

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**Kentsel Gelişim Modeli ve VIIRS-DNB Uydu Verileri İle
Dünya Astronomi Sitelerinin Işık Kirliliği Analizi ve Gelecek
Tahmini**

Zühal KURT

Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı

Mart, 2025

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZ ONAYI

**Kentsel Gelişim Modeli ve VIIRS-DNB Uydu Verileri İle
Dünya Astronomi Sitelerinin Işık Kirliliği Analizi ve Gelecek
Tahmini**

Zühal KURT

Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı

Bu Doktora Tezi ./../... Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Kabul Edilmiştir.

Jüri	: Prof. Dr. Nazım AKSAKER	(Danışman)	
	: Prof. Dr. Mehmet Akif ERDOĞAN		
	: Doç. Dr. Bekir Yiğit YILDIZ		
	: Doç. Dr. Mahmut DİNGİL		
	: Dr. Öğr. Üyesi Fızyon Sönmez ERDOĞAN		

**Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim
Dalında Hazırlanmıştır.**

Tez No:

Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR.....	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	IX
GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Işık Kirliliği Ölçü Birimleri ve Işık Kirliliği Ölçümünde Kullanılan Teknikler	3
2.2. Işık Kirliliğinin Astronomik Gözlemler Üzerindeki Olumsuz Etkisi	15
2.3. Kentsel Gelişim ve Işık Kirliliği	19
2.3.1. SLEUTH Kentsel Gelişim Modeli	19
2.3.2. SLEUTH Kentsel Gelişim Modelinin Güvenilirliği.....	21
3. MATERYAL VE METOT	25
3.1. Materyal 25	
3.1.1. Yararlanılan Veriler ve Temini	25
3.1.2. Ön İşleme	44
3.2. Metod 53	
3.2.1. SLEUTH Kentsel Gelişim Modeli	53
3.2.2. İstatistiksel Yöntemler.....	66
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	76
4.1. İstatistiksel Analizler	76
4.2. SLEUTH Modeli Çıktıları ve Kentsel Alan.....	82
4.3. Gelecekteki Yapay Işığın Tahmini	94
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	114
KAYNAKLAR	120
ÖZGEÇMİŞ	132
EKLER.....	133
Ek 1. SLEUTH modeline girdi olacak kentsel alan verisini model kareleri kapsamında kesen ön işleme adımı için çalıştırılan python kodu.....	133
Ek 2. SLEUTH modeline girdi olacak verilerin isim formatları.....	133
Ek 3. Verilerin isim formatlarını SLEUTH modeli formatına dönüştürmek için kullanılan python kodu	134
Ek 4. TİF formatındaki görüntüleri GIF formatına dönüştüren Python kodu.....	134

Ek 5. SLEUTH modelinin test, kalibrasyon ve demo adımlarından oluşan C kodlarının Cygwin arayüzüne çalıştırılması için gerekli komutlar.....	135
Ek 6. Cygwin arayüzünde modelin test, kalibrasyon ve tahmin modunu çalıştırmak için gerekli olan komutlar.....	135
Ek 7. Kaba kalibrasyon sonucu ilk 30 model karesi için “control_stats.log” dosyasından elde edilen Lesale istatistiği ve ince kalibrasyon için kullanılacak hesaplanmış katsayıların tablosu.	136
Ek 8. İnce kalibrasyon sonucu ilk 30 model karesi için “control_stats.log” dosyasından elde edilen Lesale istatistiği ve final kalibrasyonu için kullanılacak hesaplanmış katsayıların tablosu.	143
Ek 9. Final kalibrasyon sonucu ilk 30 model karesi için “control_stats.log” dosyasından elde edilen Lesale istatistiği ve öngörü aşaması için kullanılacak hesaplanmış katsayıların tablosu.	150
Ek 10. Öngörü aşaması sonucu 30 kare için “average.log” dosyasından elde edilen beş parametre ve tahmin aşaması için kullanılacak yuvarlanmış katsayıların tablosu.	153
Ek 11. SLEUTH modelinin simüle ettiği ve var olan kentsel alan görüntülerini piksel bazında okun Python kodu.....	159
Ek 12. SLEUTH modelinin simüle ettiği ve var olan kentsel alan görüntüleri için Kappa istatistiğini hesaplayan Python kodu.	160
Ek 13. SLEUTH modelinin çıktısı olan GIF görünüsünü TIF formatına dönüştüren Python kodu.	161
Ek 14. Tüm Dünyadaki profesyonel astronomi sitelerinin yıllık yapay ışık, ortalama standart sapma eğim ve R^2 değerleri.	164
Ek 15. Tüm Dünyadaki profesyonel astronomi sitelerinin yıllık yapay ışık ortalamalarından elde edilen regresyon denklemleri.....	168
Ek 16. 84 astronomi sitesinin yıllık ortalamalarından elde edilen Spearman, Pearson Kendall korelasyon katsayı değerleri, Mann-Kendall test istatistiği ve Sen’s Slope tahmin edicisinin tablosu.	173
Ek 17. 84 astronomi sitesinin yıllık ortalamalarından elde edilen Mann-Kendall test istatistiği ve Sen’s Slope tahmin edicisinin tablosu.".....	177

Kentsel Gelişim Modeli ve VIIRS-DNB Uydu Verileri İle Dünya Astronomi Sitelerinin Işık Kirliliği Analizi ve Gelecek Tahmini

Zühal KURT

Danışman: Prof. Dr. Nazım AKSAKER

Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı

ÖZ

Bu tez çalışmasının amacı, Dünya'da 1 m ve üzeri ayna çapına sahip teleskopların bulunduğu 84 profesyonel astronomi sitesinde, yakın gelecekte (2030) yapay ışık etkisini uydu ve model verileri kullanarak Uzaktan Algılama (UA) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yöntemleri ile belirlemektir. VIIRS-DNB uydu verileri ile 2012-2023 için astronomi sitelerinin güncel yapay ışık durumu değerlendirilmiş, veri seti için istatistikler (regresyon, korelasyon, Mann-Kendall ve Sen's-Slope) hesaplanmıştır. Astronomi sitelerinin ışık kirliliğinin yıllık ortalaması $19,2 \text{ mag/arcsec}^2$ olup bunların $\sim 12\%$ 'si (10 astronomi sitesi) ortalamanın altında kalmaktadır, bu astronomi sitelerinde ışık kirliliği diğerlerine göre daha fazladır. Astronomi sitelerindeki kentleşme uzak gelecek (2050) için kentsel gelişim modeli kullanılarak tespit edilmiştir. Farklı konumlardan seçilen altı astronomi sitesi için yapay ışığın zamansal değişimi, kentsel model çıktılarıyla birlikte regresyon analiziyle modellenmiş ve yakın gelecek (2030) için tahmin edilmiştir. Bu altı astronomi sitesi için kentsel gelişim modeli ve regresyon analizi ile elde edilen 2030 yılı yapay ışık haritası oluşturulduktan sonra astronomi sitelerine etki eden yapay ışığın tespiti için Ters Kare Yasası'dan faydalanılmıştır. 2023 yılı için var olan ve tahmin edilen yapay ışık etkisi karşılaştırılmış ve bu iki sonuç arasındaki bağlantıyı kuran a_t katsayısı hesaplanmıştır. a_t katsayısının 2030 yılı yüksek olasılık sınıfları piksel sayısı ve model çıktısı olan bazı parametrelerle Spearman, Pearson ve Kendal korelasyonlarının en az birinde $\pm 0,80$ ve üzeri düzeyde anlamlı bir ilişki gösterdiği bulunmuştur. Bu parametrelerle a_t katsayısı arasında lineer bir denklem elde edilip bütün astronomi siteleri için a_t katsayısı hesaplanmıştır. Altı astronomi sitesinde yapay ışık etkisinin 2023 yılına göre %13 azalma ile %110 artış arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uzaktan Algılama, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Işık Kirliliği, Kentsel Gelişim

**Light Pollution Analysis and Future Prediction of
World Astronomy Sites with Urban Development Model and
VIIRS-DNB Satellite Data**

Zühal KURT

Advisor: Prof. Dr. Nazım AKSAKER

Department of Remote Sensing and Geographic Information Systems

ABSTRACT

The aim of this thesis is to determine the artificial light effect in the near future (2030) at 84 professional astronomy sites with telescopes with a mirror diameter of 1 m and above in the world by using satellite and model data with Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) methods. With VIIRS-DNB satellite data, the current artificial light status of astronomy sites for 2012-2023 was evaluated and statistics (regression, correlation, Mann-Kendall and Sen's-Slope) were calculated for the data set. The annual average light pollution of astronomy sites is $19.2 \text{ mag/arcsec}^2$, of which ~12% (10 astronomy sites) are below the average, these astronomy sites have more light pollution than the others. The urbanisation of astronomy sites was determined using an urban development model for the distant future (2050). The temporal change of artificial light for six astronomy sites selected from different locations was modelled by regression analysis together with the urban sites model outputs and predicted for the near future (2030). After the artificial light map for the year 2030 obtained from the urban development model and regression analysis for these six astronomy sites, the Inverse Square Law was used to determine the artificial light affecting the astronomy sites. For the year 2023, the existing and predicted artificial light effect was compared and the a_t coefficient that establishes the connection between these two results was calculated. a_t coefficient was found to show a significant relationship at a level of ± 0.80 and above in at least one of the Spearman, Pearson and Kendal correlations with the number of pixels in the high probability classes of 2030 and some parameters that are model outputs. A linear equation was obtained between these parameters and a_t coefficient and a_t coefficient was calculated for all astronomy sites. It was found that the artificial light effect at the six astronomy sites varied between 13% decrease and 110% increase compared to 2023.

Keywords: Remote Sensing, Geographic Information Systems, Light Pollution, Urban Growth

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim boyunca, maddi ve manevi her türlü desteğini ve yakın ilgisini benden esirgemeyen, akademik, insani ve ahlaki açıdan örnek aldığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Nazım AKSAKER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu süre zarfında bilgilerinden yararlandığım hocalarım Sayın Doç. Dr. Sinan Kaan YERLİ ve Sayın Prof. Dr. Mehmet Akif ERDOĞAN'a teşekkür ederim.

Çalışmamda haritalandırma konusundaki yardımları için Murat BAYAZIT'a, dostluğu ile bana destek olan Heyyam TANİ ve Alişan AKTAY'a, çalışma olanakları açısından desteklerini esirgemeyen UZAYMER Merkez Müd. Prof. Dr. Aysun AKYÜZ'e ve UZAYMER ekibine teşekkürü borç bilirim. Bu süre zarfında tecrübeleri ile bana yol gösteren, her daim desteğini hissettiğim kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. Anıl AKIN TANRIÖVER ve Sayın Doç. Dr. Bekir Yiğit YILDIZ'a, Sayın Doç. Dr. Mahmut DİNGİL'e ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fizyon Sönmez ERDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Başından sonuna kadar her an yanımda olan ve varlığından güç aldığım hayattaki en iyi dostum, sevgili kardeşim Gülnihal KURT KAYALI'ya teşekkür ederim. Aldığım her kararda arkamda olan, desteklerini her zaman yanımda hissettiğim sevgili babam Bünyamin ve annem Hilmiye KURT'a ve bu süre zarfında beni destekleyen ve yanımda olan olan tüm sevdiklerime çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 123F244 nolu bir TÜBİTAK 1001 projesi olan "Işık Kirliliğinin Astronomi Sitelerine Güncel Etkisi ve Gelecek Tahmininin Küresel Çapta İncelenmesi" adlı proje tarafından desteklenmiştir.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	+1m teleskop çapına sahip profesyonel 84 astronomi sitesinin öznitelik bilgileri. ..	27
Çizelge 3.2.	Bu tez çalışmasında kullanılan verilerin öznitelik tablosu.....	43
Çizelge 3.3.	SLEUTH Modeli aşamalarında Senaryo dosyasında kullanılan Monte Carlo iterasyonu sayıları.	57
Çizelge 3.4.	Kaba kalibrasyonda senaryo dosyasında kullanılan beş büyüme katsayısı için katsayılar.	57
Çizelge 3.5.	Kaba kalibrasyon sırasında senaryo dosyasında büyüme katsayılarına verilen tahmin için en iyi uyum değerleri.	57
Çizelge 3.6.	Kaba kalibrasyon sonucu elde edilen beş büyüme parametresi ve ince kalibrasyon için kaba kuvvet kalibrasyon yöntemi ile verilen değerler.	60
Çizelge 3.7.	İnce kalibrasyon sonucu elde edilen beş büyüme parametresi ve final kalibrasyon için kaba kuvvet kalibrasyon yöntemi ile verilen değerler.	61
Çizelge 3.8.	Final kalibrasyon sonucu elde edilen beş büyüme parametresi ve öngörü aşaması için kaba kuvvet kalibrasyon yöntemi ile verilen değerler.	63
Çizelge 3.9.	Öngörü aşaması sonucu elde edilen beş büyüme parametresi ve tahmin aşaması için bir üst tam sayı değerine yuvarlanan değerler.	65
Çizelge 3.10.	Kentsel alan çıktısı olan GIF formatındaki görüntülerin renklerinin karşılık geldiği olasılık aralıkları.	71
Çizelge 4.1.	Gözlemelerine ait zamansal ışık kirliliği değerlerinden elde edilen ortalama, standart sapma, doğrusal regresyon için R^2 ve eğim istatistikleri.	76
Çizelge 4.2.	(ρ) korelasyon katsayısına göre en büyük değeri alan 10 astronomi sitesinin (ρ), (r) ve (τ) korelasyon katsayıları.	79
Çizelge 4.3.	Gözlemelerinin yıllık yapay ışık değerleri kullanılarak elde edilen Mann-Kendall test istatistiği ve Sen's Slope tahmin edicisi değerleri.	81
Çizelge 4.4.	13. Kare için 2023 yılının son ayına ait yapay ışık ve kentsel alan değerleri.	95
Çizelge 4.5.	2012-2023 için ters kare yasası kullanılarak merkezdeki piksele etki eden toplam radyans değerleri.	97
Çizelge 4.6.	44. model karesinde bulunan Pekin Astronomik Gözlemevi için 2012-2023 için ters kare yasası kullanılarak elde edilen merkezdeki piksele toplam etki.....	99
Çizelge 4.7.	20., 51., 2., ve 22. numaralı model karelerinde merkezde bulunan Lowell, ÇOMÜ-Ulupınar, Gemini ve Atina Ulusal Gözlemevi için kare yasası kullanılarak elde edilen merkezdeki piksele etki eden toplam radyans ($nW_{cm-2sr-1}$).....	102
Çizelge 4.8.	20., 51., 2., ve 22. numaralı model karelerinde merkezde bulunan Lowell, ÇOMÜ-Ulupınar, Gemini ve Atina Ulusal Gözlemevi için kare yasası kullanılarak elde edilen merkezdeki piksele etki eden toplam radyans ($nW_{cm-2sr-1}$). (devamı)	103

Çizelge 4.9. at katsayısı hesaplanan astronomi sitelerinin eğim, yükseklik, hesaplanan piksel sayısı, 2023 ve 2030 yılları içinde sahip oldukları olasılık sınıfı sayısı bilgileri	106
Çizelge 4.10. at katsayısı ile cl_size saçılım grafiğine ait denklem kullanılarak tüm model karelerine ait hesaplanan at katsayısı değerleri.	111
Çizelge 4.11. at katsayısı ile cl_size saçılım grafiğine ait denklem kullanılarak tüm model karelerine ait hesaplanan at katsayısı değerleri. (devamı).....	112



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	GSC2.3 kataloğundaki yıldızların V parlaklıklarının histogramı.....	16
Şekil 3.1.	Astronomi sitelerinin sınıflandırılmasında izlenen adımları gösteren akış şeması.....	26
Şekil 3.2.	Dünya'da ayna çapı 1 metre ve üzeri olan 84 profesyonel astronomi sitesinin haritada konumları.....	27
Şekil 3.3.	Sol panelde Suomi National Polar-Orbiting Partnership (Suomi NPP) uydusu ve sağ panelde Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) enstrümanına ait bir fotoğraf (Kaynak: nesdis.noaa.gov).	30
Şekil 3.4.	VIIRS DNB'den elde edilen 2022 yılına ait küresel yapay ışık haritası.	32
Şekil 3.5.	Dünya sayısal yükseklik modeli haritası.	36
Şekil 3.6.	Dünya eğim haritası.....	37
Şekil 3.7.	Küresel korunan alan ve küresel su alanlarından elde edilen çıkarma katmanı haritası.	38
Şekil 3.8.	Dünya'nın 2000, 2004, 2007 ve 2022 yıllarına ait nüfus haritaları.	39
Şekil 3.9.	OpenStreetMap ve gROADS veri setinden elde edilen 2010 ve 2022 yıllarına ait Dünya küresel yol haritası.....	41
Şekil 3.10.	GTPO30 DEM verisinden elde edilen hillshade haritası.....	42
Şekil 3.11.	Yöntem akış şeması.....	44
Şekil 3.12.	(3.1) Denklemi uygulanarak birimi SQM'e dönüştürülmüş 2022 yılı Aralık ayına ait yapay ışık görüntüsü.....	45
Şekil 3.13.	SLEUTH modeli için oluşturulan 200x200 piksel boyutundaki astronomi siteleri merkezli model kareleri.	46
Şekil 3.14.	2000 yılına ait "kentsel alan" ve "kentsel olmayan alan" olacak şekilde 255-0 arasında normalize edilmiş ve yeniden sınıflandırılmış kentsel alan görüntüsünün model kareleri çerçevesinde görünümü.	48
Şekil 3.15.	Sırasıyla 2000, 2007, 2014 ve 2022 yıllarına ait SLEUTH modeli için CBS ortamında hazırlanmış kentsel alan veri seti.....	49
Şekil 3.16.	SLEUTH modeli için hazırlanan ulaşım veri seti.....	50
Şekil 3.17.	SLEUTH modeli için hazırlanan eğim verisi.	51
Şekil 3.18.	SLEUTH modeli için hazırlanan çıkarma katmanı verisi.....	52
Şekil 3.19.	SLEUTH modeli için hazırlanan hillshade ve su kütlesinin tanımlandığı hillshade veri seti.....	53
Şekil 3.20.	Ters Kare Yasasının açıklanması için kullanılan bir görsel. (Kaynak: fizzics.org).....	72
Şekil 3.21.	13 numaralı model karesi için denklemde kullanılan değişkenlerin gösterimi.....	74
Şekil 4.1.	Canopus Hill Gözlemevine ait yıllara bağlı yapay ışığın değişim grafiği.	77

Şekil 4.2.	South African Astronomical Gözlemevine ait yıllara bağlı yapay ışığın değişim grafiği.	77
Şekil 4.3.	Maidanak Gözlemevine ait yıllara bağlı yapay ışığın değişim grafiği.	78
Şekil 4.5.	13 numaralı model karesinin 2022 yılına ait model tarafından simüle edilen ve var olan kentsel alan görüntüsü.	82
Şekil 4.6.	2 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.	84
Şekil 4.7.	13 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.	85
Şekil 4.8.	15 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.	86
Şekil 4.9.	32 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.	87
Şekil 4.10.	46 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.	88
Şekil 4.11.	33 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.	89
Şekil 4.12.	20 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.	90
Şekil 4.13.	22 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.	91
Şekil 4.14.	44 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.	92
Şekil 4.15.	51 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.	93
Şekil 4.16.	SLEUTH modeli çıktıları ve 2023 yılına ait yapay ışık görüntülerinin piksel bazında karşılaştırılmasına ait grafik.	94
Şekil 4.17.	13. Kare için 2023 yılının son ayına ait yapay ışık ve kentsel alan değerlerinin saçılım grafiği.	95
Şekil 4.18.	2012-2023 yılları arasında kentsel alan olasılık sınıflarına karşılık gelen yapay ışık piksel değerlerinin zaman içindeki değişimi.	96
Şekil 4.19.	13. Kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası.	97
Şekil 4.20.	13 numaralı model karesinin yıllara göre hesaplanan merkezdeki astronomi sitesine etki eden yapay ışık grafiği.	98
Şekil 4.21.	44. Kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası.	99
Şekil 4.22.	44 numaralı model karesinin yıllara göre hesaplanan merkezdeki astronomi sitesine etki eden yapay ışık grafiği.	100

Şekil 4.23.	20. ve 51. kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası.....	101
Şekil 4.24.	2. ve 22. kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası.....	102
Şekil 4.25.	20, 51. 2, ve 22 numaralı model karelerinin yıllara göre hesaplanan merkezdeki astronomi sitesine etki eden yapay ışık grafikleri.....	103
Şekil 4.26.	at katsayısı hesaplanan model karelerinin Çizelge 4.7.'de verilen parametreler ile hesaplanan Spearman, Pearson ve Kendall korelasyon katsayıları.	108
Şekil 4.27	at katsayısı ile $\pm 0,80$ ve üzeri ilişki gösteren parametrelerin saçılım grafiği, regresyon denklemleri ve determinasyon katsayılar.	110
Şekil 4.28.	Model karelerinin ait cl_size parametris kullanılarak elde edilen at katsayısı için oluşturulan histogram.	113



SİMGELER VE KISALTMALAR

Area	: Kentsel alan büyüklüğü
avg.log	: SLEUTH modelinin ortalama istatistik çıktısı dosyası
breed	: Yeni merkez oluşturma katsayısı
cl_size	: Ortalama küme boyutu
control_stats	: Kalibrasyon çıktılarının tutulduğu dosya
D	: Teleskop açıklığı (ayna çapı)
DAG	: Doğu Anadolu Gözlemevi
Diffus	: Diffusion katsayısı
ϵ (epsilon)	: Hata terimi
exe	: Executable file (Çalıştırılabilir dosya uzantısı)
GIF	: Graphics Interchange Format (Görüntü dosya biçimi)
grw pix	: Büyüme pikselleri
grw_rate	: Büyüme oranı
GSC2.3	: Guide Star Catalog, Version 2.3.2
Hex	: Hexadecimal renk kodu
Hillshade	: Yamaç gölgelendirme verisi
K	: Kategori
Limiting	: Magnitude: Limit parlaklık
Mag	: Magnitude (parlaklık birimi)
MK	: Mann-Kendall testi
Monte Carlo	: Rastgele sayılarla yapılan simülasyon yöntemi
mV	: V bandında yıldız parlaklığı
N	: Teleskop formülündeki sabit değer (6.8–8.7 aralığında)
NO	: Numara
og	: Organik büyüme
Ort	: Ortalama
OSM	: Overall Slope Metric (Genel Eğim Metrik Değeri)
OSS	: Olasılık Sınıf Sayısı
OSPS	: Olasılık Sınıfı Piksel Sayısı
Pop	: Kentsel piksel sayısı
rad	: Kentsel alanı çevreleyen dairenin yarıçapı
r	: Pearson korelasyon katsayısı
R ²	: Determinasyon katsayısı
rd_grav	: Yol çekim katsayısı
RGB	: Red, Green, Blue

ROC	: Receiver Operating Characteristic (Alıcı Çalışma Karakteristiği eğrisi)
S	: Sınıf
sdg	: Yeni yayılma merkezi büyümesi
slp_res	: Eğim direnci katsayısı
slope	: Eğim
spread	: Organik büyüme katsayısı
St	: Standart Sapma
SQM	: Sky Quality Meter (Gökyüzü Parlaklık Ölçer)
T100	: TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nde bulunan 100 cm çapındaki teleskop
tif	: Tagged Image File Format (Raster veri formatı)
THPS	: Toplam Hesaplanan Piksel Sayısı
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
%urban	: Kentsel alan yüzdesi
xmean / ymean	: Kentsel piksellerin ortalama koordinatları
Y	: Yükseklik
YPS	: Yol Piksel Sayısı

1. GİRİŞ

Bir astronomi sitesinde yer alan gözlemevi için ışık kirliliğinin güncel ve gelecekteki durumu kritik derecede önemlidir. Gözlem kalitesi bulutluluk, nem, rüzgâr hızı, aerosol gibi birçok farklı atmosferik parametreye bağlıdır. Artan şehirleşme ve tüm Dünya’da insan nüfusundaki artış, antropojenik bir kirlilik olan ışık kirliliğindeki artışı doğrudan etkilemektedir (Kyba ve ark., 2017; Sánchez de Miguel ve ark., 2021).

Yapay aydınlatmanın kullanımı insanların 24 saat boyunca aktif olması ve verimlilik göstermesine olanak tanır. Ancak gece saatlerinde dış aydınlatmadaki artışın en büyük yan etkisi "ışık kirliliği" etkisidir. Işık kirliliği, antropojenik ışık kaynakları tarafından doğal aydınlatma seviyesine yapılan müdahaleler olarak tanımlanmaktadır (Cinzano ve ark., 2000). Bir başka deyişle ışık kirliliği geceleri yapay ışığın oluşturduğu olumsuz etki veya etkilerdir (Green ve ark., 2020). Geçtiğimiz on yılda, küresel olarak ortalama artış hem aydınlatılan alanda hem de toplam parlaklıkta yılda %2 olmuştur. Bu oran, dünya nüfus artış hızının kabaca iki katı olarak hesaplanmıştır (Kyba ve ark., 2017). Işık kirliliğindeki artışın daha hızlı olmasına katkıda bulunan faktörler arasında nüfus artış hızı, ekonomik büyüme, gelir düzeyindeki artış, gayri safi yurtiçi hasıla ve göç gibi çeşitli parametreler bulunmaktadır (Henderson ve ark., 2012; Yerli ve ark., 2020; Phan, 2023).

Yapılan çalışmalarda ışık kirliliğinin insanlar, hayvanlar ve bitkiler üzerinde birçok yan etkisi tespit edilmiştir. Buna ek olarak, astronomi alanında da ışık kirliliğinin gözlem sonuçlarının kalitesini olumsuz yönde etkilediği bilinen bir gerçektir (Puschnig ve ark., 2014). Işık kirliliği, özellikle yıldızların görünürlüğünü büyük ölçüde etkiler ve kirlilik seviyesinin artmasıyla birlikte gözlemlenen kaynak sayısının logaritmik olarak azalmasına neden olur (Cinzano ve ark., 2000; Falchi ve ark., 2016). Işık kirliliğinin gözlemlere olan etkilerini gösterebilmek amacıyla TÜBİTAK Ulusal Gözlemevinde bulunan T100 teleskobu referans alınarak aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır. Bir teleskobun limit parlaklık (Limiting Magnitude) değeri $m = N + 5 \log(D)$ formülü ile verilmektedir (Garstang, 2000). Burada D teleskobun açıklığı (ayna çapı) cm ve N ise 6,8-8,7 arasında bir değer olarak verilmektedir. Teorik olan bu sınır değer atmosferden (aerosol, seeing vb.), aynaların yansıtıcılığında, kullanılan optiğin geçirgenliğinde, algılayıcıların hassasiyetinden nedeniyle azalmaktadır. Örnek olarak T100 için teorik değer 16.8-18.7 mag olmasına rağmen gerçek değer bu değerlerin oldukça altındadır. Ancak uzun pozlama tekniği sayesinde teleskopların limit parlaklıkları artmaktadır. Parlaklık azaldıkça artan kaynak sayısını göstermek amacıyla Guide Star Catalog, Version 2.3.2 (GSC2.3) (Lasker vd., 2007) yıldız kataloğundaki yıldızların (limit parlaklık=21 kadir) parlaklık (mV) histogramı Şekil 1’de sunulmuştur. Burada yıldız parlaklığının azaldıkça yıldız sayısındaki logaritmik artış açıkça görülmektedir. Ayrıca, Göz, T100 limitleri ile SQM ölçümü (standart sisteme dönüştürülmüştür) grafikte gösterilmiştir. SQM ölçüm değerinin

$mag/arcsec^2$ birimindedir. SQM ölçü değerini standart sistemine dönüştürmek için $SQM+0,31=SQMAB$ (Sánchez de Miguel ve ark., 2017) eşitliği ve $SQMV=SQMAB+0,044$ (Frei ve ark., 1995) eşitlikleri kullanılarak $SQMV=SQM+0,354$ bulunur. Burada, SQMAB, AB parlaklık sistemi değeri ve SQMV, standart parlaklık (V) değeridir. Buna göre T100 için teleskop parlaklık limiti (bkz. Şekil 1 deki yeşil dikey kesikli çizgiler) o tarihte gökyüzü parlaklık seviyesini aşmadığı görülmektedir. Ancak, ışık kirliliğinin artması, aerosol, seeing, ay zamanı gibi etkiler düşünüldüğünde gökyüzü parlaklık değerinin teleskop limitlerine ulaşacağı görülmektedir. Işık kirliliği, özellikle şehirleşme ve nüfus artışı gibi insan aktivitelerine bağlı olarak hızla artmaktadır (Kyba ve ark., 2017; Sánchez de Miguel ve ark., 2021). Şehir alanlarının 2000 ile 2100 yılları arasında 1.8 ile 5.9 kez artması beklenmektedir (Gao ve ark., 2020).

Şu anda Dünya nüfusunun %80'i artık ışık kirliliğinin etkisi altında yaşamaktadır ve günümüzde insanların üçte biri Samanyolu Galaksisini çıplak gözle görememektedir (Falchi ve ark., 2016). Astronomi alanında, ışık kirliliğinin gözlem sonuçlarının kalitesini olumsuz yönde etkilediği yaygın bir gerçektir (Puschnig ve ark., 2014). Hâlihazırda var olan veya kurulum aşamasında olan birçok astronomi sitesi, şehir alanlarının ve nüfus artışının etkisiyle ışık kirliliği tehdidi altındadır. Gelecekte, ışık kirliliğinin olumsuz etkilerinden kaçınmak için, kirlenme potansiyeli yüksek bölgeler yerine daha doğal alanlara yönelmek ve sınırlı kaynakları verimli bir şekilde kullanmak büyük önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, kirlenme tehdidi altındaki bölgelerin uzun dönemde etkilerini azaltmak amacıyla yasal düzenlemeler yapılması da önemlidir.

Yapay ışık, astronomi siteleri üzerinde halihazırda olumsuz etkiler yaratmakta olup, kentsel gelişme ve insan faaliyetlerinin artmasıyla birlikte gelecekte de varlığını sürdürecektir önemli bir çevresel sorun teşkil etmektedir. Bu tez çalışmasının temel amacı, kentleşme ile yapay ışık arasındaki ilişkiyi ortaya koyarak, astronomi sitelerinin gelecekte risk altında olup olmadığını değerlendirmektir. Bu kapsamda, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknikleri kullanılarak, tüm dünyadaki astronomi siteleri için yapay ışığın güncel durumu ortaya konmuştur. Ayrıca, uydu ve model verileri aracılığıyla kentsel gelişim çerçevesinde ışık kirliliğinin yakın gelecekte astronomi siteleri üzerindeki potansiyel etkileri tahmin edilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Işık Kirliliği Ölçü Birimleri ve Işık Kirliliği Ölçümünde Kullanılan Teknikler

Işığı ölçmek için birçok farklı ölçü ve birim kullanılır. Örneğin, ışınım bir yüzeye gelen elektromanyetik radyasyon miktarını ölçerken, radyans o yüzeyin parlaklığını ölçer. "Spektral ışınım" terimi, genellikle "Spektral Güç Dağılımı" olarak adlandırılan bir dalga boyu spektrumu için ölçülen ışınımı ifade eder (Miller ve Irvin, 2019). Spektral güç dağılımına farklı ağırlıklandırmalar uygulandığında, farklı birimler elde edilir. Örneğin, insan gözünün fotopik tepkisine (380 nm ile 780 nm) göre ağırlıklandırıldığında, ışınım ve radyans sırasıyla aydınlık ve parlaklık olarak bilinir. Aydınlık lüks (lx) cinsinden, parlaklık ise metrekare başına kandela (cd/m^2) cinsinden ölçülür. Metrekare başına watt (W/m^2) ise birim zaman ve birim alan başına enerjidir (Thimijan ve Heins, 1983). Gökbilimciler gökyüzü parlaklığı için geleneksel olarak arksaniye kare başına büyüklük birimini ($mag/arcsec^2$ veya mpass) kullanmaktadır. Astronomi ölçümleri, radyant verilere farklı geçiş bantları uygulayan, genellikle yıldızları renklerine göre sınıflandırmak için kullanılan UBVRI (Ultraviolet, Blue, Visual) Johnson-Cousins sistemi gibi filtreler kullanılarak yapılır (Bessell, 2005). Ve V bandındaki ölçümler genellikle $mag/arcsec^2$ olarak gösterilir (Bará, 2016). Diğer gökyüzü parlaltısı terimleriyle karşılaştırmayı kolaylaştırmak için astronomi odaklı çalışmalarda ölçümlerin $mag/arcsec^2$ cinsinden ifade edilmesi sonuçların tartışılması bakımından kolaylık sağlar.

Işık kirliliği, yalnızca astronomik gözlemleri değil, aynı zamanda ekosistemler, insan sağlığı ve enerji tüketimi gibi birçok alanı etkileyen küresel bir çevre sorunu olarak dikkat çekmektedir. Bu sorunun etkilerini belirleyebilmek ve zaman içindeki değişimini izleyebilmek için çeşitli ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir. Yer tabanlı ölçüm cihazlarından uydu temelli uzaktan algılama tekniklerine, taşınabilir sensörlerden görüntü analizine kadar uzanan geniş bir yöntem yelpazesi bulunmaktadır. Son yıllarda özellikle uzaktan algılama teknolojilerindeki gelişmeler, ışık kirliliğinin mekânsal ve zamansal düzeyde izlenmesinde önemli olanaklar sunmuştur. Bu bölümde, ışık kirliliğinin ölçümüne yönelik kullanılan yöntemler, kullanılan cihazlar, uydu sistemleri ve örnek araştırmalar kapsamlı şekilde ele alınmaktadır.

Yer tabanlı ölçüm yöntemleri, yüksek yersel ve zamansal çözünürlük sunmaları açısından avantajlıdır; ancak bu teknikler genellikle dar alanlarla sınırlı kalmaktadır. Buna karşılık, uydu tabanlı ölçümler daha geniş alanları kapsayarak küresel ölçekte veri sunabilmektedir. Ancak bu yöntemin yersel çözünürlüğü, yer tabanlı tekniklere kıyasla daha düşüktür. Bu nedenle bazı araştırmacılar, ışık kirliliğinin havadan (örneğin uçak, İnsansız Hava Aracı (İHA), drone ya da hava balonu gibi araçlarla) gözlemlenmesini, yer tabanlı ve uydu tabanlı gözlemler arasındaki boşluğu doldurabilecek bir ara çözüm olarak değerlendirmektedir.

Kuechly ve ark (2012) Cessna T207A uçağına monte edilmiş bir CCD kamera kullanarak Almanya'nın Berlin şehrinin gece vakti yüksek çözünürlüklü (1m x 1m) mozaik görüntüsünü oluşturmuştur. Kullanılan kamera, üretici tarafından tanımlanan parlaklık değerlerini ve kırmızı,

yeşil, mavi ve opak ölçümleri yakalamak için bir filtre tekerleği ile donatılmıştır. Veri seti, kentsel arazi kullanım verilerine dayalı olarak şehirdeki başlıca ışık kirliliği kaynaklarını belirlemek için mekânsal olarak analiz edilmiştir. Farklı büyüklükteki arazi kullanım sınıflarından kaynaklanan ışık emisyonunun doğrudan karşılaştırılmasına olanak tanıyan alandan bağımsız bir 'parlaklık faktörü' tanıtılmış ve her sınıf için ortalama parlaklığın üzerinde değerlere sahip alan yüzdesi hesaplanmıştır. Bu yöntem kullanılarak, diğer arazi kullanım sınıflarının çok daha yüksek ortalama parlaklığa sahip olmasına rağmen, caddelerle ilişkili aydınlatmanın zenit yönelimli ışık kirliliğinin baskın kaynağı olduğu bulunmuştur.

White (2018) East Lansing, Michigan, ABD’de yapay gece ışığının yaygınlığını ölçmek için havadan bir yaklaşım izleyerek bir Cessna 172'nin dikmesine monte edilmiş bir Go-Pro Hero-3 cihazı kullanmıştır. Video görüntülerinden tek kareler izole edilmiş ve yüksek çözünürlükte (1m x 1m) 0'dan (en karanlık) 1'e (en parlak) ölçeklendirilmiştir. Kentsel gece ışıklarını ölçmek için havadan bir yaklaşım kullanan ilk çalışmalardan biri olan bu çalışmada 32 farklı alanda habitat tür zenginliği ile ışık kirliliğini ilişkilendirmiştir.

Tabaka (2020) İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanılarak yapılan pilot saha aydınlık ölçümlerinin metodolojisini ve sonuçlarını sunmuştur. Çalışmanın temel amacı, elde edilen ölçüm verilerine dayanarak üst yarımkürede (gökyüzüne doğru) yayılan ışık akısını ölçmektir. Test amacıyla, tepesine her tür armatürün monte edilebileceği, yüksekliği ayarlanabilir bir mobil park feneri inşa edilmiş, pilot ölçümlerde, iki gerçek opal küre tipi armatür dikkate alınmıştır. Fener, büyük bir şehir kümelenmesinden uzakta bulunan açık bir alana yerleştirilmiştir. Kullanılmayan ışık akısını belirlemek için, gerekli ölçüm ekipmanı bir İHA'ya yerleştirilerek aydınlık ölçülmüş ve ölçümler, fenerin üzerine kurulduğu zemindeki aydınlığın kaydedilmesiyle desteklenmiştir. Bulgularda İHA'ların aydınlatmanın ışık kirliliği etkisi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesinde başarıyla kullanılabileceğini belirtmiştir.

Bolliger ve ark (2020) sokak lambalarının trafiğe bağlı olarak karartılmasının gece böcek bolluğu ve yarasa aktivitesi üzerindeki etkisini tam ışıkla karşılaştırmalı olarak ölçmek için Uncrewed Aerial Vehicle (UAV) (vidasız hava aracı veya drone olarak da bilinir) bir hava cihazı kullanmıştır. Çalışmada 50 ila 70 m yükseklikte bir Sony NEX-7 kamera kullanılmış ve doyumlukla ilgili sorunlara dikkat çekilmiştir. Toplamda 16 karanlık, 16 tam aydınlık olmak üzere 32 gün ölçüm yapmıştır. Sokak ışıklarını kısma teknolojisinin yapay ışığın gece canlılar üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmaya katkıda bulunabileceği, ancak bu önlemin ışığa duyarlı ve tehdit altındaki türleri desteklemek için yeterince etkili olmayabileceği sonucuna varılmıştır.

Fiorentin ve ark (2018) bir spektrometre ile üç kamera kullanan "MINLU" adlı yukarı doğru bir ışık yakalama cihazı tasarlamıştır. Bu cihaz dronlar ve hava balonları ile nispeten düşük irtifalarda ışık izleme yapmak için yeni bir teknik olarak tanımlanmıştır. MINLU, 200 m yükseklikte yaklaşık 0,2 m uzamsal çözünürlüğe sahiptir. Cihaz sınırlı bir alan üzerinde çalışarak, uzamsal çözünürlükte

metrenin onda biri kadar ölçüm yapabilir ve bağlı balonlar kullanılırsa, parlaklığın zaman içindeki gelişimi saatler boyunca izlenebilmektedir.

Yer tabanlı ölçüm tekniklerinden biri olarak dikkat çeken bir diğer yöntem ise TESS-W cihazlarının kullanımıdır. Bu cihazlar, uzun dalga boylu spektral yanıtı genişletmek için bir dikroik filtreyle donatılmış ve SQM ile aynı fotodiyot sistemine sahiptir. TESS-W cihazları, WiFi aracılığıyla bir yönlendiriciye bağlanarak nesnelerin interneti protokolleri üzerinden parlaklık değerlerini otomatik olarak bir veri havuzuna iletebilmektedir. Bu özellikleri sayesinde, ışık kirliliği verilerinin sürekli ve kullanıcı müdahalesine gerek kalmadan toplanmasını sağlamaktadır.

Zamorano ve ark (2016) bant geçişi, SQM'e göre kırmızıya doğru genişletilmiş TESS-W cihazı ile, Gece gökyüzü ışık kirliliğini ölçmeyi hedeflemiştir. Avrupa Birliği tarafından finanse edilen bu çalışma Avrupa'da karanlık gökyüzünü teşvik etmek için kolektif bir farkındalık platformu olan STARS4ALL projesi kapsamında geliştirilmiştir. Donanım ve yazılım aşaması sorunsuz bir şekilde ilerleyen bu proje geliştirilmeye devam etmektedir. Vatandaşların alıp kolayca kurabilecekleri bu cihazla mevcut profesyonel ölçüm ağlarını daha da genişletmeyi hedeflemektedir.

Barentine ve ark (2020) tarafından ABD'nin Arizona eyaletindeki Tucson Şehri tarafından sahip olunan ve işletilen yaklaşık 20.000 karayolu armatürünü içeren, bugüne kadarki en büyük belediye aydınlatma karartma deneylerinden birinin sonuçları rapor edilmiştir. TESS-W cihazı, üç SQM-L metre, bir SQM-LU-DL metre ve balık gözü lensli bir DSLR kamera ile yapılan bu çalışmada zenit gökyüzü parlaklığının, sokak aydınlatma sisteminin çıkışının tam güç çekiminin % 90'ından yerel gece yarısından sonra %30'a düşürüldüğü gecelerde şehir merkezine yakın % $(-5,4 \pm 0,9)$ ve bitişik bir banliyö konumunda % $(-3,6 \pm 0,9)$ oranında azaldığını belirlemiştir. Cihazlar arasında yaklaşık % 10'luk bir karşılaştırmalı doğruluk elde edilmiştir ($\pm 0,1 \text{ mag/arcsec}^2$).

Bará, Tapia ve ark (2019) TESS-W ve SQM-LU-DL cihazları sonuçları için genel bir optik model geliştirmiştir. Yaygın olarak kullanılan iki gece gökyüzü parlaklık sensörünün ışınlım-frekans dönüşümüne dayalı olarak sağladığı okumaların mutlak radyometrik kalibrasyonunu sunmuştur. Farklı ölçüm araçları için aynı birimlerin kullanılmasının kolayca çoğaltılamayan veri kümeleriyle sonuçlanabileceği için tavsiye edilmediğine dikkat çekmişlerdir.

Ölçüm araçları yalnızca sabit sistemlerle sınırlı değildir; kullanıcıların taşınabilir olarak kullanabileceği cihazlar da mevcuttur. Bunlardan biri, “aydınlık ölçer” olarak bilinen el tipi cihazlardır. Pankromatik özellikte olan bu cihazlar, insan fotopik gözünün tepkisini taklit edecek şekilde tasarlanmıştır (Coaton ve Marsden, 1997). Ucuz, taşınabilir ve kolay kullanılabilir olmalarına rağmen, bu cihazlar yalnızca tek bir veri noktası sağladığından veri toplama süreci zaman alıcıdır. Ayrıca, aydınlık değeri ışık kaynağından olan uzaklığın karesi ile ters orantılı olduğundan, doğru ölçüm elde etmek için cihazın konumu oldukça kritiktir. Bunun yanı sıra, düşük ışık seviyelerinde hassasiyet problemi yaşanabilmektedir (Hänel ve ark., 2018).

Papalambrou ve Doulos (2019) ışık kirliliği hakkındaki temel gerçekleri (nedenleri, etkileri ve çözümleri) analiz etmekte ve ışık kirliliğinden korunan alanların planlanması için yöntemler, parametreler ve özel gereksinimleri parlaklık ölçer kullanarak incelemiştir. Bu karanlık gökyüzü parkı planlama metodolojisi, Natura 2000 koruma alanı olarak önemi ve Yunanistan'ın en popüler astronomik gözlem alanı olması nedeniyle seçilen Parnon Dağı'nda bir vaka çalışması olarak uygulanmıştır. Bir karanlık gökyüzü parkının planlanması aşamasında belirli bir alana ilişkin gerçeklerin eksiksiz bir şekilde incelenmesini gerektirdiğini vurgulayan yazarlar mevcut aydınlatma tesisatları, armatür ve lamba tipleri kaydedilerek ve konumları bir haritaya işlenerek ayrıntılı olarak incelemiştir.

Liu ve ark (2018) Dalian kentindeki gökyüzü ölçümlerini sunmakta ve gökyüzünün parlaklık ve renk sıcaklığı dağılımındaki değişiklikleri incelemiştir. Gündüzden geceye geçişte gökyüzünün renk sıcaklığının yaklaşık 2000 K-3000 K azaldığı ve ışık spektrumunun nispeten düzgün bir dağılımdan belirgin bir tepe noktasına sahip bir dağılıma dönüştüğünü SQM cihazı ile tespit edilmiştir. Ayrıca, zenit parlaklığı $0,01 \text{ cd/m}^2$ 'ye kadar çıktığını ki bunun da standart karanlık gökyüzü parlaklığının 50 katından fazla olması anlamına geldiğine dikkat çekmiştir.

Tüm bu yöntemlerin yanı sıra, hem profesyonel araştırmacılar hem de amatör astronomlar arasında en yaygın kullanılan teknik, Gökyüzü Kalite Ölçer (SQM) cihazlarıdır. Bu cihazlar sayesinde, ışık kirliliği seviyelerini ölçmek ve haritalandırmak için hızlı, güvenilir ve yaygın bir çözüm sunulmaktadır.

SQM ölçümü, ışık yönünden kirli bölgelerden birinci sınıf astronomik gözlemevlerine kadar gökyüzünün parlaklığının gelişimini izlemek için kullanılan en yaygın cihaz haline gelmiştir. Bu ölçüm tekniğinin bu kadar popüler olmasındaki en büyük etken maliyetinin ($\sim 150-200\$$) oldukça düşük olmasıdır. Spektral hassasiyet bakımından uydu verilerine göre SQM kısa dalga boylarına daha duyarlıdır (Sánchez de Miguel ve ark., 2017). Fakat bu cihazı büyük alanların ışık kirliliği ölçümünü yapmak için kullanmak neredeyse olanaksızdır. SQM cihazının yaygın kullanımındaki bir diğer etken de astronomik birimde ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$) ölçüm yapmasıdır. Bazı araştırmacılara göre V bandı ile SQM biriminin arasında spektral bir uyumsuzluk ortaya konulmuştur. Bu uyumsuzluğa atıfta bulunmak için sonuçlarına $\text{mag}_{SQM}/\text{arcsec}^2$ yani SQM alt simgesini eklemektedirler (Bará, 2016).

Bu cihaz görüş alanı ve niteliklerine göre çeşitli farklılıklar göstermektedir. Orijinal SQM cihazı elde taşınır ve geniş bir görüş alanına sahiptir ($\sim 84^\circ$ Yarım Maksimumda Tam Genişlik (Full Width at Half Maximum) (FWHM)) (Unihedron, 2022a). Daha sonra, bitişik ışık kaynaklarının ($\sim 20^\circ$ FWHM) etkilerini en aza indirmek için dar bir görüş alanına sahip olan dar alanlı bir el cihazı olan SQM-L (Espey ve McCauley, 2014), bir ethernet bağlantısı üzerinden bilgisayara bağlanabilen SQM-LE (Nievas ve Zamorano, 2014), bir USB portu üzerinden indirme yapabilen SQM-LU, RS232 konnektörü üzerinden indirme yapan SQM-LR (Unihedron, 2022b), SQM-LU'dan daha

gelişmiş bir dahili veri depolama alanına sahip olan SQM-LU-DL (Jechow ve ark., 2015) ve son olarak irtifa ve azimut vektör ölçümlerini üreten bir model olan SQM-LU-DL-V (Unihedron, 2022c) gibi cihaza ait birçok model geliştirilmiştir.

SQM geniş bir spektral bant üzerinde çalışır ve spektral tepkisi gökyüzünün spektrumu ile karmaşık bir şekilde etkileşime girer. Bu nedenle, veriler farklı yapay ışık kaynaklarına sahip bölgelerde kaydedildiğinde optik sinyallerin yorumlanması zordur (Sánchez de Miguel ve ark., 2017). Başboş, kaçak ışıktan kaynaklanan hataları azaltmak için birçok kez yapılmış hassas ölçüm gerektiren bu yöntem yine de lokal ölçekli çalışmalarda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Hänel ve ark., 2018; Longcore ve ark., 2020).

Chris Baddiley (2021), F.C. Mathon Gözlemevinde gökyüzü parlaklığını SQM cihazı kullanarak her türlü hava koşulunda dakika mertebesinde aralıklarla sürekli olarak ölçmüştür. Gözlemevi yakınında bulunan Malvern Hills Conservators, Herefordshire'da devam eden mavi zengin LED yeniden aydınlatma sisteminin gözlemevi ufkundaki ışık kirliliği etkisini modelleyerek SQM fotometrisinin gökyüzü parlaklığının hava durumuna çok bağlı olduğunu ve kameranın turuncu-pembeden mavi-zengin LED'lere doğru renk değişimleri gösterdiğini ortaya koymuştur. Bunun yanında Birleşik Krallık kırsalında Samanyolu en karanlık gecelerde tepe noktasında arka planla sadece %20 kontrast oluşturduğunu ($21,10 \text{ mag/arcsec}^2$) ve Avrupa genelinde yol ışık seviyesinin iki katına çıkması durumunda Samanyolu'nu görünmez hale geleceğine dikkat çekmiştir.

Herdiwijaya ve ark (2020) insan faaliyetlerinden kaynaklanan ışık kirliliğinin seviyesini belirlemek için, 2011'den 2018'e kadar yedi yıl boyunca Endonezya'daki Bosscha Gözlemevi'nde zenit noktasına doğrultulmuş taşınabilir bir fotometre kullanarak gökyüzü parlaklığı ölçümleri yapmıştır. 1692 gecelik kayıttan, aysız gecelerde ortalama parlaklığın $19,70 \pm 0,84$ ve $19,01 \pm 0,88$ astronomik büyüklüklere ulaştığını, ortanca değerlerin ise gündüz ve gece dönemleri için sırasıyla 19,73 mpass ve 19,03 mpass olduğunu bulmuştur. En karanlık gökyüzü, yaz mevsiminin zirvesinde, en düşük yıllık sıcaklık, yağış ve bağıl neme karşılık gelen Temmuz ayında meydana geldiğini ve gözlemevi çevresindeki şehirlerin (Bandung ve Lembang) korumasız ışık kaynakları nedeniyle bölgedeki ışık kirliliğine açıkça güçlü katkılarda bulunduğunu eklemiştir.

Tahar ve ark (2017) Malezya'nın Langkawi Adası'ndaki gökyüzü parlaklığı büyüklüğünün uzamsal bir modelini sunmuştur. Unihedron tarafından üretilen iki tip SQM kullanarak seçilen GPS koordinatları ile parlaklık verileri ve işaretlenmiş veriler, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) kullanılarak enterpole edilmiş ve analiz edilmiş, böylece Langkawi Adası'ndaki karanlık ve aydınlık gökyüzü alanlarını açıkça gösteren mekânsal bir gökyüzü parlaklığı modeli üretilmiştir. V-bandındaki $21,45 \text{ mag/arcsec}^2$ 'lik gökyüzü parlaklığı, tüm adadaki $2,8 \cdot 10^{-4} \text{ cdm}^{-2}$ 'ye eşdeğer gökyüzü parlaklığının ortalaması olarak, adanın genel olarak hala nispeten karanlık olduğu belirtilmiştir.

Ngadiman ve ark (2020) Gökyüzü Kalitesi Ölçer (SQM-LU-DL) kullanarak Kundasang'da gece gökyüzü parlaklığını ölçmüştür. Sabit bir konumda ve zenit yönüne doğru yapılan ölçümler her gün yaklaşık olarak akşam 7 ile sabah 5.30 arasında yapılmıştır. En iyi gece gökyüzü parlaklığı

değerini $21,34 \pm 0,7 \text{ mag/arcsec}^2$ ile 5 Ocak 2019'da ölçmüşlerdir. Gökyüzü parlaklığının ön ortalama değeri $20,71 \pm 0,2 \text{ mag/arcsec}^2$ 'dir. Malezya'daki ve diğer yerlerdeki astronomi alanlarının aynı durumu için yapılan önceki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, Kundasang, Sabah'ın astronomik gözlem için uygun bir yer olduğunu öne sürmüştür.

Karpińska ve ark (2022) tarafından Polonya'nın Toruń kentinde 2017 yılından 2022 yılına gece gökyüzündeki ışık kirliliği üzerine bir araştırma yürütülmüştür. Başlangıçta ölçümler, lensli (SQM-L) el tipi gökyüzü kalitesi ölçer fotometre (Unihedron, Kanada) kullanılarak 24 noktadan oluşan bir ağ dâhilinde gerçekleştirilmiştir. Farklı kullanıcı gruplarının gelişen beklentilerini ve Akıllı Şehirler konseptinde gözlemlenen eğilimleri, özellikle de Nesnelerin İnterneti cihazları arasındaki iletişimle ilgili olanları karşılamak için veri iletimi için LoRaWAN seçilmiştir. İlk aşamada otomatik, taşınabilir ve uygun maliyetli bir cihazın prototipi oluşturulup cihaz operasyonel koşullar altında aylar süren saha testlerine tabi tutulmuştur. Cihaz, kullanıma hazır elektronik bileşenler ve dış mekânda kullanım gereksinimlerini karşılayan bir muhafaza kullanılarak inşa edilmiştir. Bir sonraki aşamada elde edilen sonuçları profesyonel SQM cihazları kullanılarak yapılan ölçümlerle eş zamanlı olarak karşılaştırarak cihaz kalibre edilmiştir.

Deverchère ve ark (2022) gökyüzü parlaklığının doğrudan sayısal ölçümlerine dayanan geleneksel göstergelerin, kalibrasyon yanlılığı ve tekrarlanabilirlik eksikliği nedeniyle önemli sınırlamalara maruz kaldığını belirtmiştir. SQM ölçümleri çoğunlukla açık gökyüzü dönemlerinde gerçekleştirildiğini ve belirli bir sahada oldukça homojen olmayan ışık kirliliği seviyeleri üretebilen çok çeşitli meteorolojik koşulları yansıtmadığını öne sürmüşlerdir. Çeşitli meteorolojik koşullar altında istatistiksel olarak anlamlı sayıda bireysel gece gökyüzü parlaklık ölçümlerinden türetilmiş herhangi bir mutlak fotometre kalibrasyonundan bağımsız bir gösterge önermişlerdir.

Puschnig ve ark (2023) Stockholm, Berlin ve Viyana gibi üç büyük Avrupa metropolü de dahil olmak üzere kırsal, orta ve kentsel bölgeleri kapsayan 26 noktada gözlemlenen ışık kirliliğinin uzun vadeli (4-10 yıl) eğilimlerini elde etmiştir. Analiz (i) gökyüzü kalitesi ölçerlerle (SQM'ler) elde edilen gece gökyüzü parlaklığı (NSB) ölçümlerine ve (ii) zengin bir atmosferik veri ürünleri setine dayanmaktadır. Puschnig ve ark (2021) tarafından üretilen alacakaranlık yönteminin güncellenmiş bir versiyonu kullanılarak SQM 'yaşlanma' etkisini düzeltip SQM veri azaltma rutini uygulanmıştır. Kırsaldaki 11 sahada ışık kirliliğindeki ortalama artışı yılda % 1,7 olarak bulunmuş, dokuz kentsel sahada yılda % 1,8'lik bir artış ölçerken, kalan altı ara saha için yılda ortalama % 3,7'lik bir artış değeri gözlenmiştir. Bu rakamlar 41, 39 ve 19 yıllık ikiye katlanma sürelerine karşılık gelmekte olup çalışmada kullanılan yöntemin yılda $\pm 1,5$ 'ten daha sığ/daha dik eğilim eğimlerini tespit edebildiği öne sürmektedir.

Biggs ve ark (2022) Batı Avustralya'nın Perth şehrinde oluşan ışık kirliliğini incelemek amacıyla, şehir genelinde gece gökyüzü parlaklığını ölçmek için SQM cihazı kullanmıştır. Çalışma şehrin 2400 km²'lik alanı boyunca gece gökyüzü parlaklığının kontur haritasının oluşturulmasını kolaylaştırırken bu kadar büyük bir alanda SQM kullanılarak üretilen ilk harita olma özelliğini de

taşımaktadır. Çalışmanın en önemli bulgularından biri, arazi kullanımının gece gökyüzü parlaklığı üzerindeki etkisidir. Gece gökyüzü parlaklığı haritasını Perth'in uygun şekilde işlenmiş Landsat uydu görüntüsü üzerine bindirilerek, ticari ve/veya hafif sanayi alanlarının yakınındaki yerlerin daha parlak bir gece gökyüzüne sahip olduğunu, tarım için kullanılan veya yüksek bitki örtüsüne sahip yerlerin ise çevredeki alanlardan daha soluk bir gece gökyüzüne sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Plauchu-Fray (2017) México'daki Observatorio Astronómico Nacional on the Sierra San Pedro Mártir'de (OAN-SPM) 2013-2016 yılları arasında 18 gecede toplanan optik UBVRI zenit gece gökyüzü parlaklığı ölçümlerini ve 2014-2016 yılları arasında 20 ay boyunca günlük olarak elde edilen SQM ölçümlerini gerçekleştirmiştir. UBVRI verileri 0,84 m ve 2,12 m teleskoplarla elde edilen CCD görüntülerine dayanırken, SQM verileri yüksek hassasiyetli, düşük maliyetli bir fotometre ile elde edilmiştir. Tüm dönem boyunca zenitteki tipik aysız gece gökyüzü parlaklığının ortalaması $U= 22,68$, $B= 23,10$, $V= 21,84$, $R= 21,04$, $I= 19,36$ ve zodyak ışığı için düzeltildikten sonra $SQM= 21,88 \text{ mag/arcsec}^2$ 'dir. SQM ile ölçülen gece gökyüzü parlaklığında mevsimsel bir değişiklik olmadığını OAN-SPM'de bulunan tipik gece gökyüzü parlaklığı değerlerinin, güneş döngüsünün benzer bir aşamasında diğer astronomik karanlık alanlar için bildirilenlere benzer olduğunu ileri sürmektedir. Gözlemler süresince azalan güneş aktivitesi ile birlikte gece gökyüzü parlaklığında da bir azalma eğilimi tespit etmiş bu eğilim neticesinde mevcut güneş döngüsü nedeniyle 2014'ün başından bu yana gökyüzünün $\Delta U= 0,7$, $\Delta V= 0,5$, $\Delta R= 0,3$, mag/arcsec^2 daha karanlık hale geldiğini ortaya koymuştur.

Zhang ve ark (2015) Xinglong Gözlemevi'ndeki gözlem koşullarının 2007-2014 yılları arasındaki meteoroloji, görüş ve gökyüzü parlaklığı gözlemlerine dayalı olarak karakterizasyonu sunmuştur. Meteorolojik veriler, Çin Meteoroloji İdaresi tarafından kalibre edilen ticari bir Otomatik Hava İstasyonu'ndan (AWS) toplanmış olup gökyüzü parlaklığı ölçümleri Gökyüzü Kalitesi Ölçer (SQM) ve fotometrik gözlemlerden elde edilmiştir. Analizler sonucunda zenitteki gökyüzü parlaklığının $21.1 \text{ mag/arcsec}^2$ civarında olduğunu ve zenit açısı büyüdükçe daha parlak hale geldiğini göstermiştir. Gökyüzü parlaklığının, çevre şehirler Pekin, Tangshan ve Chengde'nin ışık kirliliği nedeniyle arttığı, Pekin yönüne doğru, 30° yükseklikteki önemli etki, gökyüzü parlaklığını $20,0 \text{ mag/arcsec}^2$ 'ye kadar da artabileceği sonucuna varılmıştır.

Cinzano (2001) gece gökyüzü kalitesini ölçmeyi kolaylaştıran SQM cihazı ile, bu cihazla yapılan ölçümlerin geniş bir alana yayılmasını bekleyerek, cihazı test etmiş, sentetik fotometri ve laboratuvar ölçümleri ile SQM ile gece gökyüzü parlaklığı arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. Fotometrik sistem ve ışık kirliliği çalışmalarında kullanılan ana sistemlerle bağlantılı B ve V bantlarına, tipik spektrumlar ve spesifik filtreler eklendiğinde ortaya çıkan spektral uyumsuzluk düzeltme faktörlerini detaylı bir biçimde incelemiştir.

Priyatikanto ve ark (2019) Büyük Bandung bölgesi üzerinde SQM-LU-DL cihazı kullanarak gökyüzü parlaklığını ölçmüş ve bölgenin astro-turizm potansiyelini tartışmaya sunmuştur. Ölçüm sonuçları gökyüzü parlaklığı değerleri şehir merkezinde $\sim 17 \text{ mpsas}$ ile şehir merkezine 30 km'den

daha uzak olan Haurgombong, Sumedang'da ~20 mpsas arasında değişmekte olup Bandung, Lembang ve Sumedang üzerindeki gökyüzü parlaklığının aylarca süren sabit ölçümleri ile uyumluluk göstermektedir.

Işık kirliliği ölçümünde son yıllarda gelişen teknolojilerle birlikte görüntü tabanlı yöntemler de öne çıkmaktadır. Bu yöntemlerden biri, DSLR kameraların kullanımıdır. DSLR kameralar gece gökyüzünü görüntülemek için genellikle bir balıkgözü lens ile birleştirilir. Bu ölçüm sistemi, lens görüntünün kenarlarındaki parlaklığı azaltabileceğinden, vinyet düzeltmesi de dahil olmak üzere özel kalibrasyon prosedürleri gerektirir. Bununla birlikte, RGB kanalları çok spektral renk bilgisi vermek için birleştigiğinden üretilen veri miktarı önemlidir. Yeşil kanal, insan fotopik eğrisine benzerliği nedeniyle parlaklığı kaydetmek için kullanılabilir (Hänel ve ark., 2018).

Jechow ve ark (2019) tam katı açıyı kapsayan dikey düzlem çok spektrumlu (RGB) görüntüler elde etmek için balık gözü lensli ticari bir dijital kamera kullanarak parlaklık ve ilişkili renk sıcaklığı haritalarını işlemek ve aydınlığı üretmek için teknik ve pratik prosedürü ve yazılımı ortaya koymuştur.

1970'lerden bu yana Dünya'nın uzaydan çekilen gece uydu görüntüleri yapay ışığın boyutlarını çarpıcı bir şekilde gözler önüne sermektedir (Bennie ve ark., 2014). Büyük alanlardaki yapay ışığın uydu görüntüleri kullanılarak algılanması maliyet ve enerji tasarrufu açısından çok büyük fayda sağlar. Geleneksel saha ölçümleri oldukça maliyetli ve fazla enerji isteyen ölçümlerdir (Levin ve ark., 2020). En önemlisi yerinde ölçümlerin en büyük sıkıntısı geçmiş veriler ile karşılaştırılmasında yaşanan zorluklardır. Bununla birlikte, yeryüzü gözlem teknolojisini kullanan uzaktan algılama, geniş kapsam, yüksek frekans ve uzun zaman serisi avantajlarına sahiptir. Özellikle gece ışığına odaklanan uzaktan algılama teknolojisi, yapay ışığın bölgesel ve küresel uydu görüntülerini hızlı bir şekilde oluşturabilir (Elvidge ve ark., 2007).

Işık kirliliği ölçümü için uydu verileri bulutsuz gecelerde görüntü toplar ve geçiş zamanına bağlı olarak belirli zaman aralıklarında anlık aydınlatma görüntüsünü sunar (Kyba ve ark., 2015). Geçmişte, dünya çapında ALAN araştırma verilerinin iki önemli ücretsiz kaynağı Savunma Meteorolojik Uydu Programı/Operasyonel Linescan Sistemi (DMSP/OLS) ve Suomi Ulusal Kutup Yörüngeli Ortaklığı Görünür Kızılötesi Görüntüleme Radyometre Paketi'nin (VIIRS/DNB) Gündüz Gece Bandıdır. EROS-B (Levin ve ark., 2014), LuoJia-1 (Jiang ve ark., 2018) ve Jilin-1-03B (Zheng ve ark., 2018) gibi diğer uydulardan gelen veriler de mevcuttur.

DMSP tarafından fırlatılan Operation Linescan System (OLS) 1970'lerin sonunda devreye alınmış ve hava durumunu izlemek üzere tasarlanmıştır. Orijinal araç, ABD Hava Kuvvetleri Savunma Meteorolojik Uydu Programı (DMSP) tarafından uçurulan operasyonel çizgi tarama sistemidir (OLS). OLS'nin en eski versiyonu 1970'lerin başında veri toplamaya başlamıştır. Dijital bir OLS veri arşivi 1992 yılında Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) Ulusal Jeofizik Veri Merkezi'nde (NGDC) kurulmuştur (Elvidge ve ark., 2013).

Levin ve ark (2014) yapay ışıklardan kaynaklanan ışık kirliliğinin, astronomi için gece gökyüzünü kapattığını ve biyolojik çeşitliliğin yanı sıra insan sağlığı üzerinde de olumsuz etkilere neden olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada gece ışıklarıyla ilgili uzaktan algılama çalışmaları çoğunlukla DMSP-OLS gibi kaba uzamsal çözünürlüklü sensörlerle sınırlı kaldığına değinmiştir. Levin ve ark. (2014) ticari bir uydudan elde edilen, gece ışıklarının uzaydan yüksek mekansal çözünürlükte haritalanması için yeni bir kaynak sunmuştur. İsrail EROS-B uydusunu Avustralya'nın Brisbane kentinde iki gece ışık görüntüsünü (1m x 1m) elde etmekle görevlendirilmiş olan bu ekip görüntülerin radyometrik kalitesini ve içeriğini arazi örtüsü ve arazi kullanımına göre analiz etmiştir. EROS-B tarafından görüntülenen gece ışıklarının mekansal dağılımı, EROS-B'nin düşük ışık seviyelerine karşı hassas olmamasına rağmen, havadan bir kamera ile elde edilen gece görüntülerine karşılık gelmiştir. İstatistiksel yerel alan düzeyinde arazi örtüsü ve arazi kullanımı verilerini kullanarak, gece ışıklarındaki değişkenliğin %89'unu istatistiksel olarak açıklanmıştır. Arteriyel yollar ile ticari ve hizmet alanlarının en parlak arazi kullanım türlerinden bazıları olduğu tespit edilirken EROS-B görüntülerinin gece ışıklarının ince mekansal çözünürlüklü görüntülerini sağladığını ve dünya çapındaki şehirlerde ışık kirliliğini incelemek için yeni bir yol açtığını belirtmişlerdir.

Cinzano (2000), Garstang (1984) tarafından tanıtılan ve geliştirilen gökyüzü parlaklığı modelleme tekniğini, ABD DMSP-OLS ile gerçekleştirilen yukarı doğru yapay ışık akısının yüksek çözünürlüklü uydu ölçümlerine ve GTOPO30 dijital yükseklik verilerine uygulayarak, bir dizi atmosferik aerosol içeriği için birincil astronomik fotometrik bantlarda belirli bir bölgedeki gece gökyüzünün parlaklık dağılımını tahmin etmiştir. Küresel verilere dayanan ve yükseklik, Dünya eğriliği ve dağ perdelenmesini hesaba katan bu yöntem, dünyadaki herhangi bir yer için tüm gökyüzündeki gökyüzü parıltısı koşullarının değerlendirilmesine, evriminin değerlendirilmesine, çevredeki bölgedeki bireysel kaynakların katkısının ayrıştırılmasına ve katkıda bulunan ana kaynakların belirlenmesine olanak tanımıştır. Gökyüzü parlaklığı, çıplak gözle yıldız görünürlüğü ve teleskop sınırlayıcı büyüklüğü, eksenleri gökyüzündeki konum ve atmosferik berraklık olan üç boyutlu diziler olarak üretilmiş olup elde ettikleri sonuçlar mevcut ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

Ścieżor (2020), bulutluluk seviyesinin yanı sıra bulutların cinsi ve tabanının yüksekliğinin ışık kirliliğinin artması üzerindeki etkisini DMSP_OLS uydu verileri ve SQM-LE cihazı kullanarak analiz etmiştir. Farklı seviyelerde ışık kirliliği olan yerlerde bulutluluğun gece gökyüzünün parlaklığı üzerindeki etkisi araştırılmış, meteorolojik unsurların ölçümleri, bulut cinsi değerlendirmeleri ile birlikte kullanılmıştır. Bulutluluk ile gece gökyüzünün parlaklığı arasında doğrusal bir korelasyon bulunmuştur. Gece gökyüzü parlaklığının çoğu en düşük irtifadaki bulut cinslerine saçılan ışıktan gelirken, en az katkı yüksek seviyeli bulutlara saçılan ışıktan gelmekte olduğunu ayrıca donma sıcaklıklarında, bazı bulut cinslerinin cinslerinin seviyesinin altında aerosol tabakası oluştuğu tespit edilmiştir. Azalan sıcaklıkla birlikte kalınlaşan bu tabaka nedeni ile yapay ışığın da saçıldığı sonucuna varmışlardır.

Power ve ark (2017) Savunma Meteoroloji Uydu Programı'nın Operasyonel Linescan Sistemi görüntülerinin interkalibrasyonu ile İrlanda'daki gece ışığı emisyonlarının 1995'ten 2010'a kadar önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Bu süre aralığında yapay ışık, arazi yüzeyinin %28'inin habitat ve tür koruma amaçlı olarak belirlendiği County Mayo da dâhil olmak üzere daha önce karanlık olan kırsal alanlara yayıldığını tespit etmiştir. Kırsal alanlardaki ışık kirliliğini araştırmak için Owenduff/Nepin Beg Kompleksi koruma alanında inceleme yapılmıştır. Koruma altındaki türlerin geceleri yapay ışık kaynaklarına yakınlığını belirlemek için alanı çevreleyen Gökyüzü Kalite Ölçüm Cihazlarından alınan ışık ölçümlerinin mekânsal analizi tür dağılım kayıtlarıyla örtüştürülmüştür.

Zhu ve ark (2024) Çin'deki, 2000-2015 yılları arasında toplam 1912 ilçede ışık kirliliği verilerini, enerji tüketimi, arazi kullanımı ve diğer ilgili verilerle birleştirerek endüstriye göre sınıflandırmıştır. Sonuçlar şunu ortaya koymuştur: (1) İncelenen 16 yıl boyunca, karbon emisyonları en hızlı Kuzey Çin'de artmış, bunu Doğu Çin izlemiş ve en düşük artış Kuzeydoğu Çin'de gözlenmiştir. Yüksek karbon emisyonuna sahip ilçeler doğu kıyı bölgelerinde yoğunlaşmıştır. (2) Moran endeksi, Çin'deki ilçelerin karbon emisyonlarının, incelenen zaman ölçeğinde Çin ekonomisi ile güçlü bir şekilde ilişkili olan bariz bir toplama etkisine sahip olduğunu göstermiştir; (3) Farklı bölgelerdeki çeşitli sanayi ilçelerinin değişimleri ve gelişimleri, esas olarak yıldan yıla hizmetlerdeki azalma ile sınırlandırılmıştır. Bu çalışmada hem DMSP OLS hem de VIRRS DNB uydu verileri kullanılmış, yerel koşullara göre enerji tasarrufu ve emisyon azaltma stratejilerini uygulamak için çeşitli yerel yönetimlere teorik bir altlık oluşturmuştur.

Yue ve ark (2020) zamansal kapsamını genişletmek için iki gece ışığı uzaktan algılama veri setini, yani Savunma Meteoroloji Uydu Programı'nın Operasyonel Linescan Sistemi (DMSP-OLS) verilerini ve Suomi Ulusal Kutup Yörüngeli Ortaklığı (NPP) Görünür Kızılötesi Görüntüleme Radyometre Paketi (VIIRS) verilerini entegre etmiştir. Ardından, Çin'in 1995-2016 yılları arasındaki enerji tüketiminin 1 km çözünürlükteki dağılımları farklı modeller kullanılarak tahmin etmiş ve enerji tüketiminin mekansal-zamansal değişimleri en iyi tahmin edilen sonuçlar temelinde araştırmıştır. Daha sonra, Çin'in il düzeyindeki enerji yoğunluğunu etkileyen faktörler mekânsal ekonometrik modele dayalı olarak araştırmıştır. Sonuçlar entegre gece ışığı veri setleri, enerji tüketiminin dinamik değişimlerini tahmin etmek için başarıyla uygulanabileceğini göstermiştir.

Gece hassasiyeti, 1990'larda bu verilerin dijital formda kullanılabilir hale gelmesiyle aydınlatma araştırmalarında önem kazanmıştır (Levin ve ark., 2020). Bilgiler artık Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) web sitesi üzerinden ücretsiz olarak temin edilebilmektedir. DMSP/OLS'nin yerleşik kalibrasyonu yoktur, bu da hassasiyet zaman içinde değişebileceğinden uzun vadeli kararlılığı hakkında soru işaretleri doğurmuştur (Weishampel ve ark., 2016). Elvidge ve ark (2014) ve Q. Zhang ve ark (2016) tarafından yapılanlar da dahil olmak üzere interkalibrasyon teknikleri önerilmiştir. DMSP/OLS verileri fotometrik parlaklık değerleri olarak değil, 0 (göreceli

karanlık) ile 63 (doymunluk) arasındaki Dijital Sayı (DN) değeri olarak verilmektedir (Han ve ark., 2014). Bazı araştırmacılar, aydınlık koşulları temsil etmek için DN değeri 5,5 veya daha büyük olan pikselleri kullanmaktadır (Duffy ve ark., 2015). Paksarian ve ark (2020) ve Zhang ve ark (2020) NOAA'dan alınan ve $nW/cm^2/sr$ cinsinden radyans değeriye dönüştürülen DMSP/OLS verilerini kullanmıştır.

Priyatikanto ve ark (2019) Büyük Bandung bölgesi üzerinde gece gökyüzü parlaklığı ölçümlerinin sonuçları rapor etmiştir. Elde edilen gökyüzü parlaklığı değeri şehir merkezinde ~ 17 mpsas ile şehir merkezine 30 km'den daha uzak olan Haurgombong, Sumedang'da ~ 20 mpsas arasında değiştiğini belirtmiştir. Bandung, Lembang ve Sumedang üzerindeki gökyüzü parlaklığının aylarca süren sabit ölçümler ile uyum göstermiştir. Bu sonucun Büyük Bandung bölgesi üzerindeki gökyüzü parlaklığı haritasını üretmek için Savunma Meteorolojik Uydu Programı Operasyonel Çizgisel Tarama Sisteminden (DMSP-OLS) alınan gece uydu görüntüleri ile birleştirilebileceğini ve bu haritanın, bölgesel planlama ve astro-turizm olasılığının tartışılması için önemli bir ürün olduğu ortaya konulmuştur.

Elvidge ve ark (2001) bulutların tespiti için geliştirilmiş benzersiz bir düşük ışık görüntüleme kabiliyetine sahip olan ve ay ışığıyla aydınlanan bulutların yanı sıra insan yerleşimlerinden, yangınlardan, gaz fişeklerinden, yoğun ışıklı balıkçı teknelerinden, şimşeklerden ve auroradan kaynaklanan ışıkları da tespit edebilen Savunma Meteoroloji Uydu Programı (DMSP) Operasyonel Linescan Sistemi (OLS) verilerini kullanarak 1994-1995 yıllarında 6 aylık bir zaman diliminde gözlemlenen dört tür ışık kaynağının küresel bir haritasını çıkarmıştır. Gece ışık verilerine dayanarak geliştirilen veya önerilen bir dizi çevresel uygulamayı gözden geçirirken Dünya nüfusunun %99'unu temsil eden 200 ülke için aydınlatma alanı, nüfus, ekonomik faaliyet, elektrik enerjisi tüketimi ve enerji ile ilgili karbon emisyonları arasındaki ilişkiyi incelemiştir.

2018 yılında fırlatılan Luoja-1, Çin ve diğer bazı bölgeleri mükemmel bir şekilde kapsamaktadır ve görüntüler ücretsiz olarak indirilebilir (Levin ve ark., 2020). Luoja-1, DMPS/OLS ve VIIRS/DNB'den daha geniş olan 460 nm ila 980 nm spektral hassasiyete sahiptir (Li ve ark., 2019). Ayrıca 130 m'lik gelişmiş bir uzamsal çözünürlüğe sahiptir ve verileri radyansa ($W/m^2/sr/\mu m$) dönüştürülebilen dijital numara değeri olarak sağlamaktadır (Li ve ark., 2020). Luoja-1 15 günlük bir tekrar ziyaret süresine sahiptir (Li ve ark., 2019). Fakat hem uydunun kapsama alanı hem de Luoja-1 ile lüksmetreler arasındaki spektral uyumsuzluk uzay kaynaklı ve yer tabanlı ölçüm cihazları arasındaki ilişkinin tutarlı olmayabileceği ve aydınlatma koşullarına bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir (Li ve ark., 2020).

Li ve ark (2019), Haziran 2018'de fırlatılan Luoja-1 uydusunun yapay ışık görüntülerini kullanarak Los Angeles, Wuhan ve Roma şehirleri için radyometrik ve mekânsal özelliklerinin yanı sıra Zunyi şehri için değişim tespit kabiliyetini değerlendirmiştir. Radyometrik özellik için, analiz Luoja-1 görüntülerinin Görünür Kızılötesi Görüntüleme Radyometre Paketi'nin (VIIRS) Gündüz ve Gece Bandı (DNB) radyansı ile iyi korelasyon gösterdiği ve Luoja-1 görüntülerinin daha geniş bir

radıans değeri aralığına ve VIIRS DNB görüntülerinden daha yüksek radıans değ rl rine sahip olduğu belirtilmiştir. Mekânsal  zellik ve değişiklik tespit kabiliyetini değerlendirmek için dalgacık ayırıştırma ve değişiklik tespit analizi kullanılarak, Luoia-1 görüntülerinin 100-400 m  z n rl kte depolanan görüntülerin dalgacık bileşenin yaklaşık %20-%54 enerjisi ile bol miktarda mekânsal detay bilgisi sağladığı ve yeni yolların ve binaların elektrifikasyonunun ince bir  z n rl kte izlenmesine yardımcı olabileceği bulunmuştur.

Jiang ve ark (2018) tarafından yapay ışık kirliliğini araştırmak için Luoia 1-01'in gece ışık görüntülerini kullanma potansiyeli ilk olarak bu çalışmada değerlendirilmiştir. Geometrik düzeltme yapmak için sekiz Luoia 1-01 görüntüsü seçilmiştir. Ardından, Luoia 1-01'in yapay ışık kirliliğini tespit etme kabiliyeti, Luoia 1-01 ile Suomi Ulusal Kutup Yörüngeli Ortaklık Görünür Kızılötesi Görüntüleme Radyometre Paketi (NPP-VIIRS) arasındaki karşılaştırma, yapay ışık kirliliğinin kaynağı ve kentsel ışık kirliliği modelleri dâhil olmak üzere üç açıdan değerlendirilmiştir. Ayrıca, Luoia 1-01'in avantajları ve sınırlamaları tartışılmıştır.

Yin ve ark (2020) gece ışığı (NTL) görüntülerinin kentsel genişlemeyi haritalamak için güvenilir bir veri kaynağı olduğunu kanıtladığı bu çalışmada, kentsel genişlemeyi tespit etmek için 100 m'ye yakın  z n rl kte çok kaynaklı NTL görüntülerini kullanma potansiyelini araştırmak için, 2018'deki Luoia1-01 (LJ1-01) görüntüsünü ve Wuhan şehrinde 2010'daki bir Uluslararası Uzay İstasyonu (ISS) gece görüntüsünü deney görüntüleri olarak kullanmıştır. Çoklu doğrusal sağlam regresyon modeline dayanarak, karşılaştırılabilir bir veri kümesi oluşturmak için LJ1-01 görüntüleri ile ISS görüntüleri arasında bir interkalibrasyon süreci önerilmiştir. Tüm aday kombinasyonlar arasında, LJ1-01 görüntüsü, simüle edilmiş LJ1-01 görüntüsü ve bunların oranının kombinasyonunun sınıflandırma için bütün gereksinimleri en iyi şekilde karşılandığı belirtilmiştir. Bu  zellik kombinasyonuyla, çalışma alanını istikrarlı kentsel olmayan sınıf, istikrarlı kentsel sınıf ve kentsel sınıfın genişletilmesi olarak sınıflandırmak için sırasıyla Destek Vektör Makineleri ve Geri Yayılımlı (BP) - Sinir Ağına dayalı çok zamanlı bir sınıflandırma yöntemi kullanılmıştır. Çok zamanlı sınıflandırmanın sonuçları, genel doğruluğun yaklaşık %90 olduğunu ve Kappa katsayılarının 0,84'ten büyük olduğunu gösterilmiştir. Her sınıf için, kullanıcının doğruluğu %87'den ve üreticinin doğruluğu %83'ten büyüktür. Bu çalışmanın sonuçları, yaklaşık 100 m  z n rl kte çok kaynaklı NTL görüntüleri kullanarak kentsel genişlemeyi tespit etmenin mümkün olduğunu göstermiştir.

Uluslararası Uzay İstasyonu'ndan (ISS) astronotlar tarafından çekilen fotoğraflar Astronot Fotoğraf Veritabanı aracılığıyla ücretsiz olarak temin edilebilir. Bu multispektral görüntüler DMSP/OLS ve VIIRS/DNB ile aynı veya daha iyi bir uzamsal  z n rl ğe sahiptir (S nchez de Miguel, Zamorano ve ark., 2021). Astronotlar tarafından çekilen görüntüler, ISS'nin yörüngesi ve tutarsız uçuş süreleri nedeniyle sınırlıdır (Kyba ve ark., 2015). Fotoğraflar genellikle nadiren değil eğik açılarda çekilmektedir (S nchez de Miguel, Zamorano Calvo ve ark., 2014).

Sanchez de Miguel ve ark (2021) ISS görüntülerini kullanarak RGB kanallarındaki yoğunluk ve oranlardan yararlanmak için önemli ölçüde işleme ve uygun kalibrasyon gerektirdiğini vurgulamıştır. Burada sırasıyla Kod Çözme, Doğrusallık düzeltmesi (ISO'ya bağlı), Düz alan/Vinyetleme, Kanalların spektral karakterizasyonu, Astrometrik kalibrasyon/jeoreferanslama, Fotometrik kalibrasyon (yıldızlar)/Radyometrik düzeltme (ayar düzeltmesi - pozlama süresi, ISO, lens geçirgenliği vb. ile) ve Geçirgenlik düzeltmesi (pencere geçirgenliği, atmosferik düzeltme) konularını ele alarak daha öncekilerden farklı kalibrasyon adımlarını açıklamış ve İspanya gece gökyüzü parlaklığı ile ilgili bir örnek sunmuştur.

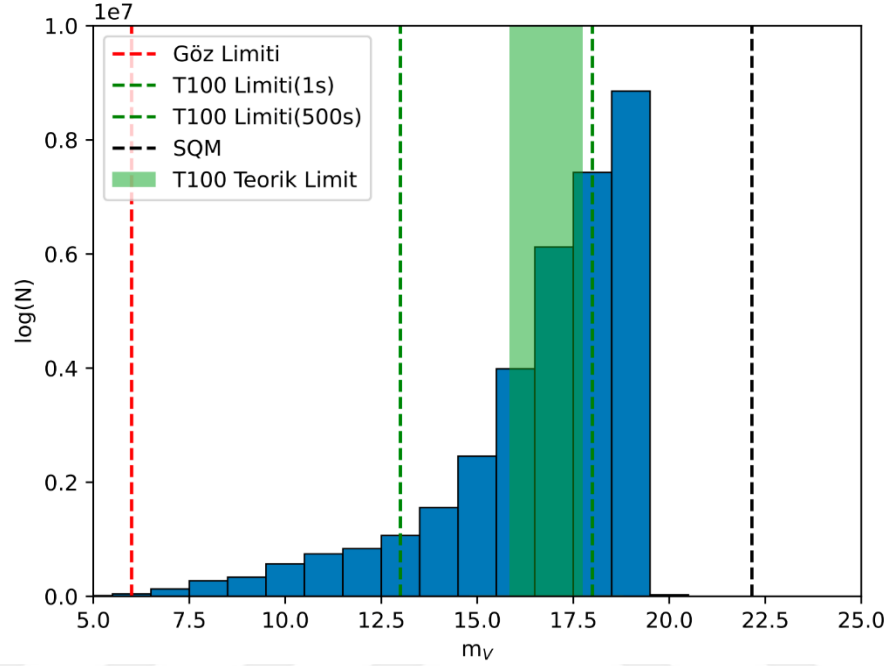
Côté-Lussier ve ark (2020) Kanada'nın Montreal şehrinin Uluslararası Uzay İstasyonu'ndan (ISS) alınan bulutsuz bir gece görüntüsünden elde edilmiş yapay ışık görüntüsünü kullanarak yapay ışığın güvenlik hissi ve kendi kendine bildirilen sağlık ile ilişkili olduğunu ortaya koymuştur.

2.2. Işık Kirliliğinin Astronomik Gözlemler Üzerindeki Olumsuz Etkisi

Astronomik gözlemler genel olarak ışık kontrastına dayalıdır. Herhangi bir kaçak ışık tüm kontrastı azaltır ve bu ışık kırılması nedeni ile noktasal kaynaklar bile yüzey kaynaklarına dönüşmektedir. Narisada ve Schreuder (2004) ışık kirliliğinin gözlemlere olan etkilerini gösterebilmek amacıyla TÜBİTAK Ulusal Gözlemevinde bulunan T100 teleskobu referans alınarak aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır. Bir teleskobun limit parlaklık (Limiting Magnitude) değeri $m=N+5\log(D)$ formülü ile verilmektedir (Garstang, 2000). Burada D teleskobun açıklığı (ayna çapı) cm ve N ise 6,8-8,7 arasında bir değer olarak verilmektedir. Teorik olan bu sınır değer atmosferden (aerosol, seeing vb.), aynaların yansıtıcılığında, kullanılan optiğin geçirgenliğinde, algılayıcıların hassasiyetinden nedeniyle azalmaktadır.

Örnek olarak T100 için teorik değer 16,8-18,7 mag olmasına rağmen gerçek değer bu değer in oldukça altındadır. Ancak uzun pozlama tekniği sayesinde teleskopların limit parlaklıkları artmaktadır. Parlaklık azaldıkça artan kaynak sayısını göstermek amacıyla Guide Star Catalog, Version 2.3.2 (GSC2.3) (Lasker ve ark., 2007) yıldız kataloğundaki yıldızların (limit parlaklık=21 kadir) parlaklık (mV) histogramı Şekil 2.7'de sunulmuştur. Burada yıldız parlaklığının azaldıkça yıldız sayısındaki logaritmik artış açıkça görülmektedir. Ayrıca, Göz, T100 limitleri ile SQM ölçümü (standart sisteme dönüştürülmüştür) grafikte gösterilmiştir. SQM ölçüm değerinin $mag/arcsec^2$ birimindedir. SQM ölçü değerini standart sistemine dönüştürmek için $SQM+0,31=SQMAB$ (Sánchez de Miguel ve ark., 2017) eşitliği ve $SQMV=SQMAB+0.044$ (Frei ve ark., 1995) eşitlikleri kullanılarak $SQMV=SQM+0,354$ bulunur. Burada, SQMAB, AB parlaklık sistemi değeri ve SQMV, standart parlaklık (V) değeridir. Buna göre T100 için teleskop parlaklık limiti (bkz. Şekil 1 deki yeşil dikey kesikli çizgiler) o tarihte gökyüzü parlaklık seviyesini aşmadığı görülmektedir. GSC2.3 kataloğundaki yıldızların V parlaklıklarının histogramında tüm parlaklık değerleri V olarak seçilmiştir. Çeşitli parlaklık sınırları dikey kesikli çizgilerle gösterilmiştir: Göz sınırı (kırmızı); TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG) T100 teleskobu sınırı (yeşil, 1s ve 500 s poz süresi, 100

Sinyal/Gürültü oranı); T100 teleskobunun teorik limit parlaklık değeri (Yeşil bölge) GÖKSİS/SQM (siyah, proje ekibin tamamlanan 113F266 nolu projesinde 14.06.2017 tarihli SQM ölçüm değeri, Ay olmadan ve tam gece yarısı alınan en sönük değer). Ancak, ışık kirliliğinin artması, aerosol, seeing, ay zamanı gibi etkiler düşünüldüğünde gökyüzü parlaklık değerinin teleskop limitlerine ulaşacağı görülmektedir.



Şekil 2.1. GSC2.3 kataloğundaki yıldızların V parlaklıklarının histogramı.

Falchi ve ark. (2023) VIIRS 2021 uydu radyans verilerine uygulanan Garstang-Cinzano modelini kullanarak, tümü 3 m'den daha büyük açıklıklara sahip teleskoplara ev sahipliği yapan 28 sahayı ve bazı ek seçilmiş sahaları karşılaştırmıştır. Işık kirliliğinin beş göstergesini baz alarak zenitteki parlaklık; 60° zenit mesafesinde ortalama; tüm gökyüzünde ortalama; ufku ilk 10° üzerinde ortalama; ve yatay ışınlam değerlerini hesaplamıştır. Sonuç olarak tüm büyük astronomi sitelerinin üçte ikisinin, varsayılan doğal seviyelere göre parlaklıktaki kritik %10'luk artışı çoktan aştığını bulmuşlardır.

Wesołowski ve ark (2019) SQM kullanarak 2015 ve 2018 yıllarına ait ölçüm sonuçlarını analiz etmiş komşu köylerdeki gökyüzü kalitesinin astronomik gözlemlerdeki gök cisimlerinin görünürlüğünü olumsuz yönde etkilediğini belirtmiştir.

Aboushelib ve ark (2023) Mısır Kottamia Astronomi Gözlemevi (KAO) sahasında tüm gökyüzünü kapsayan farklı zenit mesafeleri ve azimutlarda gece gökyüzü parlaklığının fotoelektrik gözlemlerini, tam otomatik fotoelektrik fotometre kullanarak yapmıştır. Gözlem geceleri boyunca atmosferik ve diğer meteorolojik koşulların göz önünde bulundurulduğu bu çalışmada KAO'nun çevresinde inşa edilen yeni şehirlerin üzerindeki gökyüzü ışıltısının KAO'da 1995'te Nawar ve ark.

(1995) tarafından yapılan önceki gözlemlerle karşılaştırıldığında, NSB, BVR filtrelerinde yaklaşık %9,4, %9,8 ve %9,6 oranında arttığını belirtmiştir.

Zhang ve ark (2016) Xinglong Gözlemevi'nin gece gökyüzünde 2004-2015 yılları arasında 12 yıl boyunca 4000-7000 Å dalga boyu kapsamına sahip 2,16 m reflektöre monte edilmiş OMR spektrografi kullanılarak aysız ve açık gecelerde yapılan spektroskopik ölçümler gerçekleştirmiştir. Pekin yönünden gelen ışık kirliliğinin etkisinin Tangshan ve diğer alanlardan gelen ışık kirliliğine kıyasla daha güçlü olduğunu belirtmiş, Xinglong Gözlemevi'nin zenit gökyüzü parlaklığının 2004'ten 2015'e kadar V ve B bantlarında yaklaşık $0,5 \text{ mag/arcsec}^2$ parlaklaştığı sonucuna varmıştır.

Herdiwijaya ve ark (2020) Endonezya'daki Bosscha Gözlemevi'nde ışık kirliliğinin seviyesini belirlemek için, 2011'den 2018'e kadar yedi yıl boyunca zenit noktasına doğrultulmuş taşınabilir bir fotometre kullanarak gökyüzü parlaklığı ölçümü yapmıştır. 1692 aysız gecede yapılan ölçümlerden sonra gözlemevi çevresindeki Bandung ve Lembang şehirlerindeki korumasız ışık kaynakları nedeniyle bölgedeki ışık kirliliğinin açıkça arttığını belirtmiştir.

Şehirleşmenin artması ve gözlemlerinin gittikçe ışık kirliliğinin etkisi altında kalmasının sonucunda var olan ışık kirliliği ölçümlerinin yanı sıra yeni sahalar keşfetmek için de astronomların öncelikli kriterlerinden biri ışık kirliliği olmuştur. Aboushelib ve ark. (2019), Kottamia gözlemevinin yerini alacak yeni bir astronomi gözlemevi için aday olabilecek ön alanların seçilmesini amaçlamıştır. Ana faktörler olarak ışık kirliliği ve sahaların yüksekliği göz önünde bulundurulmuş ve aday sahaları zenit gökyüzü parlaklığı ve yüksekliğe bağlı olarak seçilmiştir. SQM ölçümlerine dayanan bu çalışmada gece gökyüzü parlaklığı, ortalama 22,07, 22,03, 21,57 ve 21,58 $\text{mag}_{SQM}/\text{arcsec}^2 \text{ m}$ olarak ölçmüştür.

1930'larda yeni bir 5m teleskop için planlamalar başladığında, planlamacılar o zamanki en büyük teleskoba (2,5 m) ev sahipliği yapan Mount Wilson Gözlemevi'nin zaten çok fazla ışık kirliliğinden muzdarip olduğunu fark ettiler ve Palomar Dağı'nda, Los Angeles bölgesinin ışıklarından daha uzakta yeni bir yer seçtiler. 1950'lerin başında ise Kitt Peak National Observatory için o zamanki nüfusları nispeten daha az şehirler olan Tucson'a 80 km ve Phoenix'e 170 km uzaklıktaki Arizona'daki Kitt Peak dağı seçildi. 1960'lardan günümüze kadar ise Şili, Arizona, Hawaii ve Kanarya Adaları'nda giderek kentlerden daha da uzak bölgelere yeni teleskoplar inşa edildi (Christian ve ark., 2009). Bu sahalar şu an için ışık kirliliğine diğer alanlardan daha az maruz kalsa da gelecek için yine de beklentiler belirsizdir.

Walker ve ark (1973) ışık kirliliğinin optik astronomik gözlemler üzerindeki etkisine dikkat çeken ilk çalışmalardan biridir. Çalışmada yapay aydınlatmanın Kaliforniya ve Arizona'daki yer tabanlı optik astronomik gözlemler üzerindeki mevcut ve geçici etkisi tartışılmaktadır. Bu eyaletlerdeki tüm büyük astronomi sitelerinin etkinliğinin potansiyel olarak ışık kirliliği nedeniyle sınırlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Aksaker ve ark (2020a) Dünya’da astronomi siteleri için yer seçimi yapmış ve bulutluluk, aerosol, nem ve rüzgâr gibi atmosferik parametrelerin yanı sıra yapay ışığı da yer seçiminde kullandıkları katmanların arasına eklemiştir. Bu veri setlerine çok kriterli karar analizi tekniği uygulanarak her katmanın belirli bir ağırlığa sahip olacağı dört farklı seri oluşturulmuştur. İlk kez astronomik alanlar için bir uygunluk indeksi (SIAS) tanımlamıştır. Tüm seriler göz önüne alındığında, tüm karasal yüzeylerin % 3'ünden daha azının bir astronomik gözlemevi kurmak için en iyi bölgeler olduğu görülmüştür.

Walker (1977), kentsel aydınlatmanın gece gökyüzü parlaklığı üzerindeki etkilerini inceleyerek ışık kirliliğinin astronomik gözlemler üzerindeki etkilerini niceliksel olarak değerlendirmiştir. Çalışmasında, benzer ekonomik gelişmişlik düzeyine sahip şehirlerde toplam ışık çıkışının nüfusla yaklaşık orantılı olduğu, gece gökyüzünün 45° yükseklikteki parlaklık artışının şehirden olan uzaklığın yaklaşık $D^{-2.5}$ oranında azaldığı ortaya konmuştur. Ayrıca, belirli bir parlaklık eşiği (örneğin 0.2 kadir) oluşturacak ışık kirliliğinin hangi mesafelerde görülebileceğini hesaplamak için nüfusla mesafe arasında $P \propto D^{2.5}$ ilişkisi kurulmuştur. Bu çalışma, gökyüzü parlaklığına dair hem görsel hem de mavi bantta yapılan ölçümlerle desteklenmiş; San Jose, Salinas ve King City gibi farklı büyüklükteki şehirler temel alınarak model önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ışık kirliliğinin dağılımını tahmin etmede nüfusa dayalı deneysel modellerin kullanılabilirliğini ortaya koyarken, modern uydu temelli ışık kirliliği çalışmalarına temel teşkil eden erken dönem nicel yaklaşımlardan biri olarak öne çıkmaktadır.

Garstang (1986), yapay gece gökyüzü aydınlatmasını modellemek üzere geliştirdiği kuramsal yaklaşım ile ışık kirliliği literatüründe öncü çalışmalar arasında yer almıştır. Geliştirdiği model, şehirlerin toplam ışık çıkışının nüfusa bağlı olduğunu varsayarak, moleküler ve aerosol saçılımı, yer yansıtırlığı (albedo), yukarı yönlü ışık oranı gibi parametreleri dikkate alarak gece gökyüzü parlaklığının hesaplanmasını mümkün kılmıştır. Model, hem şehir merkezinden hem de şehir dışından farklı zenit açılarına göre gökyüzü parlaklığını tahmin edebilmekte; özellikle uzak mesafelerden gözlemlenen parlaklıkla nüfus ve mesafe arasındaki ilişkileri açıklamada kullanılmaktadır. Garstang, ışığın doğrudan yukarı yönlü bileşenini ve zemin yansımalarını dikkate alarak, gökyüzüne yayılan ışığın açisal dağılımını tanımlamış, bu yönüyle daha sonra geliştirilecek modellere temel oluşturmuştur.

Luginbuhl ve ark (2009) ise Garstang’ın modelini daha gerçekçi hale getirmek amacıyla, ışığın yere yakın çevresel koşullarda (binalar, ağaçlar, topoğrafya vb.) maruz kaldığı engellenme ve sönümlenme etkilerini vurgulamıştır. Flagstaff, Arizona’da yapılan gözlemsel çalışmalar, GU1 çalışmasıyla elde edilen yer tabanlı ışık çıkışı verileri ile karşılaştırıldığında, Garstang modelinin gökyüzü parlaklığını olduğundan fazla tahmin ettiğini ortaya koymuştur. Bu farkın, özellikle yataya yakın açılarla yayılan ışığın yapılar ve bitki örtüsü tarafından engellenmesinden kaynaklandığı vurgulanmıştır. Böylece, ışık kirliliğinin modellenmesinde sadece atmosferik faktörlerin değil, aynı zamanda yapısal çevrenin de önemli bir rol oynadığı ortaya konmuştur.

2.3. Kentsel Gelişim ve Işık Kirliliği

2.3.1. SLEUTH Kentsel Gelişim Modeli

BM Nüfus Bölümü, mevcut demografik eğilimlere dayanarak dünya ülkelerinin gelecekteki nüfusunu hesaplamıştır. 2022 yılında dünya nüfusu 8 milyara ulaşmıştır. BM'nin 2022 raporu, dünya nüfusunun 2050 yılında 9,7 milyar kişi, 2100 yılında ise yaklaşık 10,3 milyar kişi olacağını öngörmektedir. UN DESA 2022 raporuna göre 2020 ile 2050 yılları arasında öngörülen 1,9 milyar kişilik ilave nüfusun 1,2 milyarı Afrika'da, 0,7 milyarı Asya'da ve sıfıra yakını da dünyanın geri kalanında yer alacaktır. Afrika'nın küresel nüfustaki payının 2020'de %17'den 2050'de %25'e ve 2100'de %38'e çıkacağı, Asya'nın payının ise 2020'de %60'tan 2050'de %55'e ve 2100'de %45'e düşeceği tahmin edilmektedir. Artış miktarı için bölgesel ölçekte azalma beklense dahi 2050 yılına kadar küresel nüfusa eklenen 9,7 milyon kişinin kentleşmeyi arttıracığı beklenmektedir. (World Population Prospects/Population Division, 2022). Hoornweg ve ark (2016) bu yüzyılın sonuna kadar dünya nüfusunun 6,9 milyar ile 13,1 milyar arasında değişen tahminlerle artış göstermesine bağlı olarak en büyük 101 şehirde yaşayan insanların oranının %15 ile %23 arasında olacağı ve buna bağlı olarak kentsel alanın 010 yılında 7,5 milyon iken 2100 yılında yaklaşık 23 milyona çıkacağını öngörmektedir. Bunun sonucu olarak kentsel gelişmenin hem ülkesel hem de küresel ölçekte ne yönde ilerleyeceği sorusuna cevap aramak azalan kaynaklar bakımından hayati önem taşır. Bu problem çerçevesinde birçok kentsel modelleme yaklaşımı geliştirilmiştir. LUCAS, Markov, SLEUTH, Smart Growth Index, UPLAN ve UrbanSim bu modellere örnek olarak verilebilir. Kullanılan bu modeller girdi verileri ölçümleme teknikleri ve veri ön işleme yöntemleri bakımından farklılıklar gösterir. Küresel ölçekte büyük alanların kentsel gelişim tahminleri için kullanılan en doğru yaklaşım SLEUTH modelidir (Tanrıöver, 2011).

SLEUTH modeli son yıllarda dünya çapında başarıyla uygulanan bir hücresel otomata (CA) modelidir ve arazi kullanım değişikliğini simüle etmek için Clarke ve ark (1997) tarafından ortaya atılmıştır. Modelin adı, modelde girdi verisi katmanları olarak kullanılan altı ızgara raster haritasının akronimidir SLEUTH: Slope (Eğim), Land use land cover (Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü), Excluded (Çıkarma Katmanı), Urbanization (Kentleşme), Transportation (Ulaşım), Hillshade. Modelin kaynak kodu ve dökümanları ücretsiz ve halka açık bir şekilde sunulmaktadır. Bu da modelin orijinal yazarları dışında da birçok araştırmacı tarafından modelin geliştirilip değiştirilmesine ve daha iyi hale getirmesine olanak tanımıştır. SLEUTH modelini 66'dan fazla farklı şehir ve bölgede uygulandığı bilinmektedir (Clarke ve Gaydos, 1998; Clarke ve ark., 2007; Clarke, 2008).

UGM'nin uygulanması, öncelikle San Francisco Körfezi bölgesinde tarihsel kentsel büyümenin simülasyonu ile başlamıştır (Clarke ve ark., 1997). Hücresel otomat (CA) yaklaşımının kapsamlı bir hali olan ve C dili kodlamasını içeren "Gigalopolis" projesi kapsamında mevcut olan bir arazi kullanım değişikliği bağlantısının da eklenmesiyle SLEUTH modeli güncel halini almıştır.

Herold ve ark (2003) Santa Barbara, Kaliforniya'daki kentsel büyümenin analizi ve modellemesinde uzaktan algılama, mekânsal ölçümler ve mekânsal modellemenin birlikte uygulanmasını araştırmıştır. Araştırma, yorumlanmış tarihi hava fotoğrafları ve IKONOS uydu görüntülerinden derlenen 72 yıllık zaman serisi veri setine dayanmaktadır. SLEUTH kentsel büyüme ve arazi kullanımı değişikliği modeli, tüm çalışma bölgesi için çok zamanlı veri setleri kullanılarak kalibre edilmiştir. 1930 ile 2001 arasındaki seçilmiş yıllar kullanılarak 2030 yılına kadar kentsel büyümenin mekânsal tahmini yapılmıştır. Sonuçlar, kentsel büyümenin miktarını ve mekânsal modelini açıklamada uzaktan algılamayı, mekânsal ölçümleri ve kentsel modellemeyi beraber kullanan bu modellemenin avantajlarını göstermiştir.

Mathioulakis ve ark (2017) Yunanistan'ın Doğu Attika bölgesi için 2045 yılına ait kentsel büyümeyi simüle ettiği çalışması bir Hücrel Otomat (CA) Kentsel Büyüme Modeli (UGM) uygulamasını içermektedir. Yunanistan'ın Doğu Attika bölgesi, öngörülebilir gelecekte kente dönüştürülebilecek geniş kentsel olmayan alanlara sahip olması nedeniyle vaka çalışması olarak özellikle seçilmiştir. Nihai simülasyon çıktısını üretmek için çeşitli dijital görüntü kaynakları kullanılmış ve ardından modelin özel formatına göre işlenmiştir.

Sakieh ve Salmanmahiny (2016), İran'ın kuzeydoğusunda oldukça gelişmekte olan bir bölge olan Gorgan Kasabası'ndaki kentsel ve peyzaj planlaması için SLEUTH kentsel büyüme modellemesi ile peyzaj metrikleri ve istatistiksel analizler uygulanarak sürdürülebilir, gerçekçi ve pratik bir kentsel büyüme modeli ortaya konmuştur. Çalışmanın bulgularında İran'ın gelişmekte olan kentsel çevreleri için gerçekçi, pratik ve sürdürülebilir bir planlama alternatifi olarak değerlendirilebileceğini vurgulanmaktadır.

Liu ve ark (2020) Pekin'de SLEUTH modeli kullanarak nüfus yoğunluğunun yeniden dağılımını ve alt ölçeklendirmesini tahmin etmeyi ve planlama değerlendirmesi ve uygulamaları için kullanılan 1 km^2 'lik griddeki yerleşik araziye simüle etmeyi içeren gevşek bir bağlantı yaklaşımına dayanan yeni bir metod önermiştir.

Jantz ve ark (2004) SLEUTH modelini kullanarak Giza için 2015'ten 2035'e kadar üç farklı kentsel politika ve ilgili büyüme senaryosunu simüle etmiştir. İlk senaryo, mevcut koşullar altında kalıcı büyüme eğilimlerini simüle etmek için tarihsel büyüme eğilimlerini kullanmıştır. İkincisi, belirlenmiş büyüme merkezlerinin dışındaki alanlarda gelişime sağlam kısıtlamalar getiren kompakt bir büyüme senaryosu olup üçüncü senaryo, daha katı büyüme planlarını ve doğal kaynaklara sahip araziler üzerinde güçlü siyasi taahhütlerle gerçekçi bir şekilde gerçekleştirilebilecek düzeyde daha güçlü korumaları entegre eden resmi olarak planlanmış büyümeyi dikkate almıştır. Eğitim, arazi kullanımı, çıkarma katmanı ve kentsel büyüme, ulaşım ve hillshade dâhil olmak üzere modelin ihtiyaç duyduğu girdi verileri, denetimli sınıflandırmalara göre 1984, 2000 ve 2013 yıllarına ait üç Landsat uydu görüntüsünden elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları, kompakt büyüme politikası senaryosunun ekilebilir araziler üzerinde en az olumsuz etkiye sahip olduğunu, tarihsel büyüme senaryosunun ise en kötü etkiye sahip olduğunu ortaya konulmuştur.

Wu ve ark (2009) Çin'in Shenyang metropolitan alanında SLEUTH kentsel büyüme modelinin simülasyon performansını değerlendirmek için harita karşılaştırması ve model doğrulaması için birden fazla yöntem kullanmıştır. Bu çoklu yöntemler arasında göreceli çalışma karakteristiği eğrisi istatistiği, çoklu çözünürlük hata bütçesi ve peyzaj metrikleri yer almaktadır. Değerlendirme sonuçları, SLEUTH modelinin kentsel büyümenin niceliksel simülasyonunda iyi bir performans sergilediğini göstermiştir.

Liu ve ark (2015) Çin'in kuzeybatı kesiminde yer alan Sincan Uygur Özerk Bölgesinin başkenti olan Urumçi kentinde, kentsel büyüme simülasyon ve tahmin modelini oluşturmak için SLEUTH modelini kullanılmıştır. Model, zaman serisi uydu görüntülerinden elde edilen geçmiş verilerle kalibre edilmiş ve 2015-2045 yılları arasında kentsel büyüme simülasyonu için kullanılmıştır.

Varquez ve ark (2023) SLEUTH adlı hücresele-otomata tabanlı bir arazi kullanım değişikliği modelinden elde edilen kentsel projeksiyonları, demiryolu kaynaklı kentsel büyümeyi dikkate alabilen versiyonları olan SLEUTsH ve SLEUTsHGA ve almayan versiyonları olan SLEUTH ve SLEUTHGA karşılaştırılmıştır. Dünyanın farklı yerlerinden 12 tane şehir çalışma alanı olarak seçilmiştir. Model simülasyonu 2040 yılına kadar yapılmıştır. Temel olarak kamuya açık CBS veri setlerine dayanan bu çalışma, demiryolu kaynaklı kentsel büyümenin küresel ölçekte modellenme potansiyeli ortaya konmuştur.

Bölgesel olarak SLEUTH modeli kullanılarak yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Fakat küresel ölçekte ilk defa Zhou ve ark (2019) tüm dünyada kentsel büyümeyi modellemek için SLEUTH kentsel büyüme modeline ve 2020'den 2050'ye kadar kentsel büyüme olasılıklarını içeren 30 yay-saniye çözünürlüklü bir veri tabanına dayalı olarak küresel kentsel büyümeyi projelendirmek için bir çerçeve oluşturmuştur. Kentsel arazi örtüsü için bir vekil olarak LandScanTM'den alınan küresel nüfusun tarihsel dağılımı kullanılmış, SLEUTH modeli 2000-2013 dönemi için kalibre edilmiştir. Küresel kentsel bölgeleri kapsayan 50 yay dakikalık ızgaralardan oluşan iki katman kullanarak kentsel büyüme simüle edilip her kentsel alanda farklı büyüme oranları gözlemlenirken, küresel kentsel örtünün 2050 yılına kadar $1,7 \times 10^6 \text{ km}^2$ 'ye ulaşacağı tahmin edilmiştir. Bu sonucun da 2012 yılının yaklaşık 1,4 katı olmasına dikkat çekilmiştir.

2.3.2. SLEUTH Kentsel Gelişim Modelinin Güvenilirliği

SLEUTH modelinin potansiyel kentsel büyüme ve arazi kullanım değişikliğini tahmin etme kabiliyetleri açısından güvenilirliği aşağıdaki verilen çalışmalarda incelenmiştir. Kuo ve Tsou (2017), SLEUTH'nin bir kentin gelişmiş bölgelerinin arazi özelliklerine dayalı olarak kentsel bir bölgedeki gelişmeye ilişkin güvenilir uzun vadeli bilgileri tahmin edebildiğine işaret etmektedir. Dolayısıyla bu güvenilirliğin, (Chaudhuri ve Clarke, 2019) tarafından ortaya konduğu üzere, kentsel alanların büyüme eğilimlerini simüle etmenin yanı sıra tahminlerde bulunmada tarihsel verilerin

kullanılmasından kaynaklandığı ileri sürülebilmektedir. Mekonnen ve Hailu (2020), sonuçları doğru bir şekilde tahmin etmek için kalibrasyonun SLEUTH modeli çerçevesinde kritik bir adım olduğunu vurgulamaktadır. Bu kalibrasyon adımı, şehir yapısının sürekli büyümesini doğru tahmin etme performansını artırmaktadır. Li ve ark (2019) yaptıkları çalışmada, kalibrasyon sonuçlarının doğruluğunu analiz etmek için Dietzel ve Clarke (2004) tarafından tanımlanan OSM parametresinin kullanılabileceğini ve bunun da çeşitli senaryolar altında kentsel bölgelerin gelişiminin modellenmesi için modelin kullanım güvenilirliğini güçlendirmeye hizmet ettiğini belirtmektedir (Li ve ark., 2019). Ayrıca modelin 2100 yılına kadar olan yıllar için Kaliforniya'daki arazi kullanım değişikliğinin simülasyonuna yönelik olarak ayarlanması için büyük verinin nasıl kullanılabileceğine dair bir tartışma ve modelin tahmininin doğruluğunu ve Clarke ve Johnson (2020) tarafından verilen tahminin sonuçlarını değerlendirme girişimi de bulunmaktadır. Bu kapsamda kalibrasyon aşamasının doğru bir şekilde yapıldığında, kentsel arazi örtüsü değişikliklerinin derecesini doğru bir şekilde yakalama ve tahmin etme konusunda SLEUTH'un güvenilir bir model olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Hesaplama parametrelerindeki esneklik sayesinde, SLEUTH modelinin güvenilirliğinin arttığı, modelin tüm boyutlardaki hücreler için büyüme oranlarını makul bir doğrulukla tahmin edebildiğini ortaya konulmuştur. Nüfus değişiklikleri ile ilgili analizlerin tahmin edilmesine yardımcı olacak demografik modellerin oluşturulmasına ihtiyaç vardır. Bu etkinin kentsel arazi kullanımına yansıtacağını belirtilmiş, demografik dinamiklerin simülasyonun bir parçası olarak açıklanması, demografik değişim dinamiklerini netleştirmekte ve böylece modelin güvenilirliğini arttırılacağı belirtilmiştir (Jantz ve ark., 2014).

SLEUTH modelinden elde edilen projeksiyonlar, belirli coğrafi bağlamların ötesinde de geçerli olduğu bilinmektedir. Xu ve Yi-meng (2019) kentsel yayılmanın tahmininde modelin ne kadar iyi olacağına ilişkin değerlendirme amacıyla özel bir metrik benimsemişler ve simüle edilen kentsel alanın uyum iyiliğinin değerlendirilmesi ihtiyacını vurgulamışlardır. Ayrıca Liu ve ark (2020) modelin bir bölgedeki kentsel yayılmanın boyutları hakkında bilgi edinmede ve sürdürülebilir kentleşmeye yönelik yeni yaklaşımların formüle edilmesine katkıda bulunmada yardımcı olabileceğini vurgulamaktadır (Liu ve ark., 2020). Genel olarak, SLEUTH modelinin gelecek vadede şehir planlamacılarına ve politika yapıcılara uygun sürdürülebilir kentsel kalkınma uygulamalarına yönelik tavsiyelerde bulunmada nasıl faydalı olabileceğini ileri sürmektedirler. Bu nedenle, sağladığı fayda açısından kentsel büyüme ve arazi kullanım değişikliklerini tahmin etmek için kullanılan SLEUTH modelinin kalibrasyonunda, farklı durum ve ortamların esnekliği ve demografik özelliklerin tepkisi gibi unsurların dikkate alınması çok önemlidir. Farklı parametrelerin iyileştirilmesi, modelin değerlendirilmesi ve genel istikrarının hesaplanması, SLEUTH'u kentsel alanların gelişme eğilimlerinin karşılaştırmalı analizinde güvenilir bir araç haline getirmektedir.

Kentsel büyümenin izlenmesi açısından SLEUTH modelinin doğruluğunu değerlendirmek için daha farklı metriklerle birçok yaklaşım izlenebileceğinden, çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Clarke ve Johnson (2020), Çin'in Shenyang metropolitan bölgesi için Kentleşme, Arazi Kullanımı ve Tran

skiportasyonun Simülasyonu açısından SLEUTH modelinin çıktısını incelerken göreceli çalışma karakteristiği (ROC) eğrisi istatistiğini, çoklu çözünürlük hata oranını ve peyzaj metriklerini kullanmışlardır. Benzer bir çalışma, modelin büyüme tahminlerinde güvenilirliğe dair ikna edici kanıtlar sunarken, kentsel dinamiklerin uyum düzeyine ilişkin ayrıntılı bir değerlendirme sunmuştur. Li ve ark (2018) SLEUTH modelini, hariç tutulan katmanı veya model parametrelerini ve katsayılarını değiştirerek politikaları ve kentsel gelişim planlarını dâhil etme becerisiyle gözlemlendiği gibi habitat kalitesi kısıtlamalarını içeren kentsel büyümeyi simüle etmek için daha da genelleştirmiştir. SLEUTH'un bu şekilde geliştirilmesi, habitat kalitesi dikkate alındığında kentsel büyümenin doğru bir tasvirini oluşturma kabiliyetini kolaylaştıran faktörleri ele alma konusunda modelin mevcut gelişimine katkıda bulunmaktadır. Varquez ve ark (2020)'ye dayanarak, SLEUTH modelinin veri, model kalibrasyonu ve tahmin adımlarını içeren üç temel aşamadan oluştuğunu anlamak önemlidir. Bu yapısal yaklaşım, bölgede gerçekleşen gerçek büyüme ile karşılaştırıldığında SLEUTH modelinin kentsel büyümeyi tahmin etmedeki güvenilirliğini artırmada önemli olduğu bu çalışmada vurgulanmıştır. Buna ek olarak, Kamarajugedda ve Lo (2019), SLEUTH modelleme uygulamasını kullanarak, modelleme sürecindeki son adımı tanımlamıştır; bu adım, büyüme katsayılarının kalibrasyonu için kullanılan gelecekteki büyüme kriteri olarak da bilinen büyüme haritasının tahminini ve gelecekteki büyüme haritasını ortaya çıkarmak için tarihsel büyüme haritasını içermektedir. Bu adım aynı zamanda geçmiş trendlerle uyumlu olan kentsel gelişmelere yönelik projeksiyonlar hakkında modeldeki hata derecesinin belirlenmesinde de çok önemlidir ve bu da modelin öngörülebilirliğini belirlemesine yardımcı olur. Benzer şekilde, Kumar ve Agrawal (2022) SLEUTH modelinin entegre uygulamasının eğim, yol erişilebilirliği ve arazi örtüsü gibi çeşitli faktörleri dahil ederek mekansal kesinliği artırabileceğini vurgulamıştır.

Bir zaman noktasından diğerine değişimin simüle edildiği hücresel otomat modellerinde kullanılan mekânsal verilere dayalı olarak sonuç belirsizlikler ve hatalar içerebilmektedir (Crosetto ve Tarantola, 2001; Yeh ve Li, 2006). Çok sayıda çalışmada hücresel otomatların çıktılarında genel belirsizliğe yol açabilecek farklı hata kaynaklarını tanımlamıştır (Liliburn ve Tarantola, 2009). Dolayısıyla, bu modeller kullanılarak yapılan uzun vadeli tahminler için, tahmin edilen çıktılarının her birindeki doğruluk miktarının ölçülmesi, tahmin edilen haritaların doğruluğunun yakın gelecekte uzak geleceğe doğru tahmin edilen yıllar için nasıl değiştiğini açıklamaktadır.

Modellemenin doğrulama aşamasında, modelciler genellikle ilk tahmin edilen haritanın doğruluğunu ölçer ve sonraki tahmin yılları için doğruluklar ilkinin sonuçlarına göre ekstrapole edilir. Goldstein ve ark (2004), SLEUTH'un kentsel genişlik tahminleri için tarihsel veriler kadar uzun bir süre boyunca (70 yıl) çalıştırılabilmesini öne sürmüştür. Candau, (2000) tahmin haritalarının doğruluğunun yakın geçmişten gelen girdi verileriyle arttığını ve model daha uzun tarihsel zaman dilimleri üzerinden kalibre edildiğinde, kısa vadeli tahminler için bile azaldığını göstermiştir.

Hücre tabanlı kentsel modellerde en basit doğrulama yöntemi, modellenen ve gerçek haritaların görsel olarak değerlendirilmesinden. Bu amaçla, artan karmaşıklık sırasına göre en sık kullanılan ölçütler (i) belirli bir arazi kullanımı için simüle edilen hücre (veya küme) sayısının gerçek hücre (veya küme) sayısına oranı, (ii) genel doğruluk, yani doğru sınıflandırılmış piksellerin yüzdesi, (iii) simülasyon sonuçları ile gerçek veriler arasındaki regresyon analizi ve (iv) karışıklık matrisi ve kappa indeksidir (Santé ve ark., 2010).

SLEUTH tarafından modellenen tahmini kentsel haritaların doğruluğunun zamansal eğilimini değerlendirmek için ise Kappa katsayısı (ve varyasyonları) (Pontius 2000; Hagen 2002), miktar ve tahsis anlaşmazlığı (Pontius ve Millones 2011) ve $K_{simülasyonu}$ (ve varyasyonları) (Van Vliet ve ark., 2011) gibi yöntemler kullanılmaktadır. Kappa istatistiği, uzaktan algılama ve harita karşılaştırma alanında kullanılan en popüler doğruluk ölçütü olmuştur. Son zamanlarda, çalışmalar Kappa'nın uygulamalarını, avantajlarını ve dezavantajlarını araştırmıştır (Congalton ve ark., 1983; Monserud ve Leemans, 1992; Congalton ve Green, 1999; Smits ve ark., 1999; Pontius, 2000; Wilkinson, 2005; Pontius ve Millones, 2011). Kappa istatistiği, gözlenen harita ile tahmin edilen haritanın hücre hücre karşılaştırılmasından elde edilen bir karışıklık matrisinden hesaplanır (Hagen-Zanker ve Martens, 2008). Bir örneklemden veya iki haritadaki tüm piksellerden ölçülebilir. Uyum yüzdesine dayanan Kappa, saf şansla beklenebilecek uyum oranı için düzeltilir.

Her ne kadar kentsel modellemelerde Kappa istatistiği popüler olarak kullanılan bir yöntem olsa da hala yanlılığı tartışmaya açıktır. Bunun en büyük nedeni ise harita doğruluğunun değerlendirilmesinde kappa katsayısının kullanılması, çoğunlukla tesadüfi uyuma izin vermesi ve bunun da harita doğruluğunun olduğundan düşük tahmin edilmesine yol açmasıdır (Brennan ve Prediger, 1981; Aickin, 1990).

Berberoğlu ve ark (2016) SLEUTH modelinde doğruluk değerlendirmesi için tahmin edilen ve gerçek kentsel haritaları aynı yıl için üst üste bindirmiştir. Bu yaklaşımla simüle edilen kentsel alan ile var olan kentsel alanın uyumunu Kappa İstatistiği ile ölçmüştür. Buna ek olarak Berberoğlu ve ark (2016) SLEUTH modelinde verileri ve simüle edilmiş büyümeyi karşılaştırarak en iyi uyum istatistiklerini ölçen on üç unsur olduğunu dolayısıyla ek bir doğrulama süreci gerektirmediğini ancak farklı kentsel alan tahmin metodları ile SLEUTH modelinin çıktıları karşılaştırmak için Kappa İstatistiğini kullandıklarını belirtmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

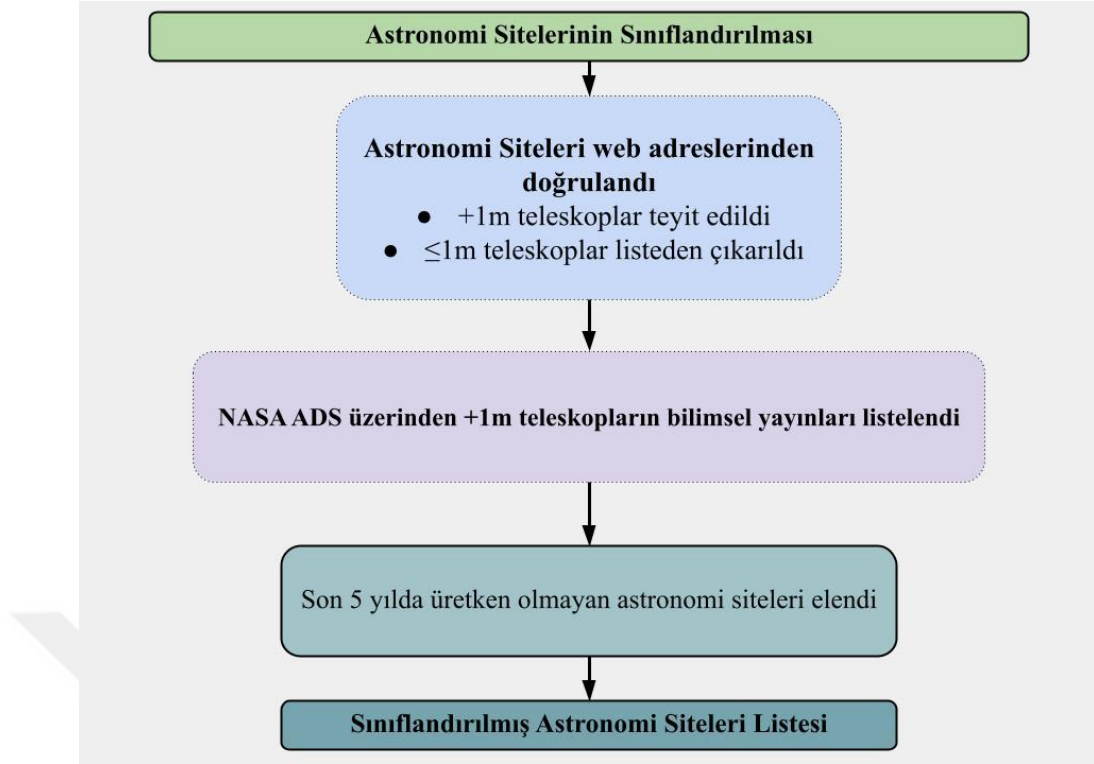
3.1. Materyal

3.1.1. Yararlanılan Veriler ve Temini

Dünya’da amatör ve profesyonel olmak üzere 2470 astronomi sitesi bulunmaktadır. Astronomi sitelerinin listesi ilgili web¹ adresinden indirilmiş olup bu astronomi sitelerinin 284’ü kuzey 2185 tanesi güney yarım kürede bulunmaktadır. Bu liste filtrelenmiş bir liste olmadığı için içerisinde amatör, profesyonel, tarihi ve popüler olmak üzere birçok astronomi sitesi bulunmaktadır. Bu tez çalışmasının çıktılarının sadece bilimsel amaçlı kullanılan astronomi sitelerinin ışık kirliliği üzerine olacağından ilk olarak listenin filtreleme işlemi yapılmıştır. 1m ve üzeri ayna çapına sahip teleskopların bulunduğu astronomi siteleri kendi web sitelerinden edinilen bilgiler doğrultusunda teyit edilmiştir ve 1m altında aynı çapına sahip teleskopların bulunduğu astronomi siteleri çalışmadan çıkarılmıştır. İkinci kriter olarak 1m ve üzeri ayna çapına sahip teleskopların bulunduğu astronomi sitelerinin NASA Astrophysics Data System (ADS)² adresinden bilimsel çıktıları ve bu bilimsel çıktıların yılları listelenmiştir. Son beş yıl içerisinde bilimsel üretkenliği olmayan astronomi siteleri elenmiştir. Bu elemeler sonrasında 84 adet astronomi sitesi kalmış olup nihai liste oluşturulmuştur. Astronomi sitelerinin sınıflandırma işlemini anlatan akış şeması Şekil 3.1.’de verilmiştir.

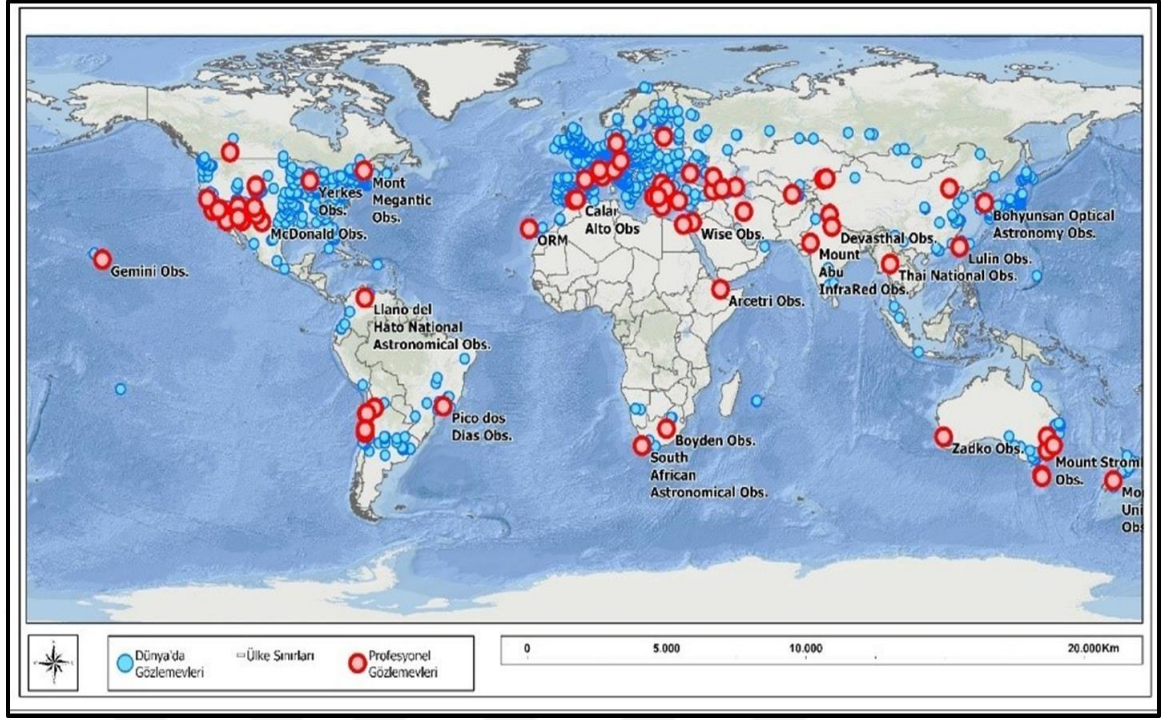
¹projectpluto.com

²adsabs.harvard.edu



Şekil 3.1. Astronomi sitelerinin sınıflandırılmasında izlenen adımları gösteren akış şeması.

Dünya genelinde astronomi sitelerinin dağılımı Şekil 3.2.'de verilmiştir. Mavi noktalar Dünya'da bulunan 2470 astronomi sitesini, kırmızı noktalar sınıflandırılmış nihai liste sonucu elde edilen 84 astronomi sitesini, gri çizgiler ise ülke sınırlarını temsil etmektedir. Astronomi sitelerinin Batı Avrupa ve Güney Amerika'da yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 3.2. Dünya'da ayna çapı 1 metre ve üzeri olan 84 profesyonel astronomi sitesinin haritada konumları.

Astronomi sitelerinin bulunduğu ülke, boylam, enlem, yükseklik, teleskop ayna çapı, kategori sınıf ve web sitesi bilgileri ile birlikte Çizelge 3.1.'de verilmiştir. Çizelge 3.1. +1m teleskop çapına sahip profesyonel 84 astronomi sitesinin sırasıyla ülke, boylam, enlem, yükseklik, teleskop açıklığı (diametre), ait olduğu sınıf (+4m: 4m ve üzeri ayna çapına sahip teleskop, +3m: 3m ve üzeri açıklığa sahip teleskop, +2m: 2m ve üzeri açıklığa sahip teleskop +1m: 1m ve üzeri açıklığa sahip teleskop), kategori (o:optik, i:infrared, n:near infrared, x:x ışını, g:gamma, s:solar) ve web sitesi bilgilerini içermektedir. Bu astronomi siteleri bünyesinde listesinde yalnızca (sub-) millimetre, yalnızca radyo ve yalnızca güneş teleskobu bulunduran astronomi siteleri alınmamıştır. Bunun sebebi ise radyo ve güneş ve (sub-) milimetre teleskoplarının ışık kirliliğinden etkilenmemesidir.

Çizelge 3.1. +1m teleskop çapına sahip profesyonel 84 astronomi sitesinin öznitelik bilgileri.

NO	Astronomi Sitesi	Ülke	Boylam	Enlem	Y(m)	AÇ (cm)	S	K	Websitesi
1	NANTEN2	Şili	-67,7	-22,97	4771	400	+4m	o	astro.uni-koeln.de
2	Gemini	ABD	-155,47	19,82	3916	810	+4m	o, 1	gemini.edu
3	Gemini -2	Şili	-70,73	-30,24	2,722	810	+4m	o, 1	gemini.edu
4	Mauna Kea	ABD	-155,47	19,82	3916	820	+4m	ı, r	ifa.hawaii.edu
5	Mt. Graham Int.	ABD	-109,89	32,7	3089	840	+4m	o	mgio.arizona.edu
6	Eastern Anatolia	Türkiye	41,23	39,78	2913	400	+4m	o, 1	-
7	Cerro Pachon	Şili	-70,74	-30,24	2600	810	+4m	o	noirlab.edu
8	Paranal	Şili	-70,4	-24,63	2322	820	+4m	o, 1	eso.org
9	Las Campanas	Şili	-70,69	-29,02	2284	650	+4m	o	lco.cl
10	Lowell	ABD	-111,66	35,2	2106	428	+4m	o	lowell.edu
11	Special Astrophys	Rusya	41,44	43,65	2064	600	+4m	o, r	sao.ru

Çizelge 3.1. +1m teleskop çapına sahip profesyonel 84 astronomi sitesinin öznitelik bilgileri.
(devamı)

NO	Astronomi Sitesi	Ülke	Boylam	Enlem	Y(m)	AÇ (cm)	S	K	Websitesi
12	Cerro Tololo Inter American	Şili	-70,81	-30,17	1888	410	+4m	o, n1	-
13	F. L. Whipple	ABD	-110,88	31,68	1858	650	+4m	o	linmax.sao.arizona.edu
14	Kitt Peak National	ABD	-111,6	31,96	1810	400	+4m	o	noao.edu
15	McDonald	ABD	-104,02	30,67	1740	920	+4m	o,1	mcdonalobservatory.o
16	Palomar	ABD	-116,87	33,36	1676	508	+4m	o	astro.caltech.edu
17	South African Astronomical	Güney Afrika	18,48	-33,93	12	1100	+4m	o	sao.ac.za
18	University of Tokyo Atacama	Şili	-67,74	-22,99	5157	100	+1m	o,1	ioa.s.u-tokyo.ac
19	Llano del Hato National Astronomical	Venezuela	-70,87	8,79	3350	122	+1m	o	cida.ve
20	Sierra Nevada	İspanya	-3,3	37,06	3201	150	+1m	o	osn.iaa.es
21	Vatican Adv. Tec. Telescope	ABD	-109,89	32,7	3089	183	+1m	o	vovatt.org
22	Cloudfcroft	ABD	-105,73	32,98	2727	120	+1m	o	-
23	Mount Lemmon	ABD	-110,79	32,44	2679	150	+1m	o,1	astro.arizona.edu
24	Cerro Armazones	Şili	-70,2	-24,6	2641	150	+1m	o, 1	eso.org
25	Lulin	Tayvan	120,87	23,47	2634	100	+1m	o	lulin.ncu.edu
26	Tien Shan Astronomical	Kazakistan	76,97	43,06	2581	100	+1m	1	aphi.kz
27	Pic du Midi	Fransa	0,14	42,94	2538	200	+1m	o	omp.eu
28	MMT	ABD	-110,89	31,69	2369	182	+1m	o	mmto.org
29	ORM	İspanya	-17,89	28,76	2335	104	+1m	o	iac.es
30	Maidanak Observatorium	Özbekistan	66,94	38,68	2296	150	+1m	o	maidanak.uz
31	United States Naval	ABD	-111,74	35,18	2186	155	+1m	1,o	cnmoc.usff.navy.mil
32	TÜBİTAK National	Türkiye	30,34	36,82	2105	150	+1m	o	tug.tubitak.gov.tr
33	Table Mountain	ABD	-117,68	34,38	2028	100	+1m	o	tmf.jpl.nasa.gov
34	Rozhen	Bulgaristan	24,74	41,69	1608	200	+1m	o,s	NAO-Rozhen
35	Pico dos Dias	Brezilya	-45,58	-22,53	1575	160	+1m	o	lna.br
36	Skinakas	Yunanistan	24,9	35,21	1482	130	+1m	o	skinakas.physics.uoc
37	Mount Abu InfraRed	Hindistan	72,78	24,65	1431	120	+1m	1	prl.res.in
38	Boyden	Güney Afrika	26,4	-29,04	1323	150	+1m	o	kasi.re.kr
39	Shamakhi Astrophysical	Azerbaycan	48,6	40,78	1318	200	+1m	o,s	Shao.az
40	Rothney Astrophysical	Kanada	-114,29	50,87	1256	180	+1m	o	science.ucalgary.ca
41	Assy Türgen	İtalya	77,87	43,23	1045	150	+1m	o	welcome.kz
42	Mont Megantic	Kanada	-71,15	45,46	1019	160	+1m	o,1	astrolab.qc.ca

Çizelge 3.1. +1m teleskop çapına sahip profesyonel 84 astronomi sitesinin öznitelik bilgileri.
(devamı)

NO	Astronomi Sitesi	Ülke	Boylam	Enlem	Y(m)	AÇ (cm)	S	K	Websitesi
43	Wise	İsrail	34,76	30,6	840	100	+1m	o	wise-obs.tau.ac
44	Bohyunsan Optical Astronomy	Güney Kore	128,97	36,16	829	180	+1m	o, ni	-
45	Mount John University	Yeni Zelanda	170,47	-43,99	710	180	+1m	o	canterbury.ac.nz
46	Mount Stromlo	Avustralya	149,01	-35,32	637	127	+1m	o, i	rsaa.anu.edu.au
47	Greenhill	Avustralya	147,29	-42,43	609	127	+1m	o	utas.edu.au
48	Haute-Provence	Fransa	5,71	43,93	572	193	+1m	o	obs-hp.fr
49	Kottamia Astronomical	Mısır	31,83	29,93	426	188	+1m	o	nriag.sci.eg
50	ÇOMÜ Ulupınar	Türkiye	26,47	40,1	309	120	+1m	o	physics.comu.edu.tr
51	Las Cumbres	Çin	-119,86	34	5000	100	+1m	o	lco.global
52	Merate	İtalya	9,43	45,71	304	100	+1m	o	merate.mi.astro.it
53	Yerkes	ABD	-88,56	42,57	264	100	+1m	o, s	yerkesobservatory.org
54	Canopus Hill	Avustralya	147,43	-42,85	228	100	+1m	o	-
55	Lyon	Fransa	4,78	45,69	220	100	+1m	o	observatoire.univ-lyon
56	Moletai Astronomical	Lithuania	25,56	55,32	174	165	+1m	o	mao.tfai.vu.lt
57	Arcetri	İtalya	11,25	43,75	153	150	+1m	o	arcetri.inaf.it
58	Zadko	Avustralya	-31,36	-115,71	0	100	+1m	o	zt.ems.uwa.edu.au
59	Hamburg	Almanya	10,24	53,48	-	120	+1m	o	astro.inaoep.mx
60	Wyoming Infrared	ABD	-105,98	41,1	2713	230	+2m	i	physics.uwyo.edu
61	Lick	ABD	37,34	-121,64	3283	240	+2m	o, s	mthamilton.ucolick.org
62	National Astronomical of Mexico	Meksika	-115,46	31,04	2675	210	+2m	o	OAN SPM
63	Thai National	Tayland	98,49	18,59	2340	240	+2m	o	-
64	Nordic Optical Telescope	İspanya	-17,89	28,76	2335	256	+2m	o	not.iac.es
65	Chelmos	Yunanistan	22,2	37,99	2158	230	+2m	o	helmos.astro.noa.gr
66	Guillermo Haro	Meksika	-110,38	31,05	2069	210	+2m	o	astro.inaoep.mx
67	Indian Astronomical	India	78,96	32,77	4500	201	+2m	o	iiap.res
68	MDM	ABD	-111,62	31,95	1743	240	+2m	o	lsa.umich.edu
69	Mount Wilson	ABD	-118,06	34,23	1517	250	+2m	o	mtwilson.edu
70	Byurakan Astrophysical	Ermenistan	44,27	40,33	1316	260	+2m	o	baa.am
71	Beijing Astronomical	Çin	117,58	40,4	789	216	+2m	o, i	english.nao.cas.cn
72	Xinglong Station (NAOC)	Çin	117,58	40,39	723	216	+2m	o, i, x	xinglong-naoc.org
73	Crimean Astrophysical	Ukrayna	34,02	44,73	518	260	+2m	o, s	crao.ru
74	National of Athens	Yunanistan	23,72	37,97	77	230	+2m	o	noa.gr
75	Iranian National	İran	51,32	33,67	3177	340	+3m	o	ino.org.ir

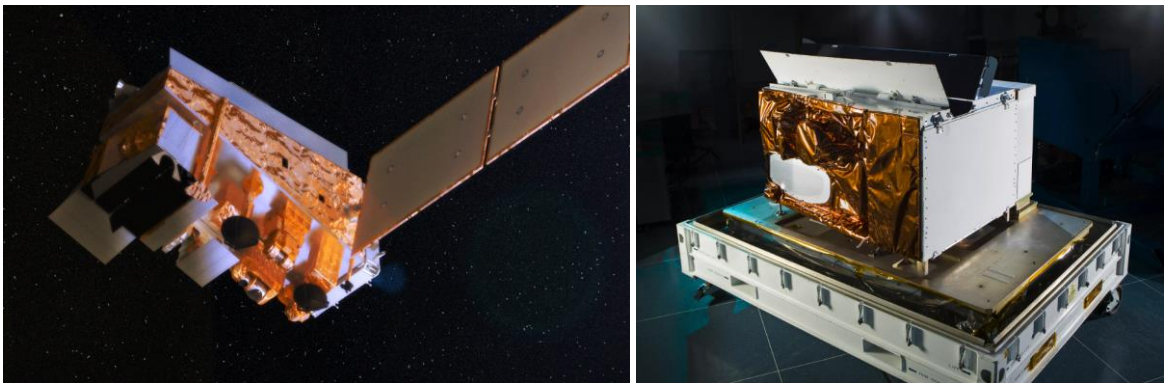
Çizelge 3.1. +1m teleskop çapına sahip profesyonel 84 astronomi sitesinin öznitelik bilgileri. (devamı)

NO	Astronomi Sitesi	Ülke	Boylam	Enlem	Y(m)	AÇ (cm)	S	K	Websitesi
76	Apache Point	ABD	-105,82	32,78	2778	340	+3m	o, m	apo.nmsu.edu
77	La Silla	Şili	-70,74	-29,26	2198	360	+3m	o	ls.eso.org
78	Devasthal	Hindistan	79,69	29,36	2016	360	+3m	o	aries.res.in
79	Calar Alto	İspanya	-2,55	37,22	1965	350	+3m	o, 1	caha.es
80	Starfire Optical Range	ABD	-106,46	34,96	1842	350	+3m	o	afrl.af.mil
81	WIYN	ABD	-111,6	31,96	1810	350	+3m	o	wiyn.org
82	Siding Spring	Avustralya	149,06	-31,27	943	390	+3m	o	rsaa.anu.edu.au
83	European Southern	Almanya	11,67	48,26	482	393	+3m	o, 1	eso.org
84	Anglo-Australian	Avustralya	151,15	-33,8	38	380	+3m	o, m	aaao.gov.au

Dünyadaki kayıtlı +1m teleskop yarıçapına sahip profesyonel bütün astronomi sitelerini kapsayan bu tez çalışmasında var olan astronomi sitelerinin gelecekte ışık kirliliğinden nasıl etkileneceği araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan veriler iki alt başlık halinde sunulmuştur. İlk olarak yapay ışık verisi için kullanılan veriler ve veri tabanı, ikinci aşamada ise SLEUTH kentsel gelişim modeli için kullanılan veri setleri ve veri tabanlarından bahsedilecektir.

Yapay Işık

Çalışmada kullanılan yapay ışık verileri Dünya'dan 833 km yükseklikte Güneş'le eş zamanlı bir yörüngede bulunan Suomi National Polar-Orbiting Partnership (Suomi NPP) uydusu üzerinde bulunan Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) enstrümanına ait Day Night Band (DNB) tarafından algılanmış verilerdir (Şekil 3.3.). Suomi NPP uydusu, Amerika Birleşik Devletleri National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) tarafından işletilmektedir.



Şekil 3.3. Sol panelde Suomi National Polar-Orbiting Partnership (Suomi NPP) uydusu ve sağ panelde Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) enstrümanına ait bir fotoğraf (Kaynak: nesdis.noaa.gov).

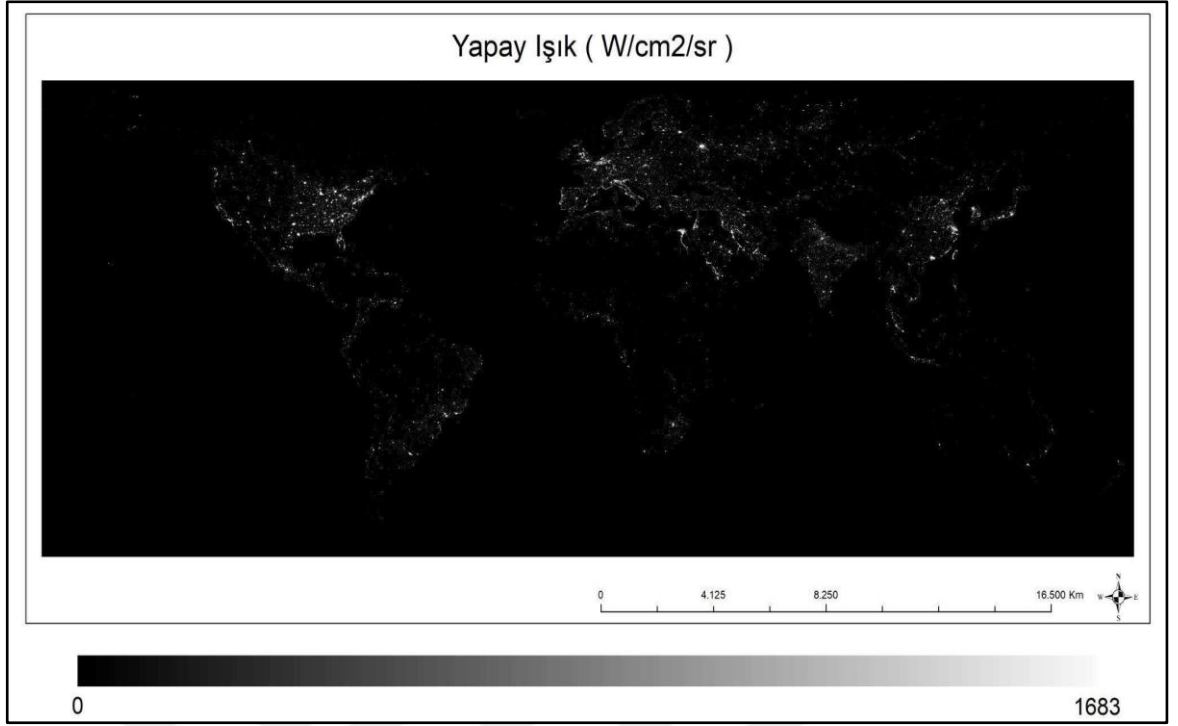
Suomi NPP üzerindeki DNB, tam güneş ışığından yarı aydınlatılmış ay diskini gece aydınlatmasına kadar aydınlatma koşulları altında $3 \times 10^{-9} \text{ Wcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 'den $0,02 \text{ Wcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 'e kadar yaklaşık 7 büyüklük mertebesinde Dünya'nın görünür ve yakın kızılötesi spektral görüntülerini

sağlamaktadır. Spektral olarak DNB pankromatiktir ve 500 nm ila 900 nm arasındaki dalga boylarını kapsar. Düşük parlaklık seviyelerinde üstün SNR (signal-to-noise ratio) ve tüm alan boyunca neredeyse sabit ayak izi nedeniyle, DNB verileri şehir ışıklarını, gaz fişeklerini, geceleri yangınları ve bulutları, aurora ve hava parıltısını incelemek için benzersiz bir şekilde uygundur (Miller ve ark., 2012; Elvidge ve ark., 2013).

Nadirde 750 m uzamsal çözünürlüğe sahip 16 orta çözünürlüklü banda (M bantları, her biri 16 dedektörlü), nadirde 375 m uzamsal çözünürlüğe sahip beş görüntüleme çözünürlüklü banda (I bantları, her biri 32 dedektörlü) ve tarama boyunca neredeyse sabit 750 m uzamsal çözünürlüğe sahip bir pankromatik DNB'ye sahiptir. 0,41 – 12,5 μm dalga boyu aralığında toplamda 22 görüntüleme ve radyometrik bant ile işlevsel çevresel görüntüleme ve sayısal hava tahminleri yapabilmektedir (Cao ve ark., 2013). Sensörleri bulutlar, deniz yüzey sıcaklığı, okyanus rengi, kutup rüzgarları, bitki örtüsü kesri, aerosol, yangın, kar ve buz, bitki örtüsü gibi yirmiden fazla çevresel veriyi kaydetmektedir. Görüntüleme bantlarının aksine DNB, 32 birleştirme (32-aggregate) modu kullanılarak elde edilen tüm tarama boyunca 750 m'lik neredeyse sabit bir uzamsal çözünürlük sunmaktadır. Çapraz iz taramalı bir radyometre olan VIIRS $\pm 56.06^\circ$ 'lik nominal Dünya görüşü (Earth View) tarama açılarına ve I-bantları ve M-bantları ile yaklaşık olarak aynı alanı kapsayan ~ 3060 km'lik bir tarama genişliğine sahiptir (Wang ve Cao, 2019). VIIRS üzerinde yer alan DNB Ekvator yakınında $0,5 \times 0,5$ km^2 'ye karşılık gelen 15 açılı saniyelik çözünürlüğe sahiptir. Günlük olarak üretilen Coğrafik Bilgi Sistemi (CBS) veri seti ise piksel başına 742 m mekânsal çözünürlüğe sahip olup toplamda 3060 km'lik alanı tek karede gösterir.

DNB değerleri $Wcm^{-2}sr^{-1}$ birimindedir. 12 bit radyometrik ve 750 m yersel çözünürlükte veri kaydedebilmekte ve gece – gündüz olacak şekilde aynı konumdan günde 2 geçiş yapabilmektedir. Algılama aralığı 0,5 – 0,9 μm olup merkez dalgaboyu 0,7 μm 'dir (Cavazzani ve ark., 2020). Günlük olarak üretilen, gece görüntülerini içeren CBS veri seti, Dünya yüzeyinde 75° Kuzey ve 65° Güney enlemleri arasını kapsar ve tüm Dünya yüzeyini 6 çerçevede görüntülemektedir. Uydu verileri günlük aylık ve yıllık olmak üzere kaçak ışık, ve bulut maskesi düzeltilmesi ile birlikte kalibrasyonu yapılmış halde kullanıcıya sunulmaktadır (Elvidge ve ark., 2012). Bu tez çalışmasında aylık ve yıllık veriler ilgili web³ adresinden edinilmiştir. Veri indirme işlemi, 2012-2023 yıllarını kapsamaktadır. Şekil 3.4.'de 2022 yılı için yapay ışık örnek olarak verilmiştir. Şekil 3.4.'de beyaz yerler parlaklığı yüksek olan alanları siyah yerler ise parlaklığı düşük olan alanları temsil etmektedir.

³ payneinstitute.mines.edu



Şekil 3.4. VIIRS DNB'den elde edilen 2022 yılına ait küresel yapay ışık haritası.

Suomi NPP uydusundaki DNB enstrümanı, gündüz ve gece boyunca görünür ve yakın kızılötesi sürekli gözlem yapma kapasitesine sahip kalibre edilmiş bir sensördür. VIIRS DNB, geleneksel AirMass sensörlerinden farklıdır çünkü düşük yoğunluk nedeniyle tespit edilmesi zor olan görünür ve yakın kızılötesi ışığı ölçer (Miller ve ark., 2018). Bu hassasiyet, DNB'nin MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) ve MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) gibi düşük EEO (Earth-Equatorial Orbit) uydularındaki bazı pasif tabanlı sensörler için görünmez olan gece ışıklarını algılamasını sağlar (Zhang ve ark., 2022). DNB'nin geceleri Dünya'nın düşük ışıklı sahnelerini gözlemleme kapasitesinin, yansıyan güneş ışığından on milyon kat daha zayıf olarak tanımlanması, hassasiyetinin bir kanıtıdır (Zhang ve ark., 2022).

VIIRS DNB'nin gece hem doğal hem de yapay ışıkları gösterebilmesi, şehirleşmenin tahmini, bölgesel kalkınmanın değerlendirilmesi, aerosoller ve bulut örtüsü gibi atmosferik koşulların izlenmesi gibi amaçlar için daha yüksek çözünürlük sağlar (Zhou ve ark., 2015; Wang ve ark., 2017; Changruenngam, 2023). Gece yansıyan ay ışınımını ölçme konusundaki çok yönlülüğü, bu aracı çevresel koşulların ve süreçlerin tahmin edilmesinde ve izlenmesinde daha da etkili hale getirmektedir (Cao ve ark., 2019). VIIRS DNB'nin kalibrasyon performansı iyi bir şekilde geliştirilmiş, NTL (Night Time Light) ürünleri ve gece boyunca farklı çevresel koşulların nicel karakterizasyonları, doğal ışık veya yapay ışık kaynaklarının sinyalleri ile mümkün hale getirilmiştir (Wang ve ark., 2018; Zhang ve ark., 2018). Enstrümanın radyometrik kalibrasyonunun güneşe göre yapılması, diğer düşük yoğunluklu ışıkların yanı sıra soluk yansıyan ay ışıklarını da doğru ve tutarlı

bir şekilde gözlemlemesini sağlar (Cao ve ark., 2014). DNB'nin düşük ışık kalibrasyon doğruluğu ile yapılan deneyler, aktif yer ışık tabanı ile düşük ışıklı gece görüntülemesi için etkili bir yol açmıştır (Cao ve ark., 2015). VIIRS sistemi altındaki Suomi NPP uydusundaki DNB cihazı, gece görüntüleme olanaklarını önemli ölçüde artıran ve yapay ışıkla aydınlatılan konumlar hakkında ayrıntılı bilgi edinmeye yardımcı olan gelişmiş ve yenilikçi bir araçtır.

DNB aracı ile toplanan verilerin güvenilirliğini ve doğruluğunu araştıran önceki bazı çalışmalar, kanıtlanan değerler arasında korelasyonlar bularak bilgileri kalibre etmiş ve incelemiştir (Cao ve ark., 2013; Wang ve ark., 2018; Solbrig ve ark., 2020; Choi ve Cao, 2021). Bağımsız bir araştırma çalışmasında Cao ve ark (2013), Suomi NPP VIIRS projesi için SNC SDR'nin uzun vadeli performans değerlendirmesinin yanı sıra doğrulama ve geçerlilik yöntemlerini kullanmış ve bir buçuk yıllık kalibrasyon ve doğrulamanın ardından cihazın en iyi şekilde çalıştığını kanıtlamıştır (Cao ve ark., 2013). DNB cihazının farklı çevresel parametreleri güvenilir bir şekilde ölçebildiğinin kanıtlanması, çalışma sırasında toplanan verilerin doğrulanması için çok önemlidir. Yaptıkları araştırmada Solbrig ve ark (2020), Suomi-NPP uydusunun VIIRS DNB'si yardımıyla gece atmosferik parametrelerinin yeniden denenmesi için yüzey ışıklarının kararlılığını tanımlamıştır. Bu kararlılık değerlendirmesi, özellikle gece atmosferini ve olaylarını gözlemlerken ve ölçerken cihazdan daha tutarlı sinyaller elde etmek için önemlidir. Buna ek olarak, Wang ve ark (2018) VIIRS cihazının DNB sensörünün kalibrasyonunun ve performansının geliştirildiğini ve bunun da Gece Işığı (NTL) ürünlerinin kalibrasyonunun geliştirilmesine yol açtığını vurgulamıştır (Wang ve ark., 2018). Bu, özellikle afet kaynaklı elektrik kesintilerinin yaşandığı bölgelerde ve kentleşme oranının takibinde verilerin güvenilir hale getirilmesi için kalibrasyon performansının iyileştirilmesine yardımcı olacaktır. Choi ve Cao (2021), DNB sensörü için yerleşik güneş difüzörünün kalibrasyon doğrulamasını hedeflemiş; ayrıca cihazın spektral tepkisi ve dinamik aralığı hakkında tartışmışlardır (Choi ve Cao, 2021). DNB cihazında kullanılan kalibrasyon süreçlerinin ve farklı bilimsel amaçlar için elde edilen verilerin doğrulanmasına yönelik ana yöntemlerin bilinmesi, sunulan verilerin geçerliliğinin değerlendirilmesinde esastır. Suomi NPP uydusuna yerleştirilen DNB enstrümanı tarafından toplanan radyasyon verilerinin V, C ve S performansları, çevre ve meteorolojik gözlemden afet yardımı ve akıllı şehirlerin analizine kadar çeşitli amaçlar için toplanan bilgilerin güvenilirliğini ve kesinliğini belirlemede çok önemlidir.

SLEUTH modeli ilk olarak Clarke ve ark (1993) tarafından orman yangınının yayılma ve yok olma davranışını simüle etmek için tasarlanmış hücresel otomat tabanlı bir modeldir. Modelin ilk operasyonel versiyonu (o zamanki adıyla Kentsel Büyüme Modeli) USGS Kentsel Dinamikler araştırma programı tarafından verilen desteklerle ile geliştirilmiştir (Kirtland ve ark., 1994). Bu desteklerle ve USGS Coğrafyacısı Len Gaydos tarafından öne sürülen arazi örtüsü modellemesi fikri ile model, kentsel gelişmenin yanında arazi örtüsünün de modellenmesine açık hale gelmiştir (Clarke, 1997). Kentsel gelişmeyi ve arazi örtüsünü aynı anda modellenenebilecek şekilde formüle edilen model Gigalopolis projesi (Clarke ve ark., 1997) kapsamında önce New York Hunter

College'da, sonra da Santa Barbara'daki California Üniversitesi'nde yayınlanmıştır. 1996'dan sonra proje web sitesi dokümantasyon ve bir tartışma forumu içerecek şekilde genişletilmiş ve model dinamik bellek tahsisi ile 2. versiyona geliştirilmiştir. Tommy Cathey ve Mark Feller ise SLEUTH modeline ait kodu EPA'nın süper bilgisayarlarına uyumlu hale getirmişlerdir. Böylece kodun ve modelin 3. versiyonu piyasaya sürülmüştür (Clarke ve ark., 2007). Şuan kullanılan son sürüm hala bakım ve onarımı daha az sıklıkla yapıldığı için hala beta sürümüdür. Hücresel otomat mantığına dayanan bu model için kullanılan kod başlangıçtan beri açık kaynaklı bir C kodu olup ilerleyen dönemlerde Linux ve Windows tabanlı bir UNIX emülatörü olan Cygwin altında çalışması sağlanmıştır.

Hücresel otomat (CA) ilk olarak 1940'ların sonunda S. Ulan ve J. von Neumann tarafından bir kafesin her hücreğine yerleştirilen ve birbirine bağlanan aynı Turing makinesinin kopyaları gibi geliştirilmiştir. Wolfram (1984) karmaşık doğal olayların modellenebileceğini göstermiş ve daha sonra, bileşenler arasındaki yerel etkileşimlerin uzay ve zamanda küresel değişiklikler yarattığı ayrık dinamik sistemler olarak tanımlanan Hücresel Otomatlar Teorisinin (Wolfram, 2002) temellerini atmıştır. Hücresel otomat simülasyonu kısa süre içinde fiziksel bilimlere, matematiğe ve doğa bilimlerine uygulanmıştır. Tobler (1979) ilk olarak hücresel uzay modellerinin coğrafi modellemeye uygulanmasını önermiştir. 1980'lerde, kentsel genişlemenin simülasyonu için hücresel otomat tabanlı modellere yönelik ilk teorik yaklaşımlar ortaya çıkmıştır (Couclelis, 1985; Batty ve Xie, 1994; White ve Engelen, 1994).

Hücresel otomat (CA), zaman içinde mekânsal düzenlemelerde hesaplamalı deneylere izin veren teorik bir çerçevedir. Bir kentsel CA modeli temelleri şunlardan oluşmaktadır:

- Genellikle kentsel bir alanı kapsayan piksellerden oluşan bir raster ızgara olan bir referans hücre kümesi.
- Kentsel, kentsel değil kümesinde veya kentsel, orman, tarımsal, vahşi arazi, sulak alanlar, su gibi daha ayrıntılı arazi kullanımlarında olabilen ve tüm hücrelerin herhangi bir zamanda bir duruma sahip olacağı şekilde hücrelerle ilişkili bir durum kümesi.
- Zaman içinde durum değişikliklerini yöneten bir dizi kural.
- Bir sonraki zaman diliminde aynı hücrelerin durumlarını ortaya çıkarmak için kuralların bir zaman dilimindeki duruma uygulandığı bir güncelleme mekanizması.
- Çerçevenin başlangıç koşulu.

SLEUTH modelinde çalışma alanının ızgaralı bir rasteri sayısallaştırılır veya görüntülerden oluşturulur ve çerçeve belirli ve sabit bir uzamsal çözünürlüğe veya hücrelerin zemin boyutuna ve ayrıca sabit bir uzamsal kapsama, genellikle çalışma alanı için sınırlayıcı bir dikdörtgene sahiptir. Kuralların durumlara art arda uygulanması başlangıç koşullarının ötesinde durumlar ortaya çıkarır ve tüm hücrelerin eşzamanlı olarak güncellendiği bir kural uygulaması zaman içinde bir “yıl” olarak kabul edilir.

SLEUTH kentsel gelişim modeli için beş tür gri tonlamalı Graphics Interchange Format (GIF) görüntü dosyası girdisi gerekmektedir (arazi kullanımı analiz ediliyorsa altı). Tüm katmanlar için “0” var olmayan veya boş bir değerdir, “0 < n < 255” ise var olan bir değerdir. Model, tüm girdi katmanlarının tutarlı sayıda satır ve sütuna sahip olmasını gerektirir. Modelin istatistiksel kalibrasyonu için en az dört kentsel zaman dilimi kullanılmalıdır. Ayrıca, kalibrasyon amacıyla, yollar iki veya daha fazla zaman diliminde temsil edilmelidir. Tüm katmanlar uyum açısından kontrol edilmelidir; kentsel alanlar, hariç tutulan katmanda geliştirilemez olarak tanımlanan yerlerde bulunmamalıdır.

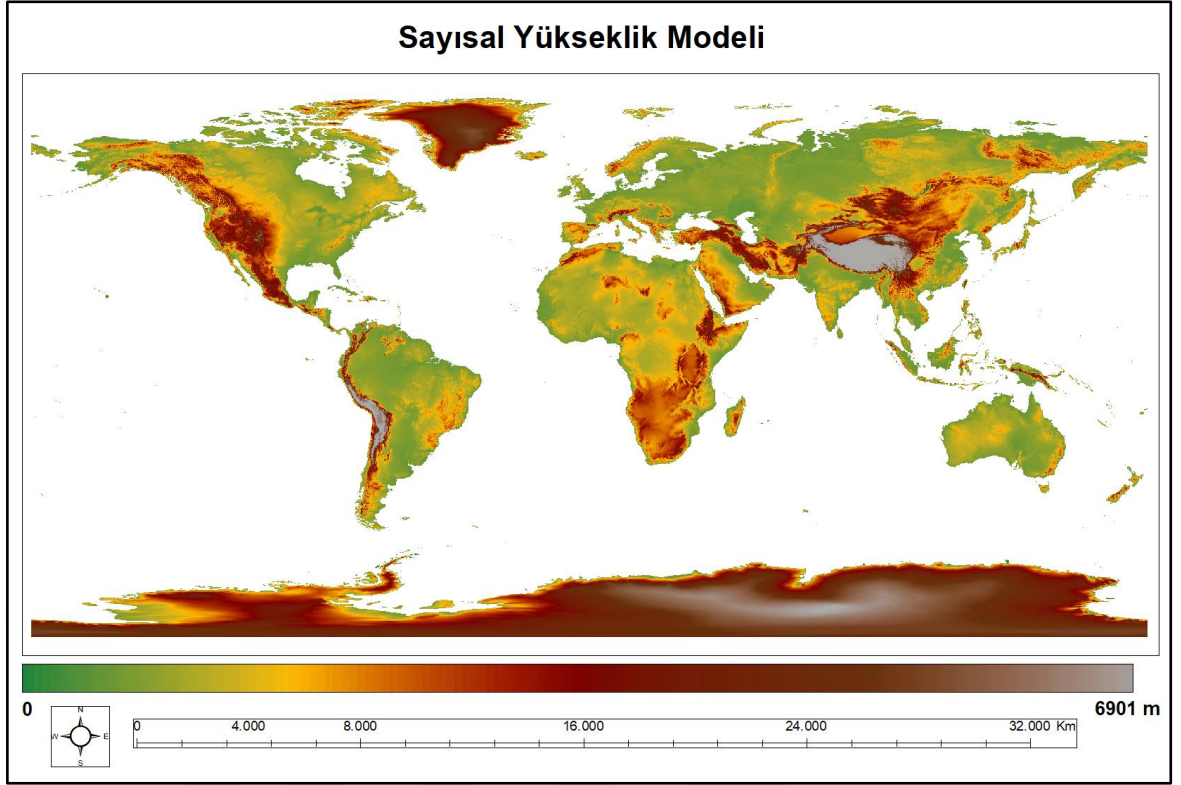
Tüm veri türleri için değişmez standartlar vardır:

- Girdi verilerinin formatı gri tonlamalı GIF formatı olmalıdır.
- Girdi verileri aynı projeksiyona sahip olmalıdır.
- Girdi verileri aynı yersel çözünürlükte olmalıdır.
- Girdi verilerinin satır ve sütun sayıları aynı olmalıdır.
- Girdi verileri standart adlandırmayı takip etmek zorundadır.

Aşağıda model için kullanılacak tüm verilerin (Eğim, Çıkarma Katmanı, Kentsel Alan ve Ulaşım) edinildiği web adresleri ve verilerin özellikleri ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

Eğim

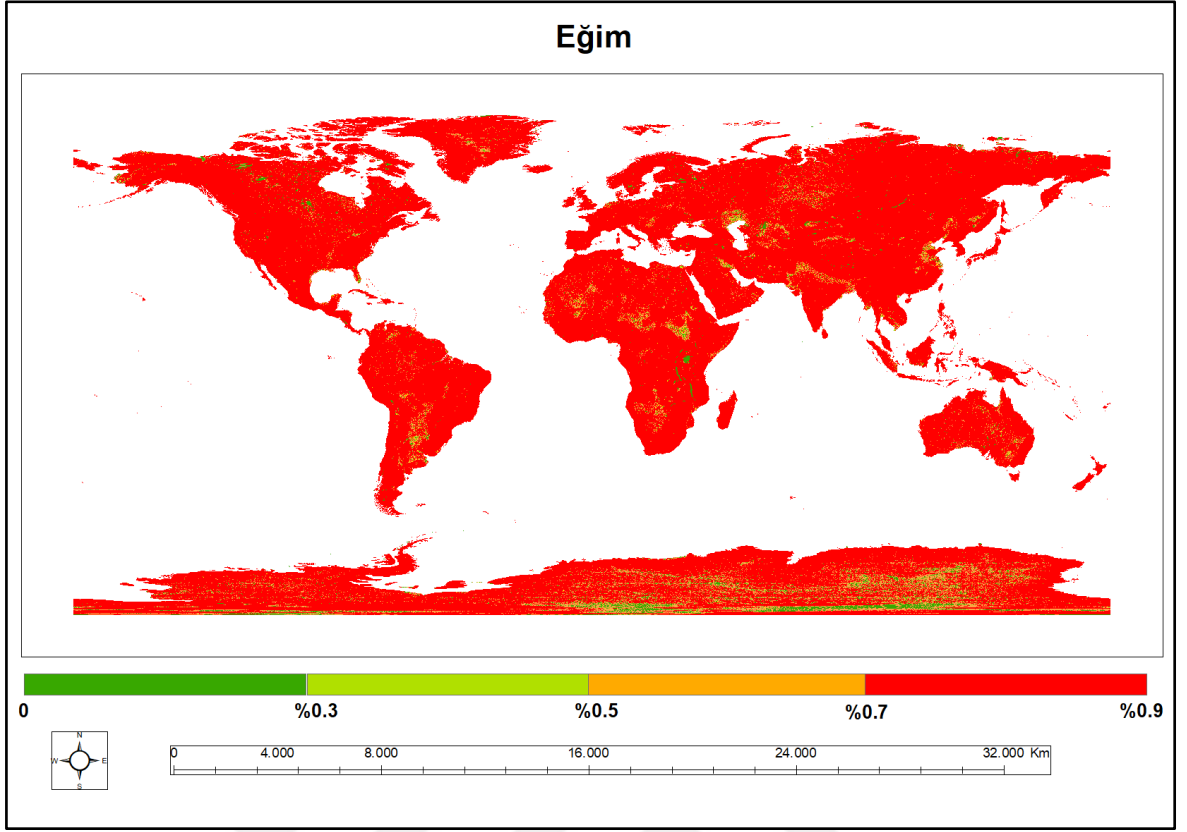
Topoğrafya, genel olarak kentsel gelişim için uygun olan alanın en temel tanımıdır. Düz alanlar, kolay büyüme için en elverişli olanlardır. Ancak eğim arttıkça, alanlar giderek daha az uygun hale gelmektedir (Candau, 2002). SLEUTH modelinde eğim, genellikle bir dijital yükseklik modelinden (DEM) üretilmektedir. Bu tez çalışmasında da eğim parametresinin üretilmesi için küresel kapsama alanına sahip 30 yay saniyelik (yaklaşık 1 km) yatay ızgara aralığında veri sunan bir sayısal yükseklik modeli olan GTOPO30 veri seti (Varga ve ark., 2015) kullanılmıştır. Şekil 3.5.’de GTOPO30 veri setinden elde edilen küresel kapsama alanına sahip dijital yükseklik modeli haritası örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.5. Dünya sayısal yükseklik modeli haritası.

GTOPO30 modelinde yükseklikler düzenli olarak 30 açılı saniyelik (yaklaşık 1 km) aralıklarla ayrılmaktadır. GTOPO30, 90° Güney 90° Kuzey enlemleri ve 180° Doğu 180° Batı boylamları aralığını kapsayan, grid yerleşimi 30 açılı saniye olan ve yükseklik değerleri -407 ile 8752 m aralığında değişen bir veri setidir. DEM’de okyanus yüzeyi “no data” olarak maskelenmiştir ve değer olarak 9999 atanmıştır. Ova kıyı bölgeleri en az 1 m yüksekliktedir. Bu veri setinde yaklaşık olarak 1 km^2 yüzey alanından az küçük okyanus adaları temsil edilmemektedir. Veri seti 33 levhaya bölünmüştür ve 60° Güney ile 90° Kuzey enlemleriyle 180° Doğu ile 180° Batı boylamları arasında kalan alan 27 paftadan oluşur. Her bir pafta 50° enlem ve 40° boylamı kaplamaktadır. Antarktika (90° Güney ile 60° Güney enlemleri ve 180° Doğu ile 180° Batı boylamları arası) 6 paftadan oluşmaktadır. Buradaki her bir pafta 30° enlem ve 60° boylamı kapsamaktadır. Pafta isimleri levhanın sol üst (Kuzeybatı) köşesinin enlem boylamı ile adlandırılmaktadır. Veriler ilgili web⁴ adresinden ücretsiz olarak indirilebilmektedir. Şekil 3.6.’da GTOPO30 yükseklik verisinden elde edilmiş eğim haritası tüm Dünya için verilmiştir.

⁴usgs.gov



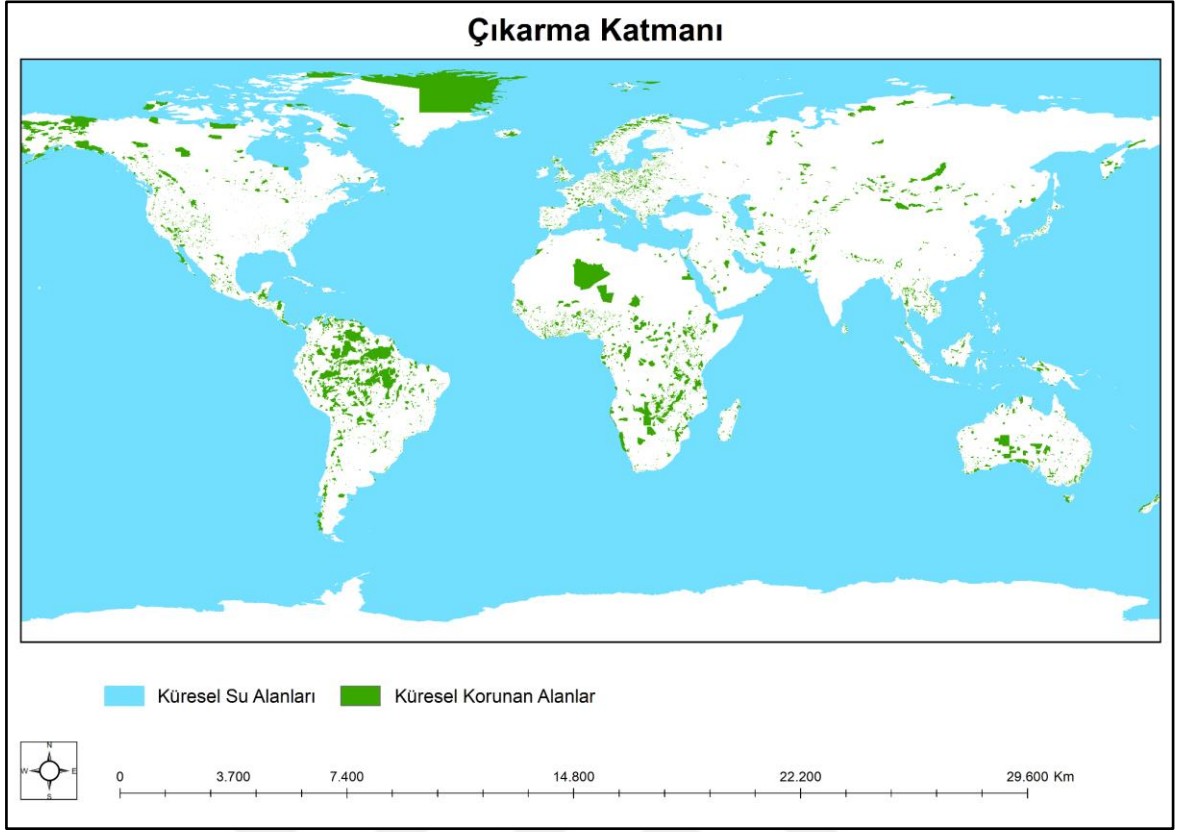
Şekil 3.6. Dünya eğim haritası.

Çıkarma Katmanı

Bu katmanda, kentleşme için uygun olmayan alanların belirtilmesi gerekmektedir. Bu alanlar genellikle kent içerisindeki yeşil alanlar, nitelikli tarım toprakları, su kaynakları ve korunan özel alanlar gibi ortak alanlar olup simülasyonun dışında bırakılacaktır. Bu tez çalışması için küresel bir veri seti sunan Dünya Korunan Alanlar Veritabanı (WPA) kullanılmıştır. WPA, deniz ve karada korunan alanların en kapsamlı küresel veri tabanı olmasının yanında Uluslararası doğa koruma birliği ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı ile yürütülen ortak bir projedir. WPA, Birleşmiş Milletler Çevre Programı Dünya Koruma İzleme Merkezi tarafından yönetilmekte olup, hükümetler, hükümet olmayan organizasyonlar, akademiler ve endüstri ile işbirliği halindedir. WPA aylık olarak güncellenmektedir. Bu veri seti ilgili web⁵ adresinden ücretsiz ve halka açık bir şekilde temin edilebilmektedir. Korunan alanların yanı sıra bu katmanda su alanları da korunan alanlar katmanına dahil edilmiştir. Küresel su alanları için OpenStreetMap veri tabanı⁶ kullanılmıştır. Şekil 3.7.'de korunan alanların ve su alanlarının birleştirilmiş haritası tüm Dünya için verilmiştir.

⁵ protectedplanet.net

⁶ openstreetmap.org

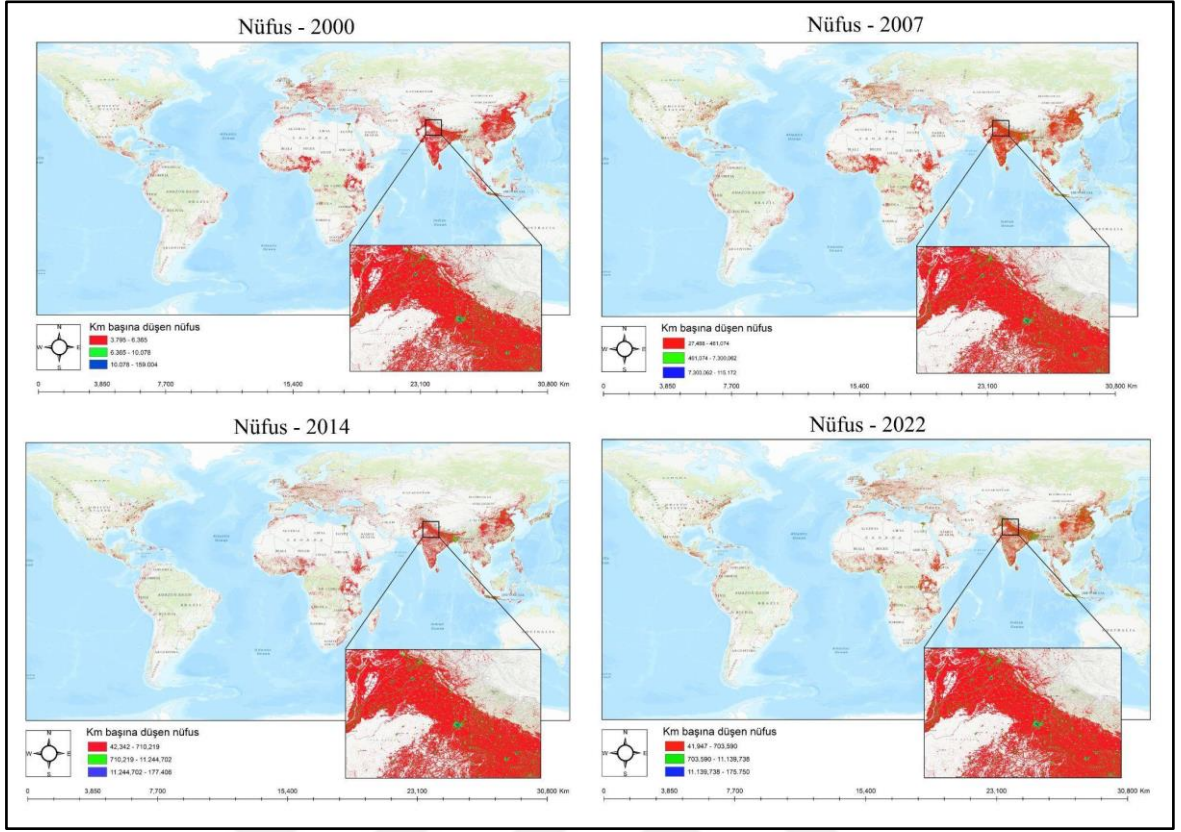


Şekil 3.7. Küresel korunan alan ve küresel su alanlarından elde edilen çıkarma katmanı haritası.

Kentsel Alan

Kentsel alan verisi başlangıç yılı veya tohum için kentsel kapsam, modeli başlatmak için kullanılır ve CA kaynaklı kentsel büyümenin temelini oluşturur. Kalibrasyon için, en erken kentsel yıl tohum olarak kullanılır ve sonraki kentsel katmanlar veya kontrol yılları, birkaç istatistiksel en iyi uyum değerini ölçmek için kullanılır. Bu nedenle, kalibrasyon için en az dört kentsel katmana ihtiyaç vardır: başlangıç için bir ve en küçük kareler hesaplaması için ise üç ek katman. Geçmişte kullanılan yöntemler arasında şehir haritalarının ve hava fotoğraflarının sayısallaştırılması, uzaktan algılanan görüntülerin eşiklenmesi veya nüfus sayımı verilerinden blok yoğunlukları yer almaktadır. Bu tez çalışması için kentsel alan verisi 2000-2022 yılları arasındaki LandScanTM yıllık küresel nüfus dağılımı veri setlerinden elde edilmiştir. LandScanTM, 2000 yılına kadar uzanan verileriyle bir küresel nüfus veritabanıdır. Yüksek çözünürlüklü (30 açılı saniyesi ya da ekvatorunda 1 km) nüfus dağılımı verisi sağlamaktadır. Dağılım, ortamdaki 24 saatlik ortalama dağılımı göstermektedir. Serbest erişim ile ilgili web⁷ adresinden istenilen bölgenin verisine sınırlama olmaksızın ulaşılabilir. Şekil 3.8’de 2000, 2007, 2014 ve 2022 yıllarına ait LandScanTM’den elde edilmiş yıllık nüfus haritaları verilmiştir.

⁷ landscan.ornl



Şekil 3.8. Dünya'nın 2000, 2004, 2007 ve 2022 yıllarına ait nüfus haritaları.

Ulaşım

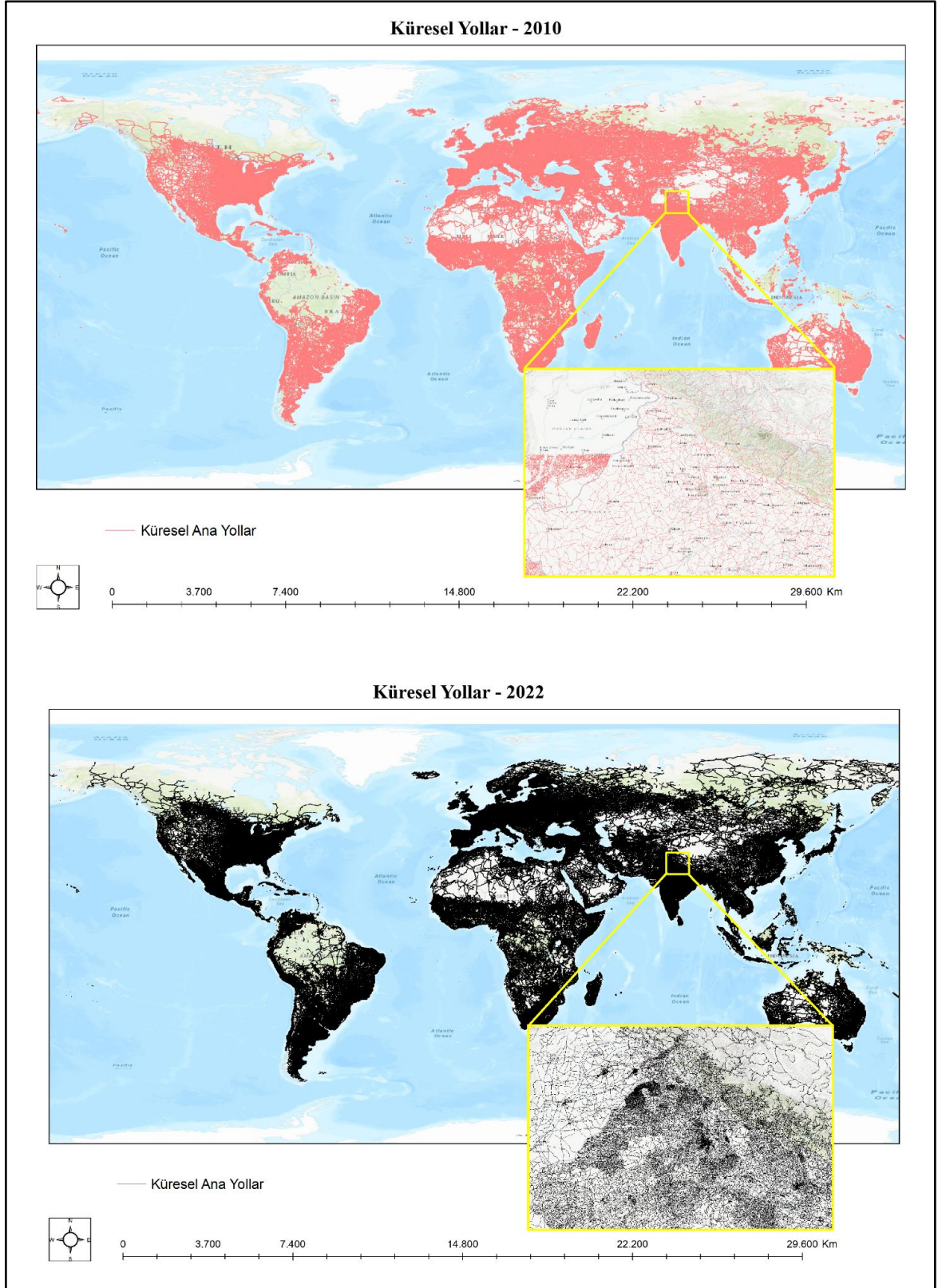
Ulaşım ağı, kentsel gelişimde en önemli faktörlerden biridir. Kent merkezinden uzaklaştıkça, kentsel koridorlar ulaşım ağı boyunca hareket etme eğilimindedir. Ulaşım altyapısı, kentsel büyümeyle birlikte genişlemeye devam eder. SLEUTH'de yer alan karayolundan etkilenen büyüme dinamiği, kentsel gelişimin erişilebilirliğin arttığı yerlere çekilme eğilimini simüle etmektedir. Bir ulaşım ağı, bir bölgenin nasıl geliştiği üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Bu etkiyi kalibrasyona dâhil etmek için, şehrin zaman içindeki büyümesiyle birlikte değişen birkaç yol katmanı istenmektedir. SLEUTH en eski yol katmanı ile başlatılacaktır. Büyüme döngüleri veya "zaman" geçtikçe ve daha yeni bir yol katmanının tarihine ulaşıldığında, yeni katman okunacak ve gelişim buradan devam edecektir. Bu tez çalışmasında küreseş bir kapsama ile üretilen 1980 – 2010 yılları arasındaki güncellemeleri kapsayan lbal Roads Data Development Task Group himayesinde geliştirilen gROADS (Küresel Yollar Açık Erişim Veri Seti – Global Roads Open Access Data Set v1) veri seti eski tarihli veri seti olarak kullanılacaktır. Açık erişim ile ilgili web⁸ adresinden veriye ulaşılabilmektedir. İkinci ve güncel tarihli veri seti olarak Birleşik Krallık tarafından finanse edilen, ücretsiz ve Dünya genelinde coğrafik veri seti yaratmayı amaçlayan bir proje olarak ortaya çıkan OpenStreetMap veri seti kullanılacaktır. Bu verinin ise güncelleme tarihi 2022'dir. OpenStreetMap veri setinin ana odağı ulaşım altyapısı (sokaklar, patikalar, demiryolları, nehirler vb.) üzerine olsa da

⁸ sedac.ciesin.columbia.edu

ayrıca kat, binalar, doğal özellikler ve sahil şeridi ve yönetimsel sınırlar gibi arazi kullanım bilgilerini de toplamaktadır. Veri kalitesi ve kapsamı bölgeler arasında farklılıklar göstermektedir. Veriler ilgili web⁹ adresinden ücretsiz bir şekilde indirilebilmektedir. Şekil 3.9’da tüm Dünya için gROADS veri setinden elde edilen 2010 yılına ait küresel yollar (üst panel), ve OpenStreetMap veri setinden elde edilen 2022 yılına ait küresel yollar (alt panel) verilmiştir.



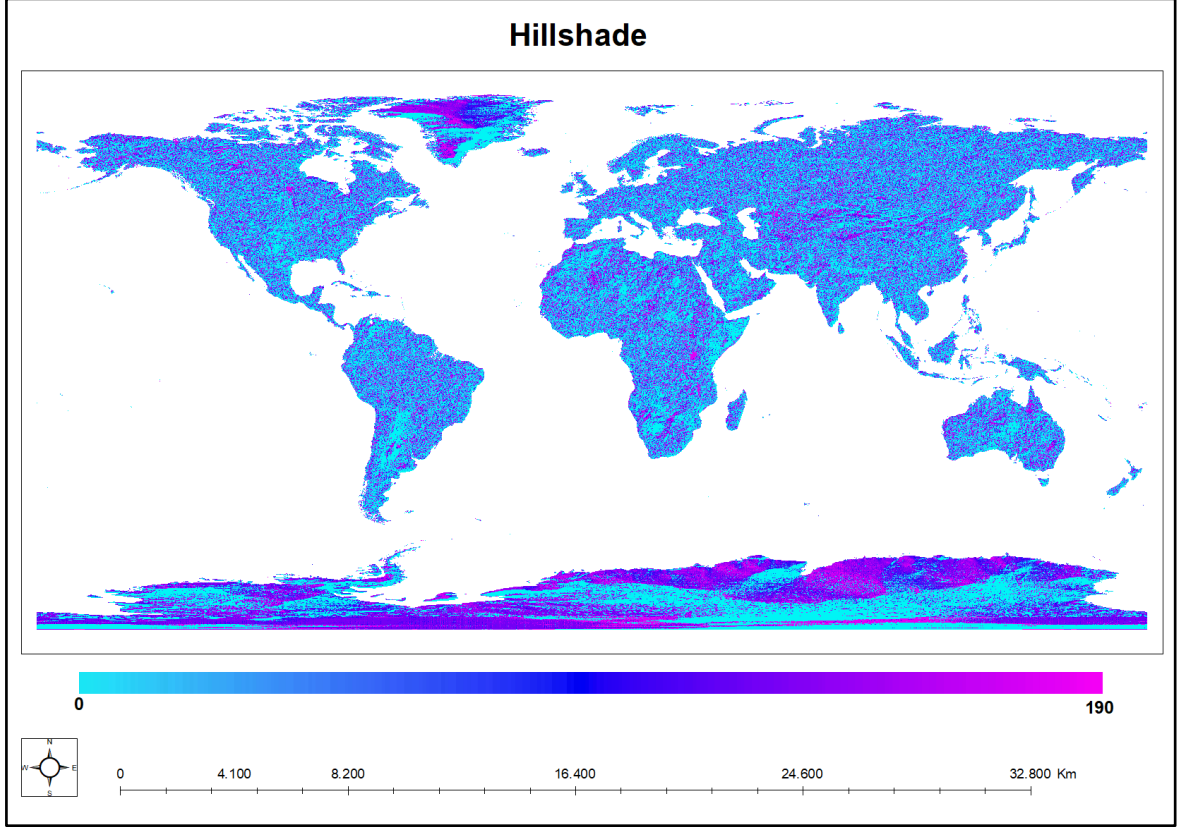
⁹ geofabrik.de



Şekil 3.9. OpenStreetMap ve gROADS veri setinden elde edilen 2010 ve 2022 yıllarına ait Dünya küresel yol haritası.

Hillshade

Kentsel alan verilerine mekânsal bağlam kazandırmak için görüntü çıktısına bir arka plan görüntüsü eklenmektedir. Bu gri tonlamalı bir görüntü olmalıdır ve yaygın olarak bir tepe gölgeli DEM kullanılmaktadır. Bir bölgeye daha fazla tanım vermek için, su kütleleri de bu girdi katmanında temsil edilebilir. Bu, arka plan görüntüsündeki değerleri sıfır (0) olan piksellerin senaryo dosyasında tanımlanan SU olarak atanmasını sağlamaktadır. Şekil 3.10.'da GTOPO30 DEM verisinden elde edilen hillshade verisi örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.10. GTOPO30 DEM verisinden elde edilen hillshade haritası.

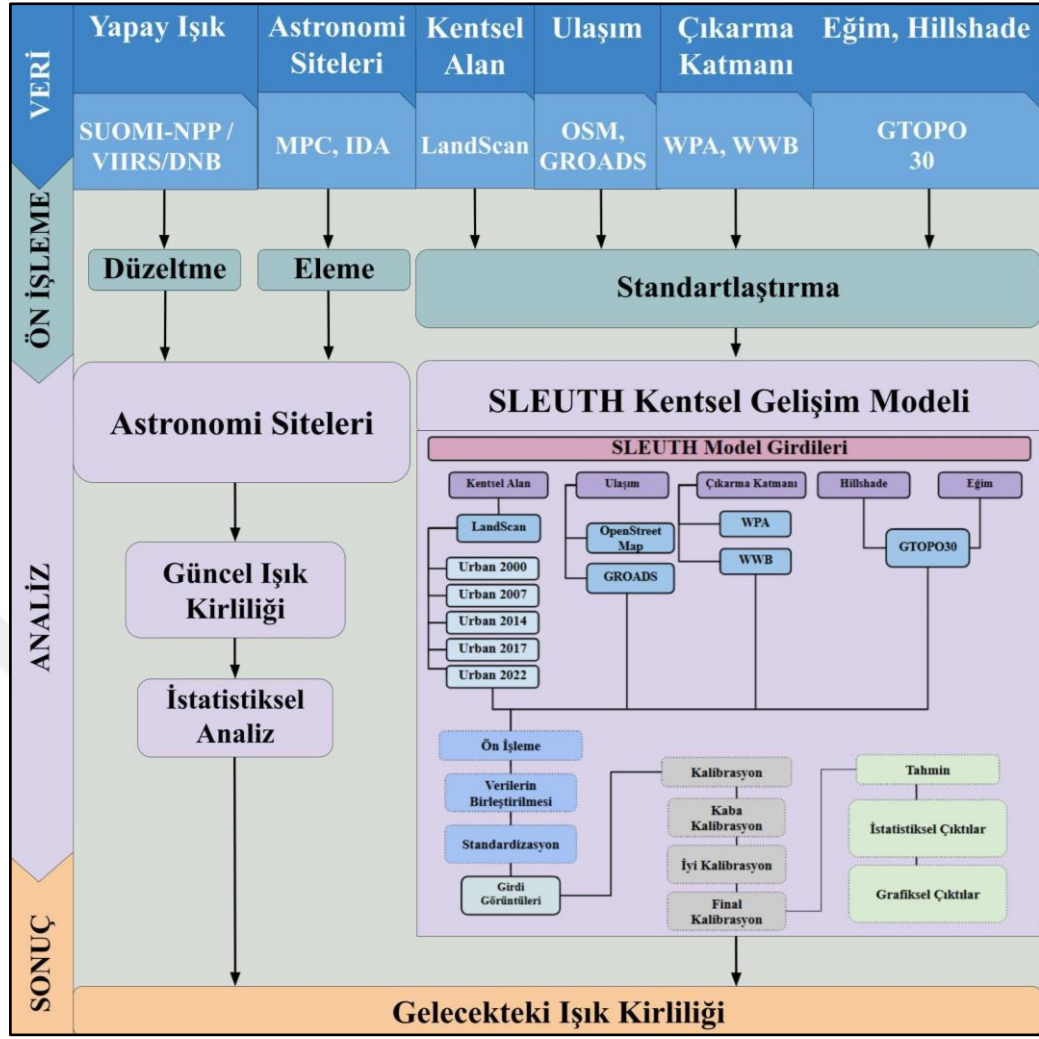
Bu çalışmada kullanılan tüm verilerin zamansal çözünürlükleri, yersel çözünürlükleri, türleri ve indirildikleri web adresleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir. Kullanılan veriler veri tabanlarındaki en güncel verilerdir.

Çizelge 3.2. Bu tez çalışmasında kullanılan verilerin öznitelik tablosu.

Veri	Uydu/ Enstrüman/ Model	Veri Tipi	Yersel Çözünürlük	Zamansal Çözünürlük	Boyut	İndirilen web adresi
Gözlemeleri	-	Vektör	-	-	0,5 MB	projectpluto.c om
Yapay Işık	Suomi-NPP/ VIIRS DNB	Raster	742 m	2012-2023	1 TB	payneinstitut e.mines.edu
Kentsel Alan	LandScanTM	Raster	1km	2000-2022	3 GB	landscan.ornl .gov
Ulaşım	gROADS	Vektör	-	2010	1 GB	sedac.ciesin.c olumbia.edu
	OpenStreetM ap	Vektör	-	2022	65 GB	openstreetma p.org
Eğim	GTOPO30	Raster	1 km	1996	2,50 GB	usgs.gov
Hillshade	GTOPO30	Raster	1 km	1996	2,50 GB	usgs.gov
Çıkarma Katmanı	WPA	Vektör	-	2024	60 GB	protectedplan et.net
	OpenStreetM ap	Vektör	-	2022	1 GB	osmdata.open streetmap.de

Bir astronomi sitesi için yapay ışık en az atmosferik parametreler kadar önemlidir. Artan nüfus ve şehirleşme ile kent yakınlarında bulunan astronomi sitelerinin geleceği tehlike altında olup, ışık kirliliğinden uzak alanların korunması için önlemler alınması zorunlu hale gelmiştir. Bu tez çalışmasında uydu verisinden elde edilen yapay ışık görüntüleri ile CA tabanlı bir kentsel gelişim modeli olan SLEUTH modeli kullanılarak kentsel gelişme simüle edilmiş ve 2050 yılı için 64 astronomi sitesinin gelecekteki ışık kirliliği sunulmuştur. Astronomi sitelerinin gelecekteki ışık kirliliğinin tahmin edildiği bu çalışmada yöntem dört adımda yürütülmüştür:

1. Yapay ışık ve kentsel model için gerekli olan uydu ve model verilerin temini.
2. Verilerin ön işleme aşamasından geçirilmesi.
3. Kentsel modelleme ve sonuçlarının yorumlanması
4. Yapay ışık verileri ile zamansal bir istatistik oluşturulması ve kentsel model çerçevesinde gelecek tahmini. Çalışmada kullanılan verilerin akış şeması Şekil 3.11.'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Yöntem akış şeması.

3.1.2. Ön İşleme

Çalışmada kullanılacak bütün veriler eksiksiz temin edildikten sonra ön işleme aşamasına geçilmiştir. Ön işleme aşamasında Python kodları ve CBS ortamında çalışan programlardan yararlanılmıştır.

Yapay Işık

126 ay ve 10 ayrı yıldan (2012-2023) oluşan GeoTIFF uzantılı veri setinde airglow düzeltmeleri için ilgili web¹⁰ adresinden “.csv” uzantılı düzelme dosyaları indirilmiştir (Coesfeld ve ark., 2020). Buradan elde edilen dosyalar “.asc” uzantılı raster dosyalarına dönüştürülmüş ve WGS84 koordinat sistemi eklenerek coğrafi olarak konumlandırılmıştır. Ardından bu airglow raster verileri VNL/V1 verilerinden ilgili her ay ve her sene için çıkarılmış ve düzeltilmiş veriler elde edilmiştir. Sonrasında ise Kuzey kutbuna yakın bölgelerde kuzey ışıkları etkisi bulunduğu ve bu etkinin istatistiki olarak anlamsız sonuçlara yol açması nedeniyle kuzey ışıkları için bir maske verisi

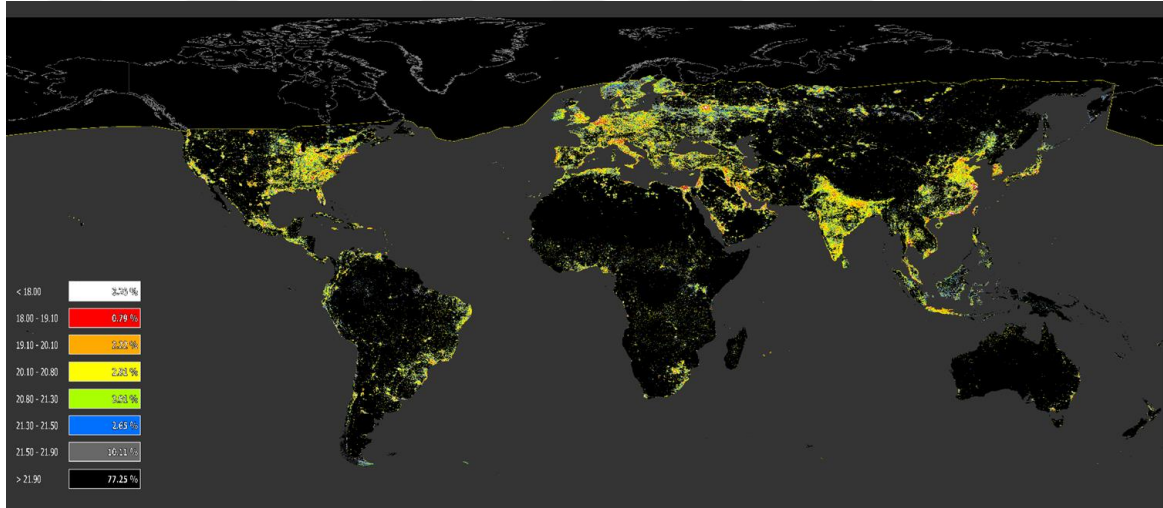
¹⁰ lighttrends.lightpollutionmap.info

kullanılmış ve denk geldiği yerler nodata olarak değiştirilmiştir (Elvidge ve ark., 2020). Bu maskeleme işlemi görsel amaçlı olup verilerin işlenmesi sırasında dikkate alınmamıştır.

SQM, gökyüzü parlaklığını gökyüzünde birim kareye (1 açı saniye kare) düşen ışığın parlaklığını kadir cinsinden ölçmektedir $mag/arcsec^{-2}$ (Cheng ve ark., 2020). Çalışılacak coğrafi alanın astronomi açısından kalitesiyle ilgili daha doğru çıkarım sağlamak adına birimlerin SQM cinsinden olması gerekmektedir. Yapay ışık görüntüsü $nW cm^{-2} sr^{-1}$ birimindedir. Bu veriler (1) denklemi kullanılarak $mag/arcsec^{-2}$ biriminde olan SQM birimine çevrilmiştir (Sánchez de Miguel ve ark., 2017; Aksaker ve ark., 2020b):

$$SQM = 20 - 1,9 \times \log (AL) \quad (3.1)$$

Şekil 3.12.'de gerekli düzeltmeleri yapılmış yapay ışık veri setine (3.1) denklemi uygulanarak değerlerinin SQM ölçü birimine dönüştürülmüş görüntüsü verilmiştir.

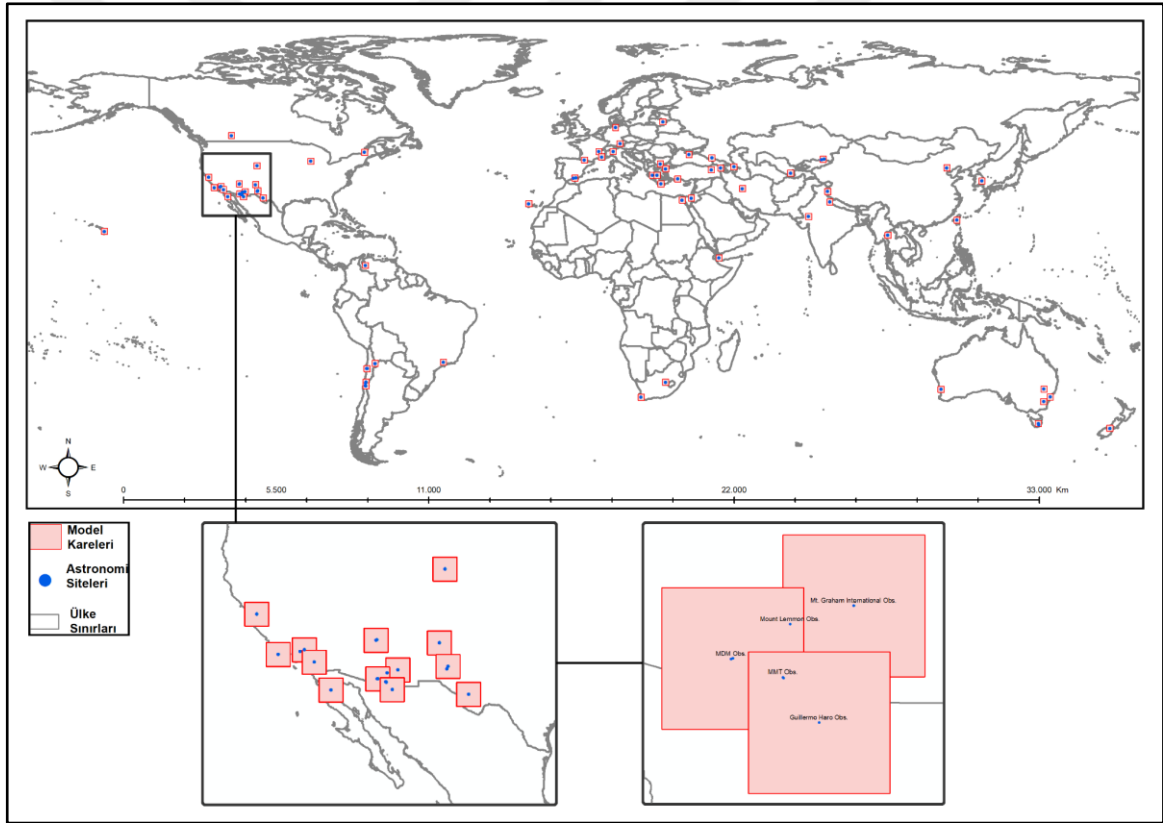


Şekil 3.12. (3.1) Denklemi uygulanarak birimi SQM'e dönüştürülmüş 2022 yılı Aralık ayına ait yapay ışık görüntüsü.

Bu görüntüde parlak yerler beyaz karanlık yerler ise siyah ile gösterilmiştir. Kuzey enlemlerdeki maskeleme işlemi yalnızca görsel amaçlı kullanılmış olup analizleri etkilememektedir. Sol altta verilen lejantta herbir sınıf aralığına denk gelen alanların yüzölçümü verilmiştir.

Astronomi sitelerinin konumlandırılması, gözlemsel verilerin kalitesini doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir. Bu nedenle astronomi sitelerinin, mümkün olan en karanlık ve izole alanlara kurulması, uluslararası standartlara göre bir gereklilik olarak kabul edilmektedir. Işık kirliliğinin en yoğun olduğu büyük yerleşim alanlarından uzak durulması, hem amatör hem de profesyonel astronomik gözlemler için kritik öneme sahiptir. NASA tarafından yayımlanan bilgilere göre, başarılı bir amatör gözlem deneyimi için dahi şehir merkezlerinden en az 20–30 mil (yaklaşık 30–50 kilometre) uzaklaşılması gerekmektedir (NASA, 2023). Profesyonel astronomi siteleri açısından bu mesafenin çok daha fazla olması önerilmektedir. Bu bağlamda, DarkSky International (Uluslararası Karanlık Gökyüzü Birliği) gibi kuruluşlar, büyük ölçekli astronomi sitelerinin

kurulacağı bölgelerde, yaklaşık 100 kilometre yarıçaplı alanlarda yapay aydınlatmanın en düşük seviyede tutulmasını önermektedir. Bu alanların, E0 veya E1 zonları gibi çok düşük ışık emisyonuna sahip bölgeler olarak sınıflandırılması, gözlem kalitesi açısından önem arz etmektedir (DarkSky International, 2020). Bu sebeple kentsel alan veri setinin ön işleme aşamasına geçilmeden önce astronomi sitelerinin bulunduğu noktalar belirlenip SLEUTH modeli için 200x200 pikseli kareler halinde astronomi siteleri ortada olacak şekilde model kareleri belirlenmiştir. Bazı astronomi sitelerinin konumları birbirine çok yakın olduğundan bir karede birden fazla astronomi sitesi bulunabilmektedir. Toplamda 64 model karesi ileriki aşamalarda kullanılmak üzere oluşturulmuştur. Şekil 3.10'da elde edilen model kareleri harita üzerinde verilmiştir kırmızı alanlar model karelerini mavi noktalar ise astronomi sitelerinin konumlarını göstermektedir. Şekil 3.13'de görüldüğü gibi bir kareye birden fazla astronomi sitesinin denk gelmesi durumunda astronomi sitesinin koordinatı merkezde olacak şekilde karelerin konumları ayarlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.13. SLEUTH modeli için oluşturulan 200x200 piksel boyutundaki astronomi siteleri merkezli model kareleri.

SLEUTH Kentsel Gelişim Modeli

SLEUTH modeli için beş tür GIF formatında görüntü dosyası kullanılmalıdır. Bunlardan kentsel alan, ulaşım, eğitim, hillshade ve çıkarma katmanı verileri zorunlu olup, LULC arazi arazi kullanımı analiz ediliyorsa modele dahil edilebilmektedir. Tüm katmanlar için 0, var olmayan veya boş bir değerdir, $0 < n < 255$ ise "canlı" veya mevcut bir değerdir. Yani katmanlardaki tüm değerler

0-255 aralığında normalize edilmiş olmalıdır. Model, tüm giriş katmanlarının tutarlı sayıda satır ve sütuna sahip olmasını gerektirir. Modelin istatistiksel kalibrasyonu için en az dört kentsel zaman periyodu kullanılması model için zorunludur. Ayrıca, kalibrasyon amacıyla, yolların iki veya daha fazla zaman diliminden elde edilmiş olması gerekmektedir. Tüm katmanlarda hillshade kentsel gelişim verisine mekansal bağlam vermek amacıyla, görüntü çıktısına bir arka plan görüntüsü olarak eklenmektedir. Ön işleme sonrası elde edilen bütün katmanların GIF formatında olması gerekmektedir.

Tüm veri türleri için format standartları kısaca şu şekildedir:

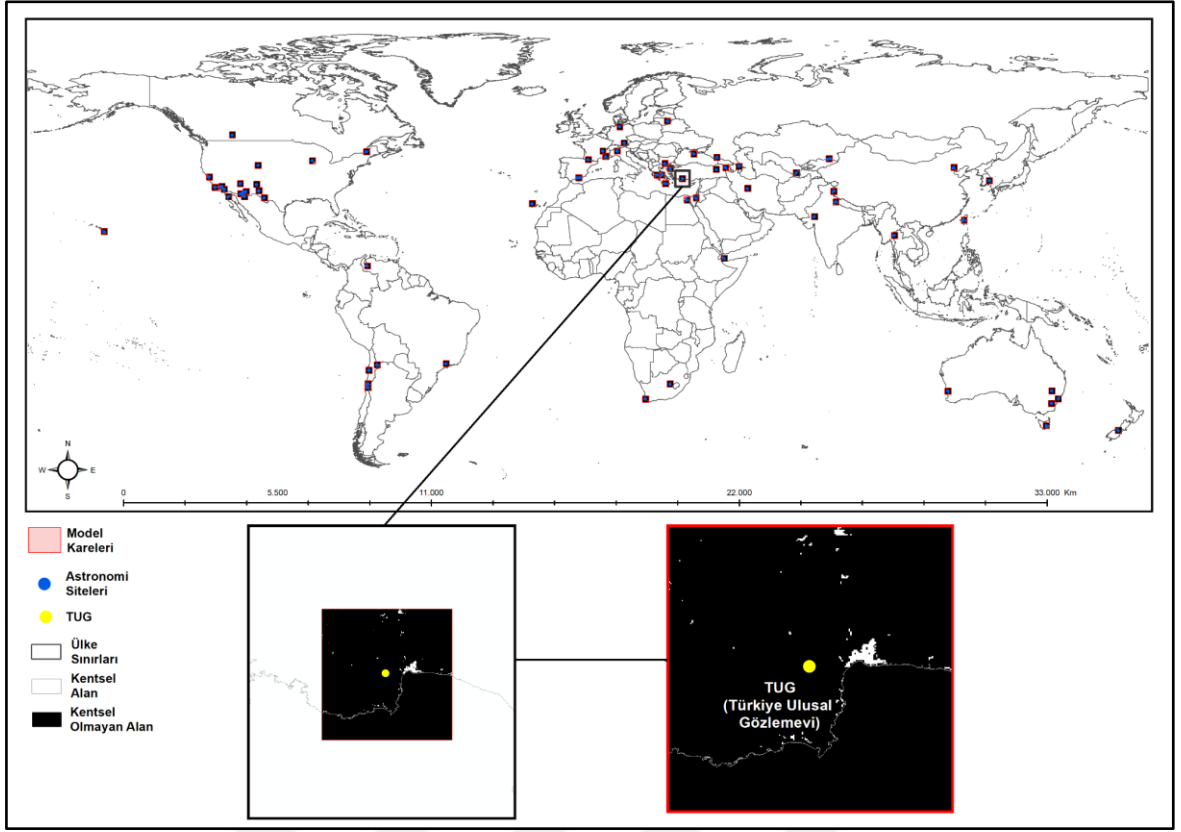
- Girdi verilerinin formatı Gri tonlamalı GIF formatında olmalıdır.
- Görüntüler aynı projeksiyondaki gridlerden türetilmelidir.
- Görüntülerin kapsamı birebir aynı olmak zorundadır.
- Görüntüler aynı çözünürlükte olmalıdır. (Satır x sütun sayısı tutarlı olmak koşulu ile.)
- Görüntüler gerekli adlandırma formatını takip etmelidir.

Kentsel Alan

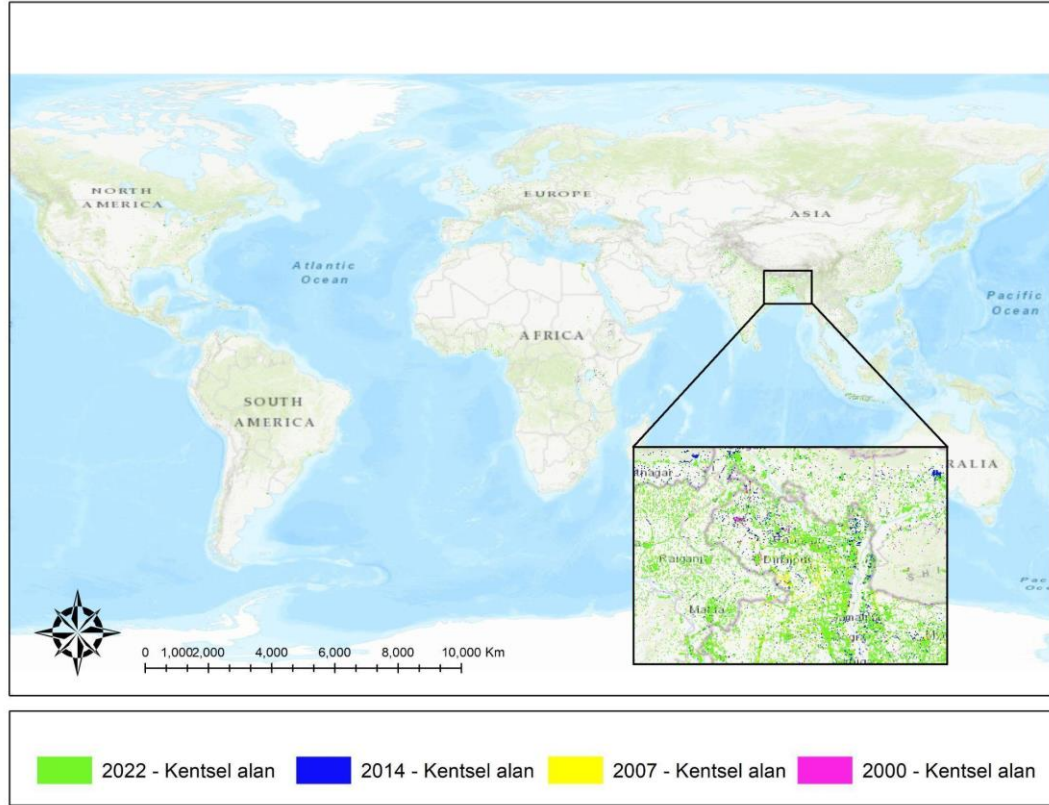
Model girdilerinden en önemlisi olan ve 2000-2022 yılları arasında edinilen LandScan küresel nüfus verisi yeniden sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma Zhou ve ark. (2019) de küresel ölçekteki kentsel modelleme çalışmalarında kullanılan ve OECD (Organization for Economic Co-Operation and Development) tarafından kent tanımı olarak açıklanan, 30 x 30 aç-saniye alan içinde 1000 kişinin olması koşuludur. Bu koşula dayanarak nüfusu 1000'den büyük alanları kent olacak şekilde yeniden sınıflandırılmıştır. Raster veri formatında olan ve orijinal yersel çözünürlüğü 0,008km x 0,008km olan nüfus verisi (bu sınıflandırmadan sonra kentsel alan verisi) yeniden örnekleme ile 1km x1km yersel çözünürlüğe düşürülmüştür. Ardından veri önce koordinatlandırılmış ve tekrar yeniden sınıflandırılmış ve “kentsel alan” ve “kentsel olmayan alan” olacak şekilde 255-0 arasında normalize edilmiştir (Şekil 3.14).

Veri seti kalibrasyon aşaması için yersel çözünürlüğü 11m x 1km, 2km x 2km ve 3km x 3km olacak şekilde üç farklı yersel çözünürlükte yeniden örneklendirilmiştir.

2000, 2007, 2014 ve 2022 yıllarına ait küresel kentsel alan görüntüleri model kareleri dâhilinde üç farklı yersel çözünürlük için kesilmiştir. Bu işlem Python yazılımında EK.1’de verilen python betiği kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen kentsel alan verileri sırasıyla 2000, 2007, 2014 ve 2022 olacak şekilde Şekil 3.15’de sunulmuştur. Bu şekil için kullanılan veri sterinin yersel çözünürlüğü 1kmx1km’dir.



Şekil 3.14. 2000 yılına ait “kentsel alan” ve “kentsel olmayan alan” olacak şekilde 255-0 arasında normalize edilmiş ve yeniden sınıflandırılmış kentsel alan görüntüsünün model kareleri çerçevesinde görünümü.



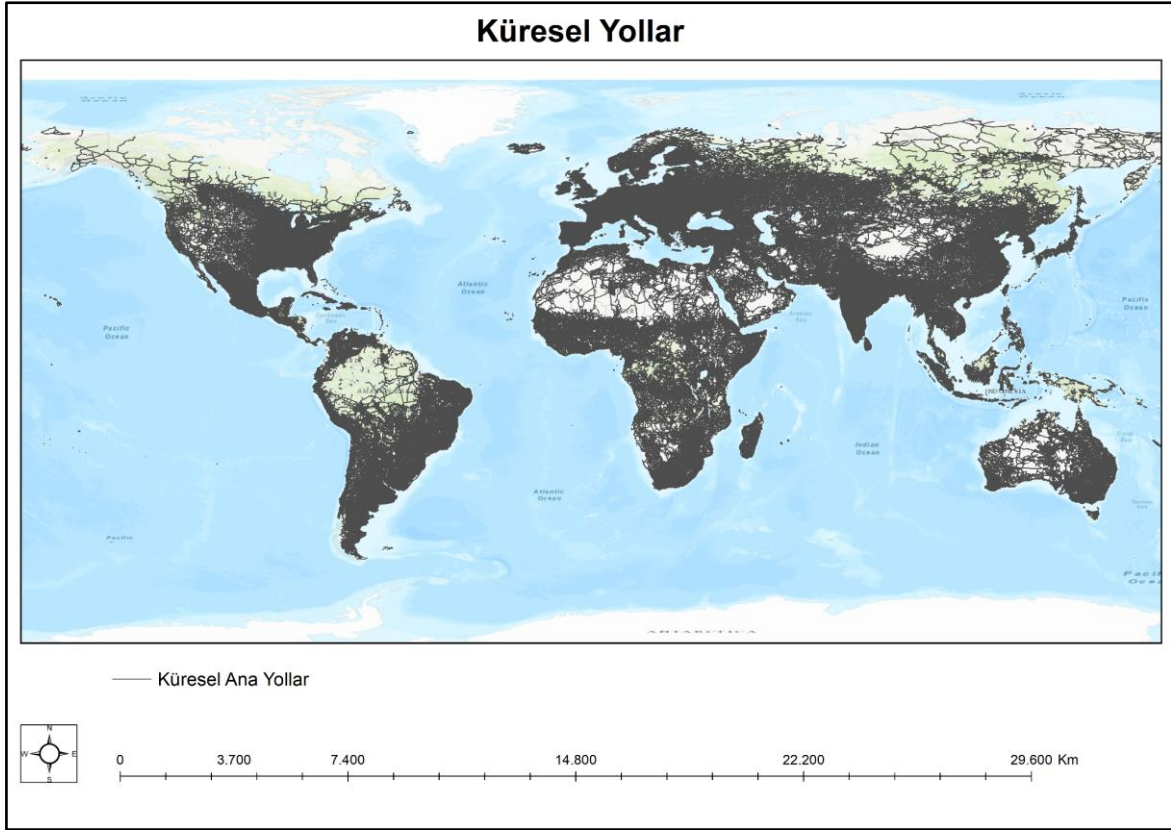
Şekil 3.15. Sırasıyla 2000, 2007, 2014 ve 2022 yıllarına ait SLEUTH modeli için CBS ortamında hazırlanmış kentsel alan veri seti.

64 astronomi sitesinin bulunduğu noktalara 200kmx200km olacak şekilde tampon bölgeler atanmış ve her biri birer kare olarak görüntülerden kesilmiştir. Veriler GeoTIFF formatından GIF formatına ArcGIS programı kullanılarak dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm sırasında 16 bitlik radyometrik çözünürlüğe sahip kent verisi 8 bitlik radyometrik çözünürlüğe düşürülmüştür. Model kalibrasyon için, en erken kentsel yıl tohum olarak kullanılır ve sonraki kentsel katmanlar veya kontrol yılları, birkaç istatistiksel en iyi uyum değerini ölçmek için kullanılır. Bu nedenle, kalibrasyon için en az dört kentsel katmana ihtiyaç vardır: başlangıç için bir ve en küçük kareler hesaplaması için üç ek katman. Bu sebeple 2000, 2007, 2014 ve 2022 yılları olmak üzere toplam beş tane veri kullanılmıştır.

Ulaşım

Model için en önemli ikinci parametre ulaşım parametresidir. SLEUTH modelinde yer alan karayolundan etkilenen büyüme dinamiği, kentsel gelişimin erişilebilirliğin arttığı yerlere çekilme eğilimini simüle etmektedir. Bir ulaşım ağı, bir bölgenin nasıl geliştiği üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Bu etkiyi kalibrasyona dahil etmek için, şehrin zaman içindeki büyümesiyle birlikte değişen en az iki yol katmanı gerekmektedir. SLEUTH modelinin ulaşım bölümü en eski yol katmanı ile başlamaktadır. Büyüme döngüleri veya "zaman" geçtikçe ve daha yeni bir yol katmanının tarihine ulaşıldığında, yeni katman okunacak ve gelişim buradan devam edecektir. Bu tez çalışmasında

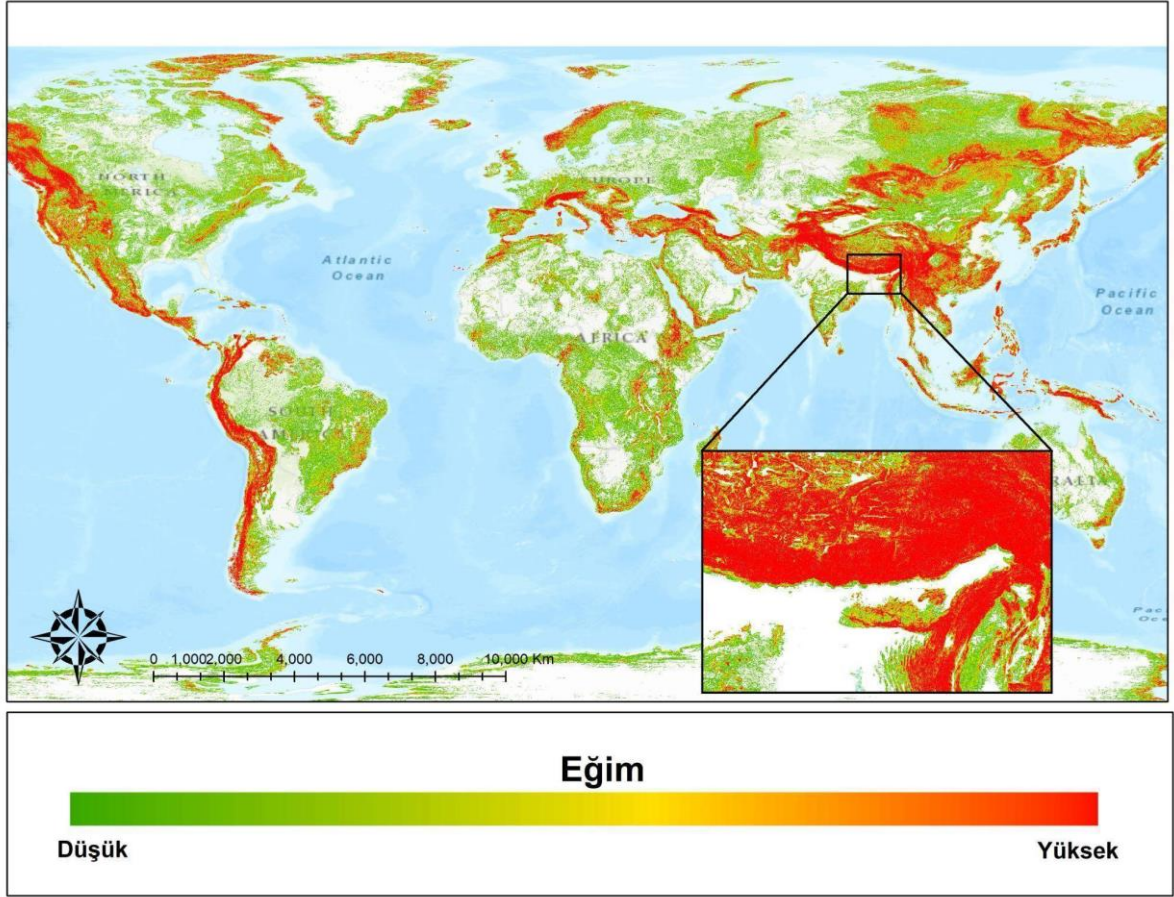
(OSM) ve Global Roads Open Access Data Set (gROADS) ulaşım verileri kullanılmıştır. Vektör verisi formatında indirilen 2022 yılına ait OSM verisi ilk olarak raster veri formatına dönüştürülmüştür. Dönüşüm esnasında yersel çözünürlük 1km x 1km ve projeksiyonu da WGS84 olacak şekilde ayarlanmıştır. Önce “yol” ve “yol değil” şeklinde iki sınıfa ayrılan ulaşım verisi yol olan yerler 255 yol olmayan yerler 0 olacak şekilde normalize edilmiştir. Kalibrasyon aşaması için yersel çözünürlüğü 2km x 2km ve 3km x 3km olan veri setleri bu aşamada oluşturulmuştur. Şekil 3.16.’da GROADS veri tabanından elde edilen en güncel (2022) ulaşım verisi sunulmuştur.



Şekil 3.16. SLEUTH modeli için hazırlanan ulaşım veri seti.

Eğim

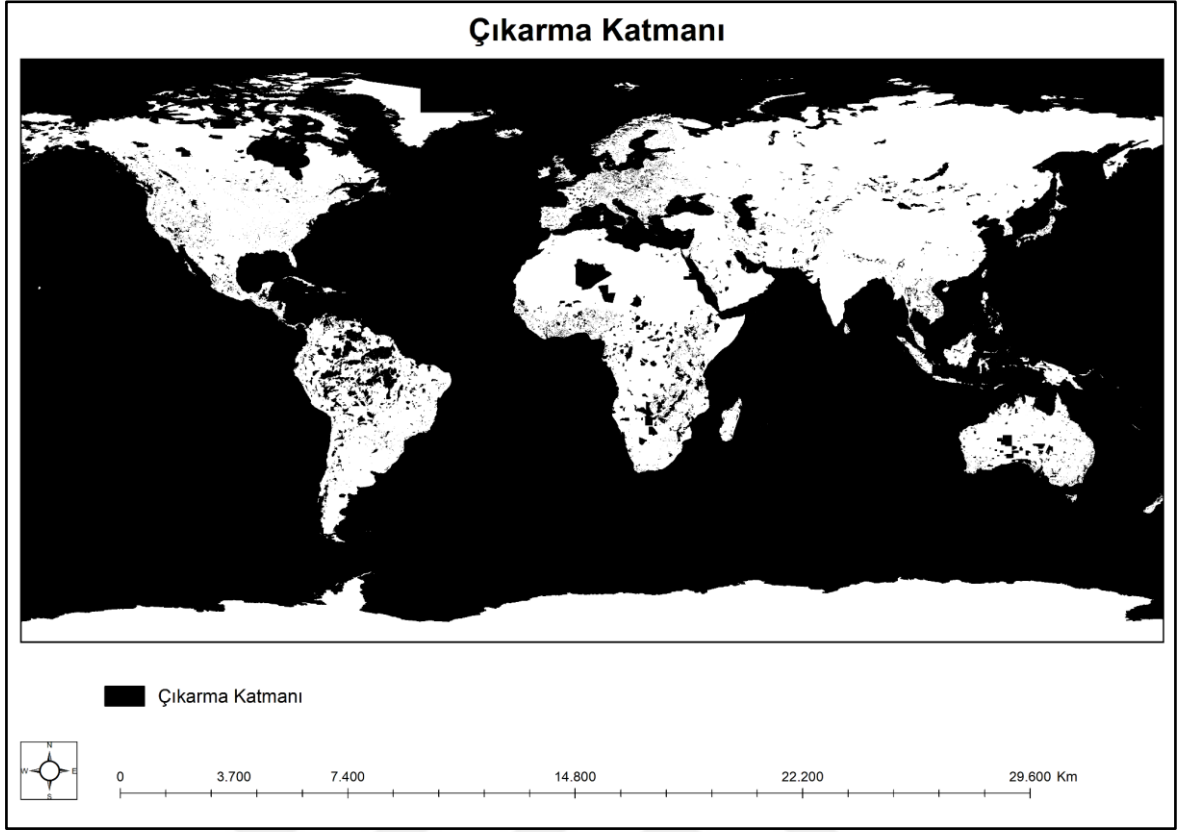
Topoğrafya, genel olarak kentsel gelişim için uygun olan alanın en temel tanımıdır. Düz alanlar, kolay büyüme için en elverişlidir ancak eğim arttıkça, alanlar giderek daha az uygun hale gelir (Candau, 2002). Eğim parametresinin üretilmesi için küresel kapsama alanı olan 30 yay saniyelik (yaklaşık 1 km) yatay ızgara aralığına sahip küresel bir sayısal yükseklik modeli olan GTOPO30 veri seti (Varga ve ark., 2015) kullanılmıştır. ArcGIS programı kullanılarak üretilen GeoTIFF formatındaki eğim verisi 0-255 aralığında normalize edilip 1km x 1km, 2km x 2km ve 3km x 3km yersel çözünürlükte olacak şekilde yeniden örneklenmiştir. Küresel eğimin SLEUTH modeli için girdi olarak hazırlanmış hali örnek olarak Şekil 3.17.’de sunulmuştur.



Şekil 3.17. SLEUTH modeli için hazırlanan eğim verisi.

Çıkarma Katmanı

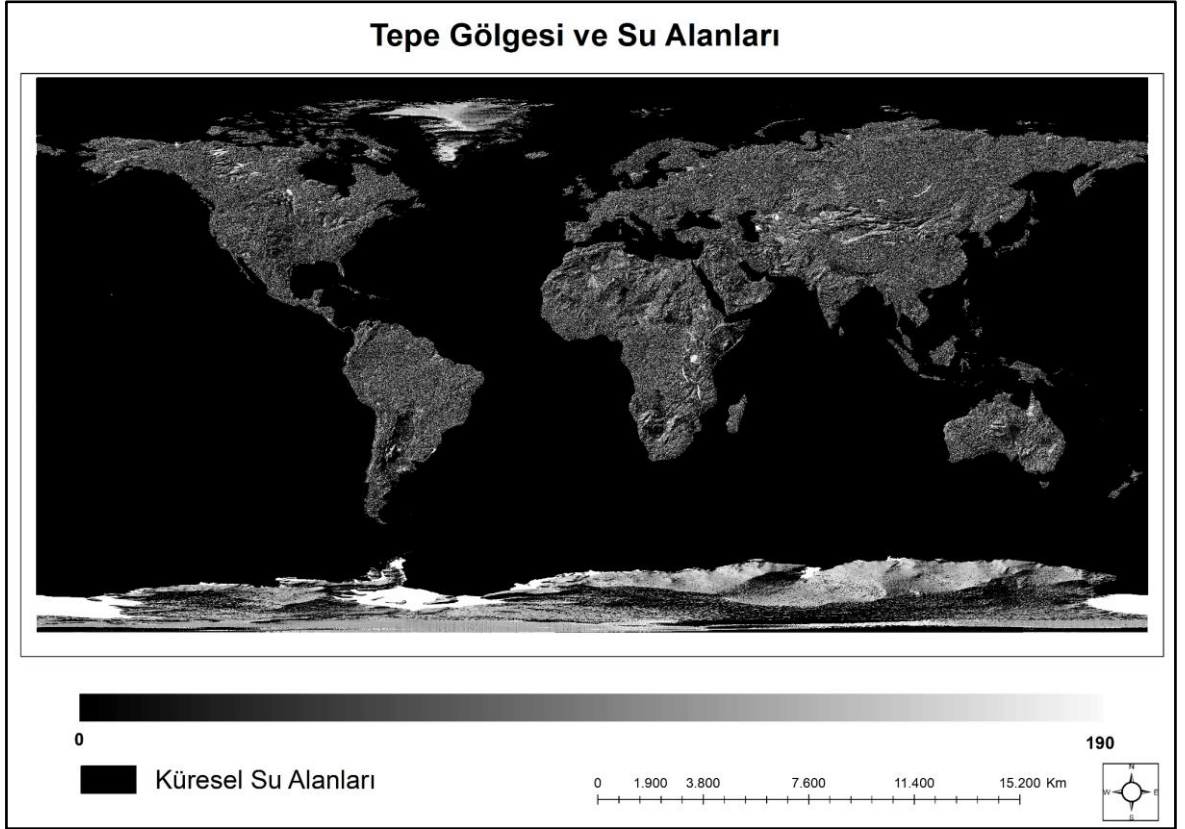
Bu katman, kentleşme için uygun olmayan alanları belirler. Bu alanlar genellikle kent içerisindeki yeşil alanlar, nitelikli tarım toprakları, su kaynakları ve korunan özel alanlar gibi ortak alanlar olup simülasyonun dışında bırakılmalıdır. Bu çalışma için indirilen koruma alanları veri seti vektör formatındadır. Model için uygun bir girdi parametresi olması için vektör formatında olan bu veri raster formatına 1km x 1km ve WGS84 datum kriterlerine uygun olacak şekilde dönüştürülmüştür. Yine diğer katmanlar gibi 0-255 aralığında normalize edilen bu veri kentsel gelişim için uygun olmayan alanlara 0 atanılacak şekilde yeniden sınıflandırılmıştır. Küresel çıkarma alanının modele girişinden önceki son hali örnek olarak Şekil 3.18.'de sunulmuştur.



Şekil 3.18. SLEUTH modeli için hazırlanan çıkarma katmanı verisi.

Hillshade

Kentsel kapsam verilerine mekansal bağlam kazandırmak için görüntü çıktısına bir arka plan görüntüsü eklenmektedir. Bu gri tonlamalı bir görüntü olmalıdır ve yaygın olarak bir tepe gölgeli Digital Elevation Model (DEM) kullanılmaktadır. Bir bölgeye daha fazla tanım vermek için, su kütleleri de temsil edilebilir. Bu çalışmada Eğim katmanında olduğu gibi hillshade verisi de Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30) DEM'den elde edilmiştir. Normalizasyon ve yeniden sınıflandırma aşamaları Eğim katmanının da işlem adımları ile aynıdır. Bunlara ek olarak ikinci bir hillshade girdi verisi su alanları da tanımlanarak oluşturulmuştur. Bu iki hillshade verisi küresel kapsama alanında örnek olarak gösterilmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. SLEUTH modeli için hazırlanan hillshade ve su kütesinin tanımlandığı hillshade veri seti.

Model için üç farklı yersel çözünürlükte hazırlanmış olan model girdi verileri Ek 1.'de verilen python kodu kullanılarak model kareleri çerçevesinde kesilmiştir. Model gerekliliklerinden biri olarak verilerin standart bir biçimde isimlendirilmesi gerekmektedir. SLEUTH modeli için gerekli isim formatları Ek 2.'de verilmiştir. Ek 3.'de verilen python kodu ile verilerin isimleri istenen standart formata getirilmiştir. 200x200 hücreli olan bu kareler 16 bitlik TIF formatından 8 bitlik GIF formatına Ek 4.'deki python kodu kullanılarak dönüştürülmüştür.

3.2. Metod

3.2.1. SLEUTH Kentsel Gelişim Modeli

Veri setinin hazırlanması ve uygun formata dönüştürülmesinin ardından Project Gigalopolis web¹¹ adresinden SLEUTH modeline ait “.exe” dosyası indirilmiştir. Windows işletim sisteminde C yazılım dilinde derlenmiş betikleri çalıştırmayı sağlayan Cygwin arayüzü kullanılarak programın uygulama dosyası ve test, kalibrasyon öngörü ve tahmin kodları ard arda çalıştırılmıştır. Modele girdi olarak eklenecek verilerin isimlerinin modelin formatına uygun olması gerekmektedir. Model için gerekli olan dosya isimleri “Scenario” dosyasında belirtildiği formattan saparsa, model tarafından veriler okunmaz. Bu tez çalışmasında kullanılan dosya isimleri kurala göre oluşturulmuş Ek 2.'de

¹¹ nrgia.ucsb.edu

verilmiştir. SLEUTH modelinin test, kalibrasyon ve tahmin adımlarından oluşan C kodlarının Cygwin arayüzüne çalıştırılması için gerekli komutlar Ek 6.'de verilmiştir.

Test Aşaması

Program için gerekli olan verilerin SLEUTH modelinin gerekliliklerini karşılayıp karşılamadığını öğrenmek için test aşaması önemli bir aşamadır. C programlama dilinde yazılmış olan SLEUTH modeli çalıştırılacağı ortamdaki işletim sistemine uyumu bu aşamada test edilmektedir (Silva ve Clarke 2002). Test modu için kullanılan senaryo dosyası simülasyon sırasında modelin davranışını kontrol eden çeşitli ayarlar ve parametreleri içerir. Test modu, kullanıcıya modelin doğru çalıştığını teyit etmek veya belirli bir katsayı seti için çıktı dosyaları üretmek amacıyla bir veri seti üzerinde tek bir çalışma yürütmenin kolay bir yolunu sunmayı amaçlamaktadır. Bu modda model, büyümeyi başlatmak için CALIBRATION*_START değerlerini kullanarak geçmiş veriler üzerinde tek bir çalışma gerçekleştirir, belirlenen MONTE_CARLO_ITERATIONS sayısını tamamlar ve ardından yürütmeyi sonlandırır. Simüle edilen kentsel büyümenin GIF görüntüleri OUTPUT_DIRECTORY dosyasına yazılmaktadır. Test aşaması sorunsuz bir şekilde tamamlandıktan sonra kalibrasyon aşamasına geçilmiştir.

Kalibrasyon Aşaması

Kentsel gelişimi doğru bir şekilde simüle edebilmek için büyüme kurallarının yerel koşullara göre ayarlanması zorunludur. Bu nedenle, SLEUTH ile modelleme çalışmasındaki en önemli basamak kalibrasyon basamağıdır (Clarke ve Gaydos, 1998; Silva ve Clarke, 2002). Kalibrasyon aşamaları, modelin geçmişten günümüze kentsel büyümeyi simüle etmesine ve simüle edilen yıllar ile kontrol yılları arasında çok yüksek derecede uyum sağlamasına olanak tanımaktadır (Goldstein ve ark., 2004; Xi ve ark., 2009).

SLEUTH modeli kalibrasyonu, tek bir büyüme özelliğini tanımlayan ve diğer özelliklerle birleştirildiğinde birkaç farklı büyüme sürecini tanımlayabilen beş parametreden (katsayı) oluşan bir set üretmektedir. Bu model için, zaman dönemleri arasındaki geçiş kuralları uzayda tek tiptir ve iç içe geçmiş bir dizi döngüde uygulanmaktadır. Döngülerden en dıştaki her bir büyüme dönemini yürütürken, içteki bir döngü tek bir yıl için büyüme kurallarını yürütür. Geçiş kuralları ve başlangıç zamanındaki kentsel alanların ve arazi kullanımının başlangıç koşulları, kalibrasyon sürecinin modeli yerel çevreye nasıl uyarladığı nedeniyle modelin ayrılmaz bir parçasıdır.

Clarke ve Gaydos (1998) başlangıç koşul setini, büyüme ve değişimin her seferinde bir hücrede gerçekleştiği, her bir hücrenin diğerlerinden bağımsız hareket ettiği, büyüme sırasında kalıplar ortaya çıkana ve 'organizma' çevresi hakkında daha fazla şey öğrenene kadar 'çekirdek' katmanı olarak tanımlamaktadır. Uygulanan geçiş kuralları, rastgele bir hücreyi alıp o hücrenin komşuluğunun mekansal özelliklerini araştırmayı ve ardından diğer yerel özelliklerden etkilenen olasılıklara bağlı olarak hücreyi kentleştirmeyi içermektedir (Clarke ve ark., 1997). SLEUTH

modelinin kuralları sabittir, ancak davranış parametrelerine bağlı olarak her zaman adımında tam etkiden sıfır etkiye kadar değişmektedir. Modelinin davranışını tamamen kontrol eden ve her biri 0 ile 100 arasında olası bir tamsayı değerine sahip olan beş parametreden oluşan bir parametre seti mevcuttur. Bu set her kalibrasyon aşamasında kullanıcı tarafından değiştirilir. SLEUTH modeli için bu parametre setinin gerçek bir kentsel büyüme dizisinin davranışını taklit etmek için en iyi set olduğu varsayılmaktadır (Clarke ve ark. 1997, Clarke ve Gaydos 1998, Candau 2002). Bu parametreler şunlardır:

- Difüzyon Katsayısı: Bir pikselin olası kentleşme için rastgele kaç kez seçileceğini kontrol eden katsayıdır. Bu katsayı dışı doğru olan genel dağılımı belirler ve şu şekilde hesaplanır (Clarke ve ark., 1997):

$$\text{difüzyon değeri} = (\text{difüzyon katsayısı} * 0,05) * \sqrt{((\text{satır sayısı})^2 + (\text{sütun sayısı})^2)} \quad (3.2)$$

Senaryo dosyasında “CALIBRATION_DIFFUSION_START:”, “CALIBRATION_DIFFUSION_STEP:” ve “CALIBRATION_DIFFUSION_STOP:” şeklinde başlangıç bitiş ve adım değerleri tanımlanmıştır.

- Soy Katsayısı: Kendiliğinden büyüyen bir pikselin yeni bir yayılma merkezi olma olasılığını belirleyen katsayıdır. Senaryo dosyasında “CALIBRATION_BREED_START:”, “CALIBRATION_BREED_STEP:” ve “CALIBRATION_BREED_STOP:” şeklinde başlangıç bitiş ve adım değerleri tanımlanmıştır.
- Yayılma Katsayısı: Bir yayılma merkezinin parçası olan herhangi bir pikselin komşuluğunda ek bir kentsel piksel oluşturma olasılığını belirler. Senaryo dosyasında “CALIBRATION_SPREAD_START:”, “CALIBRATION_SPREAD_STEP:” ve “CALIBRATION_SPREAD_STOP:” şeklinde başlangıç bitiş ve adım değerleri tanımlanmıştır.
- Eğim Katsayısı: Eğim katsayısı tüm büyüme kurallarını aynı şekilde etkileyen bir katsayıdır. Eğim yüzdesi ile kentsel gelişim arasında basit bir doğrusal ilişki kurmak yerine, eğim katsayısı bir çarpan görevi görmektedir. Eğim katsayısının yüksek olması kentleşme olasılığı üzerinde negatif yönlü sonuç vermektedir. Senaryo dosyasında “CALIBRATION_SLOPE_START:”, “CALIBRATION_SLOPE_STEP:” ve “CALIBRATION_SLOPE_STOP:” şeklinde başlangıç bitiş ve adım değerleri tanımlanmıştır.
- Yol Katsayısı: Bir yol için seçilen bir pikselden bir yol için maksimum arama mesafesi, görüntü boyutlarının bir oranı olarak belirlenir ve bu katsayı sayesinde yola bağlı büyüme olasılığı bulunur. Senaryo dosyasında “CALIBRATION_ROAD_START:”,

”CALIBRATION_ROAD_STEP:” ve “CALIBRATION_ROAD_STOP:” şeklinde başlangıç bitiş ve adım değerleri tanımlanmıştır.

SLEUTH modelinde senaryo dosyası içinde yer alan “CALIBRATION_*_START” katsayı değerleri (burada “*” bir katsayı türünü temsil eder) ilk simülasyonu başlatmaktadır. Daha sonra bir katsayı _STEP değeri kadar artırılır ve başka bir simülasyon gerçekleştirilir. Bu, _STOP katsayı değerine ulaşılan veya aşılan kadar devam etmekte olup artış, verilen aralıkların tüm olası permütasyonları için tekrarlanmaktadır.

Beş katsayı değeri, çalışma alanının modellenen kentsel büyümesini etkiler. Kalibrasyon adımında amaç zaman içinde kentsel değişimi en iyi modelleyen katsayı değerlerini bulmak ve simüle edilen kentsel alanla karşılaştırmaktır. Bunun için model dizileri bir dizi kontrol tarihi ile ampirik olarak karşılaştırılmalıdır. Bu yüzden birbirinden kopuk olmayan zmansal çözünürlüklere sahip girdi verilerinin tahmin ve öngörü aşaması için önemlidir. Bu çalışmada kullanılan kentsel alan verileri 2000, 2007, 2014, 2022; ulaşım verileri 2010, 2022; çıkarma katmanı verileri 2022, 2024 hillshade ve eğim 1996 yılına aittir. Yani kentsel modelleme simülasyonu ve hedeflenen 2030’daki kentsel örüntüyü tahmin etmek için ideal zaman periyotları seçilmiştir.

SLEUTH modeli kalibrasyon modunda belirtilen model katsayısı değerlerinin her kombinasyonunu kullanarak geçmiş veriler üzerinden kaba kuvvet yöntemi ile bir dizi monte carlo iterasyonu gerçekleştirmektedir (Gigalopolis, 2003). SLEUTH modelinde kontrol parametrelerinin olası her kombinasyonu ve permütasyonu denendiği bir yöntem olan kalibrasyonu kaba kuvvet yöntemini kullanır. Kaba kuvvet yöntemi, modeli bir döngü içinde, her seferinde önceden tanımlanmış bir parametre değerleri listesinden alınan bir parametre değeri ile birden çok kez çalıştırılması anlamına gelir. Gözlenen en iyi uyumu sağlayan parametre değerleri 'optimum' yani kalibre edilmiş değerdir (Silva ve Clarke, 2002).

Monte Carlo yöntemi ise karmaşık sistemlerin simülasyonu için güçlü bir araçtır ve farklı senaryoların olası sonuçları hakkında değerli bilgiler sağlayabilir. Kentsel büyüme simülasyonu bağlamında, planlamacıların ve politika yapıcıların farklı faktörlerin (yol altyapısı ve eğim direnci gibi) zaman içinde kentsel alanların yayılmasını nasıl etkileyebileceğini anlamalarına yardımcı olabilir (Clarke ve ark., 1997; Clarke ve Gaydos 1998; Candau, 2002; Silva ve Clarke 2002; Goldstein, 2003). Monte Carlo simülasyonunda rastgelelik, prensipte deterministik olabilecek ancak analitik olarak çözülemeyecek kadar karmaşık olan problemleri çözmek için kullanılır. Genel yaklaşım, rastgele sayılar üretmek, bunları modelde kararlar veya hesaplamalar yapmak için kullanmak ve ardından bir sonuç dağılımı oluşturmak için süreci birçok kez tekrarlamaktır.

Kentsel büyüme simülasyonu bağlamında, bir Monte Carlo yaklaşımı kentsel alanda rastgele bir piksel seçmeyi ve ardından pikselin bir sonraki zaman adımında büyüüp büyümeyeceğini ve nasıl büyüyeceğini belirlemek için belirtilen katsayılarla büyüme kurallarını uygulamayı içerebilir. Bu işlem daha sonra kentsel alandaki her piksel için tekrarlanır ve simülasyon, olası kentsel büyüme

modellerinin bir dağılımını oluşturmak için birden fazla yineleme için çalıştırılır. “MONTE_CARLO_ITERATIONS” değişkeninde belirtilen yineleme sayısı simülasyonun kaç kez çalıştırılacağını belirler. Yineleme sayısının artırılması, olası kentsel büyüme modellerinin daha doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlayabilir, ancak aynı zamanda daha fazla işlemci ve zaman gerektirir. Bu çalışmada senaryo dosyasında bulunan “MONTE_CARLO_ITERATIONS” değışkene her bir aşama için verilen değerler Çizelge 3.3. ‘de verilmiştir.

Çizelge 3.3. SLEUTH Modeli aşamalarında Senaryo dosyasında kullanılan Monte Carlo iterasyonu sayıları.

Model Aşaması	Monte Carlo İterasyonu
Test Aşaması	1
Kaba Kalibrasyon	4
İnce Kalibrasyon	8
Final Kalibrasyonu	10
Öngörü Aşaması	100
Tahmin Aşaması	100

Kaba Kalibrasyon

Bu aşama kalibrasyonun ilk aşamasıdır. Bu aşamada beş katsayının tüm aralığı (0 - 100) büyük artışlar kullanılarak araştırılır. Bu tez çalışmasında difüzyon, üreme, yayılma, eğim ve yol parametreleri için senaryo dosyasındaki değerler Çizelge 3.4.’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kaba kalibrasyonda senaryo dosyasında kullanılan beş büyüme katsayısı için katsayılar.

Büyüme Katsayısı	CALIBRATION * START	CALIBRATION * STEP	CALIBRATION * STOP
Difüzyon Katsayısı	0	25	100
Soy Katsayısı	0	25	100
Yayılma Katsayısı	0	25	100
Eğim Katsayısı	0	25	100
Yol Katsayısı	0	25	100

Modeldeki tahmin için kullanılacak olan beş büyüme parametresi için bu aşamada kullanılan değerler sabit tutulmuştur (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5. Kaba kalibrasyon sırasında senaryo dosyasında büyüme katsayılarına verilen tahmin için en iyi uyum değerleri.

Büyüme Katsayısı	PREDICTION_*_BEST_FIT
Difüzyon Katsayısı	20
Soy Katsayısı	20
Yayılma Katsayısı	20
Eğim Katsayısı	20
Yol Katsayısı	20

Kaba kalibrasyon aşamasında kullanılan veriler 3km X 3km yersel çözünürlüktedir. Modelin kalibrasyon sisteminde yukarıda bahsedilen beş parametre setinden bazılarının uzamsal çözünürlüğe duyarlı olmasından dolayı her kalibrasyonda farklı uzamsal çözünürlükteki veriler kullanılmaktadır (Costanza ve Maxwell, 1994; Dungan ve ark., 2002). Bunlardan yersel çözünürlüğe en duyarlı olan parametre yayılma ve eğim parametreleridir. Yayılma parametresinin değeri yarım çözünürlük kalibrasyon için en düşük ve tam kalibrasyon için en yüksek normal kalibrasyon için değeri kabaca ortadadır. Yayılma parametresinin düzenli kalibrasyon sırasında uzamsal çözünürlüğün arttırılması parametre değerinin sadece en ince çözünürlükte kalibre edilerek elde edilen değere doğru götürmektedir. Eğim parametresi ise yersel çözünürlükten etkilenen bir diğer katmandır. Girdi katmanındaki çözünürlüğün artırılması topografyadaki ayrıntıyı daha da artırır, bu da eğim parametresinden dolayı bu parametrenin değerini büyük ölçüde değiştirebilir ve kentsel büyümeye yatkınlık artış gösterir (Dietzel ve Clarke, 2004).

Kaba kalibrasyon aşamasında astronomi sitelerinin bulunduğu 64 kare için senaryo dosyası kullanılarak C kodu Cygwin arayüzünde 11th Gen Intel(R) Core(TM) i9-11900H 2.50 GHz işlemcili, 128 GB hafızaya sahip 64 bit işletim sistemli bir iş istasyonunda çalıştırılmıştır. Herbir kare için süreç yaklaşık 1 saat olup toplamda yaklaşık 64 saatte kaba kalibrasyon süreci tamamlanmıştır.

Meksika Ulusal Astronomik Gözlemevi, McDonald Gözlemevi, Yerkes Gözlemevi, Tokyo Üniversitesi Atacama Gözlemevi, Hindistan Astronomik Gözlemevi, Tayland Ulusal Gözlemevi, Greenhill Gözlemevi, Canopus Hill Gözlemevi, Güney Afrika Ulusal Gözlemevi ve Mounth John Üniversitesi Gözlemevi'nin bulunduğu model kareleri kaba kalibrasyon aşamasında sonuç vermemiştir. SLEUTH modeli için 3.1.1. SLEUTH Kentsel Gelişim Modeli Bölümünde de açıklandığı gibi bazı gereklilikler mevcuttur. Kentsel alan için kullanılan veri setinin {kentsel, kentsel değil} şeklinde iki sınıf içermesi gerekmektedir. Bu astronomi sitelerinin bulunduğu karelerde “kentsel alan” sınıfı olmayıp yalnızca “kentsel olmayan alan” sınıfı mevcuttur. Bu yüzden bu on astronomi sitesinin bulunduğu kareler diğer süreçlere tabi tutulmamıştır.

Kaba kalibrasyon için senaryo dosyasının çalıştırılması sonucu istatistiksel hesaplamaların sonuçlarının verildiği bir çıktı dosyası oluşmaktadır. Bu çıktı dosyasında bir sonraki adım için kullanılacak olan kalibrasyon değerleri hesaplanmaktadır. En yüksek değerleri veren çalıştırmalar, verilen aralıklar dahilinde, beş boyutlu parametre uzayında modelin simülasyon yeteneğinde bir tepe noktası içerebilecek bir bölge olduğunu göstermektedir. Kaba kalibrasyondan elde edilen sonuçlar, her bir parametre seti için uyum iyiliğini belirlemek üzere incelenir. Parametre setinin daraltılması, çeşitli farklı uyum iyiliği ölçütlerine veya bunların kombinasyonlarına dayanmaktadır. Her sonuç için on üç parametre hesaplanmakta olup çalışmanın bilinen önceki verilere uyum iyiliğini belirlemek için kullanılmaktadır. Bu on üç parametre şunlardır:

Çarpım Karşılaştırması (Product Compare): Diğer tüm puanların çarpımıdır.

Pop: Kontrol yılları için gerçek kentleşmeye kıyasla modellenmiş kentleşme için en küçük kareler regresyon puanı.

Kenarlar (Edges): Kontrol yılları için gerçek kentsel kenar sayısına kıyasla modellenen kentsel kenar sayısı için en küçük kareler regresyon skoru.

Kümeler (Clusters): Kontrol yılları için bilinen kentsel kümelenme ile karşılaştırıldığında modellenen kentsel kümelenme için en küçük kareler regresyon skoru.

Küme Büyüklüğü (Cluster Size): Kontrol yılları için bilinen ortalama kentsel küme büyüklüğüne kıyasla modellenen ortalama kentsel küme büyüklüğü için en küçük kareler regresyon skoru

Lee-Salle (Lee-Salle): A şekil indeksi, modelin büyümesi ile kontrol yılları için bilinen kentsel kapsam arasındaki mekânsal uyumun bir ölçümü.

Eğim (Slope): Kontrol yılları için bilinen kentsel hücrelerin ortalama eğimine kıyasla modellenen kentleşmiş hücreler için ortalama eğimin en küçük kareler regresyonu.

Kentsel (% Urban): Kontrol yılları için kentleşmiş piksellere kıyasla kentleşmiş mevcut piksellerin yüzdesinin en küçük kareler regresyonu.

X-Ortalama (X-Mean): Kontrol yılları için bilinen kentsel hücrelerin ortalama x değerlerine kıyasla modellenen kentleşmiş hücreler için ortalama x değerlerinin X-Mean En küçük kareler regresyonu.

Y-Ortalama (Y-Mean): Kontrol yılları için bilinen kentsel hücrelerin ortalama y değerlerine kıyasla modellenen kentleşmiş hücreler için ortalama y değerlerinin en küçük kareler regresyonu.

Rad (Rad): Kentsel dağılımın standart yarıçapının en küçük kareler regresyonu, yani x ve y deki normalleştirilmiş standart sapma.

F-Match (F-Match): Arazi kullanım sınıfları arasında uyum iyiliğinin bir oranı.

SLEUTH modeli dünya çapında çok sayıda uygulaması olmasına rağmen, kalibrasyon sürecinde hangi ölçütlerin kullanılmasının uygun olduğu konusunda net bir fikir birliği bulunmamaktadır. Jantz ve ark (2004) Washington-Baltimore metropolitan alanına SLEUTH uygulamalarında karşılaştırma, nüfus ve Lee-Sallee istatistiklerini kullanırken, Atlanta'da Yang ve Lo (2003) tüm metriklerin ağırlıklı bir toplamını kullanmış, Silva ve Clarke (2002) ise Porto ve Lizbon'un modellenmesinde sadece Lee-Sallee metriğini kullanmıştır. Bu çalışmada da Silva ve Clarke (2002)'ın kullandığı ve diğer metriklere göre daha iyi sonuçlar elde ettiklerini belirttikleri Lee-Sallee metriği kullanılmıştır. Lee-Sallee (Lee ve Sallee, 1970) metriği genellikle hangi parametre setlerinin tarihsel veri setlerinin kopyalanmasını en iyi şekilde tanımladığını belirlemek için kullanılmakta olup, simüle edilen ve gerçek kentsel alanların kesişimi ve birleşiminin oranıdır. Kaba kalibrasyon aşamasında üretilen istatistikler “control_stats.” dosyasında oluşmaktadır bu dosyada bu 13 parametrenin aldığı değerler bulunmaktadır. İnce kalibrasyon aşaması için her bir “control_stats.” dosyası kontrol edilmiş Lee-Sale parametresine göre büyükten küçüğe sıralanmış, ilk en büyük beş değer seçilip beş büyüme parametresi (difüzyon, soy, yayılma, eğim ve yol katsayısı) değerleri için kaba kuvvet kalibrasyon yöntemine göre değer aralıkları oluşturulmuştur. Bu değerler bir sonraki kalibrasyon için “CALIBRATION_*_START”, “CALIBRATION_*_STEP”,

“CALIBRATION_*_STOP” alanlarına yazılmak için kullanılmıştır. Çizelge 3.6.’da ilk beş kare için kaba kalibrasyondan ince kalibrasyona geçiş aşamasında kullanılan değerler verilmiştir. Sol baştaki sütun model karelerinin numarasını sırasıyla diğer sütunlar ise difüzyon, soy, yayılma, eğim ve yol katsayısı değerini göstermektedir. Her model karesi için altı çizili olarak gösterilen değerler ise ince kalibrasyon için hesaplanan sayıları göstermektedir. Bu çizelgede örnek olması açısından ilk beş kare verilmiştir. Çalıştırılan 30 kare için değerler Ek 7.’da örnek olarak sunulmuştur.

Çizelge 3.6. Kaba kalibrasyon sonucu elde edilen beş büyüme parametresi ve ince kalibrasyon için kaba kuvvet kalibrasyon yöntemi ile verilen değerler.

	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
1	1	1	1	100	75
	1	1	1	50	50
	1	1	1	50	75
	1	1	1	75	100
	1	1	1	100	100
	0-20/5	0-20/5	0-20/5	50-100/10	50-100/10
2	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
	100	25	1	25	1
	100	100	1	50	1
	100	100	1	25	25
	100	75	1	1	50
	60	75	1	25	1
3	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
	1	1	25	50	1
	1	1	25	50	75
	1	1	25	75	1
	1	1	50	100	100
	1	1	25	75	50
4	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
	1	75	1	50	1
	1	1	100	50	25
	1	1	50	50	75
	1	75	1	100	50
	1	50	1	25	100
5	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
	1	1	1	100	100
	1	1	1	75	100
	1	100	1	50	100
	1	1	1	100	1
	1	100	1	50	75
	0-20/5	1-100/25	0-20/5	50-100/10	1-100/25

İnce Kalibrasyon

Kalibrasyon aşamasının ikinci aşaması ince kalibrasyonludur. Bu aşamada katsayılar final kalibrasyona doğru gittiği için daraltılır. İnce kalibrasyon aşamasında, raster verilerin yersel çözünürlüğü 2km x 2km olacak şekilde ayarlanmıştır. Kaba kalibrasyonda kullanılan 3km x 3km

yersel çözünürlük $\sim$ % 66,7 kadar düşürülmüştür. İnce kalibrasyon için senaryo dosyası tekrar çalıştırılmadan önce 2km x 2km yersel çözünürlüklü model kareleri “Input” dosyasına aktarılmıştır. Çizelge 3.6’den alınan beş büyüme katsayısına ait değerler senaryo dosyasında yerine yazılmış ve olası katsayı değerleri aralığının kaba kalibrasyona göre daraltılması sağlanmıştır. Cygwin emülatöründe gerekli ortam değişkenleri kontrol edilmiş ve senaryo dosyası çalıştırılmıştır. Bu işlem 54 model karesi için tekrarlanmıştır. Tek bir karenin ince kalibrasyonunun tamamlanması 11th Gen Intel(R) Core(TM) i9-11900H 2,50 GHz işlemcili, 128 GB hafızaya sahip 64 bit işletim sistemli bir iş istasyonunda $\sim$ 45 dakika sürmüştür. Toplamda sürecin tamamı ise $\sim$ 40 saat sonunda tamamlanmıştır.

İnce kalibrasyon aşamasından sonra da kaba kalibrasyonda olduğu gibi bütün istatistiksel parametrelerin çıktılarının olduğu bir “control_stats” dosyası oluşmuştur. Final kalibrasyonu aşamında kullanılmak üzere bu çıktılar Lee-Sale istatistiğine göre sıralanmış elde edilen en büyük beş değer kullanılarak büyüme katsayılarına kaba kuvvet kalibrasyon yöntemi uygulanarak “CALIBRATION_*_START”, “CALIBRATION_*_STEP”, “CALIBRATION_*_STOP” değerleri atanmıştır. İnce kalibrasyonda senaryo dosyasında en iyi uyum değeri kaba kalibrasyonda olduğu gibi sabit bırakılmıştır (Çizelge 3.5.). Bu aşamada elde edilen “control_stats” dosyasının ilk beş çıktısı ve atanan değerler Çizelge 3.7’de verilmiştir. Çizelgede ilk beş değer örnek olarak verilmiştir. Sol baştaki sütun model karelerinin numarasını sırasıyla diğer sütunlar ise difüzyon, soy, yayılma, eğim ve yol katsayısı değerini göstermektedir. Her model karesi için altı çizili olarak gösterilen değerler ise ince kalibrasyon için hesaplanan sayıları göstermektedir. Kaba kalibrasyon çıktıları ile karşılaştırıldığında değer aralıklarının gittikçe daraldığı açıkça görülmektedir.

Çizelge 3.7. İnce kalibrasyon sonucu elde edilen beş büyüme parametresi ve final kalibrasyon için kaba kuvvet kalibrasyon yöntemi ile verilen değerler.

	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
1	1	1	5	85	5
	1	1	1	55	55
	1	1	5	45	65
	1	1	1	55	75
	1	1	1	55	65
	1-5/1	1-5/1	1-5/1	45-85/10	5-75/14
	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
2	60	84	1	50	1
	60	84	1	50	31
	60	84	20	45	1
	60	36	5	45	1
	60	36	20	50	1
	55-65/2	36-84/8	1-20/5	45-55/2	0-32/8
	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG

Çizelge 3.7. İnce kalibrasyon sonucu elde edilen beş büyüme parametresi ve final kalibrasyon için kaba kuvvet kalibrasyon yöntemi ile verilen değerler. (devamı)

3	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
	1	1	25	90	1
	1	1	30	100	1
	1	1	25	80	1
	1	1	25	100	50
	1	1	25	50	1
	1-5/1	1-5/1	24-32/2	50-100/10	1-50/10
4	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
	1	31	1	85	1
	1	16	1	100	51
	1	16	1	100	1
	1	1	1	85	1
	1	1	1	100	51
	1-5/1	1-32/8	1-5/1	80-100/4	1-52/13
5	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
	1	26	5	70	1
	1	1	20	90	1
	1	26	10	90	1
	1	1	1	60	1
	1	26	10	100	1
	1-5/1	1-28/7	1-20/5	60-100/10	1-5/1

Bu aşamada kullanılan bütün kareler için hesaplanan ince değerleri Ek 8’de 30 tanesi için verilmiştir. Bu değerler kullanılarak final kalibrasyonu aşamasına geçilmiştir.

Final Kalibrasyonu

Bu aşama kalibrasyon sürecinin son aşamasıdır. İnce kalibrasyon aşamasında üretilen “control_stats.log” dosyasında bulunan en iyi uyum değerleri kullanılarak, olası katsayı değerleri aralığı daraltılır. Gittikçe daraltılan değerler için hedef en olası parametre değerlerinin erişildiği veri setine ulaşmaktır. Bu aşamada ulaşmak istenen en iyi yersel çözünürlüğün kullanılması gerektiği için 1km x 1km’lik veri seti “input” dosyasına aktarılmıştır. İnce kalibrasyon çıktılarının Lee-Saale istatistiğine göre sıralanan ve kaba kuvvet yöntemi ile hesaplanan değerleri (Çizelge 3.8. ve tamamı için Ek 9.) oluşturulan yeni senaryo dosyasında “CALIBRATION_*_START”, “CALIBRATION_*_STEP”, “CALIBRATION_*_STOP” değerlerine atanmıştır. Tüm bu süreç 54 model karesi için uygulanmıştır. Tek bir karenin final kalibrasyonunun tamamlanması 11th Gen Intel(R) Core(TM) i9-11900H 2,50 GHz işlemcili, 128 GB hafızaya sahip 64 bit işletim sistemli bir iş istasyonunda ~ 15 dakika sürmüştür. 54 kare için final kalibrasyonu süreci ~ 810 dakika sürmüştür. Toplamda kalibrasyon süreci (kaba, ince ve final) ~ 2,6 gün sürmüştür. Final kalibrasyonda senaryo dosyasında en iyi fit değeri diğer kalibrasyon aşamalarında olduğu gibi sabit bırakılmıştır (Çizelge 3.5.). Bu aşamada elde edilen “control_stats” dosyasının ilk beş çıktısı ve atanan değerler Çizelge 3.8’de verilmiştir. 30 kare için elde edilen değerler örnek olarak Ek 9.’de sunulmuştur.

Çizelge 3.8. Final kalibrasyon sonucu elde edilen beş büyüme parametresi ve öngörü aşaması için kaba kuvvet kalibrasyon yöntemi ile verilen değerler.

1	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
	5	1	1	85	61
	5-5/1	1-1/1	1-1/1	85-85/1	61-61/1
2	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
	57	52	11	47	32
	57-57/1	52-52/1	11-11/1	47-47/1	32-32/1
3	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
	1	1	32	70	1
	1-1/1	1-1/1	32-32/1	70-70/1	1-1/1
4	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
	1	1	5	96	40
	1-1/1	1-1/1	5-5/1	96-96/1	40-40/1
5	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
	2	1	1	70	1
	2-2/1	1-1/1	1-1/1	70-70/1	1-1/1

Final kalibrasyon aşamasından sonra çıktı dosyasında oluşan “control_stats” dosyası her bir model karesi için ayrı ayrı incelenmiştir. Bu çıktılar Lee-Sale istatistiğine göre sıralanmış en büyük değer seçişip büyüme parametreleri için kaba kuvvet yöntemi ile hesaplamalar yapılmıştır. Bu aşamada model “avg.log” isimli bir dosya daha üretir. Bu dosya içerisinde 19 adet istatistik mevcuttur. “avg.log” dosyası giriş parametrelerinin etkisiyle oluşan kentsel büyümenin yıllara göre nasıl geliştiğini istatistiksel olarak raporlar. Bu 19 parametre şunlardan oluşur (James, 2005):

run: Her bir parametre kombinasyonu için yapılan Monte Carlo simülasyon serisi.

year: Simülasyonun ait olduğu yıl.

index: Kontrol yılına ait sıra numarası.

sng: Spontane büyümeden kaynaklı yeni kentsel piksellerin sayısı.

sdg: Yeni yayılma merkezi (new spreading center) büyümesinden kaynaklı yeni kentsel piksellerin sayısı.

og: Organik büyüme (mevcut kentsel alanların kenarlarında gerçekleşen) sonucu oluşan yeni pikseller.

rt: Yola bağlı büyüme sonucu oluşan yeni kentsel piksellerin sayısı.

pop / area: Toplam kentsel piksel sayısı (alan ile aynıdır).

edges: Kentsel ve kentsel olmayan piksel kenarlarının toplamı.

clusters: Kentsel alan küme sayısı.

xmean / ymean: Kentsel piksellerin ortalama X ve Y koordinatları.

rad: Kentsel alanı çevreleyen dairenin yarıçapı.

slope: Kentsel alanların ortalama eğimi.

cl_size: Ortalama küme boyutu.

diffus: Diffusion (yayılma) katsayısı.

spread: Spread (organik büyüme) katsayısı.

breed: Breed (yeni merkez oluşturma) katsayısı.

slope: Slope resistance (eğim direnci) katsayısı.

%urban: Çalışma alanındaki toplam pikseller arasında kentsel olanların yüzdesi.

Öngörü Aşaması

Kalibrasyon süreci, bir bölge için tarihsel büyümeyi en iyi şekilde simüle eden başlangıç katsayı değerlerini üretir. Ancak, SLEUTH modelinin kendi kendini değiştirme özelliği nedeniyle, bir çalışmanın START_DATE'indeki katsayı değerleri STOP_DATE tarafından değiştirilebilir. Tahminin başlatılması için en iyi kalibre edilmiş sayılardan tek bir STOP_DATE değeri alınır. Yani kısacası bu aşama geçmişten şu anki zamana kadar olan simülasyon sürecinde katsayıların değerlerini göz önüne alarak en iyi uyum değerini bulur. Böylelikle günümüzden tahmin edilecek gelecek yıllara kadar olan süreçte beş büyüme parametresini yönlendirir. Final kalibrasyonundan elde edilen “control_stats.log” dosyasında katsayılar Lee Sale istatistiğine göre sıralanır ve en büyük değer seçilir. Çizelge 3.9.’da final kalibrasyonundan elde edilen değerler öngörü aşamasında kullanılmak üzere senaryo dosyasında “CALIBRATION_*_START”, “CALIBRATION_*_STEP”, “CALIBRATION_*_STOP” değerlerinde yerine yazılır. Herbir model karesi için bu aşama tekrarlanır.

Öngörü aşaması sonucunda Tahmin aşamasında kullanılmak üzere çıktı dosyasındaki “average” dosyası kullanılır. Bu dosyadaki son satır (tahminin başlayacağı yıl) STOP_DATE için belirlenir, beş büyüme parametresi için (difüzyon, soy, yayılma, eğim ve yol katsayısı) katsayı değerleri seçilir ve bu katsayı değerleri bir üst tam sayı değerini alacak şekilde yuvarlanır. Böylece bu değerler “PREDICTION_*_BEST_FIT” değerleri olarak seçilir. Bu çalışmada öngörü aşamasından elde edilen çıktılar ve tahmin aşamasında “PREDICTION_*_BEST_FIT” değeri için hesaplanan değerler Çizelge 3.9’da verilmiştir. Sol baştaki sütunda çalıştırılan karelerin numarası bulunmakta olup “year” sütununda bulunan yıllardan tahminin başlayacağı yıl için olan satır seçilip değerler tamsayıya yuvarlanmıştır. Tahmin aşamasında kullanılacak değerler altı çizili bir şekilde çizelgede verilmiştir. Bu aşama da bütün model kareleri için tekrarlanmıştır. “average” dosyasından elde edilen 30 kare için değerler örnek olarak Ek 10.’da sunulmuştur. Bu aşama diğer kalibrasyon süreçleri gibi uzun sürelerde tamamlanmamıştır. İlaveten yersel çözünürlük 1km x 1km olacak şekilde bu aşama sonlandırılmıştır.

Çizelge 3.9. Öngörü aşaması sonucu elde edilen beş büyüme parametresi ve tahmin aşaması için bir üst tam sayı değerine yuvarlanan değerler.

	run	year	index	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
1	0	2007	1	1	1	1	39,67	0,75
	0	2014	2	0,09	0,09	0,09	56,9	0,26
	0	2022	3	0,09	0,09	0,09	76,75	0,53
				0	0	0	77	1
	run	year	index	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
2	0	2007	1	59,92	11,56	54,66	31,57	33,54
	0	2014	2	64,23	12,4	58,6	8,97	35,8
	0	2022	3	69,56	13,42	63,46	1,89	39,21
				70	13	63	2	40
	run	year	index	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
3	0	2007	1	1,06	33,97	1,06	61,11	1,89
	0	2014	2	1,14	36,42	1,14	50,47	2,95
	0	2022	3	1,23	39,44	1,23	37,86	4,21
				1	39	1	38	4
	run	year	index	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
4	0	2007	1	0,95	4,16	0,95	91,47	40,45
	0	2014	2	0,94	3,6	0,94	86,88	40,91
	0	2022	3	0,88	3,13	0,88	82,32	41,37
				1	3	1	82	41
	run	year	index	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
5	0	2007	1	0,71	1,3	0,68	90,89	39,9
	0	2014	2	0,69	0,96	0,58	88,14	39,42
	0	2022	3	0,66	0,81	0,53	88,47	38,56
				1	1	1	88	39

Tahmin Aşaması

SLEUTH tahmini geçmişteki büyüme eğilimlerinin tekrarlanmasına dayanmaktadır. Kentsel değişimin nasıl oluştuğunu tanımlayan katsayılar, gelecek değişimlerinin tahminini oluşturur (Candau, 2002). Yersel çözünürlük için hedeflenen final çözünürlük (1km x 1km) kullanılmıştır. Öngörü aşamasından gelen “average.log” dosyasından hesaplanan en iyi uyum değerleri senaryo dosyasındaki “PREDICTION_*_BEST_FIT” kısmına yazılmış, “CALIBRATION_*_START”, “CALIBRATION_*_STEP”, “CALIBRATION_*_STOP” değerleri için final kalibrasyonundan elde edilen değerler (Çizelge 3.9.) kullanılmıştır. Monte Carlo iterasyonu ise öngörü aşamasında olduğu gibi bırakılmıştır. Bu aşama sonuç aşamasıdır. Beş büyüme parametresi ile ilgili istatistiksel çıktılar bu aşamada üretilir. Bunun yanı sıra GIF formatında görüntü çıktıları da bu aşamada üretilir. Ortaya çıkan görüntü verisinde en güncel tarihli kentsel alan, en güncel tarihli ulaşım, eğim ve çıkarma katmanına ek olarak hillshade kullanılmaktadır. Bunun yanında senaryo dosyasında tanımlanan olasılıksal çıktılar da bu görüntüler üzerinde verilmektedir.

3.2.2. İstatistiksel Yöntemler

Uydu görüntülerinden elde edilen 2012-2023 yıllarını kapsayan aylık görüntüler kullanılarak 1m ve üzeri yarıçapa sahip teleskoplara ev sahipliği yapan astronomik sitelerin zamansal istatistikleri çıkarılmıştır. Bu analiz bir CBS ortamında yapılmıştır. 12 adet “*.tif” formatında aylık ışık kirliliği görüntüsünden 64 astronomi sitesinin konumlarının karşılık geldiği piksel değerleri okutulmuştur. Bu işlem sırasında mekânsal analiz ve veri yönetimi süreçlerini otomatikleştiren “ModelBuilder” aracı kullanılmıştır. Astronomi sitelerinin enlem ve boylam değerlerinin olduğu vektör formatında bir veri kullanarak, sitelerin yapay ışık değerleri elde edilmiştir. Böylece yapay ışık verisi için zamana bağlı Spearman, Kendall ve Pearson Korelasyon katsayıları ayrı ayrı hesaplanarak yorumlanmıştır. Bu analizler için Rstüdyo programı kullanılmıştır.

Korelasyon Analizi

Korelasyon analizi, değişkenler arasındaki ilişkinin yönünü ve gücünü belirlemede temel istatistiksel yöntemlerden biridir. Bu amaçla en sık kullanılan korelasyon katsayıları arasında Pearson, Spearman ve Kendall korelasyon katsayıları yer almaktadır. Pearson korelasyon katsayısı, iki sürekli değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi ölçer ve aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2]}} \quad (3.3)$$

Burada x_i ve y_i gözlem değerlerini, $\bar{x}$ ve $\bar{y}$ ise ortalamaları ifade eder. Pearson katsayısı, normal dağılım varsayımı altında güvenilir sonuçlar verir ancak aykırı değerlere karşı oldukça hassastır (Benesty ve ark., 2009). Buna karşın, Spearman sıralı korelasyon katsayısı, değişkenlerin sıraları arasındaki monotonik ilişkileri ölçer ve özellikle doğrusal olmayan, fakat yönlü ilişkilerin olduğu durumlarda tercih edilir. Spearman korelasyon katsayısı şu şekilde hesaplanır:

$$\rho = 1 - [6 \sum d_i^2 / n(n^2 - 1)] \quad (3.4)$$

Burada d_i , her bir gözlem için iki değişkenin sıraları arasındaki farkı, n ise toplam gözlem sayısını ifade eder (Mukaka, 2012). Son olarak, Kendall’s Tau (τ) katsayısı, değişkenler arasındaki ilişkinin yönünü uyumlu (concordant) ve uyumsuz (discordant) sıralı çiftler üzerinden değerlendirir ve aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$\tau = (n_c - n_d) / [\frac{1}{2} n(n - 1)] \quad (3.5)$$

Burada n_c uyumlu çift sayısını, n_d uyumsuz çift sayısını, n ise gözlem sayısını temsil etmektedir. Kendall Tau, özellikle küçük örneklemelerde ve sıralı verilerde daha güvenilir sonuçlar vermesiyle öne çıkar (Kendall, 1948; Hauke ve Kossowski, 2011). Her üç korelasyon katsayısı da farklı varsayımlara dayanmakta olup, kullanılacak yöntemin veri yapısına ve ilişkinin doğasına uygun olarak seçilmesi önemlidir.

Mann-Kendall Test İstatistiği ve Sen's Slope Eğimi

Pearson, Spearman ve Kendall korelasyon katsayılarının yanı sıra veri setindeki zamansal değişimlerdeki 0,95 güven aralığında belirleyen Mann-Kendall test istatistiği ve bu değişimlerin pozitif ya da negatif yönde olduğunu ve şiddetini gösteren Sen's Slope eğimi kullanılmıştır. Mann-Kendall istatistiği (S); Denklem 1'deki gibi hesaplanır (Alifujiang ve ark., 2020) :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_i - x_k) \quad (3.6)$$

normal bir dağılıma sahip olan verilerde S'nin varyansı Denklem 3.7, 3.8, ve 3.9'da verildiği gibi hesaplanmakta:

$$\text{sgn}(x_i - x_k) = +1 \text{ Eğer } (x_i - x_k) > 0 \quad (3.7)$$

$$\text{sgn}(x_i - x_k) = +1 \text{ Eğer } (x_i - x_k) = 0 \quad (3.8)$$

$$\text{sgn}(x_i - x_k) = +1 \text{ Eğer } (x_i - x_k) < 0 \quad (3.9)$$

zaman serilerinde bağ durumu olması durumunda ise;

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3.10)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Varyans hesabından sonra Mann Kendall testinin önemli olup olmadığı standart normal değişkenin (z) hesaplanıp Denklem 3.10, 3.11. ve 3.12'de verildiği gibi kritik z değeri ile karşılaştırılması ile belirlenmektedir.

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad \text{Eğer } S > 0 \quad (3.10)$$

$$Z = 0 \quad \text{Eğer } S = 0 \quad (3.11)$$

$$Z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad \text{Eğer } S < 0 \quad (3.12)$$

α seçilen anlamlılık seviyesi olarak ifade edilir ve $|Z| \leq Z_\alpha$ olursa H_0 hipotezi kabul edilmekte aksi halde reddedilmektedir. Ayrıca S değerinin pozitif olması durumunda artan trend, negatif olması durumunda ise azalan trendin varlığı söz konusudur. Bu denklemlere göre test istatistiği *RStudio* programında yazılan betiklerle belirlenmiştir.

Gözlemvlerinin ışık kirliliğinin zamansal değişimine yönelmeden önce 2012-2023 yılları arasındaki yıllık yapay ışık görüntüleri kullanılarak geçmişteki ışık kirliliği incelenmiştir. Yıllık ortalamalardan oluşan bu 10 yıllık raster veri seti üzerinden astronomi sitelerinin enlem ve boylam bilgilerinin

olduğu vektör dosyaları sayesinde piksel değerleri okunmuştur. Bu aşamada CBS programı kullanılmıştır. Elde edilen çıktılar kullanılarak ortalama standart sapma ve R^2 değerleri hesaplanmıştır. Yıllara göre değişen yapay ışık değerlerinin Spearman, Pearson ve Kendall korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra R-Stüdio kodu ile Mann-Kendall test istatistiği ve Sen's-Slope eğimi hesaplanarak astronomi sitelerinde yıllık ışık kirliliği değerlerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı ve eğer anlamlı ise hangi yönde olduğu belirlenmiştir.

Regresyon Analizi

Regresyon analizi, bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki matematiksel ilişkiyi modellemek için kullanılan temel bir istatistiksel tekniktir. (Sen ve Srivastava, 2012).

Doğrusal regresyon, bağımlı değişken Y ile bir veya daha fazla bağımsız değişken X arasındaki ilişkinin doğru şeklinde olduğunu varsayan en basit regresyon modelidir. Tek bir bağımsız değişken için doğrusal regresyon modeli:

$$Y = aX + b + \varepsilon \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilir; burada a regresyon doğrusunun sabit terimi (kesme noktası), b ise bağımsız değişkenin katsayısı (eğimidir) (Seber ve Lee, 2003). Bu modelde hata terimi ε 'nın ortalaması sıfır olan sabit varyanslı bir rassal değişken olduğu kabul edilir. Doğrusal regresyonun geçerli olabilmesi için belirli varsayımların sağlanması gerekir (Baskerville, 1972):

- I. Her bir X değeri için Y değerleri normal dağılımlıdır.
- II. Y'nin her bir X için gerçek (beklenen) değeri, X'in doğrusal bir fonksiyonu üzerine düşer yani ilişki gerçekte doğrusaldır.
- III. Tüm X değerlerinde Y'nin varyansı sabittir.
- IV. Gözlemler birbirinden bağımsızdır.

Bu koşullar sağlanmadığında, örneğin ilişki gerçekte doğrusal olmadığında, doğrusal regresyon modeli sapmalı (yanlı) sonuçlar verebilir ve ilişkiyi olduğundan zayıf veya güçlü gösterebilir (Osborne ve Waters, 2002). Bu nedenle, iki sürekli değişken arasındaki olası ilişkinin önce bir saçılım grafiği ile görselleştirilmesi önerilir; eğer noktalar yaklaşık olarak düz bir çizgi etrafında toplanıyorsa doğrusal regresyon uygun olabilir, değilse doğrusal olmayan modeller düşünülmelidir (Schneider ve ark., 2010). Doğrusal regresyon analizinde modelin başarı düzeyi genellikle determinasyon katsayısı (R^2) ile özetlenir. R^2 , bağımlı değişkendeki toplam varyansın ne kadarının regresyon modeli tarafından açıklandığını gösteren bir “goodness-of-fit” ölçüsüdür

(Cameron ve Windmeijer, 1997). y_i : gerçek gözlem değeri, $\widehat{y}_i$: modelin tahmin ettiği değer, $\underline{y_i}$: tüm y_i değerlerinin ortalaması olmak üzere determinasyon katsayısı:

$$R^2 = 1 - \sum \frac{(y_i - \widehat{y}_i)^2}{(y_i - \underline{y_i})^2} \quad (3.14)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Basit doğrusal regresyonda (tek bağımsız değişkenli), R^2 aynı zamanda bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki Pearson korelasyon katsayısının karelerine eşittir (Bende ve Lange, 2007). R^2 değeri 0 ile 1 arasında olup 1'e yaklaştıkça modelin veriye daha iyi uyduğu, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki değişkenliği büyük ölçüde açıkladığı anlaşılr (Siddiqui ve ark.,2024). Doğrusal regresyon modelleri, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi doğrusal bir fonksiyonla açıklamayı amaçlayan temel modeller arasında yer alır. Ancak, gerçek hayattaki birçok değişken arasındaki ilişki her zaman doğrusal olmayabilir. Bu nedenle, doğrusal olmayan regresyon modelleri de literatürde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu tür modeller, karmaşık yapıları temsil etme kapasitesine sahip olup, özellikle doğrusal modelin yetersiz kaldığı durumlarda tercih edilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon modelleri arasında en yaygın kullanılanlar şunlardır:

Polinomial Regresyon: Polinomial regresyon, bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişkinin bir polinom (çok terimli) ile ifade edildiği regresyon türüdür. Bu model, doğrusal regresyonun bir genelleştirmesidir; bağımsız değişkenin X farklı derecelerden kuvvetleri ek açıklayıcı değişkenler olarak modele dahil edilir. d dereceli tek değişkenli bir polinomial regresyon modelinde, d : polinomun derecesi, $\beta_0, \dots, \beta_n$ katsayılar, ε : hata terimi olmak üzere:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X^1 + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3 + \dots + \beta_d X^d + \varepsilon \quad (3.15)$$

şeklinde polinomial regresyon denklemi hesaplanmaktadır (Spiess ve Neumeyer, 2010).

Logaritmik Regresyon: Bağımlı değişkenin, bağımsız değişkenin logaritmasıyla modellenmesini esas alır. Genellikle başlangıçta hızlı artış gösterip zamanla sabitlenen ilişkilerin analizinde kullanılır.

a ve b parametreleri logaritmik modelin katsayısı, X : bağımsız değişken, ε : hata terimi olmak üzere:

$$Y = a + b \ln(X) + \varepsilon \quad (3.16)$$

şeklinde hesaplanır (Siddiqui ve ark.,2024).

Üstel Regresyon: Büyüme veya azalma şeklindeki süreçlerin modellenmesinde uygundur. Bağımlı değişkendeki değişimin bağımsız değişkendeki artışla üstel bir biçimde arttığı veya azaldığı durumları modellemek için kullanılır. α : üstel fonksiyonun katsayısı (ölçek parametresi) β : üstel artış hızını belirleyen katsayı ve ε : hata terimi olmak üzere:

$$Y = a e^{\beta x} + \varepsilon \quad (3.17)$$

şeklinde hesaplanır. (Schneider ve ark., 2010).

Çalışmada kullanılan kentsel gelişim ve yapay ışık verileri üzerinden yapılan ön analizlerde, 2023 yılına ait raster görüntüler için en uygun modelin doğrusal regresyon olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, bu bölümde kentsel alan olasılık sınıfları ile bu sınıflara karşılık gelen yapay ışık ortalamaları arasındaki ilişkiyi temsil etmek amacıyla doğrusal regresyon modeli kullanılmıştır. Modelin başarısı, determinasyon katsayısı (R^2) ile değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, ilerleyen bölümlerde sunulan saçılım grafikleri için, her veri seti özelinde en iyi uyumu sağlayan model tercih edilmiştir. Bu kapsamda, doğrusal ilişkinin yeterli olmadığı durumlarda polinomial, logaritmik ya da üstel regresyon modelleri uygulanmıştır. Böylece, her bir modelin veriye olan uyumu göz önünde bulundurularak, en uygun regresyon denklemi belirlenmiştir. Bu yaklaşımla yalnızca teorik doğruluk değil, aynı zamanda görsel ve istatistiksel uyum da dikkate alınarak, hesaplamaların güvenilirliğinin artırılması da hedeflenmiştir.

Kappa istatistiği

Kappa istatistiği, iki gözlemci (ya da sınıflandırıcı) arasında yapılan kategorik sınıflamaların uyum düzeyini ölçen bir istatistiksel ölçüttür (Allouche, 2006). Özellikle "rastlantısal olarak aynı sınıfa atama" olasılığını göz önünde bulundurarak gerçek uyumu hesaplamaktadır (Eugenio ve Glass, 2004). Cohen'in Kappa katsayısı, iki değerlendirici arasındaki kategorik (nominal) veri uyumunu ölçmek için kullanılıp rastgele aynı sonuca ulaşma ihtimalini dikkate almaktadır. Değer aralığı -1 ile 1 arasında olup 1'e yaklaştıkça uyum artmaktadır.

P_0 = Gözlenen uyum oranı , P_e = Beklenen uyum oranı olmak üzere kappa istatistiği:

$$K = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} \quad (3.18)$$

şeklinde hesaplanmaktadır (Rigby, 2000).

SLEUTH Modeli Renk Kodları ve Olasılık Sınıfları

SLEUTH modeline ait GIF formatındaki çıktıların istatistiksel analizlerde uygun bir şekilde kullanılabilmesi ve kentsel modellemede elde edilen model çıktısının doğru okunabilmesi adına Çizelge 3.10.'daki renk kodlarına karşılık gelen olasılık sınıfları kullanılmıştır.

Çizelge 3.10. Kentsel alan çıktısı olan GIF formatındaki görüntülerin renklerinin karşılık geldiği olasılık aralıkları.

Hex kodu	Renk	Olasılık Sınıfları
0X00ff33		0-10
0X00cc33		10-20
0X009933		20-30
0X006666		30-40
0X003366		40-50
0X000066		50-60
0XFF6A6A		60-70
0Xff7F00		70-80
0Xff3E96		80-90
0Xff0033		90-100
0Xf9d16e		Çekirdek*
0X1434d6		Su**

*Burada sözü edilen Çekirdek sonradan tahmin edilecek olan başlangıç kentsel alanıdır.

**Burada kullanılan renklendirme simüle edilmiş kentsel büyüme için bir zemin olarak kullanılmakta olup girdi dosyalarındaki verilerde pikseller sıfır (0) değerini içeriyorsa, GIF içindeki renk değeriyle doldurulacaktır. Bu çalışmada hillshadei verisi sıfır değerini içermektedir. Bu yüzden çıktılarda görülen Su rengi arka plandaki hillshade verisinin bir parçasıdır.

Yapay ışığın gelecekteki durumunu öngörebilmek amacıyla, kentsel gelişim ile yapay ışık verileri arasında bir ilişki kurulmuştur. Yapay ışık verisi olarak en güncel yıl olan 2023 yılına ait görüntü kullanılmış; bu doğrultuda, kentsel gelişim modeli çıktısı olarak da 13. kareye ait veri tercih edilmiştir. Bu karenin seçilme nedeni, tüm olasılık sınıflarını her yıl için kapsamış olmasıdır. Böylece, her bir olasılık sınıfının yapay ışık üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

Yapay ışık verisi, 2023 yılının son ayına ait olup, güncel durumu yansıtmaktadır. Böylece, kentsel gelişim sınıflarıyla ilişkili yapay ışık değerleri en güncel haliyle değerlendirilmiştir. Kentsel alan verisi, olasılık sınıflarını içeren kategorik bir formattadır. Bu nedenle, herhangi bir kentsel alan sınıfına karşılık gelen yapay ışık değeri, çok parlak ya da çok sönük olabilmekte; bu durum da piksel bazında doğrudan karşılaştırmayı güçleştirmektedir. Öte yandan, yapay ışık verisi sürekli (sayısal) bir veri yapısına sahiptir. İki veri seti arasında benzersiz değerlerin örtüşmemesi sebebiyle, kentsel alan verisindeki her bir olasılık sınıfına karşılık gelen yapay ışık değerleri, CBS ortamında Extract by Mask yöntemi ile elde edilmiştir.

Bu yöntemle elde edilen tif formatındaki görüntüler için ortalama değerler hesaplanmıştır. Böylece, her bir kentsel gelişim olasılık sınıfına karşılık gelen ortalama yapay ışık değerleri belirlenmiştir. Kentsel alan çıktısındaki çekirdek sınıf (mevcut kentsel alanlar), hâlihazırda kent olduğu ve gelecekte farklı bir olasılık değeri almayacağı için analiz dışında tutulmuştur. Elde edilen bu değerler üzerinden doğrusal (lineer) regresyon analizi gerçekleştirilmiş; böylece yapay ışığın

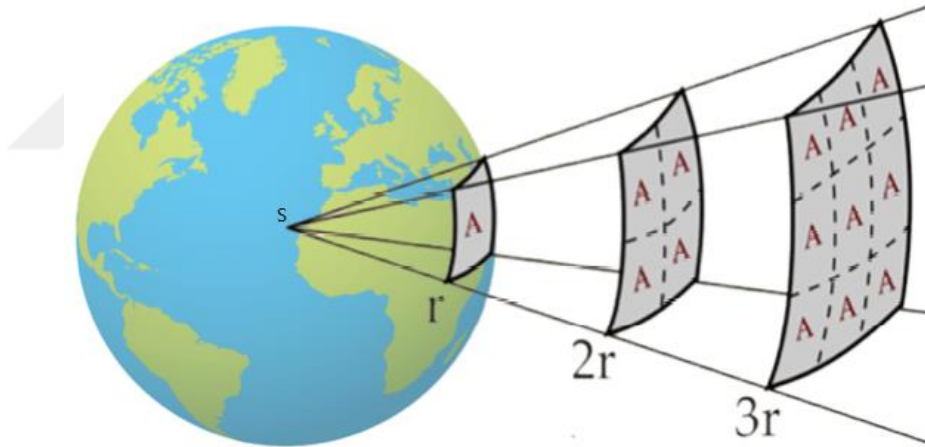
kentsel gelişim sınıflarına göre tahmini için bir regresyon denklemi oluşturulmuş ve bu modele ait determinasyon katsayısı (R^2) hesaplanmıştır.

Ters Kare Yasası

Işık yoğunluğu, kaynaktan alıcı yüzeye olan mesafe arttıkça azalır ve bu azalma, mesafenin karesiyle ters orantılıdır. Bu fiziksel ilişki, Ters Kare Yasası olarak adlandırılmakta ve ışığın doğrusal bir ortamda yayılması durumunda, enerji yoğunluğunun mesafe arttıkça hızla zayıfladığını ifade etmektedir. Pratikte bu azalma oranı farklı koşullara göre büyük ölçüde değişmektedir. İdealize edilmiş bir ilişki, Denklem 9'da olduğu gibi Ters Kare Yasası ile verilir; bu yasaya göre, her yöne yayılabilen ve çevresinde hiçbir engel bulunmayan (serbest alan koşulları) noktasal bir dalga kaynağı için yoğunluk (I), kaynaktan uzaklığın karesi, (d), ile azalır. (Brownson, 2013).

$$I \propto \frac{1}{d^2} \quad (3.18)$$

Bu yasa, geometrik bir prensibe dayanmakta olup noktasal bir kaynaktan üç boyutlu uzaya eşit biçimde yayılan enerji veya etki, mesafe arttıkça daha geniş bir alana dağılmaktadır.

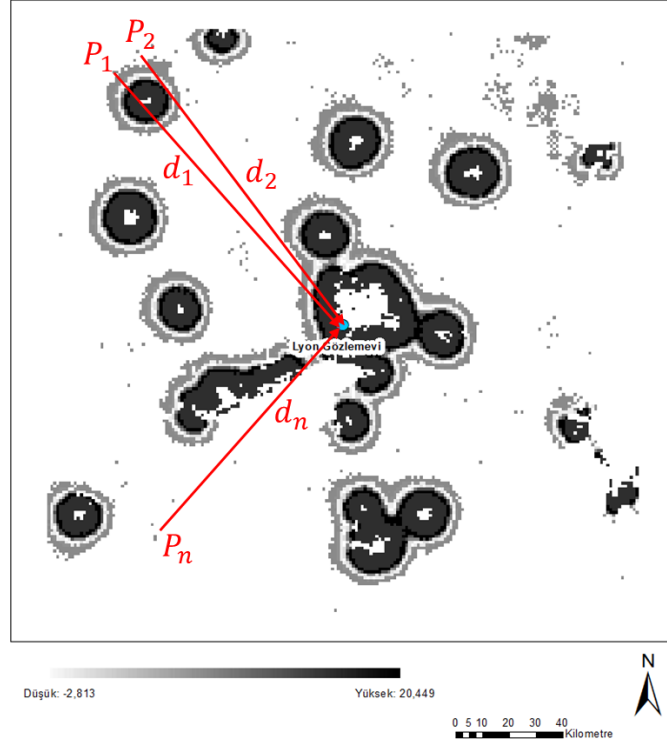


Şekil 3.20. Ters Kare Yasasının açıklanması için kullanılan bir görsel. (Kaynak: fizzics.org)

Şekil 3.20.'de S noktasının ideal bir ışık kaynağını, sarı bölgelerin ise yarıçapı r , $2r$ ve $3r$ olan küresel yüzeylerin bir kısmını siyah çizgilerin ise ışık akısını (enerji akışı) temsil ettiği varsayılırsa, her bir küresel yüzeyden geçen toplam akı aynı olup, yüzey alanı mesafenin karesi oranında arttığından (örneğin $3r$ yarıçaplı kürenin yüzeyi, r yarıçaplı yüzeyin 9 katıdır), birim alana düşen ışın yoğunluğu uzakta daha düşük olacaktır. Bu nedenle, r uzaklığındaki yüzeydeki ışık yoğunluğu, $2r$ uzaklığındakinin dört katı, $3r$ uzaklığındakinin ise dokuz katıdır. Başka bir deyişle, bir yüzey belirli bir ışık kaynağına iki kat daha uzaklaştığında, aynı büyüklükteki yüzeye düşen ışık miktarı başlangıçtaki değerin dörtte birine iner.

Ters kare yasası yalnızca görünen ışık için değil, eğer kaynağın ışınımı boşlukta noktasal ve izotropik (her yöne eşit) ise her türlü elektromanyetik ışınım için geçerlidir (radyo dalgaları, kızılötesi vb.). Bu yasa ideal koşullar içindir ve gerçek hayatta ortamın soğurma ve saçılma etkisi olmadığını varsaymaktadır. Ters kare yasasının matematiksel ifadesi Denklem 3.18.'de verildiği şekilde olup eşitlik formuna dönüştürmek için bir sabit katsayı eklenir. Noktasal ve her yöne eşit ışık yayan bir kaynak için bu katsayı, kaynağın gücü ile ilişkilidir. Tek başına evrensel bir sabit değildir; her durum için kaynağın yaydığı toplam güç veya ilgili büyüklük belirleyicidir. Dolayısıyla ters kare yasasının her alandaki özel formülünde, o etkiye özgü bir katsayı bulunur.

Bu çalışmada, 13 numaralı model karesinde bulunan astronomi sitesi noktasına etki eden yapay ışık miktarını belirleyebilmek amacıyla, 200×200 piksellik bir kare alan içerisinde yer alan tüm piksellerin katkısı değerlendirilmiştir. Alanın merkezinde yer alan astronomi sitesi noktasına göre, her bir pikselin yapay ışık düzeyini temsil eden raster (GeoTIFF) değeri alınmıştır. Ardından, her pikselin astronomi sitesi noktasına olan uzaklığı hesaplanmış ve bu uzaklığın karesi elde edilmiştir. Bu doğrultuda, her bir pikselin astronomi sitesi üzerindeki yapay ışık katkısı, ilgili raster değeri ile bu pikselin astronomi sitesine olan uzaklığının karesinin tersi oranında hesaplanmıştır. Diğer bir ifadeyle, her piksel için yapılan işlem, raster değeri / uzaklığın karesi biçiminde olup, tüm piksellerin bu katkıları toplanarak, astronomi sitesi noktasına etki eden toplam yapay ışık düzeyi hesaplanmıştır. Herbir yıl için bu hesaplama yapılmış ve elde edilen değerler için tekrardan bir doğrusal regresyon denklemi elde edilmiş ve buna göre 2030 yılı için astronomi sitesi noktasına etki eden yapay ışık değeri bulunmuştur. Şekil 3.21'de model çıktılarının doğrusal denklemleri sonucu elde edilen 2030 yılına ait yapay ışık haritası için de bu hesaplama yapılmıştır. Ters Kare yasasında idealize edilmiş denklem eşitlik halini aldığı anda bir sabit katsayı ile bu pratikte uygulanabilir hale gelmektedir. Bu katsayı herbir model karesi için değişken olup var olan yapay ışık gelişiminin 2030 yılındaki etkisi ve model çıktısından üretilen yapay ışığın etkisine oranı ile bulunmuştur. Aşağıdaki verilen Denklem 10 da ayrıntılı bir biçimde aktarılmıştır. Bu yöntem, ışığın ortamda yayılımını tanımlayan ve mesafenin karesiyle ters orantılı azaldığını ifade eden Ters Kare Yasası temel alınarak uygulanmıştır. Şekil 3.21.'de örnek olarak 13. model karesine ait yapay ışık görüntüsü verilmiştir. Şekil üzerinde denklemde kullanılan değişkenler örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.21. 13 numaralı model karesi için denklemde kullanılan değişkenlerin gösterimi.

R_t : t yılına ait astronomi sitesi noktasına etki eden toplam radyans, n: Toplam piksel sayısı ($200 \times 200 = 40,000$), P_i : i. pikselin raster (yapay ışık) değeri, d_i : i. pikselin astronomi sitesi (merkez piksel) noktasına olan uzaklığı, α_t : t. model karesi için hesaplanan katsayı olmak üzere toplam radyans:

$$R_t = \sum_{i=1}^n \alpha_t \frac{P_i}{d_i} \quad (3.19)$$

şeklinde hesaplanmıştır. α_t katsayısı için ise R_{2030} : 2030 yılı için hesaplanan astronomi sitesini etkileyen radyans, R_{reg} : 2012-2023 yılları için hesaplanan ters kare denklemlerinin doğrusal regresyon kullanılarak 2030 yılı için hesaplanan radyans olmak üzere:

$$\alpha_t = \frac{R_{reg}}{R_{2030}} \quad (3.20)$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Bu tez çalışmasında, kentsel gelişim ile yapay ışık yoğunluğu arasındaki ilişki analiz edilerek, yapay ışığın gelecekteki dağılımını öngörmeye yönelik bir modelleme süreci gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 2023 yılına ait en güncel yapay ışık verileri ile aynı döneme ait kentsel alan olasılık sınıflarını içeren raster veriler kullanılmıştır. Çalışma alanı olarak seçilen 13. kare, tüm olasılık sınıflarını temsil ettiği için örneklem açısından uygun bulunmuştur. Kentsel alanlar kategorik verilerden oluşurken, yapay ışık sürekli veri yapısındadır; bu nedenle iki veri türü arasında

piksel bazlı karşılaştırma yapılabilmesi için CBS yazılımında her bir kentsel olasılık sınıfına denk gelen yapay ışık değerleri elde edilmiştir. Bu değerlere ilişkin ortalamalar hesaplanmış, ardından kentsel gelişim sınıfları ile yapay ışık yoğunluğu arasındaki ilişkiyi modellemek amacıyla doğrusal regresyon analizi uygulanmıştır. Analiz sonucunda elde edilen regresyon denklemi ve determinasyon katsayısı (R^2), kentsel gelişimin yapay ışık üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve ışık kirliliğinin gelecekteki seyrine dair öngörü sağlamaktadır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

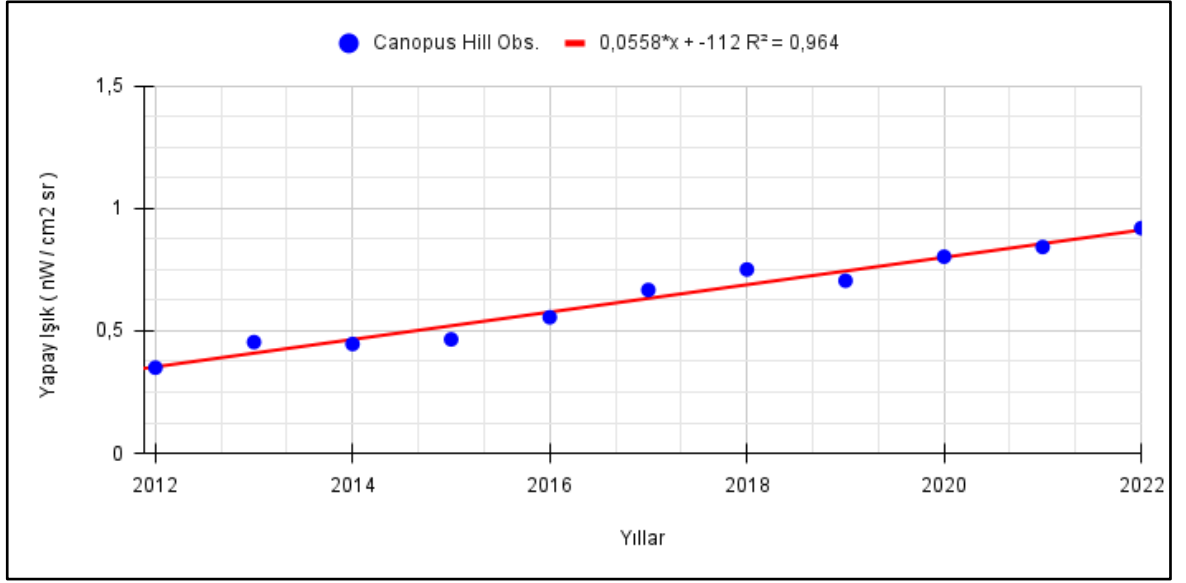
4.1. İstatistiksel Analizler

2012–2023 yılları arasındaki yıllık uydu görüntüleri kullanılarak, 1 metre ve üzeri çapta teleskoplara ev sahipliği yapan astronomik astronomi sitelerine ait zamansal ışık kirliliği istatistikleri çıkarılmıştır. Gözlemevlerinin koordinatlarının bulunduğu vektör veri üzerinden (Çizelge 3.1.) her bir konum için yapay ışık değerleri okunmuştur. Bu değerler kullanılarak öncelikle ortalama, standart sapma, doğrusal regresyon için eğim ve R^2 istatistikleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu istatistiklerden en yüksek pozitif ve negatif yönlü eğime sahip beşer adet astronomi sitesi olmak üzere toplamda on astronomi sitesi seçilerek Çizelge 4.1.'de verilmiştir. 84 profesyonel astronomi sitesinin tamamının yıllara göre yapay ışık değerleri ortalama, standart sapma, eğim ve R^2 değerleri ile beraber Ek 14.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Gözlemevlerine ait zamansal ışık kirliliği değerlerinden elde edilen ortalama, standart sapma, doğrusal regresyon için R^2 ve eğim istatistikleri.

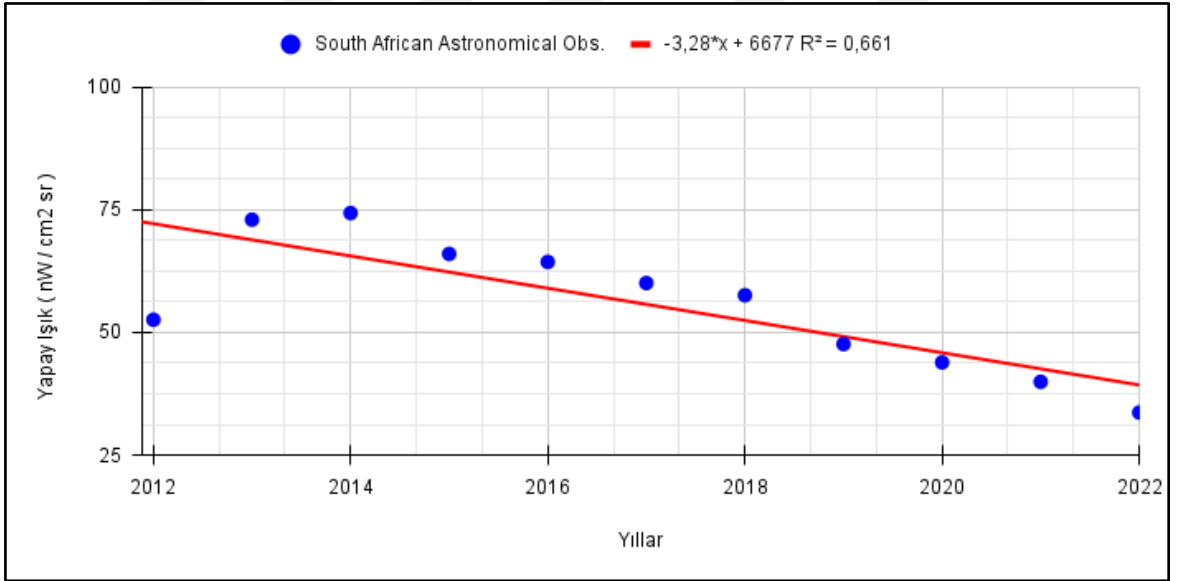
Gözlemevi	Ort	St	R^2	Eğim
Atina Ulusal Gözlemevi	77,8	992,4	0,05	0,5
Gemini	-0,3	1032,4	0,65	0,2
Mauna Kea	-0,3	1032,4	0,65	0,2
Hamburg	4,6	1029,9	0,73	0,1
Kottamia Astronomi	0,8	1031,8	0,89	0,1
South African Astronomi	55,7	1003,8	0,66	-3,3
Lowell	9,9	1027,2	0,86	-0,6
Lyon	8,3	1028,0	0,31	-0,1
ÇOMÜ Ulupınar	2,8	1030,8	0,56	-0,1
Merate	5,9	1029,2	0,12	-0,1

Gözlemevlerinin yıllık ortalama ışık kirliliği $2,6 \text{ nW cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ olup, astronomi sitelerinin $\sim 12\%$ 'si (10 astronomi sitesi) bu değerin üzerinde ışık kirliliğine sahiptir. Bu sitelerin içinde en yüksek ışık kirliliğine sahip astronomi sitesi tüm yılların ortalaması alınarak $77,8 \text{ nW cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ olarak bulunan Atina Ulusal Gözlemevi'dir. R^2 değeri en yüksek (0,96) olan astronomi sitesi ise ile Canopus Hill Gözlemevidir. Şekil 4.1'de, 2012–2022 yılları arasında Canopus Hill Gözlemevi'nin konumuna ait yapay ışığın ($\text{nW cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$) zamansal değişimi gösterilmektedir. Mavi noktalar yıllık ortalama yapay ışık değerlerini, kırmızı çizgi ise bu verilere ait doğrusal regresyon eğrisini temsil etmektedir. $R^2 = 0,96$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1. Canopus Hill Gözlemevine ait yıllara bağlı yapay ışığın değişim grafiği.

Bu astronomi sitelerinin içerisinde eğimi en yüksek (-3,3) değeri alan astronomi sitesi South African Astronomical Gözlemevi'dir. 2012-2022 yılları arasında zamana bağlı yapay ışık değişimine bakıldığında eğimi negatif değer alan ve doğrusal regresyona göre azalan trend gösteren 6 astronomi sitesinden biridir (Şekil 4.2).

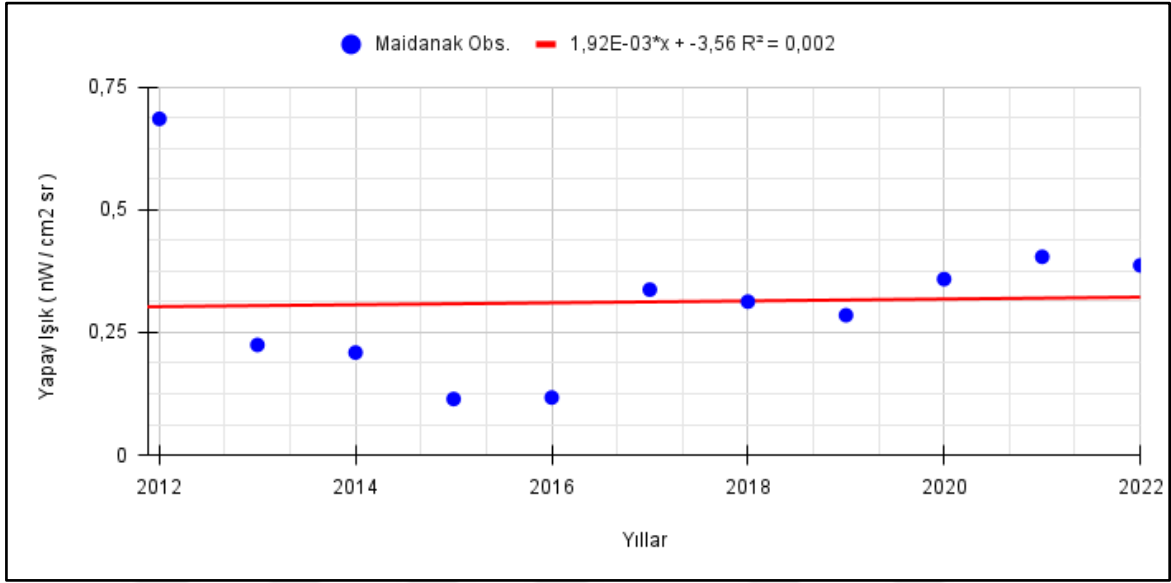


Şekil 4.2. South African Astronomical Gözlemevine ait yıllara bağlı yapay ışığın değişim grafiği.

Mavi noktalar yıllık ortalama yapay ışık değerlerini, kırmızı çizgi ise bu verilere ait doğrusal regresyon eğrisini temsil etmektedir. $R^2 = 0,66$ olarak hesaplanan determinasyon katsayısı, doğrusal regresyon modelinin yapay ışık düzeyindeki toplam varyansın %66'sını açıkladığını göstermektedir.

South African Astronomi Gözlemevi'nin yanı sıra lineer regresyon denkleminde negatif yönde eğim gösteren diğer astronomi siteleri ise şunlardır: NANTEN2, ÇOMÜ Ulupınar, Lowell, Lyon ve Merate Gözlemevleri.

Bu istatistiksel değerlere bakıldığında eğimi en az olan yani yıllara bağlı en az ışık kirliliği değişimi gösteren astronomi sitesi Maidanak astronomi sitesidir. Eğimi 0 olan bu astronomi sitesinin zamana bağlı değişim grafiği Şekil 4. 3.'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Maidanak Gözlemevine ait yıllara bağlı yapay ışığın değişim grafiği.

Şekil 4. 3.'de mavi noktalar astronomi sitesinin yıllar içerisinde aldığı değerleri temsil etmekte olup kırmızı çizgi bu grafik için oluşturulan doğrusal uyum çizgisidir. Lineer regresyon denkleminde elde edilen eğim pozitif olmakla birlikte, son derece küçük bir değerdedir. Bu da yapay ışık düzeyinde yıllar içinde çok zayıf bir artış eğilimi olduğunu göstermektedir. Ayrıca, R^2 değerinin sıfıra yakın olması, doğrusal modelin bağımlı değişkendeki varyansı açıklamakta yetersiz kaldığını ve model ile veri arasında anlamlı bir ilişki kurulamadığını göstermektedir.

84 astronomi sitesinin tamamı için doğrusal regresyon denklemleri incelenmiştir (Ek 15.). Yapay ışık düzeylerinin zamansal değişimini en güçlü şekilde yansıtan doğrusal ilişki Canopus Hill Gözlemevi'nde gözlemlenmiş olup, bu astronomi sitesinin determinasyon katsayısı 0,96 olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek değer, bölgedeki yapay ışığın yıllar içerisinde istikrarlı bir şekilde arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, Atina Ulusal Gözlemevi, 0,5 ile en yüksek yıllık eğime sahip olup, ışık kirliliğinin en hızlı arttığı astronomi sitesi olarak öne çıkmaktadır. Aynı astronomi sitesi, ortalama yapay ışık düzeyi açısından da ilk sırada yer almakta ve $77,8 \text{ nW cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ değeri ile çalışmada incelenen istasyonlar arasında en yüksek yapay ışık seviyesine sahiptir. Öte yandan, Gemini ve Mauna Kea astronomi sitelerinin hem R^2 (0,65) hem de eğim (0,2) değerlerinin birebir aynı olması, bu iki astronomi sitesinin konumsal yakınlıklarına dikkat çekmektedir. Tüm bu bulgular,

farklı astronomi sitelerinin bulunduğu bölgelerde ışık kirliliği eğilimlerinin farklı dinamiklerle şekillendiğini ortaya koymaktadır.

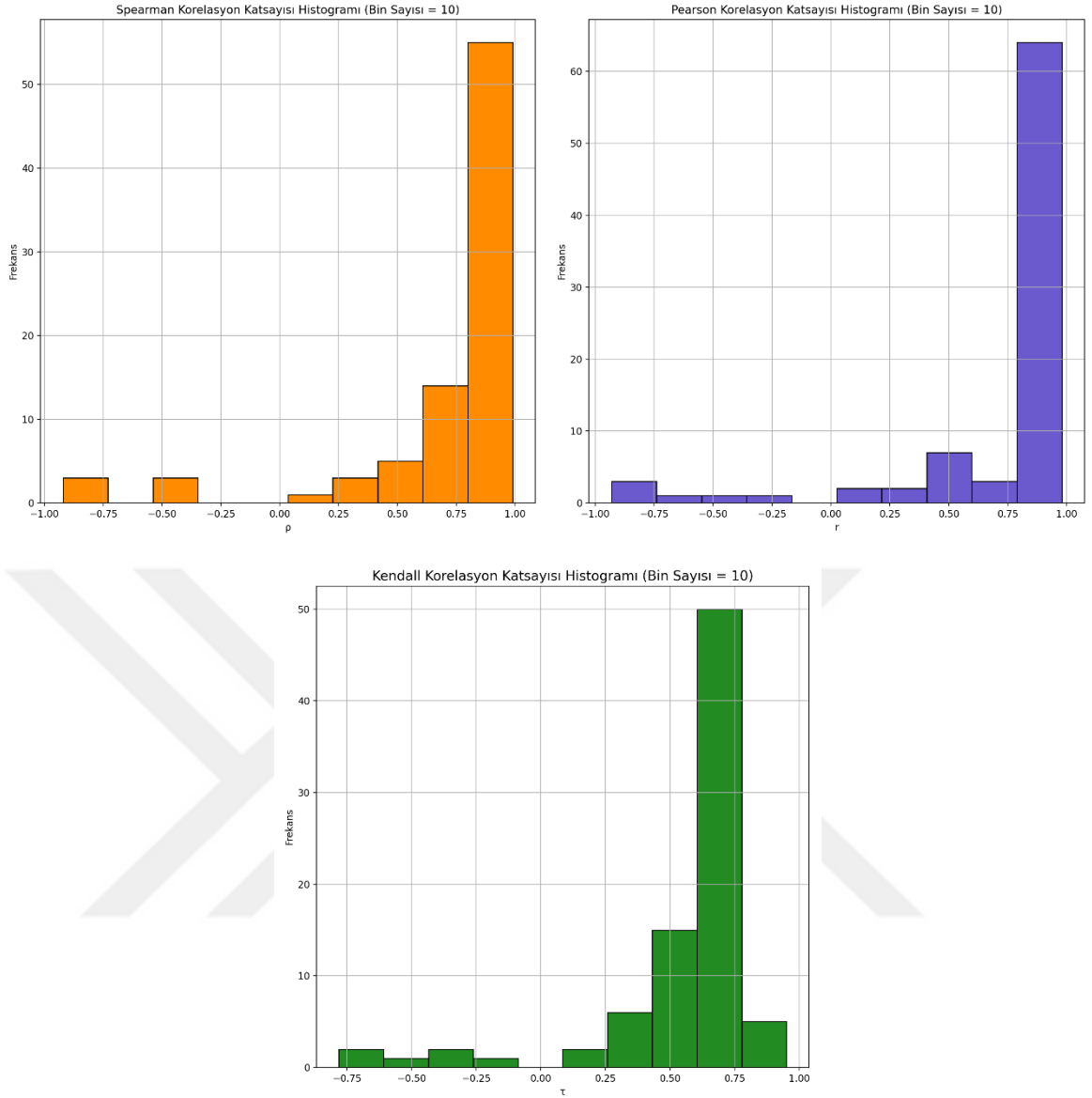
Çizelge 4.2'de, Spearman korelasyon katsayısına göre en yüksek değere sahip 10 astronomi sitesi için Spearman (ρ), Pearson (r) ve Kendall (τ) korelasyon katsayıları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Gözlemlerinin geri kalan kısmına ait tam liste Ek 16'da sunulmuştur. Bu katsayılar, her bir astronomi sitesinin bulunduğu konumda yapay ışık düzeylerinin 2012–2022 yılları arasında nasıl bir eğilim gösterdiğini ortaya koymak amacıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2. (ρ) korelasyon katsayısına göre en büyük değeri alan 10 astronomi sitesinin (ρ), (r) ve (τ) korelasyon katsayıları.

Gözlemevi	(ρ)	(r)	(τ)
Lowell	-0,92	-0,93	-0,78
SAAO	-0,80	-0,81	-0,75
ÇOMÜ	-0,75	-0,75	-0,51
NANTEN2	-0,44	-0,45	-0,24
Lyon	-0,39	-0,56	-0,27
Merate	-0,39	-0,35	-0,27
Atina Ulusal Gözlemevi	0,18	0,22	0,16
Anglo-Australian	0,25	0,19	0,24
Maidanak	0,37	0,05	0,31
Yerkes	0,41	0,47	0,31

Elde edilen sonuçlara göre, en güçlü negatif korelasyon Lowell Gözlemevi'nde gözlemlenmiş olup, Spearman katsayısı -0,92, Pearson katsayısı -0,93 ve Kendall katsayısı -0,78 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, Lowell Gözlemevi çevresinde son on yılda yapay ışık düzeylerinin anlamlı bir biçimde azaldığını göstermektedir. Benzer şekilde, SAAO Gözlemevi (Spearman: -0,80) ve ÇOMÜ Gözlemevi (Spearman: -0,75) de güçlü negatif korelasyon değerlerine sahiptir; bu da söz konusu bölgelerde yapay ışık seviyelerinin düşüş eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır. NANTEN2, Lyon ve Merate astronomi siteleri de orta düzeyde negatif korelasyon değerleri ile yapay ışıkta hafif bir azalma eğilimi göstermektedir. Öte yandan, Yerkes Gözlemevi Spearman 0,41 ve Pearson 0,47 katsayıları ile en yüksek pozitif korelasyona sahip astronomi sitesi olarak öne çıkmaktadır. Bu, bölgedeki yapay ışık düzeylerinin yıllar içerisinde belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Maidanak Gözlemevi ise Spearman katsayısı 0,37 ile zayıf bir pozitif korelasyon sergilese de, Pearson katsayısının 0,05 gibi düşük bir değer alması, değişimin doğrusal bir yapı göstermediğini işaret etmektedir.

84 astronomi sitesinin (ρ), (r) ve (τ) korelasyon katsayıları kullanarak herbiri için ayrı ayrı histogramlar elde edilmiştir.



Şekil 4.4. 84 astronomi sitesi için sırasıyla (ρ), (r) ve (τ) korelasyon katsayılarının histogramları

Şekil 4.4. incelendiğinde üm korelasyon türlerinde verilerin büyük bölümü pozitif yönde güçlü korelasyon göstermektedir. Spearman ve Pearson ve Kendall korelasyon katsayısı histogramlarının sola çarpık olduğu görülmektedir.

Monotonik artışlarda sıklıkla kullanılan Mann-Kendall test istatistiği ve Sen's Slope tahmin edicisi hesaplanarak astronomi sitelerinin ışık kirliliğinde anlamlı bir artış veya azalış olup olmadığını belirlemek için bu çalışmada kullanılmıştır. Bu test istatistiği yıllık ortalamalardan oluşan veri seti üzerinden elde edilmiştir. Bu istatistik değerleri Çizelge 3.1.'den seçilen ilk on astronomi sitesi üzerinden örnek olarak Çizelge 4.3.'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Gözlemevlerinin yıllık yapay ışık değerleri kullanılarak elde edilen Mann-Kendall test istatistiği ve Sen's Slope tahmin edicisi değerleri.

NO	Gözlemevi	Mann-Kendall	Sen's Slope
1	NANTEN2	0,35	-0,03
2	Gemini	0,01	0,15
3	Gemini - 2	0,02	0,02
4	Mauna Kea	0,01	0,15
5	Mt. Graham International	0,01	0,03
6	DAG	0,01	0,05
7	Cerro Pachon	0,01	0,02
8	Paranal	0,02	0,03
9	Las Campanas	0,01	0,03
10	Lowell	0,00	-0,64

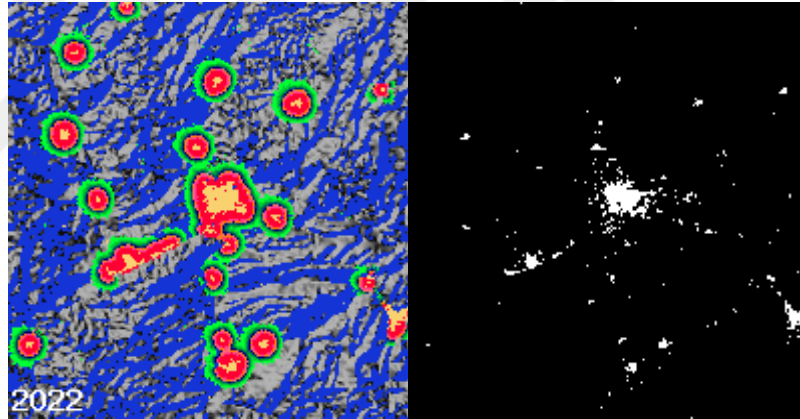
Çizelge 4.3’de, astronomi sitelerinin yıllık yapay ışık düzeylerine dayanarak uygulanan Parametrik olmayan trend analizi yöntemlerinden biri olan Mann-Kendall testi ve değişikliklerin büyüklüğünü tahmin etmeye yarayan Sen’s slope testi verilmiştir. Yalnızca NANTEN2 astronomi sitesi için Mann-Kendall katsayısı 0,35 gibi görece yüksek bir pozitif değere ulaşmıştır; ancak bu astronomi sitesi için Sen’s Slope değeri -0,03 olup, zıt yönde bir eğilim göstermektedir. Bu durum, verideki genel artış eğiliminin tutarsız ya da istatistiksel olarak anlamlı olmadığını düşündürmektedir. Diğer astronomi sitelerinin Mann-Kendall değerleri ise 0,00 ile 0,02 arasında değişmekte olup, bu sonuçlar anlamlı bir eğilim ortaya koymamaktadır. Sen’s Slope tahminleri de bu durumu desteklemekte ve oldukça küçük değerlerle, yapay ışık düzeyinde güçlü bir değişim olmadığını göstermektedir. Özellikle Gemini ve Mauna Kea astronomi sitelerinde Sen’s Slope değeri 0,15 ile nispeten yüksek olsa da, Mann-Kendall istatistiği 0,01 olduğundan eğilim istatistiksel olarak anlamlı kabul edilemez. Dikkat çeken bir diğer astronomi sitesi ise Lowell olup, Mann-Kendall değeri 0,00 iken Sen’s Slope değeri -0,64’tür. Bu, doğrusal olmayan fakat belirgin bir azalma eğilimi olabileceğini düşündürmektedir. Ancak Mann-Kendall testinde anlamlılık eşiğine ulaşılmadığı için bu eğilim istatistiksel olarak desteklenmemektedir.

84 astronomi sitesi için Mann-Kendall ve Sen’s Slope değerleri Ek 17.’de sunulmuştur. Tien Shan, European Southern, Llano del Hato, Maidanak, Shamakhi, Yerkes, Rothney, Merate, Lyon, NANTEN-2, Anglo-Australia ve Atina Ulusal Gözlemevi’nde Mann-Kendall test istatistiği olan p değeri 0,05’den büyüktür ve bu da istatistiksel olarak anlamlı bir trendin olmadığını göstermektedir. Kalan 72 astronomi sitesinde ise istatistiksel olarak anlamlı bir trend vardır. Sen’s Slope eğimi için elde edilen Sen’s Slope tahmin edicisine göre anlamlı bir değişimin olduğu 72 astronomi sitesinin %4,2’sinde negatif yönlü bir trend mevcuttur. Bu da diğer astronomi sitelerinde zamansal olarak artan ve istatistiksel olarak anlamlı olan bir ışık kirliliği artışı olduğu anlamına gelmektedir.

4.2. SLEUTH Modeli Çıktıları ve Kentsel Alan

SLEUTH modelinde kullanılan 55 model karesi için modelin bütün adımları çalıştırılmıştır. Modelin ilk kalibrasyon aşaması olan kaba kalibrasyon aşamasında kentsel alan tanımlanamadığından 9 model karesi modelde çalışmadığı için diğer süreçlere dahil edilmemiştir. Kaba, ince ve final kalibrasyonundan sonra öngörü ve tahmin aşaması için senaryo dosyası ilgili parametrelerde değişiklik yapılarak Cygwin emülatöründe çalıştırılmıştır. Bu sayede tüm model karelerinin modelin başlangıç yılı olan 2001 yılından modelin bitiş yılı olan 2050 yılına kadar olan süre zarfındaki kentsel gelişimi belirlenmiştir.

SLEUTH modeli içerisinde rastgele seçilmiş bir model karesi için simüle edilmiş 2022 yılına ait kentsel alan verisi ile hâlihazırda var olan kentsel alan verileri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.4.'de 2022 yılına ait Fransa'da bulunan Lyon Gözlemesine ait 13 numaralı model karesinin sol panelde model tarafından simüle edilen görüntüsü sağ panelde ise model girdisi olarak kullanılan kentsel alan verisi bulunmaktadır. Sol paneldeki kentsel model çıktısı Çizelge 3.10.'da verildiği şekilde kullanılmıştır. Sol paneldeki 2022 yılına ait kentsel alan görüntüsünde ise beyaz yerler kentsel alanı siyah yerler ise kentsel olmayan alanı temsil etmektedir.



Şekil 4.5. 13 numaralı model karesinin 2022 yılına ait model tarafından simüle edilen ve var olan kentsel alan görüntüsü.

Şekil 4.5.'de sol paneldeki ve sağ paneldeki GIF görüntüleri Python yazılımı ile piksel piksel okutulmuştur. Kullanılan python kodu Ek 10.'da verilmiştir. Burada Şekil 4.4.'de sol paneldeki GIF görüntüsü için hex kodu "0Xf9d16e" olan çekirdek rengi kullanılmıştır. Bu değeri alan pikselller "kentsel alan" almayan değerler ise "kentsel olmayan alan" olarak nitelendirilmiştir. Burada Şekil 4.5.'de sağ paneldeki GIF görüntüsü ise 0 ve 255 değerlerinden oluşan bir görüntüdür. Bu görüntüde de 0 değerleri "kentsel olmayan alan" 255 değerleri ise "kentsel alan" olarak nitelendirilmiştir. Bu iki görüntü için karşılaştırılan değerler ile Kappa İstatistiği oluşturulan Python betiği yardımı ile hesaplanmıştır (Ek 11.). Sonuç olarak Cohen'in kappa skoru 0,63 olarak bulunmuştur. Bu değer, model ile referans veriler arasında iyi düzeyde bir uyum olduğunu göstermektedir (Lands ve Koch, 1977)

Model karelerinin SLEUTH modelinde tüm aşamalarının tamamlanması ile 2001 yılından 2050 yılına kadar simülasyon ve tahmin görüntüleri elde edilmiştir. Bu görüntülerden büyüme tipi farklı olan 6 kare seçilmiştir. Bunlardan ilki 2 numaralı model karesidir ve Mauna Kea ve Gemini Gözlemevlerini içinde bulundurmaktadır (Şekil 4.6.) Model başlangıç yılından 2050 yılına olan süre zarfında tüm kentsel alan olasılıksal çıktıları görülmektedir. 2050 yılında kentsel alan %90-%100 arası olacak şekilde çekirdek kentsel alanın etrafında toplanmıştır.

Şekil 4. 7.'de Lyon Astronomi Sitesinin bulunduğu model karesi verilmiştir. Model başlangıç yılından 2050 yılına olan süre zarfında tüm kentsel alan olasılıksal çıktıları görülmektedir. 2050 yılında kentsel alan %90-%100 arası olacak şekilde çekirdek kentsel alanın etrafında yayılarak büyüyen bir kentsel alan gelişimi göstermektedir.

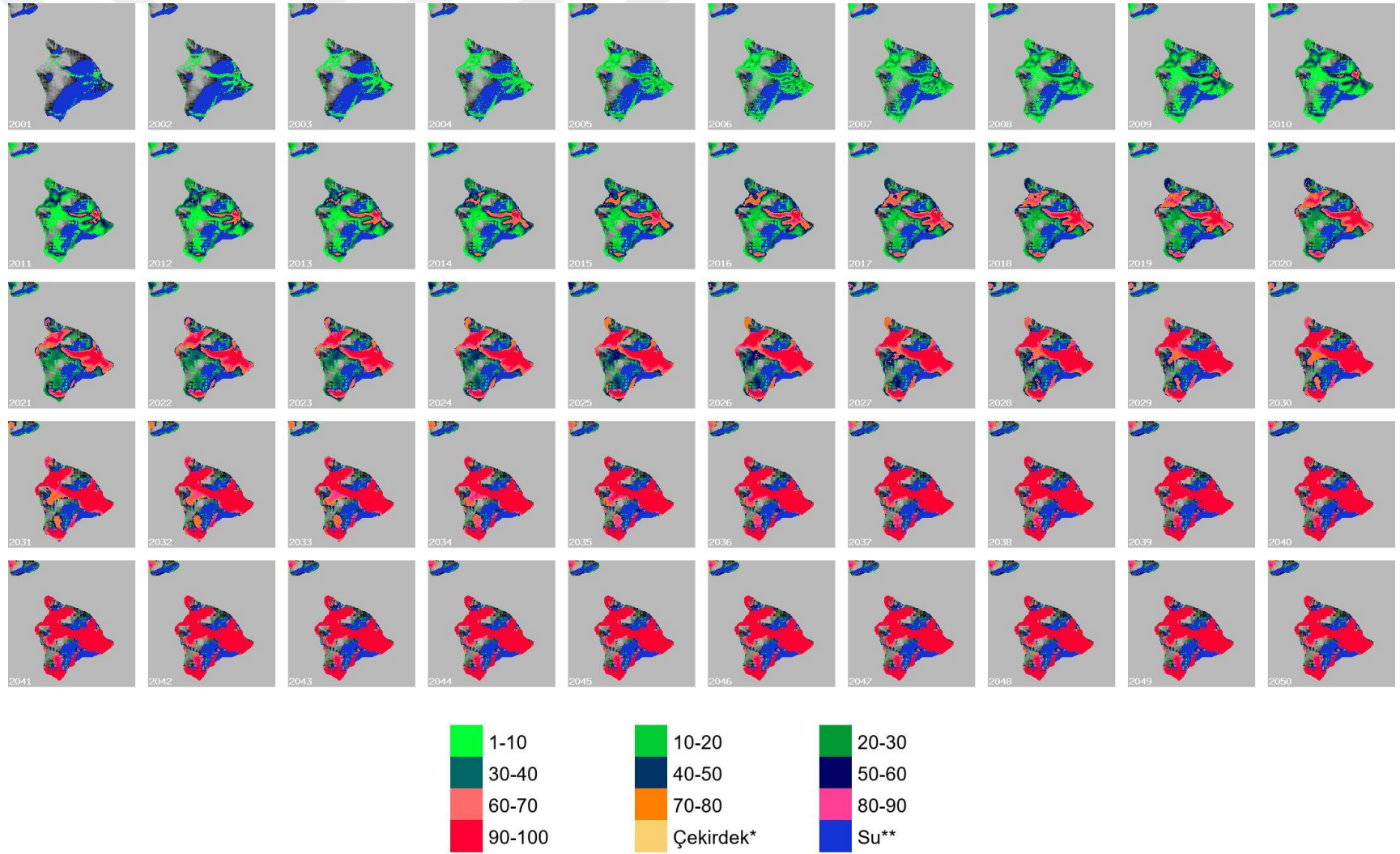
Şekil 4. 8.'de Merate Astronomi Sitesinin bulunduğu model karesi verilmiştir. Model başlangıç yılından 2050 yılına olan süre zarfında tüm kentsel alan olasılıksal çıktıları görülmektedir. 2050 yılında kentsel alan %10-%20 arası olup kentsel büyüme olasılığı diğer karelere oranla daha azdır. Fakat geniş bir alanın kentsel büyümeden etkilenebileceği görülmektedir.

Şekil 4.9.'da İran Ulusal Astronomi Sitesinin bulunduğu model karesi verilmiştir. Model başlangıç yılından 2050 yılına olan süre zarfında tüm kentsel alan olasılıksal çıktıları görülmektedir. 2050 yılında kentsel alan %10-%20 arasındadır. Tahmin edilen bu kentsel büyümenin daha az geniş bir alana yayıldığı görülmektedir.

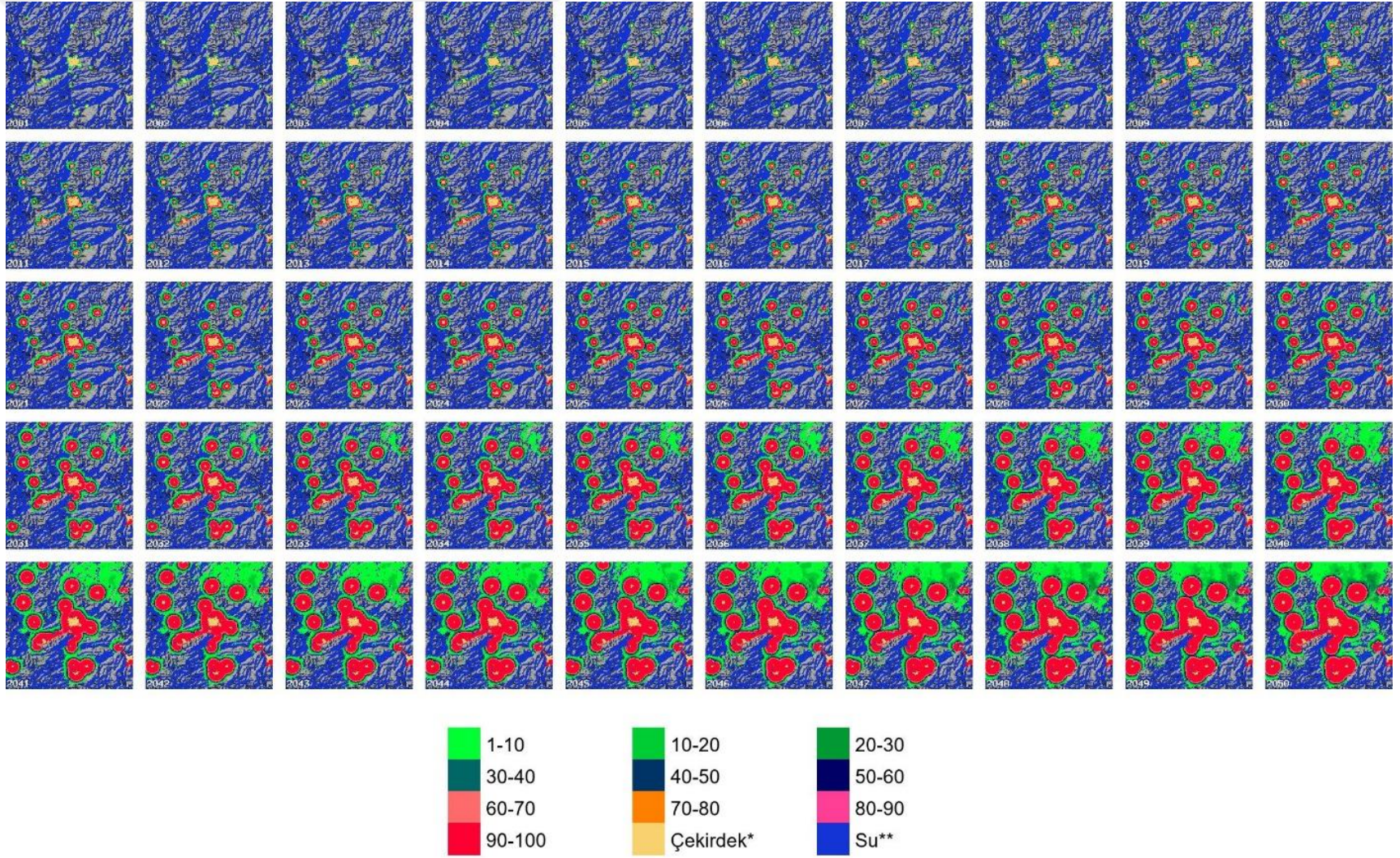
Şekil 4.10.'da Zadko Astronomi Sitesinin bulunduğu model karesi verilmiştir. Model başlangıç yılından 2050 yılına olan süre zarfında tüm kentsel alan olasılıksal çıktıları görülmektedir. 2050 yılında kentsel alan %10-%20 ve %20-%30 arasındadır. Tahmin edilen bu kentsel büyümenin geniş bir alana yayıldığı ve yol tabanlı bir büyüme olduğu görülmektedir.

Şekil 4.11.'de Arcetri Astronomi Sitesinin bulunduğu model karesi verilmiştir. Model başlangıç yılından 2050 yılına olan süre zarfında tüm kentsel alan olasılıksal çıktıları görülmektedir. 2050 yılında kentsel alan %1-%10 arasındadır. Tahmin edilen bu kentsel büyüme oldukça az bir alandadır.

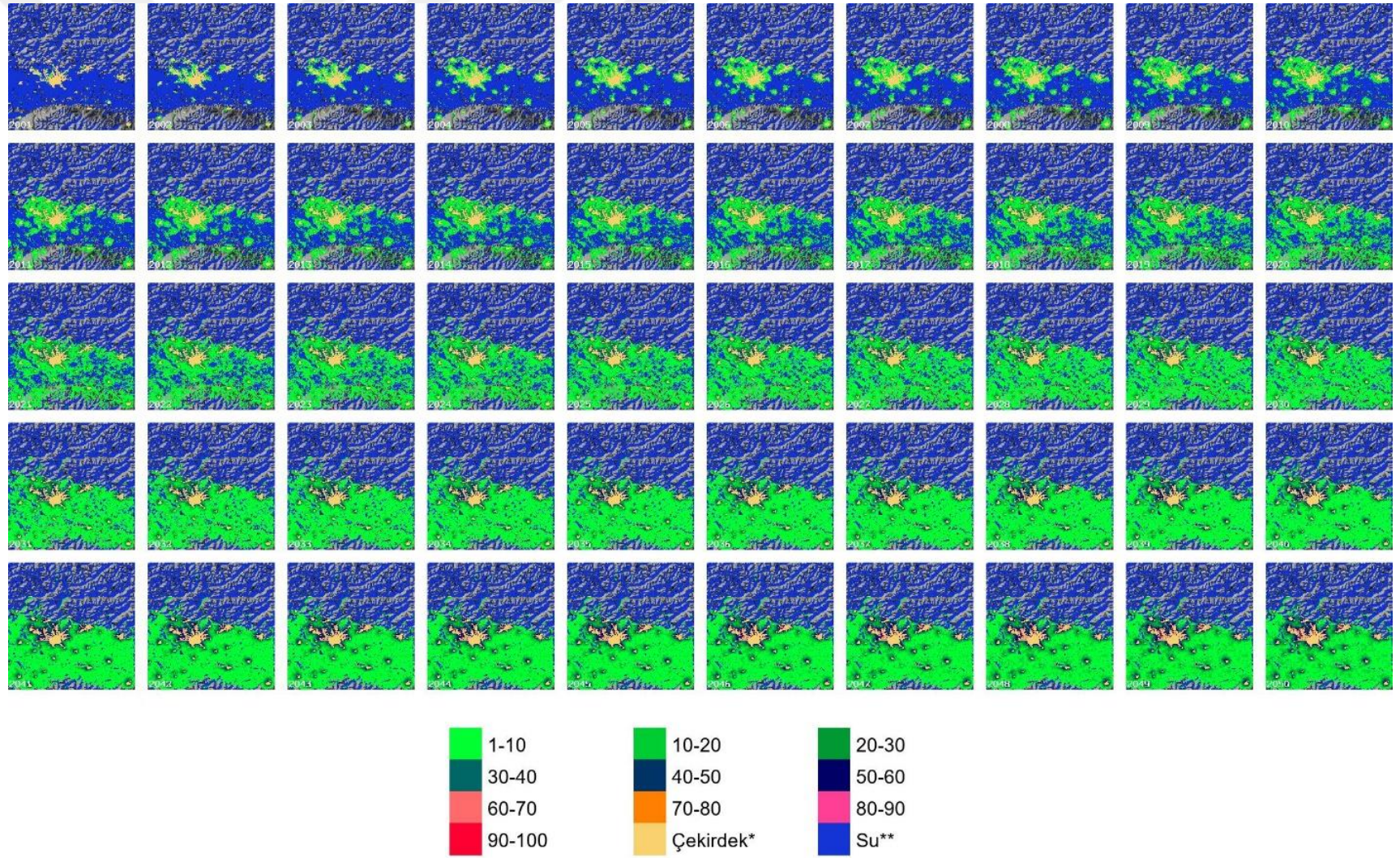
Bunlara ek olarak Çizelge 4.1.'de verilen eğimi negatif ve pozitif yönde en büyük olan ve yukarıdaki astronomi sitelerinin dışında kalan Atina Ulusal Gözlemevi, South African Astronomical, Lowell ve ÇOMÜ astronomi siteleri de Şekil 4.12., Şekil 4.13., Şekil 4.14., Şekil 4.15.'de sunulmuştur.



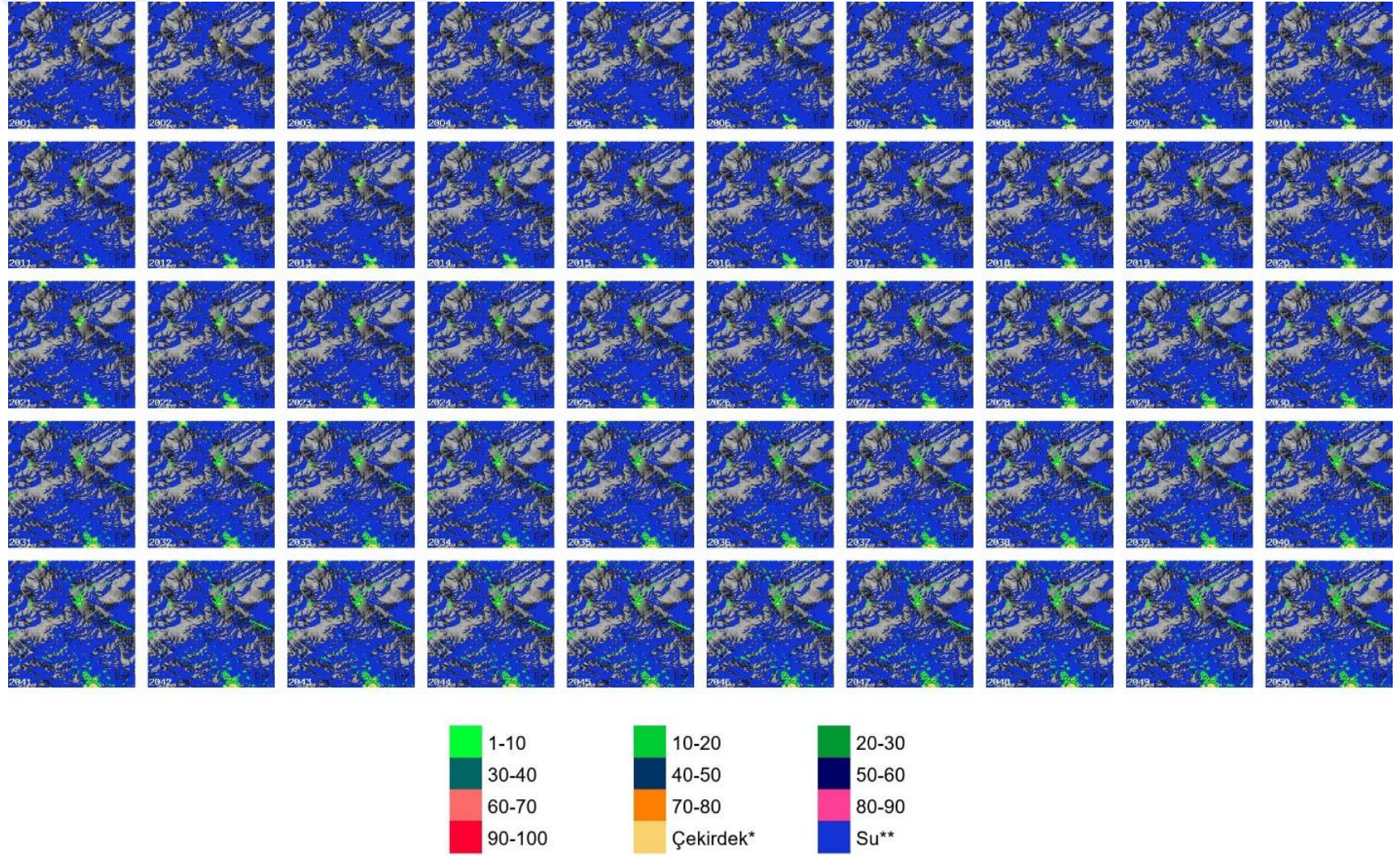
Şekil 4.6. 2 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.



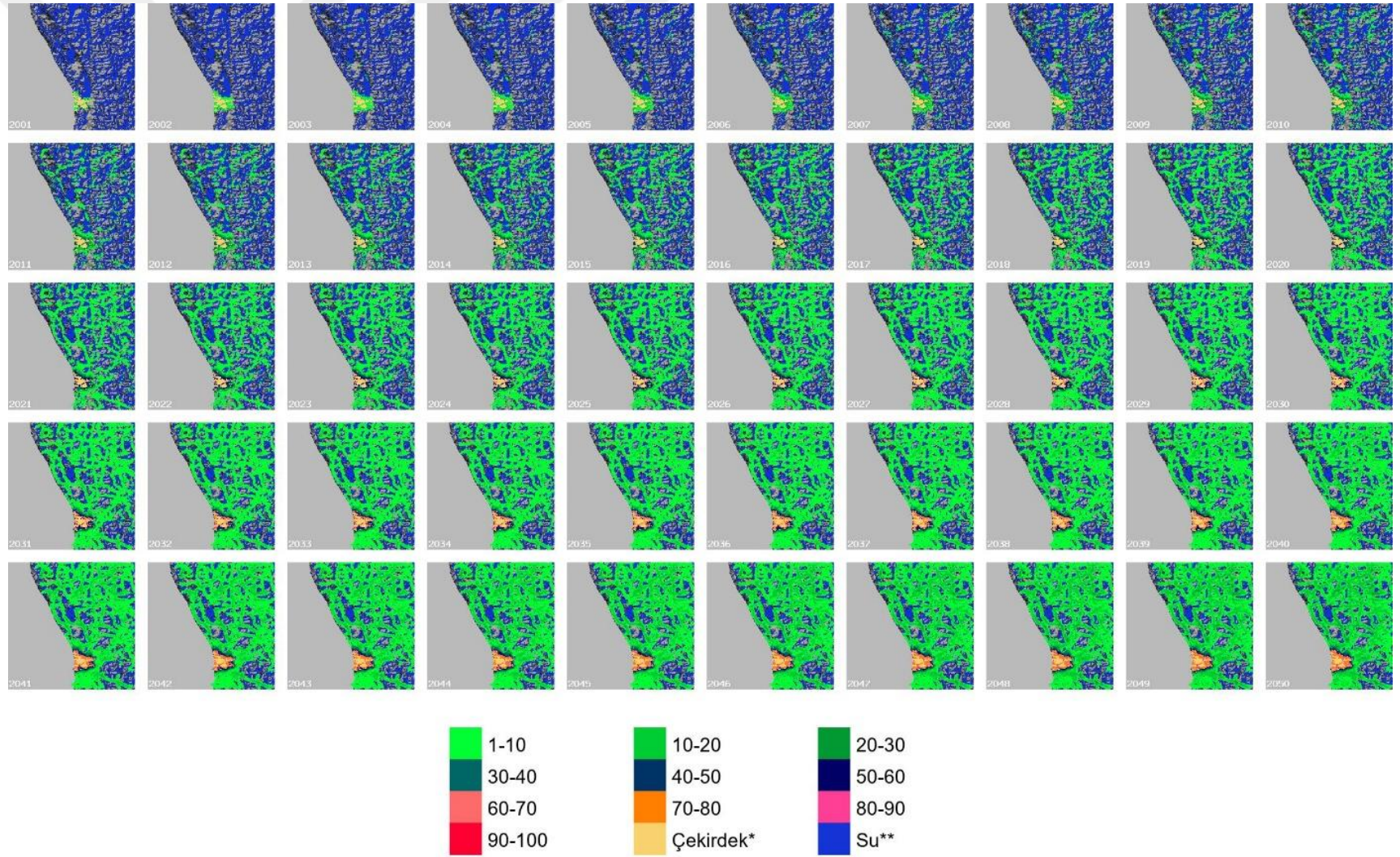
Şekil 4.7. 13 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.



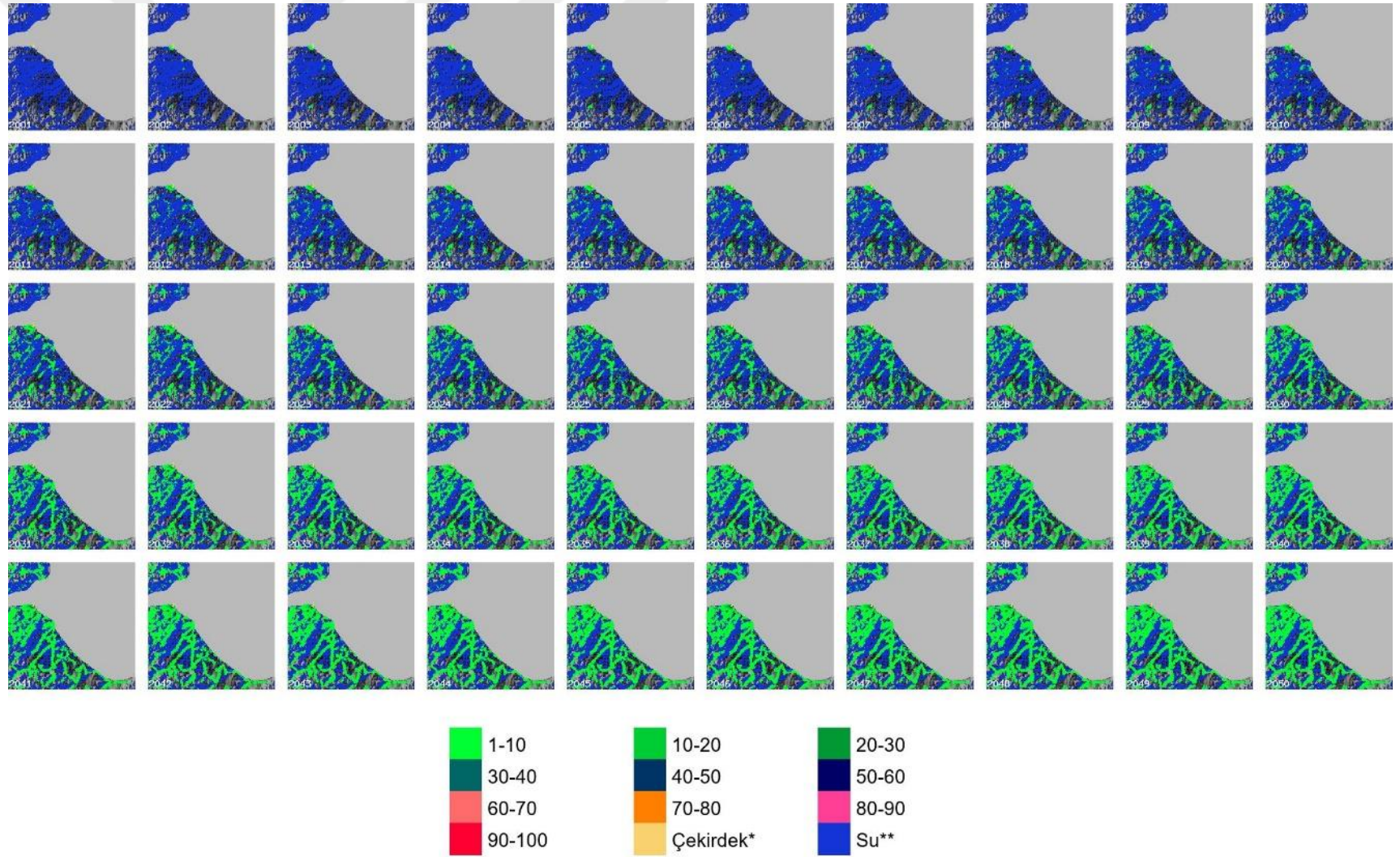
Şekil 4.8. 15 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.



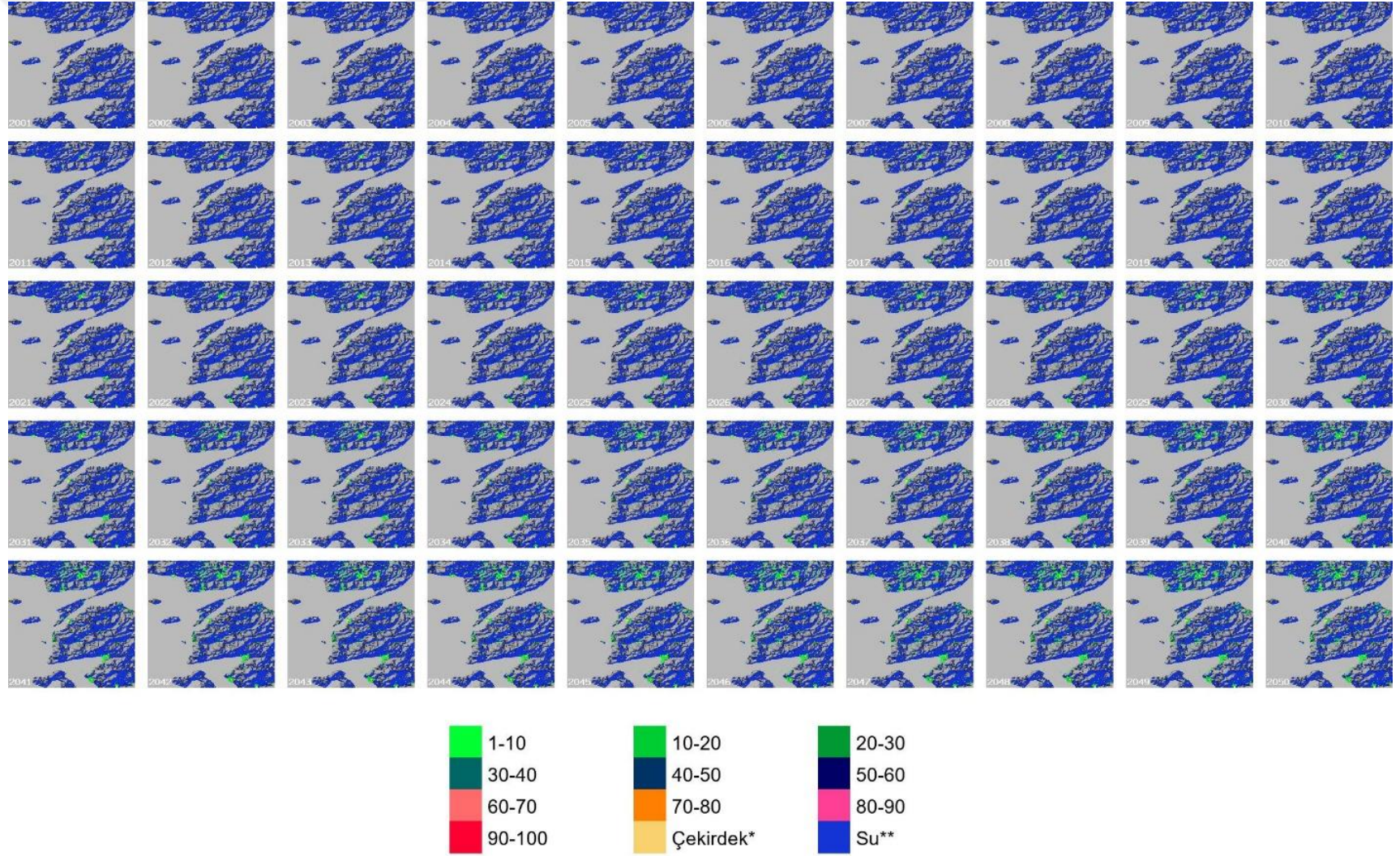
Şekil 4.9. 32 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.



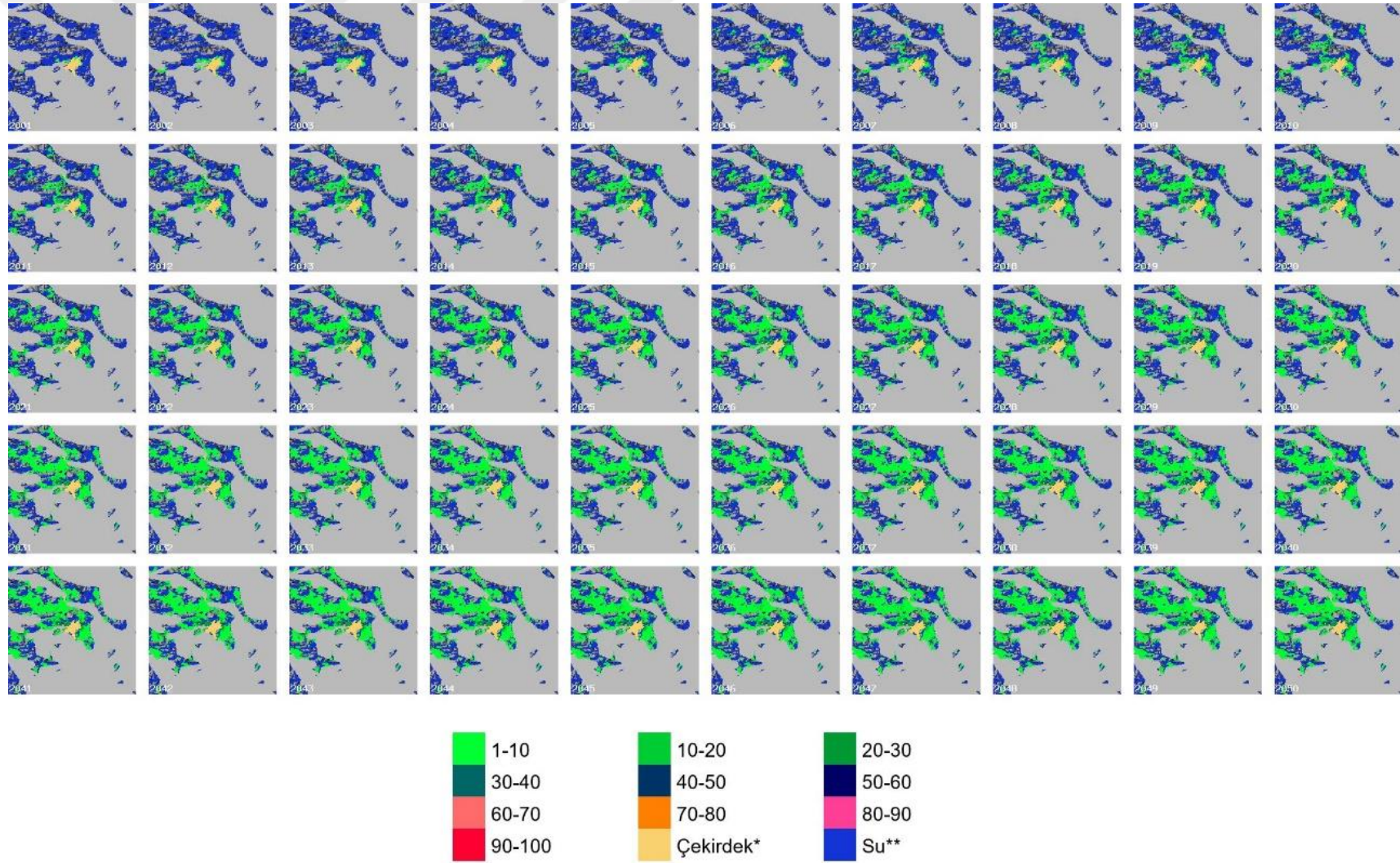
Şekil 4.10. 46 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.



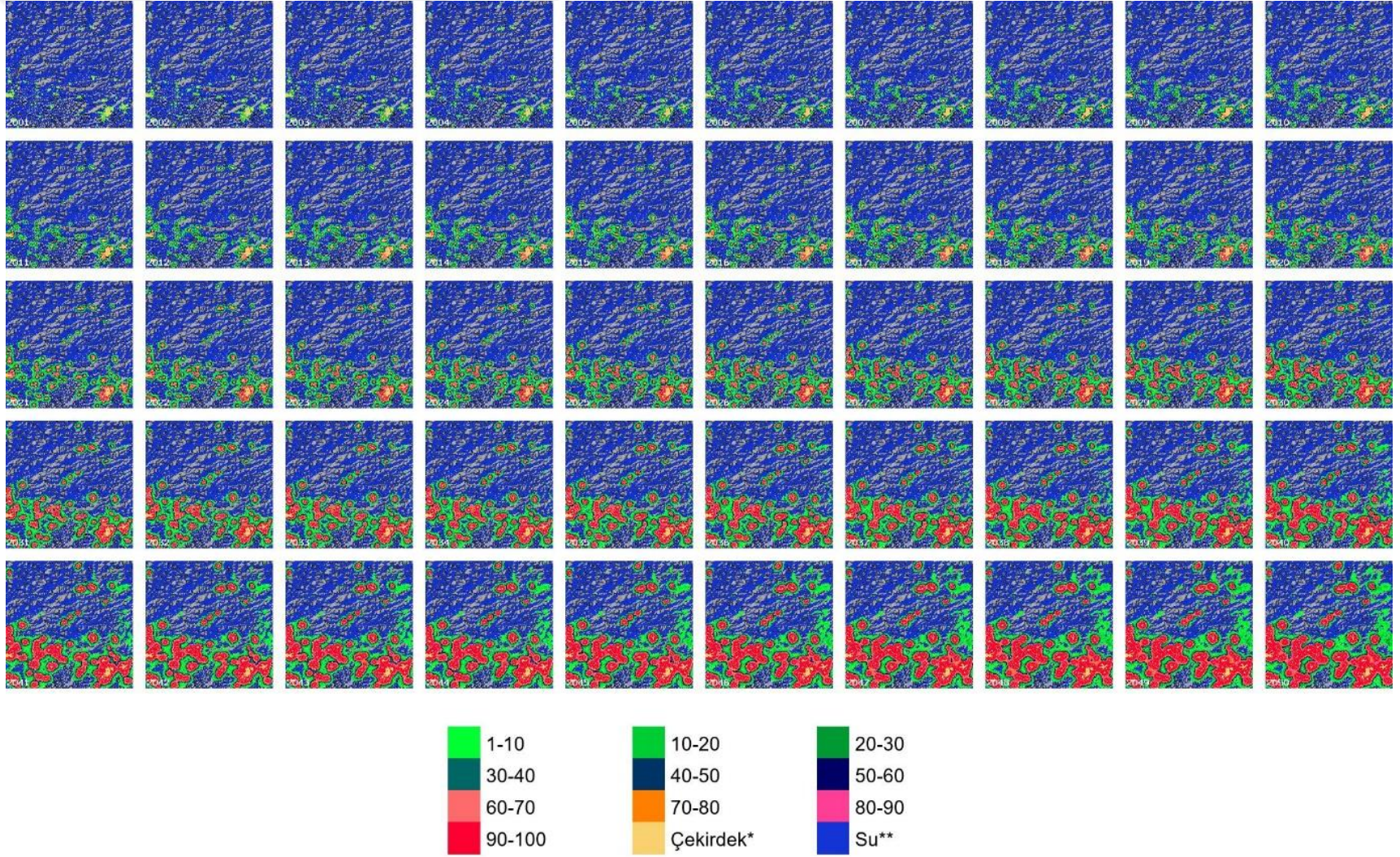
Şekil 4.11. 33 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı



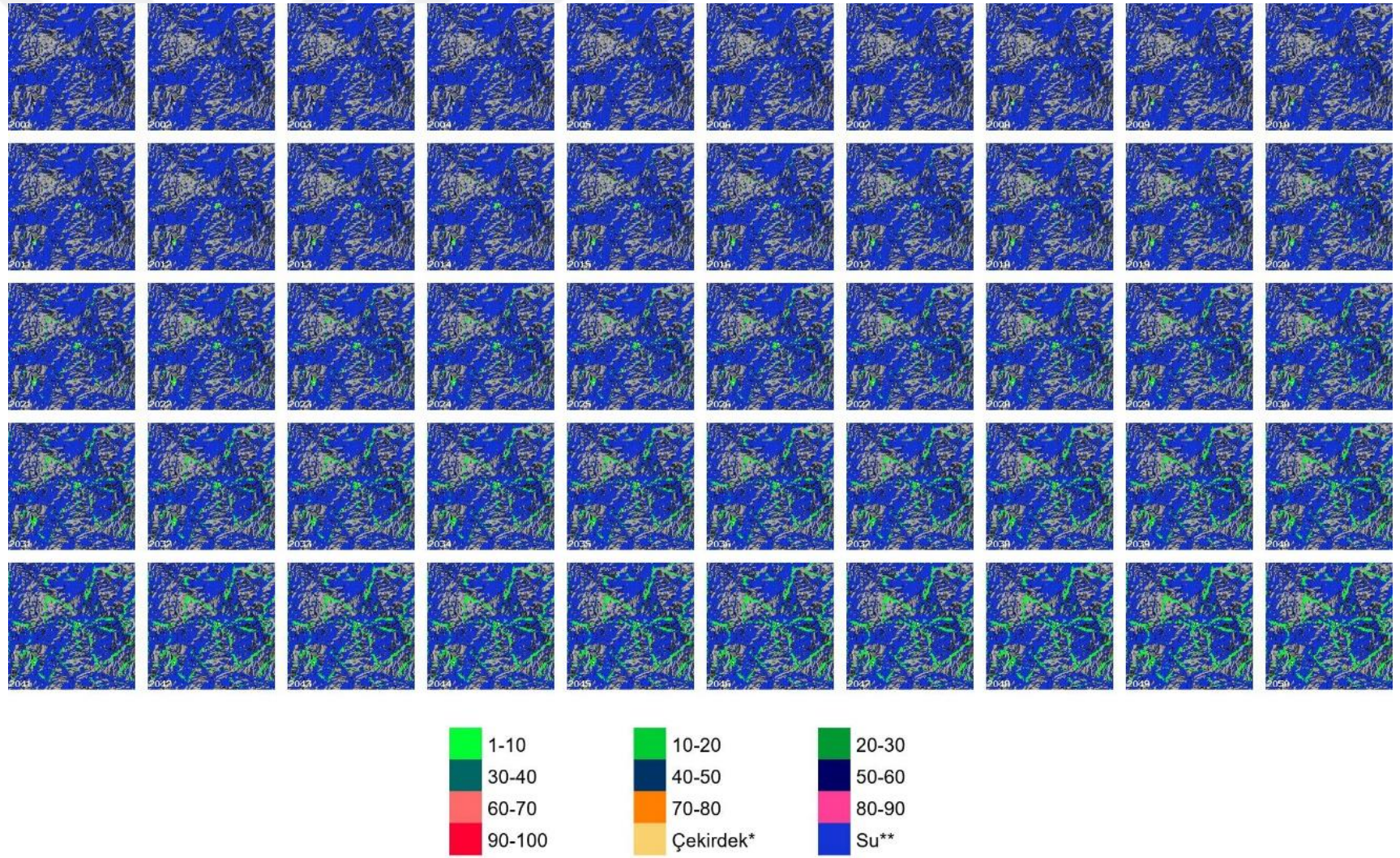
Şekil 4.12. 20 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.



Şekil 4.13. 22 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.



Şekil 4.14. 44 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.

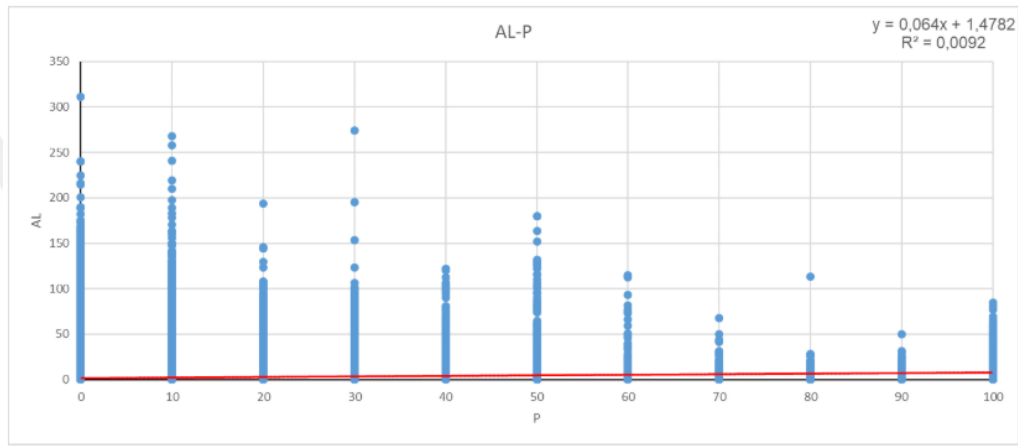


Şekil 4.15. 51 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.

Model çıktılarına bakarak yukarıda bahsedilen büyüme katsayısı değerlerine göre modeldeki kentsel alan tahmini şekillenmektedir.

4.3. Gelecekteki Yapay Işığın Tahmini

SLEUTH modeline ait her bir çıktı dosyası ve 2023 yılına ait model karelerinin yapay ışık görüntüleri Python yazılım dilinde piksel bazında okutulmuştur (Ek 10). Bu iki farklı formattaki görüntü piksel piksel karşılaştırılmış ve bir saçılım grafiği elde edilmiştir. Elde edilen saçılım grafiği Şekil 4.16.'de verilmiştir. Yatay ekseninde kentsel alan olasılık değerleri ve dikey ekseninde yapay ışık değerleri verilmiştir. Yapay ışık değerlerinin birimi $nWcm^{-2}sr^{-1}$ cinsindendir.



Şekil 4.16. SLEUTH modeli çıktıları ve 2023 yılına ait yapay ışık görüntülerinin piksel bazında karşılaştırılmasına ait grafik.

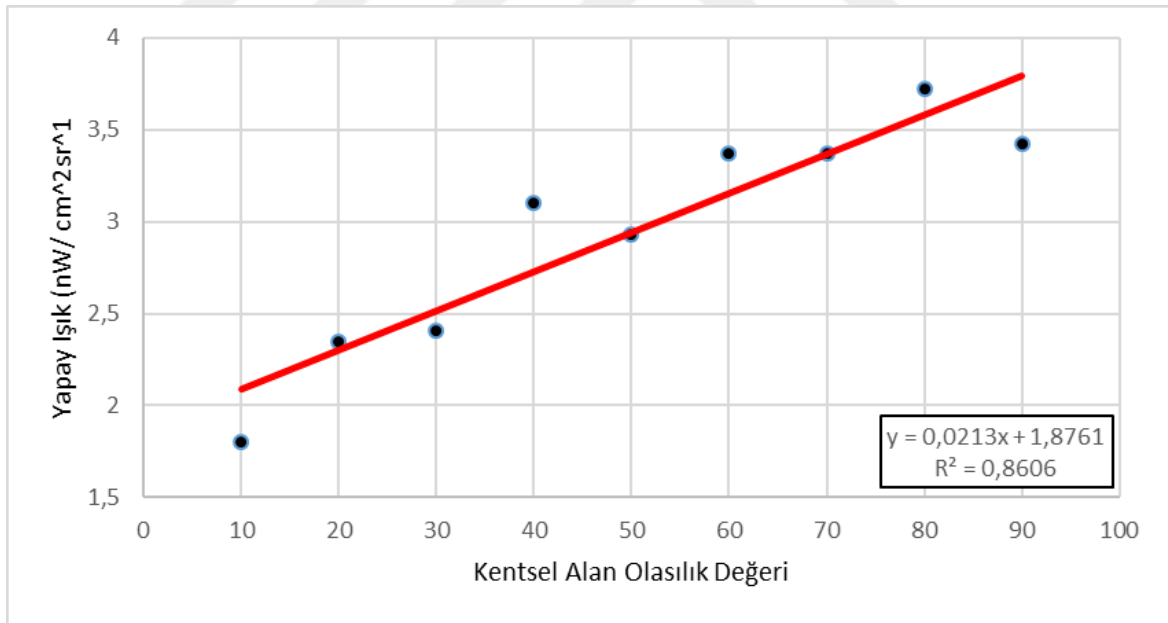
SLEUTH modeli kentsel alan çıktıları, olasılık sınıflarını içeren kategorik bir formattadır. Bu nedenle, herhangi bir kentsel alan sınıfına karşılık gelen yapay ışık değeri, çok parlak ya da çok sönük olabilmektedir. Bu durum da kentsel alan ve yapay ışık görüntülerini doğrudan birebir piksel bazında karşılaştırmayı güçleştirmektedir. Öte yandan, yapay ışık verisi sürekli bir veri yapısına sahiptir. İki veri setine ait benzersiz değerler örtüşmemektedir. Şekil 4.16.'da da görüldüğü üzere iki veri seti arasında ilişki olmadığı görülmektedir. Farklı bir yaklaşımla kentsel alan içerisindeki her bir olasılık sınıfına karşılık gelen yapay ışık değerlerinin CBS yazılımında ortalamaları alınıp bu iki parametre arasında ilişkilerin ayrıntıları aşağıda ayrıntılı sunulmuştur.

SLEUTH kentsel gelişim modeli ve yapay ışık arasında bir ilişki geliştirmek amacıyla model çıktılarından 13. kare rastgele olarak seçilmiştir. SLEUTH modeli çıktısı Ek 12.'de verilen python kodu ile GIF dosya formatından TIFF formatına çevrilmiştir. 2023 yılının son ayına ait yapay ışık görüntüsü ve 2023 yılına ait kentsel alan görüntüsü incelenmiştir. Yapay ışık değerlerinden kentsel alan görüntüsünde karşılık geldiği her bir kareye göre CBS ortamında kesilmiştir. Elde edilen bu parçaların ortalamaları alınmıştır. Böylelikle yapay ışıktaki bir olasılık kategorisine denk gelen çok parlak ve çok sönük piksel değerlerinin determinasyon katsayısına olan etkisi azaltılmıştır. Bu kare için kentsel alan çekirdek sınıfı hesap dışı tutulmuştur. Çizelge 4.4. de 13. kare için elde edilen bu

değerler sunulmuş, Şekil 4.17’de ise bu değerlerden elde edilen saçılım grafiği verilmiştir. Saçılım grafiğinde en iyi uyum doğrusal regresyon olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.4. 13. Kare için 2023 yılının son ayına ait yapay ışık ve kentsel alan değerleri.

Kentsel Alan Olasılık Sınıfı	Ortalama Yapay Işık ($nW\ cm^{-2}sr^{-1}$)
10-20	1,8
20-30	2,4
30-40	2,4
40-50	3,1
50-60	2,9
60-70	3,4
70-80	3,4
80-90	3,7
90-100	3,4



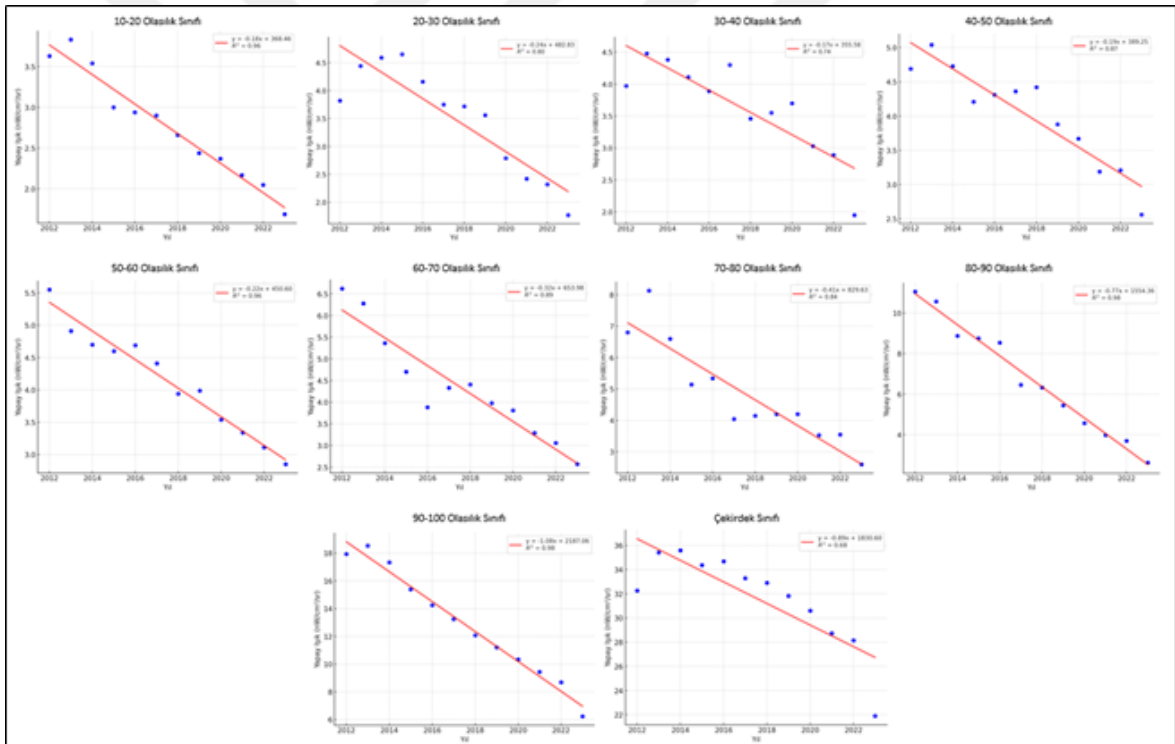
Şekil 4.17. 13. Kare için 2023 yılının son ayına ait yapay ışık ve kentsel alan değerlerinin saçılım grafiği.

Doğrusal regresyon denklemi:

$$y = 0,02 X + 1,9 \quad (4.1)$$

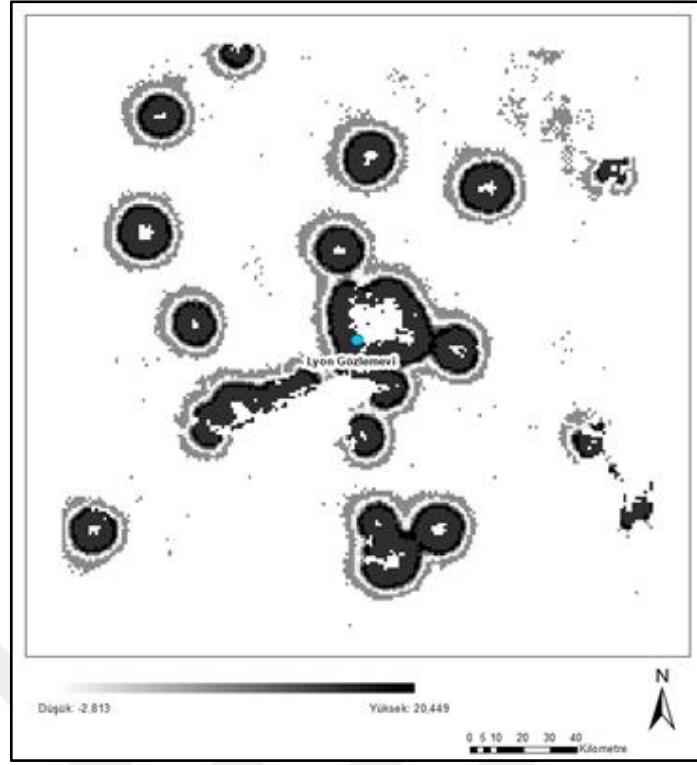
şeklinde olup $R^2 = 0,86$ 'dır. Kentsel olasılık değeri her 1 birim arttığında yapay ışığın ortalama 0,02 birim arttığı, kentsel olasılık değeri 0 olduğunda, beklenen yapay ışık düzeyinin 1,9 olduğu denklemden yola çıkarak söylenebilmektedir.

Bu model karesi için her bir olasılık sınıfına karşılık gelen yapay ışığın zamansal değişimi incelenmiştir. Şekil 4.18'de bu zamansal değişimlere ait saçılım grafikleri elde edilmiştir. Grafikler üzerinde uygun eğri türleri değerlendirilmiş, her bir olasılık sınıfı için en yüksek determinasyon katsayısını (R^2) sağlayan eğri tipi doğrusal regresyon olduğu için bu karede doğrusal regresyon kullanılmıştır. Grafiklerin yatay eksenini yılları düşey eksenini ise yapay ışık değerini göstermektedir. Şekilde 4.18'de sol üst köşeden sağa doğru sıra ile 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 olasılık sınıfları ve çekirdek olasılık sınıfı verilmiştir.



Şekil 4.18. 2012-2023 yılları arasında kentsel alan olasılık sınıflarına karşılık gelen yapay ışık piksel değerlerinin zaman içindeki değişimi.

Şekil 4.18'de verilen grafiklere ait denklemler kullanılarak, her bir olasılık sınıfı için 2030 yılına ait yapay ışık değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler haritalandırılmıştır (Şekil 4.19).



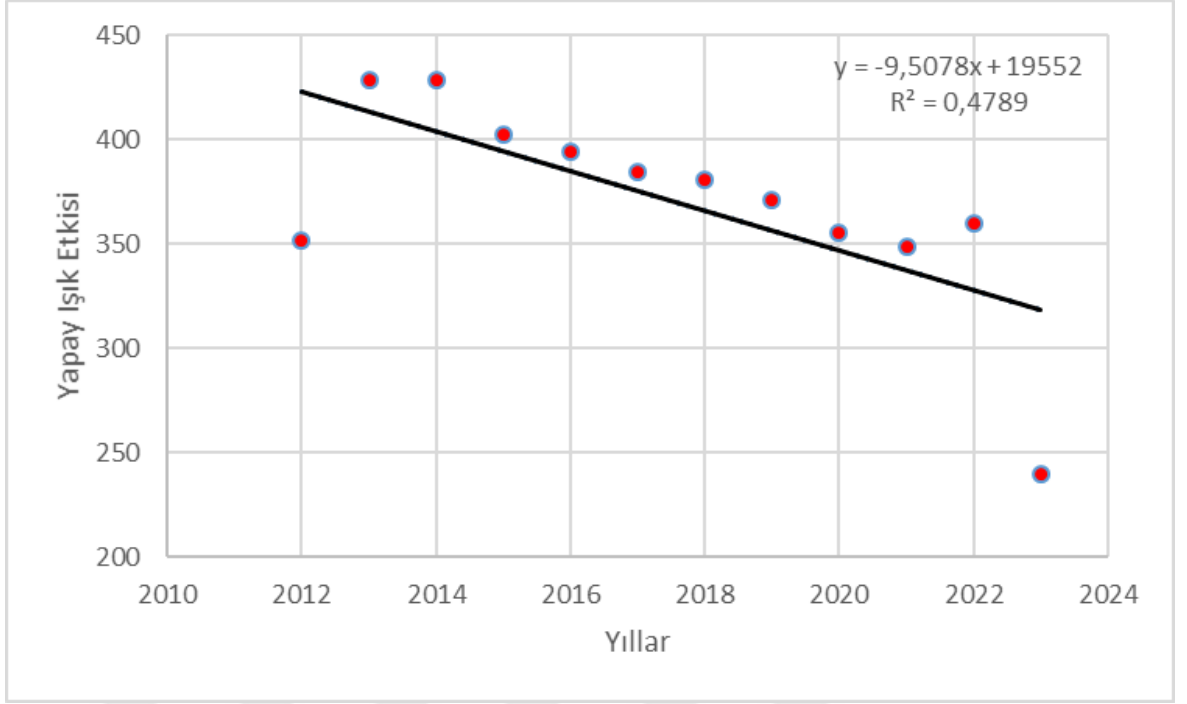
Şekil 4.19.13. Kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası.

Bu aşamada ters kare yasası kullanılarak 2012-2023 yılları için 13. model karesinin merkezinde olan astronomi sitesine yapay ışığın etkisi belirlenmiştir. Çizelge 4.5.'de herbir yıl için elde edilen merkezdeki piksele etki eden toplam radyans verilmiştir.

Çizelge 4.5. 2012-2023 için ters kare yasası kullanılarak merkezdeki piksele etki eden toplam radyans değerleri.

Yıl	Toplam Radyans ($nWcm^{-2}sr^{-1}$)
R_{2012}	351,5
R_{2013}	429,1
R_{2014}	428,4
R_{2015}	402,4
R_{2016}	394,2
R_{2017}	384,6
R_{2018}	380,9
R_{2019}	371,0
R_{2020}	355,4
R_{2021}	348,4
R_{2022}	360,2
R_{2023}	239,6

Bu değerler kullanılarak saçılım grafiği oluşturulmuş grafik üzerinde en uygun olan eğri türü determinasyon katsayısına göre belirlenmiş ve bir lineer regresyon denklemi elde edilmiştir.



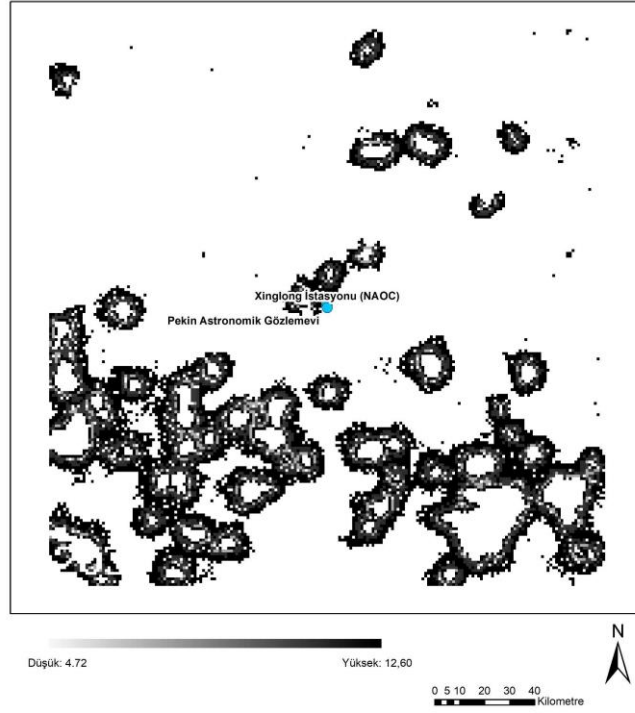
Şekil 4.20. 13 numaralı model karesinin yıllara göre hesaplanan merkezdeki astronomi sitesine etki eden yapay ışık grafiği.

Elde edilen regresyon denklemi:

$$y = -9,5 x + 19552 \quad (4.2)$$

olup determinasyon katsayısı $R^2 = 0,47$ 'dir. Bu denklem kullanılarak 2030 yılı için hesaplanan radyans değeri yani $R_{reg}=251,7 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ bulunmuştur. Bu astronomi sitesi için yapay ışığın etkisine bakıldığında 2030 yılında bu etkinin 251,7 olması beklenmektedir. Şekil 4.20.'da verilen 13. Kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası için ters kare denkleminden faydalanarak astronomi sitesine olan yapay ışığın etkisi hesaplandığında bu değer $R_{2030} = 157 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ olarak bulunmuştur. R_{reg} ve R_{2030} değerlerinin oranlanması ile 13. Model karesi için hesaplanan katsayı $a_{13} = 1,6$ olarak elde edilmiştir.

13. model karesinin ardından rastgele olarak 44. model karesi seçilmiştir. Süreç aynı şekilde tekrarlanarak 2030 yılına ait 44. model karesi için yapay ışık haritası elde edilmiştir (Şekil 4.21.).



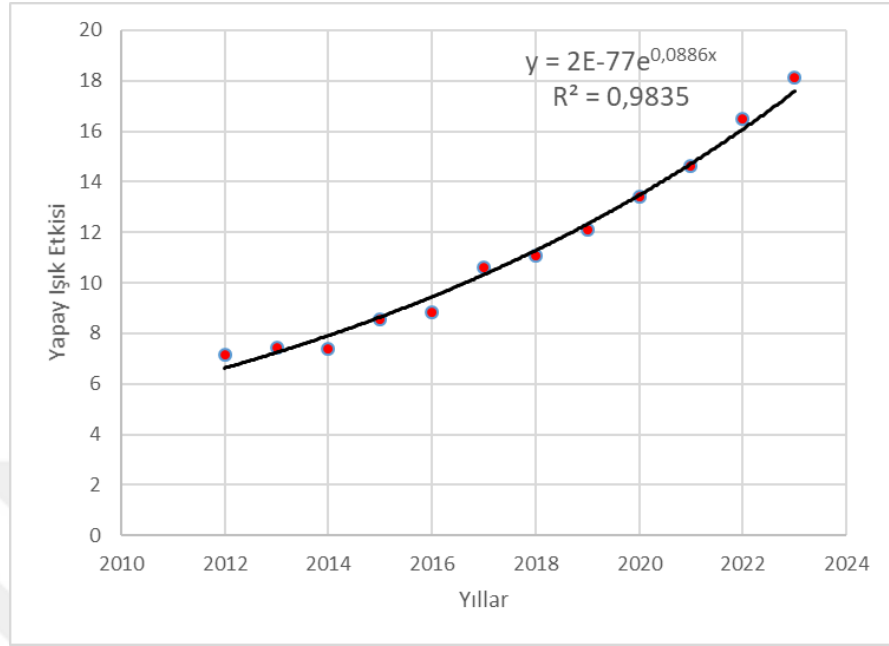
Şekil 4.21. 44. Kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası.

Bu aşamada ters kare yasası kullanılarak 2012-2023 yılları için 44. model karesinin merkezinde olan astronomi sitesine yapay ışığın etkisi belirlenmiştir. Çizelge 4.6.'da herbir yıl için elde edilen bu değerler verilmiştir.

Çizelge 4.6. 44. model karesinde bulunan Pekin Astronomik Gözlemevi için 2012-2023 için ters kare yasası kullanılarak elde edilen merkezdeki piksele toplam etki.

Yıl	Toplam Radyans ($nWcm^{-2}sr^{-1}$)
R_{2012}	7,2
R_{2013}	7,5
R_{2014}	7,4
R_{2015}	8,6
R_{2016}	8,8
R_{2017}	10,6
R_{2018}	11,1
R_{2019}	12,1
R_{2020}	13,4
R_{2021}	14,6
R_{2022}	16,5
R_{2023}	18,1

Bu değerler kullanılarak saçılım grafiği oluşturulmuş grafik üzerinde en uygun olan eğri türü determinasyon katsayısına göre belirlenmiş ve bir üstel regresyon denklemi elde edilmiştir.



Şekil 4.22. 44 numaralı model karesinin yıllara göre hesaplanan merkezdeki astronomi sitesine etki eden yapay ışık grafiği.

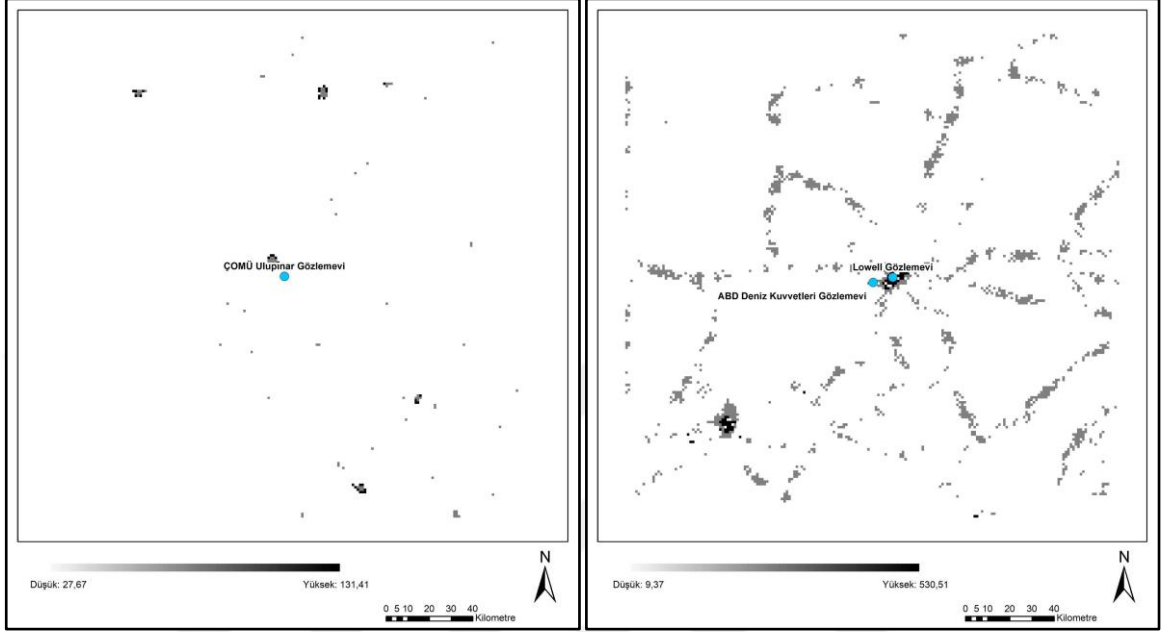
Elde edilen denklem:

$$y = 2 \times 10^{-77} e^{0,086x} \quad (4.3)$$

olup determinasyon katsayısı $R^2 = 0,98$ 'dir. Bu denklem kullanılarak 2030 yılı için hesaplanan radyans değeri yani $R_{reg} = 25,8 \text{ nWcm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ bulunmuştur. Yani yıllara göre astronomi sitesine yapa ışığın etkisine bakıldığında 2030 yılında bu etkinin 25,9 olması beklenmektedir. Şekil 4.22.'de verilen 44. Kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası için ters kare denkleminde faydalanarak astronomi sitesine olan yapay ışığın etkisi hesaplandığında bu değer $R_{2030} = 51,5 \text{ nWcm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ olarak bulunmuştur. R_{reg} ve R_{2030} değerlerinin oranlanması ile 44. model karesi için hesaplanan katsayı $a_{44} = 0,5$ olarak bulunmuştur.

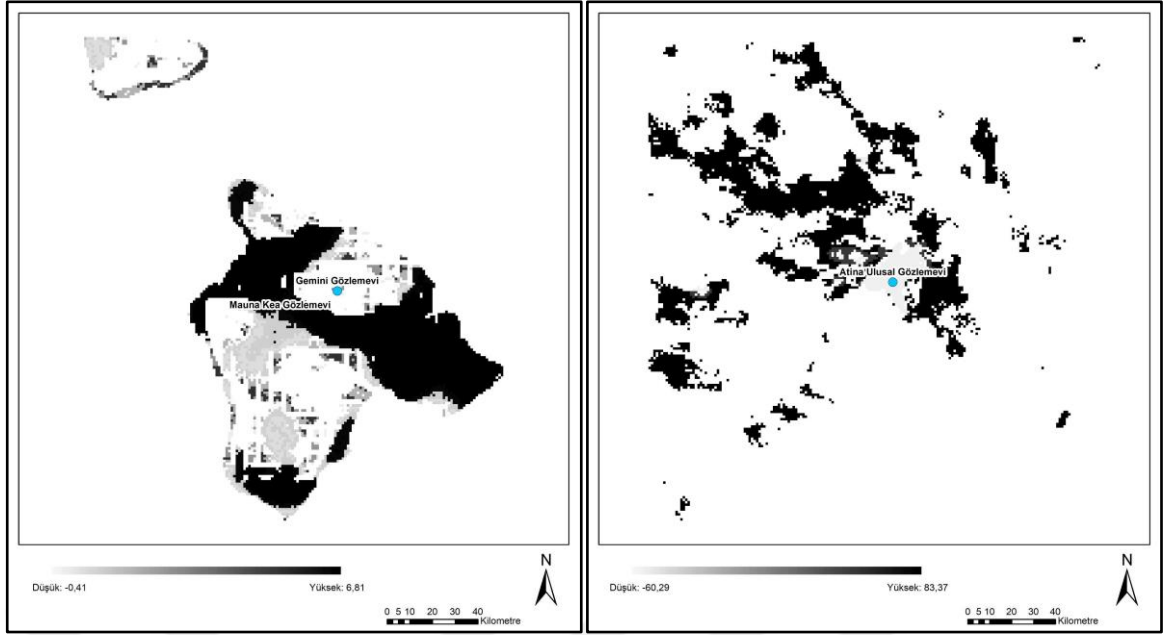
Bu iki model karesinin ardından bu kez de yıllık yapay ışık değişiminde eğimi negatif yönde en yüksek değeri alan South African Astronomi ve Lowell astronomi sitesi süreci tekrarlamak üzere seçilmiştir. Ancak South African Astronomi astronomi sitesi SLEUTH modelinin çalıştırılmadığı 9 astronomi sitesinden biridir. Bu yüzden eğimi negatif yönde en yüksek değeri bir sonraki astronomi sitesinin bulunduğu kare Lyon Gözlemevinin bulunduğu 13. karedir. Ancak yukarıda rastgele seçilen iki model karesinden biri zaten bu astronomi sitesine ait olduğundan bir sonraki eğimi negatif yönde en yüksek değeri alan model karesine geçilmiştir. Bu model karesi de merkezinde ÇOMÜ-Ulupınar astronomi sitesinin merkezinde bulunduğu 20 numaralı model karesidir. Böylece Lowel astronomi

sitesine ait 51. kare ve ÇOMÜ-Ulupınar astronomi sitesine ait 20. kare için yukarıda bahsedilen süreç tekrarlanmış, 2030 yılına ait yapay ışık görüntüleri geçmişteki olasılık sınıflarından elde edilen regresyon denklemleri sonucunda elde edilmiştir. Şekil 4.23. de sol panelde 20. kare sağ panelde 51. kare için elde edilen 2030 yılı yapay ışık haritası verilmiştir.



Şekil 4.23. 20. ve 51. kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası.

Sonraki aşamada yıllık yapay ışık değişiminde eğimi pozitif yönde en yüksek değeri alan iki astronomi sitesinin bulunduğu kareler seçilmiştir. Bunlar Gemini Gözlemevi'nin merkezinde bulunduğu 2. kare ve Atina Ulusal Gözlemevi'nin merkezinde bulunduğu 22. karedir. Bu iki kare için de diğer karelerde olduğu gibi 2030 yılına ait yapay ışık görüntüleri geçmişteki olasılık sınıflarından elde edilen regresyon denklemleri sonucunda elde edilmiştir. Şekil 4.24.'de sol panelde 2. kare sağ panelde 22. kare için elde edilen 2030 yılı yapay ışık haritası verilmiştir.



Şekil 4.24. 2. ve 22. kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası.

Bu dört kare için (20., 51., 2., ve 22. kareler için) ters kare yasası kullanılarak merkezdeki astronomi sitelerine 2012-2023 yılları için yapay ışığın etkisi hesaplanmıştır. Çizelge 4.7.'de her bir yıl için elde edilen bu değerler bu dört kare için verilmiştir. Gemini Gözlemevi için 2018 yılına ait değer uç değer olduğu için hesaplamaya dâhil edilmemiştir.

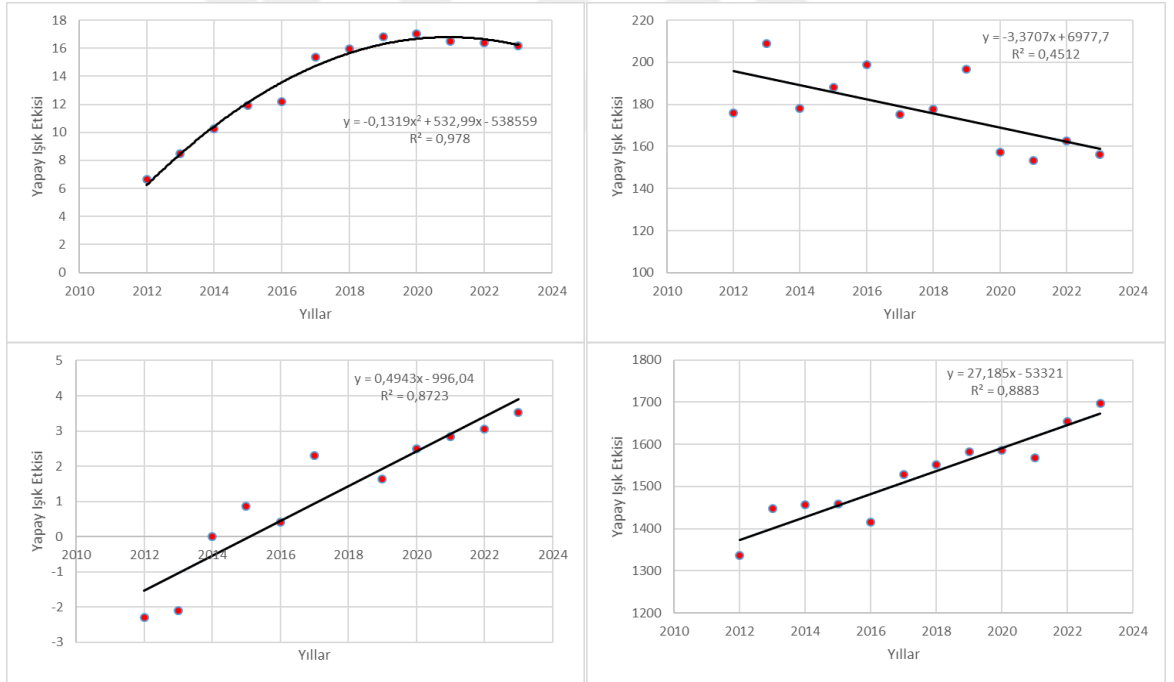
Çizelge 4.7. 20., 51., 2., ve 22. numaralı model karelerinde merkezde bulunan Lowell, ÇOMÜ-Ulupınar, Gemini ve Atina Ulusal Gözlemevi için kare yasası kullanılarak elde edilen merkezdeki piksele etki eden toplam radyans ($nWcm^{-2}sr^{-1}$).

Yıl	20. Kare	51. Kare	2. Kare	22. Kare
R_{2012}	6,7	175,8	-2,3	1336,2
R_{2013}	8,5	209,0	-2,1	1448,6
R_{2014}	10,3	177,9	0,0	1456,8
R_{2015}	11,9	188,2	0,9	1458,3
R_{2016}	12,2	198,7	0,4	1415,2
R_{2017}	15,4	175,3	2,3	1528,7
R_{2018}	16,0	177,6	-	1551,9
R_{2019}	16,8	196,7	1,6	1581,9

Çizelge 4.8. 20., 51., 2., ve 22. numaralı model karelerinde merkezde bulunan Lowell, ÇOMÜ-Ulupınar, Gemini ve Atina Ulusal Gözlemevi için kare yasası kullanılarak elde edilen merkezdeki piksele etki eden toplam radyans ($nWcm^{-2}sr^{-1}$). (devamı)

Yıl	20. Kare	51. Kare	2. Kare	22. Kare
R_{2020}	17,0	157,2	2,5	1586,7
R_{2021}	16,5	153,5	2,8	1567,5
R_{2022}	16,4	162,6	3,1	1654,8
R_{2023}	16,2	156,2	3,5	1697,9

Bu değerler kullanılarak dört farklı kare için dört farklı saçılım grafiği oluşturulmuş grafik üzerinde en uygun olan eğri türü determinasyon katsayısına göre belirlenmiştir. Şekil 4.25.'de Sol baştan 20., 51., 2., ve 22. kare olacak şekilde sıralanmıştır.



Şekil 4.25. 20, 51. 2, ve 22 numaralı model karelerinin yıllara göre hesaplanan merkezdeki astronomi sitesine etki eden yapay ışık grafikleri.

20. kare için elde edilen denklem:

$$y = -0,1 x^2 + 533 x - 538559 \quad (4.4)$$

olup determinasyon katsayısı $R^2 = 0,97$ 'dir. Bu denklem kullanılarak 2030 yılı için hesaplanan radyans değeri yani $R_{reg} = -136 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ bulunmuştur. Yıllara göre astronomi sitesine yapa ışığın etkisine bakıldığında 2030 yılında bu etkinin -136 olması beklenmektedir. Şekil 4.25.'de verilen 20. Kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası için ters kare denkleminden faydalanarak astronomi sitesine olan yapay ışığın etkisi hesaplandığında bu değer $R_{2030} = 58,8 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ olarak bulunmuştur. R_{reg} ve R_{2030} değerlerinin oranlanması ile 20. model karesi için hesaplanan katsayı $a_{20} = -2,3$ olarak bulunmuştur.

51. kare için elde edilen denklem:

$$y = -3,3 x + 6977,7 \quad (4.5)$$

olup determinasyon katsayısı $R^2 = 0,45$ 'dir. Bu denklem kullanılarak 2030 yılı için hesaplanan radyans değeri yani $R_{reg} = 135,2 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ bulunmuştur. Yani yıllara göre astronomi sitesine yapa ışığın etkisine bakıldığında 2030 yılında bu etkinin 135,2 olması beklenmektedir. Şekil 4.25.'de verilen 51. Kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası için ters kare denkleminden faydalanarak astronomi sitesine olan yapay ışığın etkisi hesaplandığında bu değer $R_{2030} = 893,5 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ olarak bulunmuştur. R_{reg} ve R_{2030} değerlerinin oranlanması ile 51. model karesi için hesaplanan katsayı $a_{51} = 0,15$ olarak bulunmuştur.

2. kare için elde edilen denklem:

$$y = 0,5 x - 996 \quad (4.6)$$

olup determinasyon katsayısı $R^2 = 0,87$ 'dir. Bu denklem kullanılarak 2030 yılı için hesaplanan radyans değeri yani $R_{reg} = 7,4 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ bulunmuştur. Yani yıllara göre astronomi sitesine yapa ışığın etkisine bakıldığında 2030 yılında bu etkinin 7,4 olması beklenmektedir. Şekil 4.25.'de verilen 2. Kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası için ters kare denkleminden faydalanarak astronomi sitesine olan yapay ışığın etkisi hesaplandığında bu değer $R_{2030} = 1,5 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ olarak bulunmuştur. R_{reg} ve R_{2030} değerlerinin oranlanması ile 2. model karesi için hesaplanan katsayı $a_2 = 5$ olarak bulunmuştur.

22. kare için elde edilen denklem:

$$y = 27,2 x - 53321 \quad (4.7)$$

olup determinasyon katsayısı $R^2 = 0,88$ 'dir. Bu denklem kullanılarak 2030 yılı için hesaplanan radyans değeri yani $R_{reg} = 1,9 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ bulunmuştur. Yani yıllara göre astronomi sitesine yapa ışığın etkisine bakıldığında 2030 yılında bu etkinin 1,9 olması beklenmektedir. Şekil

4.25.'de verilen 22. Kare için hesaplanan 2030 yılına ait yapay ışık haritası için ters kare denkleminde faydalanarak astronomi sitesine olan yapay ışığın etkisi hesaplandığında bu değer $R_{2030} = 1,1 \text{ nWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ olarak bulunmuştur. R_{reg} ve R_{2030} değerlerinin oranlanması ile 22. model karesi için hesaplanan katsayı $a_{22} = 1,8$ olarak bulunmuştur.

Yıllık yapay ışık değişiminde, eğimi en yüksek pozitif ve negatif değerlere sahip dört astronomi sitesine ait a_t katsayıları Çizelge 4.8'de verilmiştir. Bu kareler için 2030 yılında merkeze etki eden yapay ışığın hesaplanmasında kullanılacak ters kare denkleminin katsayıları, her bir kareye özgü olarak farklılık göstermektedir.

Elde edilen bu a_t katsayıları ile o model karesine ait eğim ve yükseklik bilgisi, THPS 2030, OSS 2023, OSS 2030, KAPS 2000, KAPS 2007, KAPS 2014, KAPS 2022, YPS 2010, YPS 2022, ÇKPS, OSPA 2030 - 10, OSPA 2030 - 20, OSPA 2030 - 30, OSPA 2030 - 40, OSPA 2030 - 50, OSPA 2030 - 60, OSPA 2030 - 70, OSPA 2030 - 80, OSPA 2030 - 90, OSPA 2030 - 100, ÇOSPA 2030, sng, sdg, sdc, og, rt, pop, area, edges, clusters, xmean, ymean, rad, slope, cl_size, diffus, spread, breed, slp_res, rd_grav, %urban, grw_rate, grw_pix bilgileri Çizelge 4.8.'de sunulmuştur. Bu parametrelerden sng, sdg, sdc, og, rt, pop, area, edges, clusters, xmean, ymean, rad, slope, cl_size, diffus, spread, breed, slp_res, rd_grav, %urban, grw_rate, grw_pix parametreleri SLEUTH modelinin “average” çıktı dosyasından elde edilen parametrelerdir. Diğer parametreler ise CBS ortamında hesaplanmıştır.

Çizelge 4.9. a_t katsayısı hesaplanan astronomi sitelerinin eğim, yükseklik, hesaplanan piksel sayısı, 2023 ve 2030 yılları içinde sahip oldukları olasılık sınıfı sayısı bilgileri (1. Bölüm.)

Kare	ALFA	Eğim*	Yükseklik	THPS 2030	OSS 2023	OSS 2030	KAPS 2000	KAPS 2007	KAPS 2014	KAPS 2022	YPS 2010	YPS 2022	ÇKPS	OSPS 2030 - 10	OSPS 2030 - 20
51	0,2	90,0	2170	1571	3	4	35	40	41	46	1913	3201	2786	1488	35
13	1,6	89,9	282	9127	10	10	559	661	769	712	4750	25096	6504	2047	759
20	-2,3	90,0	408	469	2	2	90	178	160	208	4233	9313	16657	345	34
22	1,8	90,0	51	4881	5	5	390	456	474	446	3744	6340	25640	4030	242
44	0,5	89,9	825	11420	9	10	1785	2232	2629	2982	4336	13645		2708	1191
2	5,0	90,0	4120	5838	10	10	13	21	26	26	1289	1361	30982	102	213

Çizelge 4.8. Devamı (2. Bölüm.).

Kare	ALFA	OSPS 2030 - 30	OSPS 2030 - 40	OSPS 2030 - 50	OSPS 2030 - 60	OSPS 2030 - 70	OSPS 2030 - 80	OSPS 2030 - 90	OSPS 2030 - 100	ÇOSP S 2030	sng	sdg	sdc	og	rt
51	0,2	12	1							35	1,6	0,0	0	1,2	3,1
13	1,6	528	416	378	352	364	409	536	2779	559	1,4	0,1	0	267,0	3,5
20	-2,3									90	0,6	0,0	0	0,5	2,2
22	1,8	157	50	7						390	0,2	0,1	0	1,4	6,2
44	0,5	807	652	596	602	570	588	723	1216	1767	1,5	0,1	0	229,9	3,1
2	5,0	223	254	185	287	442	448	663	2968	13	4,1	1,1	0	105,3	2,6

Çizelge 4.8. Devamı (3. Bölüm.).

Kare	ALFA	pop	area	edges	clusters	xmean	ymean	rad	Slope* *	cl_size	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
51	0,2	194,7	194,7	186,8	88,8	99,9	109,5	7,9	2,8	1,8	1,0	1,0	1,0	7,8	34,5
13	1,6	5291,6	5291,6	1518,9	128,0	95,2	100,9	41,0	2,9	40,9	1,3	60,1	1,3	1,0	100,0
20	-2,3	165,6	165,6	153,6	69,9	121,1	91,8	7,2	2,2	2,0	0,7	0,7	0,7	63,5	4,3
22	1,8	733,3	733,3	352,4	38,0	89,8	90,9	14,7	4,0	18,1	0,7	0,9	13,9	82,1	8,7
44	0,5	5906,9	5906,9	3031,5	880,5	94,8	143,0	43,4	1,0	6,1	1,3	26,7	1,3	1,0	20,4
2	5,0	4595,5	4595,5	1169,1	96,6	96,9	117,1	38,2	7,1	48,0	93,4	84,1	17,4	1,0	55,5

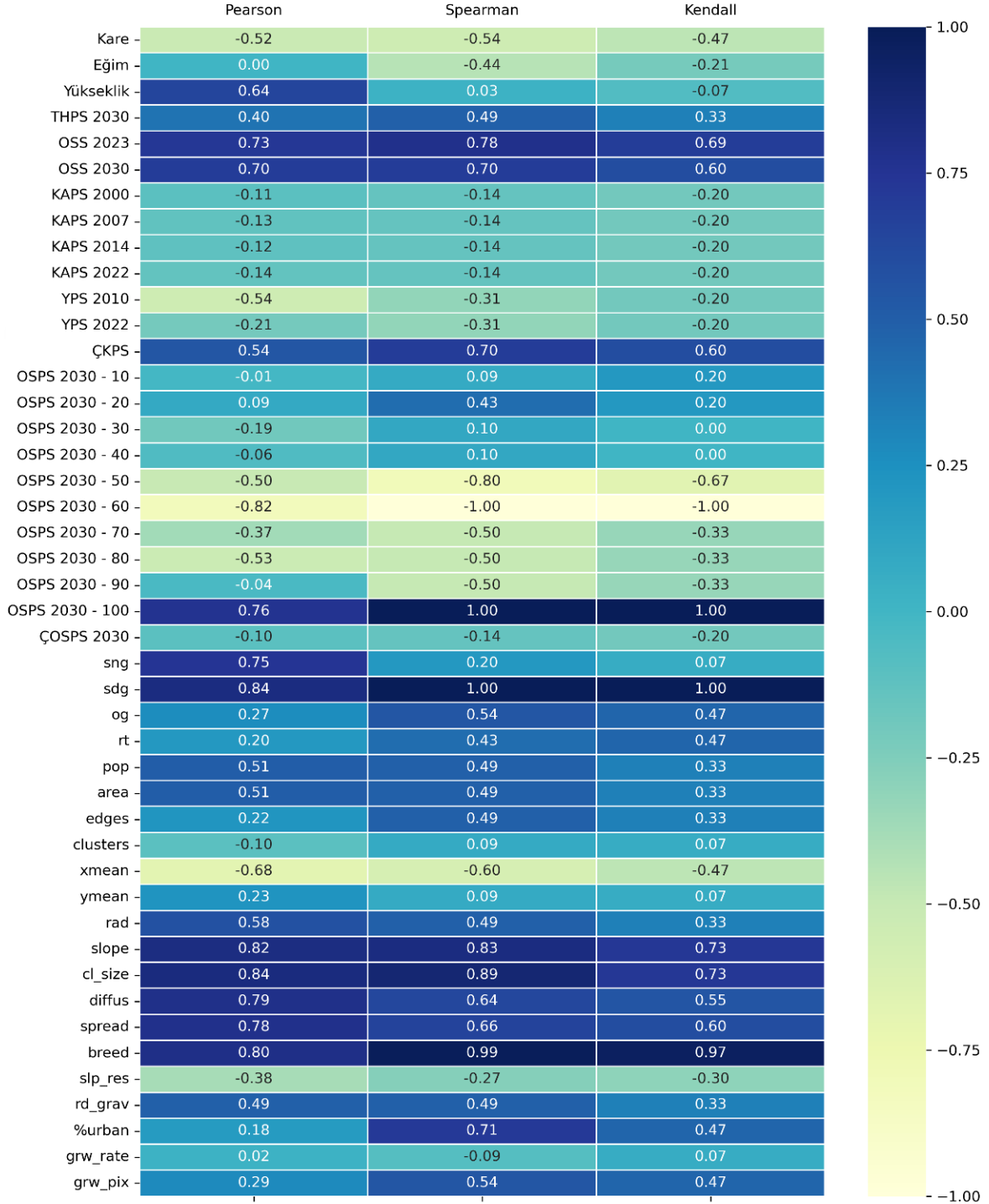
Çizelge 4.8. Devamı (4. Bölüm.).

Kare	ALFA	%urban	grw_rate	grw_pix
51	0,2	11,3	3,1	5,9
13	1,6	384,8	5,1	272,0
20	-2,3	72,5	1,9	3,3
22	1,8	98,1	0,6	7,9
44	0,5	76,9	4,0	234,5
2	5,0	87,6	2,5	113,1

*Modele girdi parametresi olan eğim katmanının ait raster veride model karesine ait astronomi sitesinin aldığı değer.

**Model çıktısı olan kentsel alanların ortalama eğimi.

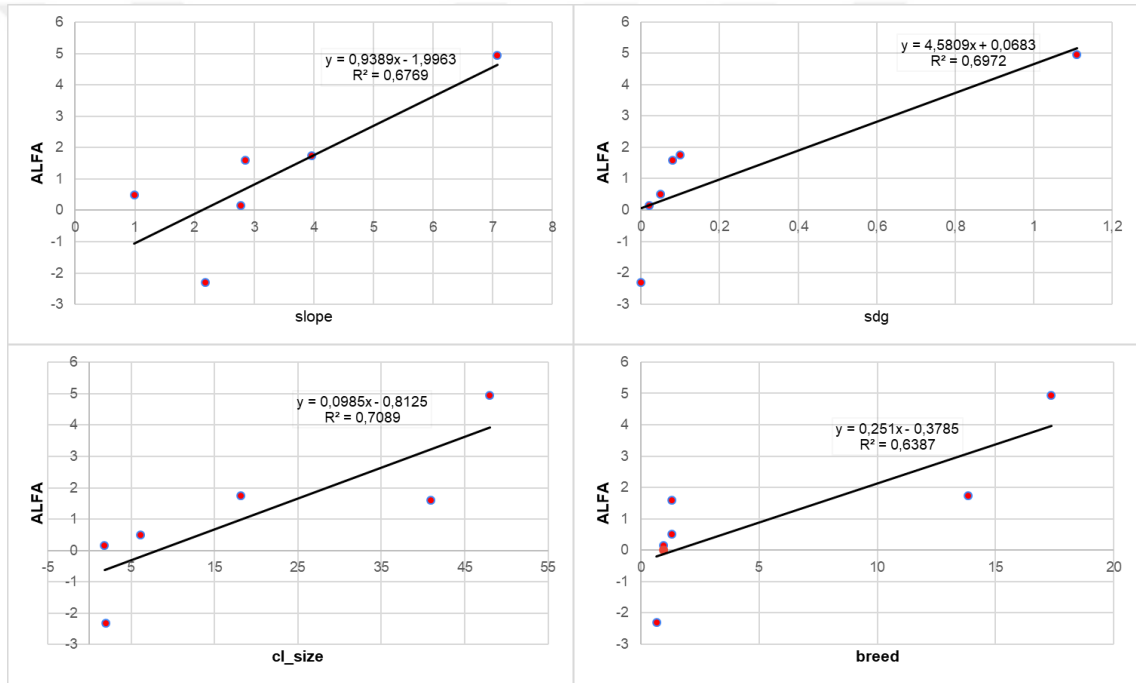
Çizelge 4.7.'de a_t katsayısı hesaplanan altı model karesinin CBS ortamında hesaplanan piksel bazındaki istatistik bilgileri ve SLEUTH modeline ait istatistiksel çıktıları tablo halinde sunulmuştur. Bu çıktılar kullanılarak a_t katsayısının diğer tüm parametrelerle Spearman, Pearson ve Kendall korelasyon katsayıları Ek 13.'deki Python kodu kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 4.25.'de sunulmuştur.

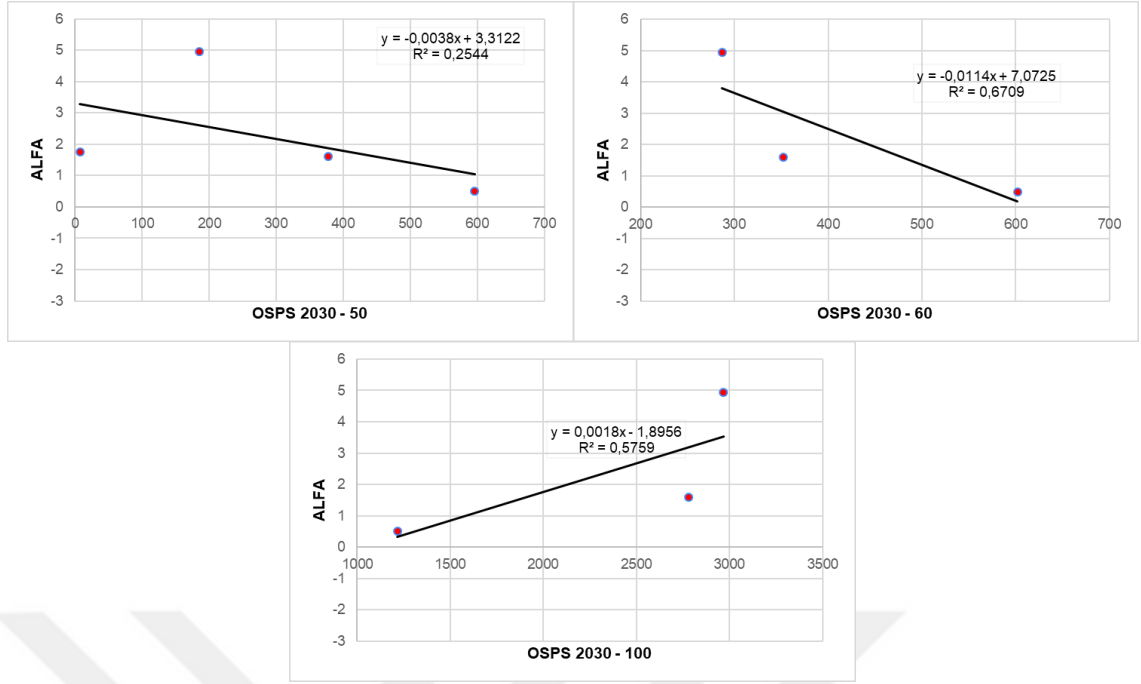


Şekil 4.26. a_t katsayısı hesaplanan model karelerinin Çizelge 4.7.'de verilen parametreler ile hesaplanan Spearman, Pearson ve Kendall korelasyon katsayıları.

Korelasyon değerleri, Şekil 4.26. üzerinde -1 (negatif yönlü güçlü ilişki) ile +1 (pozitif yönlü güçlü ilişki) arasında renk tonlaması ile görselleştirilmiştir. a_t katsayısı; OSPA 2030 – 60, OSPA 2030 – 50, OSPA 2030 – 100, slope, cl_size, breed ve sdg parametreleriyle, en az bir korelasyon modelinde $\pm 0,80$ ve üzeri düzeyde anlamlı bir ilişki göstermiştir. sdg değişkeni ile a_t arasında Spearman ve Kendall korelasyon katsayıları oldukça güçlüdür. Bunlara ek olarak, OSS 2023 ve OSS 2030 (2023 ve 2030 yıllarına ait olasılık sınıf sayısı) değişkenleri ile de a_t arasında yüksek korelasyon gözlenmiştir. Öte yandan, OSPA 2030 - 60 (2030 yılına ait 60. olasılık sınıfı piksel sayısı) gibi bazı değişkenler ile a_t katsayısı arasında negatif korelasyon olduğu görülmektedir.

a_t katsayısı ile $\pm 0,80$ ve üzeri ilişki gösteren parametreler seçilip Şekil 4.27.'de bu parametrelerin a_t katsayısı ile saçılım grafikleri elde edilmiştir. Saçılım grafiklerinde en uygun regresyon denklemi determinasyon katsayısına göre elde edilip grafiklerde sunulmuştur.





Şekil 4.27. a_t katsayısı ile $\pm 0,80$ ve üzeri ilişki gösteren parametrelerin saçılım grafiği, regresyon denklemleri ve determinasyon katsayıları.

Şekil 4.27.'de yer alan saçılım grafikleri, a_t katsayısı ile çeşitli model parametreleri arasındaki ilişkileri göstermektedir. Sol üst panelde verilen grafikte, a_t katsayısı ile slope parametresi arasındaki ilişki doğrusal olup $R^2 = 0,67$ 'dir.

Üst sol paneldeki grafik, sdg (yeni yayılma merkezi büyümesi) ile a_t arasındaki ilişkiyi göstermekte olup $R^2 = 0,69$ 'dur.

İkinci panel soldaki grafik, cl_size (ortalama küme boyutu) ile a_t katsayısı arasındaki ilişkiyi yansıtmakta olup $R^2 = 0,70$ 'dir.

İkinci panel sağdaki grafik, breed (yeni merkez oluşturma katsayısı) ile a_t arasındaki ilişkiyi sunmakta ve $R^2 = 0,63$ değeriyle desteklenmektedir

Üçüncü panel soldaki grafik OSPA 2030 – 50 sınıfı ile a_t arasındaki ilişki incelendiğinde, $R^2 = 0,25$ 'dir.

Üçüncü panel sağdaki grafik, OSPA 2030 – 60 piksel sayısı ile a_t katsayısına ait olup $R^2 = 0,67$ 'dir.

En alt paneldeki OSPA 2030 – 100 olasılık sınıfı grafiği için ise $R^2 = 0,57$ 'dir.

Bu parametrelerin içerisinde determinasyon katsayısı en yüksek olduğu için ($R^2 = 0,70$) a_t ile cl_size parametrelerine ait saçılım grafiği seçilmiş, model çıktısı olan “average_log” dosyalarından 2030 yılına ait cl_size parametresi herbir kare için ayıklanmıştır. a_t ile cl_size saçılım grafiğinden elde edilen denklemde (4.13) cl_size değerleri yerine yazılarak herbir kare için a_t parametresi hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.9.'da sunulmuştur.

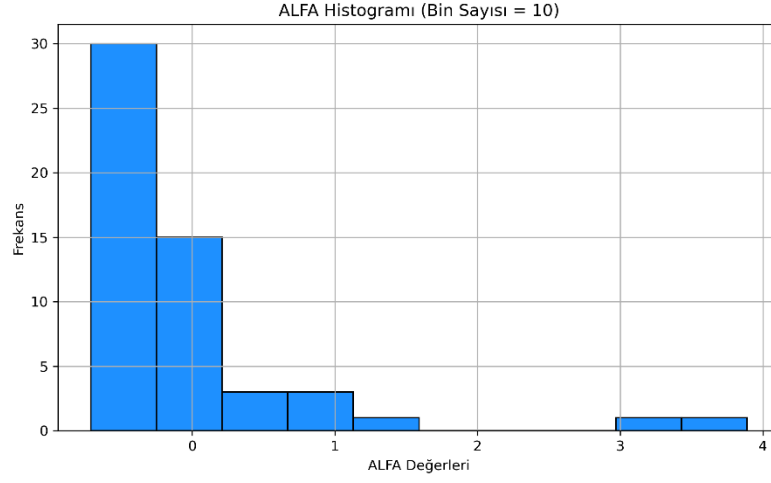
Çizelge 4.10. a_t katsayısı ile cl_size saçılım grafiğine ait denklem kullanılarak tüm model karelerine ait hesaplanan a_t katsayısı değerleri.

Model Karesi	cl_size	ALFA
1	11,2	0,3
2	48,0	3,9
3	9,2	0,1
4	2,6	-0,6
5	2,0	-0,6
6	4,5	-0,4
7	2,5	-0,6
8	4,0	-0,4
9	2,1	-0,6
10	7,3	-0,1
11	1,0	-0,7
12	6,2	-0,2
13	40,9	3,2
14	6,8	-0,2
15	8,7	0,0
16	6,6	-0,2
17	5,8	-0,2
18	2,9	-0,5
19	3,9	-0,4
20	2,0	-0,6
21	3,2	-0,5
22	18,1	1,0
23	8,5	0,0
24	4,7	-0,4
25	4,7	-0,4
26	15,2	0,7
27	7,1	-0,1

Çizelge 4.11. a_t katsayısı ile cl_size saçılım grafiğine ait denklem kullanılarak tüm model karelerine ait hesaplanan a_t katsayısı değerleri. (devamı)

Model Karesi	cl_size	ALFA
28	4,0	-0,4
29	2,0	-0,6
30	5,6	-0,3
31	2,6	-0,6
32	3,5	-0,5
33	4,5	-0,4
34	2,0	-0,6
36	5,9	-0,2
39	1,0	-0,7
40	1,0	-0,7
43	6,2	-0,2
44	6,1	-0,2
45	4,0	-0,4
46	11,1	0,3
48	19,4	1,1
49	2,7	-0,6
50	2,0	-0,6
51	1,8	-0,6
52	3,0	-0,5
53	2,4	-0,6
54	5,4	-0,3
55	4,9	-0,3
57	5,8	-0,2
58	6,3	-0,2
59	21,7	1,3
60	10,9	0,3
63	5,9	-0,2

Çizelge 4.9.'da sunulan bu değerler kullanılarak SLEUTH modeline giren bütün karelerin a_t katsayısı değerleri kullanılarak histogram grafiği elde edilmiş ve Şekil 4.28.'de sunulmuştur. Yatay eksen ALFA katsayısına ait değerler, dikey eksen de bu değerlere ait frekanslar bulunmaktadır.



Şekil 4.28. Model karelerinin ait cl_size parametresini kullanılarak elde edilen a_t katsayısı için oluşturulan histogram.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında tüm Dünya’da bulunan profesyonel astronomi sitelerinin SLEUTH kentsel gelişim modeli kullanılarak uzak gelecek (2050) için kentsel gelişim olasılıkları elde edilmiştir. Kentsel gelişim olasılıklarının yanı sıra astronomi sitelerinin güncel yapay ışık değerleri de incelenmiştir. Bu çalışmada, 84 astronomi sitesine ait zamansal yapay ışık değişimi incelenmiş; her bir astronomi sitesi için ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, doğrusal regresyon analizine dayalı olarak eğim ve determinasyon katsayıları belirlenmiş; buna ek olarak Spearman, Pearson ve Kendall korelasyon katsayıları ile birlikte Mann-Kendall test istatistiği ve Sen’s Slope eğimi analiz edilmiştir. Bu istatistiksel analizler sonucunda aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir. Gözlemeleri için verilen yapay ışık istatistiklerinde $nW\ cm^{-2}sr^{-1}$ biriminin yanı sıra $mag/arcsec^2$ birimi de verilmiştir. $mag/arcsec^2$ birimindeki sayı değerinin azalması parlaklık seviyesinin artışı, $nW\ cm^{-2}sr^{-1}$ biriminin sayı değerinin azalması ise karanlık seviyesindeki artışı göstermektedir. Sonuçlar yorumlanırken bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

- Gözlemelerinin yıllık toplam ışık kirliliği ortalaması $2,6\ nW\ cm^{-2}sr^{-1}$ ($19,2\ mag/arcsec^2$) olup astronomi sitelerinin $\sim 12\%$ ’si (10 astronomi sitesi) bu ortalamanın üstünde yapay ışık değerine sahiptir.
- Bu sitelerin içinde en yüksek ışık kirliliğine sahip astronomi sitesi yapay ışık değeri $77,8\ nW\ cm^{-2}sr^{-1}$ ($16,40\ mag/arcsec^2$) olarak bulunan Atina Ulusal Gözlemevi’dir.
- R^2 değeri en yüksek olan astronomi sitesi ise $R^2 = 0,96$ ile Canopus Hill Gözlemevidir.
- Yıllık ortalamalar kullanılarak elde edilen lineer regresyon denkleminde eğimi en yüksek değeri alan astronomi sitesi South African Astronomi Gözlemevidir. 2012-2022 yılları arasında zamana bağlı yapay ışık değişimine bakıldığında eğimi -3.3 ’dür. Eğimi negatif değer alan yani artan değil azalan bir trend gösteren 6 astronomi sitesinden biridir.
- Eğimi en az olan (0) yani yıllara bağlı en az ışık kirliliği değişimi gösteren astronomi sitesi Maidanak astronomi sitesidir.
- Katsayı değerlerinden ρ korelasyon katsayısına göre en büyük değeri alan 10 astronomi sitesi Lowell, South African Astronomi, ÇOMÜ Ulupınar, NANTEN2, Lyon, Merate, Atina Ulusal Gözlemevi, Anglo-Australian, Maidanak ve Yerkes astronomi siteleridir.
- En güçlü negatif korelasyon Lowell Gözlemevi’nde gözlemlenmiş olup, ρ katsayısı $-0,92$, r katsayısı $-0,93$ ve τ katsayısı $-0,78$ olarak hesaplanmıştır. Bu durum, Lowell Gözlemevi çevresinde son on yılda yapay ışık düzeylerinin anlamlı bir biçimde azaldığını göstermektedir. Benzer şekilde, SAAO Gözlemevi ($\rho: -0,80$) ve ÇOMÜ Gözlemevi ($\rho: -0,75$) de güçlü negatif korelasyon değerlerine sahiptir; bu da söz konusu bölgelerde yapay ışık seviyelerinin düşüş eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır. NANTEN2, Lyon ve Merate

astronomi siteleri de orta düzeyde negatif korelasyon değerleri ile yapay ışıktaki hafif bir azalma eğilimi göstermektedir.

- Korelasyon katsayılarına ait histogramlarının sağa kümelendiği (0,75-1) görülmektedir.
- Tien Shan, European Southern, Llano del Hato, Maidanak, Shamakhi, Yerkes, Rothney, Merate, Lyon, NANTEN-2, Anglo-Australia, Atina Ulusal Gözlemevi'nde Mann-Kendall test istatistiği olan p değeri 0.05'den büyüktür ve bu da istatistiksel olarak anlamlı bir trendin olmadığını göstermektedir.
- Mann-Kendall test istatistiğine göre kalan 72 astronomi sitesinde istatistiksel olarak anlamlı bir trend vardır.
- Sen's Slope eğimine göre 72 astronomi sitesinin % 4,2'sinde negatif yönlü bir trend mevcuttur.
- SLEUTH kentsel gelişim modeli ile yapay ışık verileri arasında anlamlı bir doğrusal ilişki kurulmuştur. 13 numaralı model karesi özelinde gerçekleştirilen regresyon analizinde elde edilen modelin determinasyon katsayısı $R^2=0,86$ olup, bu yüksek değer, yapay ışık düzeylerinin kentsel gelişim olasılığı ile güçlü bir doğrusal ilişki içerisinde olduğunu göstermektedir.
- Her bir olasılık sınıfına ait 2012–2023 yılları arasındaki yapay ışık değerlerinin incelenmesiyle, zaman serileri oluşturulmuş ve doğrusal eğilimler kullanılarak 2030 yılına ait kentsel yapay ışık tahmin edilmiştir. Bu işlem sırasında farklı sınıflar için oluşturulan grafikler üzerinde çeşitli regresyon eğrileri denenmiş; en yüksek R^2 değerini sağlayan eğri türü çoğunlukla doğrusal model olmuştur.
- Ters Kare Yasası kullanılarak, farklı model karelerinin merkezinde yer alan astronomi sitelerine etki eden yapay ışık miktarları yıllar bazında hesaplanmış ve zamansal değişimleri analiz edilmiştir. Bu analiz kapsamında elde edilen radyans değerleri regresyon modellerine tabi tutulmuş, her kareye özgü denklemler yardımıyla 2030 yılı için öngörüler yapılmıştır.
- Lyon, Pekin Astronomi Gözlemevi, Lowell, Gemini, Atina Ulusal Gözlemevi ve ÇOMÜ-Ulupınar Gözlemevi seçilerek 2030 yılı için yapay ışık öngürüsü yapılmış ve herbiri için a_t katsayısı hesaplanmıştır.
- Pekin Astronomik Gözlemevi'nin yer aldığı 44 numaralı model karesi üstel regresyon modelinde en yüksek uyumu sağlamıştır ($R^2=0,98$). 2030 yılı için hesaplanan yapay ışık etkisi $R_{reg}=25,8 \text{ nW cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ olarak belirlenmiş, ters kare yöntemiyle hesaplanan değer ise $R_{2030}=51,5 \text{ nW cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ olmuştur. Bu iki değer oranın üzerinden $a_t=0,5$ katsayısı elde edilmiştir.
- ÇOMÜ-Ulupınar Gözlemevi'nin yer aldığı 20 numaralı model karesinde yapılan analizde, polinomal regresyon modeliyle elde edilen denklem yardımıyla yapılan tahminlerde, 2030 yılına ait değer negatif çıkmıştır ($R_{reg}=-136 \text{ nW cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$). Ters kare hesabıyla bulunan

pozitif değerin ($R_{2030}=58,7 \text{ nW cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) karşılaştırılmasıyla $a_t=-2,3$ katsayısı elde edilmiştir.

- Lowell Gözlemevi'nin bulunduğu 51 numaralı model karesinde doğrusal regresyon modeli ile yapılan analizde, 2030 yılına ait yapay ışık etkisi $R_{reg}=135,2 \text{ nW cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ olarak tahmin edilmiş, ters kare yöntemiyle hesaplanan değer ise $R_{2030}=893,5 \text{ nW cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Bu fark üzerinden $a_t=0,15$ katsayısı elde edilmiştir.
- Gemini Gözlemevi'nin bulunduğu 2 numaralı karede $R^2= 0,87$ değerine sahip regresyon modeline göre, 2030 yılı yapay ışık etkisi $R_{reg}=7,4 \text{ nW cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ters kareye göre hesaplanan değer ise $R_{2030}=1,5 \text{ nW cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Bu fark üzerinden elde edilen a_t katsayısı 5'dir.
- Atina Ulusal Gözlemevi'nin yer aldığı 22 numaralı karede yapılan analizde, $R^2=0,88$ ile oldukça yüksek açıklayıcılığa sahip doğrusal model elde edilmiştir. 2030 yılı tahmini ışık etkisi $R_{reg}=1,9 \text{ nW cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, ters kare yöntemine göre ise $R_{2030}=1,1 \text{ nW cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ olarak bulunmuş ve bu iki değer üzerinde $a_t = 1,8$ katsayısı hesaplanmıştır.
- Farklı konumlarda bulunan 6 astronomi sitesi için yapay ışığın astronomi sitelerine olan etkisini temsil eden a_t katsayısı hesaplanmış, 2030 yılında bu altı astronomi sitesinin yarısında 2023 yılına göre yapay ışık etkisinin %1,0 ila %31 arasında artış göstereceği bulunmuştur.
- Bu çalışmada, a_t katsayısının çeşitli kentsel büyüme model parametreleriyle ve kentsel alan olasılık sınıflarına ait piksel sayıları ile aralarındaki ilişki incelenmiştir.
- Pearson korelasyon katsayısı sonuçlarına göre, a_t katsayısı ile en yüksek pozitif ilişkiyi gösteren parametreler; sdg (0,84), cl_size (0,84), slope (0,82) ve breed (0,80) olup, bu parametreler yapay ışık düzeyindeki değişimi açıklamada önemli rol oynamaktadır. Bu parametreler, özellikle kentsel yayılma, eğim ve kümelenme yapılarıyla ilişkili olup, ışığın merkezden çevreye yayılımını modelleyen a_t katsayısını anlamlı düzeyde etkilemektedir. Pearson korelasyon katsayısına göre, a_t ile $-0,80$ ve altı düzeyde negatif ilişki gösteren tek parametre OSPS 2030 – 60 ($-0,82$)'dir. Bu durum, %60 olasılıklı kentsel gelişim sınıfının yaygın olduğu alanlarda a_t katsayısının daha düşük olduğu anlamına gelmektedir.
- Spearman korelasyon katsayısına göre, a_t ile 0,80 ve üzeri düzeyde pozitif ilişki gösteren parametreler; OSPS 2030 – 100 (1,00), sdg (1,00), breed (0,99), cl_size (0,89) ve slope (0,83) şeklindedir. Bu durum özellikle yüksek olasılıklı kentsel gelişim alanlarının, modeldeki a_t katsayısı ile güçlü bir sıralı ilişki içinde olduğunu göstermektedir. Spearman korelasyon katsayısına göre, a_t ile -1 düzeyinde mükemmel negatif ilişki gösteren tek parametre OSPS

2030 – 60’dır. Bu sınıfın artışıyla birlikte a_t katsayısının azaldığı sonucuna varılmaktadır. Bunun yanısıra a_t katsayısının OSPS 2030 – 50 parametresi ile -0,80 düzeyinde bir ilişkisi mevcuttur.

- Kendall korelasyon katsayısı sonuçlarına göre, a_t ile 0,80 ve üzeri düzeyde pozitif korelasyon gösteren parametreler; OSPS 2030 – 100 (1,00), sdg (1,00) ve breed (0,97) olarak belirlenmiştir. Bu ilişki düzeyleri, sıralı veri yapısı içerisinde ışık etkisinin bu parametrelerle sistemli biçimde değiştiğini ortaya koymaktadır. Kendall korelasyon katsayısı sonuçlarına göre, a_t katsayısı ile -1 düzeyinde çok güçlü negatif korelasyon gösteren tek parametre yine Spearman korelasyon katsayısında olduğu gibi OSPS 2030 – 60 olarak belirlenmiştir.
- Spearman Pearson ve Kendal korelasyon analizleri sonucunda en az bir korelasyon türünde a_t katsayısı ile $\pm 0,80$ ’den fazla ilişki gösteren katsayılar saçılmış (sdg, cl_size, slope, breed ve OSPS 2030 – 100, OSPS 2030 – 60 ve OSPS 2030 – 50) ve bu katsayıların a_t ile olan saçılım grafikleri elde edilmiştir. Bu saçılım grafiklerinde en uygun fit grafikte gösterilmiş ve regresyon denklemleri oluşturulup determinasyon katsayıları (R^2) elde edilmiştir. Bu grafikler, korelasyon analizleriyle elde edilen bulguları desteklemekte ve a_t katsayısının mekânsal model parametreleriyle olan ilişkisini görsel olarak ortaya koymaktadır.
- slope parametresi ile a_t arasında $R^2 = 0,67$ değerinde güçlü bir ilişki gözlenmiştir. Bu durum, eğim arttıkça modeldeki a_t katsayısının da arttığını göstermektedir.
- sdg (yeni yayılma merkezi büyümesi) parametresi ile a_t arasındaki ilişki $R^2 = 0,69$ ile pozitif ve anlamlıdır.
- cl_size (ortalama küme boyutu) değişkeni için $R^2 = 0,70$ değeri elde edilmiş olup, bu parametrenin a_t üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu göstermektedir. Diğer parametrelere göre cl_size parametresinin a_t katsayısı ile arasındaki R^2 değeri en yüksek olan parametredir.
- breed (yeni merkez oluşturma katsayısı) parametresi ile ilişki daha düşük olmakla birlikte yine de anlamlıdır ($R^2 = 0,63$).
- OSPS 2030 – 60 değişkeni ile a_t arasındaki ilişki ise yukarıda verilenlerin aksine negatif yönlü olup $R^2 = 0,67$ olarak hesaplanmıştır. Bu, %60 olasılıklı kentsel gelişim sınıfı arttıkça ışık etkisi katsayısının azaldığını göstermektedir.
- OSPS 2030 – 50 değişkeni için gözlenen ilişki pozitif fakat diğer değişkenlerle a_t arasındaki ilişkiye göre daha zayıftır ($R^2 = 0,25$).
- OSPS 2030 – 100 değişkeni ile pozitif yönlü bir ilişki gözlenmiş olup $R^2 = 0,57$ olarak hesaplanmıştır.

- cl_size parametresinin a_t katsayısı ile arasındaki R^2 değeri en yüksek olan parametredir. Bundan yola çıkarak model 55 model karesi için model çıktı dosyası olan `average_log` dosyasından cl_size parametresi 2030 yılı için ayıklanmıştır. cl_size parametresinin a_t katsayısı için oluşturulan lineer regresyon denklemi kullanılarak 55 kare için a_t katsayısı elde edilmiştir. 55 karenin hesaplanan a_t katsayısı histogramı sağa kümelenmiştir.
- α_t katsayısının histogram dağılımı incelendiğinde, değerlerin büyük çoğunluğunun -0,5 ile 0,5 aralığında yoğunlaşmış olup, α_t katsayısının çoğunlukla düşük ya da sıfıra yakın değerler aldığı görülmektedir. Buna karşılık, pozitif uç değerlerde (özellikle 3 ve üzeri) çok az sayıda veri bulunduğu görülmektedir. Bu durum, dağılımın sağa kümelenildiğini, yani az sayıda yüksek değerin verinin dengesini bozduğunu göstermektedir.

Bu tez çalışması sonucunda (her bir astronomi sitesi için farklılık gösteren) elde edilen a_t katsayısı yapay ışığın zamansal etkisinin ters kare yasasına göre daha doğru bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Bu katsayılar sayesinde, her bir astronomi sitesi için 2030 yılına ait ışık etkisi tahminleri daha gerçekçi şekilde yapılabilmiştir. Bu yaklaşım, ışık kirliliği tahminlerinde bölgesel farklılıkların dikkate alınmasını mümkün kılmaktadır.

Çalışmada kullanılan farklı regresyon türlerinin (doğrusal, üstel, polinomsal) değişen başarı düzeyleri, farklı bölgelerdeki kentsel gelişim dinamiklerinin ve yapay ışık yayılım biçimlerinin birbirinden farklı olduğunu göstermektedir. Bu durum, her bölge için özel modelleme stratejileri geliştirmenin gerekliliğine işaret etmektedir.

Bu tez kapsamında öneriler aşağıda verilmiştir. Bu tez kapsamında öneriler aşağıda verilmiştir.

Kentsel gelişim modeli girdi verileri kategorik veriler olduğundan modele ait çıktılar da kategoriktir. Işık kirliliğinin kentsel gelişim ile değişimi incelendiğinde kategorik çıktısı olmayan farklı kentsel gelişim modellerin kullanılması (Markov Zinciri, Regresyon Ağacı Modelleri Yapay Sinir Ağları) iki parametre arasındaki ilişkiyi arttırabilir.

- Bu tez çalışmasında model için nihai yersel çözünürlük 1km x 1km olarak kullanılmıştır. Daha yüksek çözünürlüklü verilerle daha ayrıntılı çıktılar elde edilebilir.
- Işık kirliliğinin gelecek tahmini için veri setinin hacmi arttırılıp (aylık, günlük veriler kullanılabilir) yapay zeka modellerinden faydalanılabilir.
- Uydu gözlemlerine ek olarak yer ölçümleri ile var olan veri seti doğrulanıp gelecek tahmini için kullanılabilir.
- 2030 yılı için elde edilen yapay ışık görüntüleri oluşturulurken kullanılan model karesinin her yıl için her sınıf değerinin var olması, geleceği yönelik projeksiyon için kurulan regresyon modellerindeki determinasyon katsayısının yüksek olması ve sınıflarda hesaplanan piksellerin

sayısının fazla olması hesaplanan a_t katsayısının küçülmesine olanak tanımaktadır. Bu etkilerin optimize edilmesi ile ters kareye göre hesaplanan değer olan R_{2030} ile 2030 yılı için oluşturulmuş yapay ışık görüntüsünden hesaplanan R_{reg} sonuçları arasındaki farkın kapatılması sağlanabilir.



KAYNAKLAR

- Aickin, M., 1990 Maximum likelihood estimation of agreement in the constant predictive probability model, and its relation to Cohen's Kappa. *Biometrics* 46: 293–302
- Aksaker, N., Yerli, S. K., Erdoğan, M. A., Kurt, Z., Kaba, K., Bayazit, M., & Yesilyaprak, C. (2020). Global site selection for astronomy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 493(1), 1204-1216.
- Aksaker, N., Yerli, S. K., Kurt, Z., Bayazit, M., Aktay, A., & Erdoğan, M. A. (2020). A case study of light pollution in France. *Astrophysics and Space Science*, 365, 153.
- Allouche O, Tsoar A, and Kadmon R 2006 Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, Kappa and true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology* 43: 1223–1232
- Baddiley, C. (2021). Light pollution colour changes at MHAONB, from distant town conversions to blue-rich LED lighting, implications for rural UK skies. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 267, 107574.
- Baskerville, G. L. (1972). Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 2(1), 49-53.
- Bender, R., & Lange, S. (2007). Was ist ein Konfidenzintervall?. *DMW-Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 132(S 01), e17-e18.
- Benesty, J., Chen, J., Huang, Y., & Cohen, I. (2009). Pearson correlation coefficient. In *Noise Reduction in Speech Processing* (pp. 1–4). Springer.
- Bennie, J., Davies, T., Duffy, J., et al. (2014). Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed night time lights. *Scientific Reports*, 4, 3789. <https://doi.org/10.1038/srep03789>
- Berberoglu, S., Akin, A., & Clarke, K. C. (2016). Cellular automata modeling approaches to forecast urban growth for adana, Turkey: A comparative approach. *Landscape and urban planning*, 153, 11-27.
- Bolliger, J., Hennet, T., Wermelinger, B., Bösch, R., Pazur, R., Blum, S., ... & Obrist, M. K. (2020). Effects of traffic-regulated street lighting on nocturnal insect abundance and bat activity. *Basic and Applied Ecology*, 47, 44-56.
- Brennan, R. & Prediger, D. 1981 Coefficient kappa: Some uses, misuses, and alternatives. *Educational and Psychological Measurement* 41: 687–699
- Brownson, J. R. (2013). *Solar energy conversion systems*. Academic Press.
- Cameron, A. C., & Windmeijer, F. A. (1997). An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models. *Journal of econometrics*, 77(2), 329-342.
- Candau, J. T. (2002). *Temporal calibration sensitivity of the SLEUTH urban growth model* (Doctoral dissertation, University of California, Santa Barbara).

- Cao, C., & Bai, Y. (2014). Quantitative analysis of VIIRS DNB nightlight point source for light power estimation and stability monitoring. *Remote Sensing*, 6(12), 11915-11935.
- Cao, C., Xiong, J., Blonski, S., Liu, Q., Uprety, S., Shao, X., ... & Weng, F. (2013). Suomi NPP VIIRS sensor data record verification, validation, and long-term performance monitoring. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(20), 11-664.
- Cao, C., Bai, Y., Wang, W., & Choi, T. (2019). Radiometric inter-consistency of viirs dnb on suomi npp and noaa-20 from observations of reflected lunar lights over deep convective clouds. *Remote Sensing*, 11(8), 934.
- Cao, C., Shao, X., & Uprety, S. (2013). Detecting light outages after severe storms using the s-npp/viirs day/night band radiances. *Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(6), 1582-1586. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2013.2262258>
- Cao, C., Zong, Y., Bai, Y., & Shao, X. (2015). Preliminary study for improving the viirs dnb low light calibration accuracy with ground based active light source.. <https://doi.org/10.1117/12.2187580>
- Cavazzani, S., Ortolani, S., Bertolo, A., Binotto, R., Fiorentin, P., Carraro, G., ... & Zitelli, V. (2020). Sky Quality Meter and satellite correlation for night cloud-cover analysis at astronomical sites. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 493(2), 2463-2471.
- Changruengnam, T. (2023). The first dark sky map of chiang rai: three decades of change affecting astro-tourism. *Journal of Physics Conference Series*, 2653(1), 012027.
- Chaudhuri, G. and Clarke, K. (2019). Modeling an indian megalopolis– a case study on adapting sleuth urban growth model. *Computers Environment and Urban Systems*, 77, 101358. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101358>
- Cheng, B., Chen, Z., Yu, B., Li, Q., Wang, C., Li, B., ... & Wu, J. (2020). Automated Extraction Of Street Lights From J11-3b Nighttime Light Data and Assessment Of Their Solar Energy Potential. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 675-684. <https://doi.org/10.1109/jstars.2020.2971266>
- Choi, T. and Cao, C. (2021). S-npp viirs day night band on-board solar diffuser calibration validation using the scheduled lunar collections. *Remote Sensing*, 13(6), 1093. <https://doi.org/10.3390/rs13061093>
- Cinzano, P., Falchi, F., & Elvidge, C. D. (2001). The first world atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 328(3), 689-707.
- Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C. D., & Baugh, K. E. (2000). The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 318(3), 641-657. doi:10.1046/j.1365-8711.2000.03562.x
- Clarke, K.C., Olsen, G., and Brass, J. A., 1993. Refining a cellular automaton model of wildfire propagation and extinction, *Proceedings of the Second International Conference on the*

- Integration of Geographic Information Systems and Environmental Modeling, Breckenridge, CO.
- Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), 247-261.
- Clarke, K. C., & Gaydos, L. J. (1998). Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7), 699-714.
- Clarke, K. C., Gazulis, N., Dietzel, C. K., & Goldstein, N. C. (2007). A decade of SLEUTHing: Lessons learned from applications of a cellular automaton land use change model. *Classics in IJGIS: twenty years of the international journal of geographical information science and systems*, 413-427.
- Clarke, K. C. (2008). A decade of cellular urban modeling with SLEUTH: Unresolved issues and problems. Ch 3: 47-60.
- Clarke, K. and Johnson, J. (2020). Calibrating sleuth with big data: projecting california's land use to 2100. *Computers Environment and Urban Systems*, 83, 101525.
- Congalton R G, Oderwald R G, and Mead R A 1983 Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 49: 1671–1678
- Congalton R G and Green K 1999 Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. Boca Raton, FL, Lewis Publishers
- Costanza R and Maxwell T 1994 Resolution and predictability: An approach to the scaling problem. *Landscape Ecology* 9: 47–577
- Crosetto M and Tarantola S 2001 Uncertainty and sensitivity analysis: tools for GIS-based model implementation. *International Journal of Geographical Information Science* 15: 415–437
- Dietzel, C., & Clarke, K. C. (2004). Spatial differences in multi-resolution urban automata modeling. *Transactions in GIS*, 8(4), 479-492.
- Dungan J L, Perry J N, Dale M R T, Legendre P, Citron-Pousty S, Fortin M J, Jakomulska A, Miriti M, and Rosenberg M S 2002 A balanced view of scale in spatial statistical analysis. *Ecography* 25: 626–40
- Elvidge, C. D., Hsu, F.-C., Zhizhin, M., Ghosh, T., Taneja, J., & Bazilian, M. (2020). . *Remote Sensing*, 12(19), 3194. doi:10.3390/rs12193194
- Elvidge, C. D., Zhizhin, M., Ghosh, T., Hsu, F. C., & Taneja, J. (2021). Annual time series of global VIIRS nighttime lights derived from monthly averages: 2012 to 2019. *Remote Sensing*, 13(5), 922.

- Elvidge, C. D., Hsu, F.-C., Zhizhin, M., Ghosh, T., Taneja, J., & Bazilian, M. (2020). Indicators of Electric Power Instability from Satellite Observed Nighttime Lights. *Remote Sensing*, 12(19), 3194. doi:10.3390/rs12193194
- Eugenio, B. D., & Glass, M. (2004). The kappa statistic: A second look. *Computational linguistics*, 30(1), 95-101.
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C., Elvidge, C. D., Baugh, K., ... & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6), e1600377.
- Falchi, F., Ramos, F., Bará, S., Sanhueza, P., Jaque Arancibia, M., Damke, G., & Cinzano, P. (2023). Light pollution indicators for all the major astronomical observatories. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519(1), 26-33.
- Foody G M 1992 On the compensation for chance agreement in image classification accuracy assessment. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 58: 1459–1460
- Foody G M 2004 Thematic map comparison: evaluating the statistical significance of differences in classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70: 627–633
- Foody G M 2008 Harshness in image classification accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing* 29: 3137–3158
- Frei, Z., Guhathakurta, P., Gunn, J. E., & Tyson, J. A. (1995). A catalog of digital images of 113 nearby galaxies. arXiv preprint astro-ph/9510062.
- Gao, J., & O'Neill, B. C. (2020). Mapping global urban land for the 21st century with data-driven simulations and Shared Socioeconomic Pathways. *Nature communications*, 11(1), 2302.
- Garstang, R. H. (1986). Model for artificial night-sky illumination. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 98(601), 364–375. <https://doi.org/10.1086/131784>
- Garstang, R. H. (2000). Limiting visual magnitude and night sky brightness. *Memorie della Società Astronomia Italiana*, 71, 83.
- Green, R.F., Luginbuhl, C.B., Wainscoat, R.J. et al. The growing threat of light pollution to ground-based observatories. *Astron Astrophys Rev* 30, 1 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00159-021-00138-3>
- Green, R.F., Luginbuhl, C.B., Wainscoat, R.J. et al. The growing threat of light pollution to ground-based observatories. *Astron Astrophys Rev* 30, 1 (2022).
- Guillemin, A. (1864). *Le Ciel, notions d'astronomie à l'usage des gens du monde et de la jeunesse*. Paris: Librairie de L. Hachette et Cie.
- Hagen-Zanker A and Martens P 2008 Map comparison methods for comprehensive assessment of geosimulation model. In F Karimipour, M R Delavar, and A U Frank (eds) *Computational Science and Its Applications: ICCSA 2008*. Berlin, Springer Lecture Notes in Computer Science Vol. 5072: 194–209
- Hauke, J., & Kossowski, T. (2011). Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. *Quaestiones Geographicae*, 30(2), 87–93.

- Henderson, J. V., Storeygard, A., & Weil, D. N. (2012). Measuring economic growth from outer space. *American economic review*, 102(2), 994-1028.
- Hossain, E. (2020). Power Cuts Make Households, Industries Suffer in Bangladesh; New Age: Dhaka, Bangladesh, 11 March 2020. Available online: <https://www.newagebd.net/article/101874/power-cuts-make-householdsindustries-suffer-in-bangladesh> (accessed on 12 August 2020).
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and Practice* (2nd ed.). OTexts.
- Hänel, A., Posch, T., Ribas, S. J., Aubé, M., Duriscoe, D., Jechow, A., ... & Kyba, C. C. (2018). Measuring night sky brightness: methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 205, 278-290.
- James, G. R. (2005). Predicting the spatial pattern of urban growth in Honolulu County using the cellular automata SLEUTH urban growth model (Doktora tezi, University of Hawaii at Manoa).
- Jantz, C., Drzyzga, S., & Maret, M. (2014). Calibrating and validating a simulation model to identify drivers of urban land cover change in the baltimore, md metropolitan region. *Land*, 3(3), 1158-1179. <https://doi.org/10.3390/land3031158>
- Jantz C A, Goetz S J, and Shelley M K 2004 Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore/Washington metropolitan area. *Environment and Planning B* 31: 251–71
- Jiang, W., He, G., & Ni, Y. (2017). Assessment of light pollution impact on protected areas in China. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 1307-1312.
- Jing, X., Shao, X., Cao, C., Fu, X., & Yan, L. (2015). Comparison between the suomi-npp day-night band and dmsp-ols for correlating socio-economic variables at the provincial level in china. *Remote Sensing*, 8(1), 17.
- Jing, X., Shao, X., Cao, C., Fu, X., & Yan, L. (2015). Comparison between the suomi-npp day-night band and dmsp-ols for correlating socio-economic variables at the provincial level in china. *Remote Sensing*, 8(1), 17. <https://doi.org/10.3390/rs8010017>
- Jung H-W 2003 Evaluating inter-rater agreement in SPICE-based assessments. *Computer Standards and Interfaces* 25: 477–499
- Kamarajuggedda, S. and Lo, E. (2019). Modelling urban growth for bangkok and assessing linkages with road density and socio-economic indicators. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W19, 255-262. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-4-w19-255-2019>
- Kendall, M. G. (1948). *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin & Company.

- Kloog, I., Haim, A., Stevens, R. G., & Portnov, B. A. (2009). Global co-distribution of light at night (LAN) and cancers of prostate, colon, and lung in men. *Chronobiology International*, 26(1), 108-125.
- Koo, Y. S., Song, J. Y., Joo, E. Y., Lee, H. J., Lee, E., Lee, S. K., & Jung, K. Y. (2016). Outdoor artificial light at night, obesity, and sleep health: Cross-sectional analysis in the KoGES study. *Chronobiology international*, 33(3), 301-314.
- Kopp, T. J., Thomas, W., Heidinger, A. K., Botambekov, D., Frey, R. A., Hutchison, K. D., ... & Reed, B. (2014). The VIIRS Cloud Mask: Progress in the first year of S-NPP toward a common cloud detection scheme. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(5), 2441-2456.
- Kuechly, H. U., Kyba, C. C., Ruhtz, T., Lindemann, C., Wolter, C., Fischer, J., & Hölker, F. (2012). Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany. *Remote Sensing of Environment*, 126, 39-50.
- Kumar, V. and Agrawal, S. (2022). Urban modelling and forecasting of landuse using sleuth model. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(6), 6499-6518. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04331-4>
- Kuo, H. and Tsou, K. (2017). Modeling and simulation of the future impacts of urban land use change on the natural environment by sleuth and cluster analysis. *Sustainability*, 10(2), 72. <https://doi.org/10.3390/su10010072>
- Kyba, C. C., Kuester, T., Sánchez de Miguel, A., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., ... & Guanter, L. (2017). Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Science Advances*, 3(11), e1701528.
- Kyba, C. C., Kuester, T., Sánchez de Miguel, A., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., ... & Guanter, L. (2017). Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Science advances*, 3(11), e1701528.
- Lands, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-74.
- Larkin, A., van Donkelaar, A., Geddes, J., Martin, R., & Hystad, P. (2016). Relationships Between Changes In Urban Characteristics and Air Quality In East Asia From 2000 To 2010. *Environmental Science & Technology*, 50(17), 9142-9149. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02549>
- Lasker, B., Lattanzi, M. G., & McLean, B. J. (2007). The Guide Star Catalog, Version 2.3.2 (GSC2.3)(STScI, 2006). *VizieR Online Data Catalog*, 1305, 0.
- Lee, D. R., & Sallee, G. T. (1970). A method of measuring shape. *Geographical Review*, 555-563.
- Levin, N. (2017). The impact of seasonal changes on observed nighttime brightness from 2014 to 2015 monthly VIIRS DNB composites. *Remote Sensing of Environment*, 193, 150-164.

- Li, L., Chen, L., Cheng, L., Zhou, X., Cui, Y., Han, L., ... & Liu, W. (2019). Urban growth simulation in different scenarios using the sleuth model: a case study of hefei, east china. *Plos One*, 14(11), e0224998. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224998>
- Li, F., Wang, L., Chen, Z., Clarke, K., Li, M., & Jiang, P. (2018). Extending the sleuth model to integrate habitat quality into urban growth simulation. *Journal of Environmental Management*, 217, 486-498. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.109>
- Liliburne L and Tarantola S 2009 Sensitivity analysis of spatial models. *International Journal of Geographical Information Science* 23: 151–168
- Liu, W., Wang, T., Liang, B., Feng, D., Jiang, X., Zhang, Y., & Ma, J. (2019). Measurement of three-dimensional information by single eddy current displacement sensor. *IEEE Sensors Journal*, 19(9), 3543-3552.
- Liu, X., Wei, M., & Jia, M. (2020). Simulating urban growth scenarios based on ecological security pattern: a case study in quanzhou, china. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19), 7282.
- Luginbuhl, C. B., Boley, P. A., & Davis, D. R. (2009). The impact of light source spectral power distribution on sky glow. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121(877), 204–212.
- Ma Z and Redmond R L 1995 Tau coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 61: 435–439
- Makridakis, S., Spiliotis, E., & Assimakopoulos, V. (2018). Statistical and Machine Learning forecasting methods: Concerns and ways forward. *PLOS ONE*, 13(3), e0194889.
- Marconcini, M., Metz-Marconcini, A., Esch, T., & Gorelick, N. (2021). Küresel Kentleşmedeki Güncel Eğilimleri Anlamak – Dünya Yerleşim Ayak İzi paketi. *GI_Forum*, 1, 33-38. https://doi.org/10.1553/giscience2021_01_s33
- Mekonnen, Y. and Hailu, A. (2020). Modeling urban growth and land use transition using sleuth model: the case of dilla city, ethiopia.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-129793/v1>
- Miller, S., Straka, W., Yue, J., Seaman, C., Xu, S., Elvidge, C., ... & Azeem, I. (2018). The dark side of hurricane matthew: unique perspectives from the viirs day/night band. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(12), 2561-2574.
- Miller, S., Straka, W., Yue, J., Seaman, C., Xu, S., Elvidge, C., ... & Azeem, I. (2018). The dark side of hurricane matthew: unique perspectives from the viirs day/night band. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(12), 2561-2574. <https://doi.org/10.1175/bams-d-17-0097.1>
- Monserud R A and Leemans R 1992 Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. *Ecological Modeling* 62: 275–293

- Moreno, N., Ménard, A., & Marceau, D. (2008). Vecgca: a vector-based geographic cellular automata model allowing geometric transformations of objects. *Environment and Planning B Planning and Design*, 35(4), 647-665. <https://doi.org/10.1068/b33093>
- Mukaka, M. M. (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal*, 24(3), 69–71.
- Mutasa, H. (2019). Zimbabwe Experiences Worst Power Outages in Three Years; Aljazeera: Doha, Qatar, 5 July 2019. Available online: <https://www.aljazeera.com/news/2019/07/zimbabwe-experiences-worst-power-outagesyears-190705162434042.html> (accessed on 12 August 2020).
- Ngadiman, N. F., Shariff, N. N. M., & Hamidi, Z. S. (2020, July). Light Pollution: A Preliminary Study in Kundasang, Sabah Based on Sky Quality Meter System. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1593, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.
- Nurbandi, W., Yusuf, F. R., Prasetya, R., & Afrizal, M. D. (2016). Using visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) imagery to identify and analyze light pollution. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 47, No. 1, p. 012040).
- Osborne, J. W., & Waters, E. (2002). Four assumptions of multiple regression that researchers should always test. *Practical assessment, research, and evaluation*, 8(1).
- Petropoulos, F., Makridakis, S., & Assimakopoulos, V. (2022). Forecasting with Scenario Planning: A review and a new methodology. *International Journal of Forecasting*, 38(2), 276–292. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.05.003>
- Phan, D.H. Lights and GDP relationship: What does the computer tell us?. *Empir Econ* 65, 1215–1252 (2023).
- Phan, D.H. Lights and GDP relationship: What does the computer tell us?. *Empir Econ* 65, 1215–1252 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00181-023-02377-y>
- Pontius Jr R G 2000 Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66: 1011–1016
- Pontius Jr R G and Millones M 2011 Death to Kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing* 32: 4407–4429
- Project Gigalopolis: Urban and land cover modeling. Santa Barbara,CA: University of Santa Barbara at .)
- Project Gigalopolis: Urban and land cover modeling. Santa Barbara,CA: University of Santa Barbara at <http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/>.)
- Puschnig, J., Posch, T., & Uttenthaler, S. (2014). Night sky photometry and spectroscopy performed at the Vienna University Observatory. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 139, 64-75.

- Rigby, A. S. (2000). Statistical methods in epidemiology. v. Towards an understanding of the kappa coefficient. *Disability and rehabilitation*, 22(8), 339-344.
- Rodríguez, E. M., Morris, C. S., & Belz, J. E. (2006). A Global Assessment Of the Srtm Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), 249-260.
- Santé, I., García, A. M., Miranda, D., & Crecente, R. (2010). Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and urban planning*, 96(2), 108-122.
- Schneider, A., Hommel, G., & Blettner, M. (2010). Linear regression analysis: part 14 of a series on evaluation of scientific publications. *Deutsches Ärzteblatt International*, 107(44), 776.
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Seber, G. A., & Lee, A. J. (2003). *Linear regression analysis*. John Wiley & Sons.
- Sen, A., & Srivastava, M. (2012). *Regression analysis: theory, methods, and applications*. Springer Science & Business Media.
- Sheng, K., Fan, J., & Sun, W. (2015). From Sequential To Parallel Growth Of Cities: Theory and Evidence From Canada. *Chinese Geographical Science*, 25(3), 377-388. <https://doi.org/10.1007/s11769-015-0750-5>
- Siddiqui, M. K., Hussain, M., Javed, S., Khalid, S., Noor, T., & Tolasa, F. T. (2024). On characterization of entropy measure using logarithmic regression model for Copper (II) Fluoride. *Plos one*, 19(3), e0300757.
- Silva E A and Clarke K C 2002 Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. *Computers, Environment and Urban Systems* 26: 525–52
- Smits P C, Dellepiane S G, and Schowengerdt R A 1999 Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: A review and proposal for a cost-based approach. *International Journal of Remote Sensing* 20: 1461–1486
- Solbrig, J., Miller, S., Zhang, J., Grasso, L., & Kliwer, A. (2020). Assessing the stability of surface lights for use in retrievals of nocturnal atmospheric parameters. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(1), 165-190.
- Solbrig, J., Miller, S., Zhang, J., Grasso, L., & Kliwer, A. (2020). Assessing the stability of surface lights for use in retrievals of nocturnal atmospheric parameters. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(1), 165-190. <https://doi.org/10.5194/amt-13-165-2020>
- Spiess, A. N., & Neumeyer, N. (2010). An evaluation of R^2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: a Monte Carlo approach. *BMC pharmacology*, 10, 1-11.
- Stehman S V 1997 Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment* 62: 77–89

- Sánchez de Miguel, A., Aubé, M., Zamorano, J., Kocifaj, M., Roby, J., & Tapia, C. (2017). Sky Quality Meter measurements in a colour-changing world. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467(3), 2966-2979.
- Tabaka, P. (2020). Pilot measurement of illuminance in the context of light pollution performed with an unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing*, 12(13), 2124.
- Talmadge, E. (2018). Options Limited, North Korea Lit by Flashlights, Creaky Grid; Associated Press: New York, NY, USA, 12 November 2018. Available online: <https://apnews.com/f0a95a5b376b4152a25feb283bc0ce8e> (accessed on 12 August 2020).
- Tanrıöver, A. A. (2011). Adana kentsel gelişiminin uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak modellenmesi [Modelling the urban growth of Adana using remote sensing and geographical information systems]. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Peyzaj Mimarlığı Ana Bilim Dalı. Danışman: Prof. Dr. Süha Berberoğlu.
- Thimijan, R. W., & Heins, R. D. (1983). Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion. *HortScience*, 18(6), 818-822. Retrieved Apr 25, 2024, from
- Thimijan, R. W., & Heins, R. D. (1983). Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion. *HortScience*, 18(6), 818-822. Retrieved Apr 25, 2024, from <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.18.6.818>.
- Thimijan, R. W., & Heins, R. D. (1983). Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion. *HortScience*, 18(6), 818-822. Retrieved Apr 25, 2024, from <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.18.6.818>
- Turk G 2002 Map evaluation and ‘chance correction’. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68: 123–133
- UNHCR. Yemen Emergency. Available online: <https://www.unhcr.org/en-us/yemen-emergency.html> (accessed on [Access Date]).
- Urban Night Sky Place Program Guidelines. (June 2018).
- Varga, M., & Bašić, T. (2015). Accuracy Validation and Comparison Of Global Digital Elevation Models Over Croatia. *International Journal of Remote Sensing*, 36(1), 170-189. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.994720>
- Varquez, A., Dong, S., Hanaoka, S., & Kanda, M. (2020). Improvement of an urban growth model for railway-induced urban expansion. *Sustainability*, 12(17), 6801.
- Voudoukis, N., & Oikonomidis, S. (2017). Inverse square law for light and radiation: A unifying educational approach. *European Journal of Engineering Research and Science*, 2(11), 23–27.
- Walker, M. F. (1977). The effects of urban lighting on the brightness of the night sky. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 89(529), 405–409.

- Wang, W., & Cao, C. (2019). NOAA-20 VIIRS DNB aggregation mode change: Prelaunch efforts and on-orbit verification/validation results. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7), 2015-2023.
- Wang, P., Huang, C., Brown de Colstoun, E. C., Tilton, J. C., & Tan, B. (2017). Global Human Built-up And Settlement Extent (HBASE) Dataset From Landsat. Palisades, New York: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). <https://doi.org/10.7927/H4DN434S>
- Wang, Z., Xiong, X., Fulbright, J. P., & Lei, N. (2017). VIIRS Day/night Band Radiometric Calibration Stability Monitoring Using the Moon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(11), 5616-5624. <https://doi.org/10.1002/2016JD026372>
- Wang, Z., Román, M., Sun, Q., Molthan, A., Schultz, L., & Kalb, V. (2018). Monitoring disaster-related power outages using nasa black marble nighttime light product. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3, 1853-1856.
- Wang, R., Wan, B., Hu, M., & Zhou, S. (2017). Mapping regional urban extent using npp-viirs dnb and modis ndvi data. *Remote Sensing*, 9(8), 862.
- Wang, Z., Xiong, X., Fulbright, J., & Lei, N. (2017). Viirs day/night band radiometric calibration stability monitoring using the moon. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 122(11), 5616-5624. <https://doi.org/10.1002/2016jd026372>
- Wang, Z., Román, M., Sun, Q., Molthan, A., Schultz, L., & Kalb, V. (2018). Monitoring disaster-related power outages using nasa black marble nighttime light product. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3, 1853-1856. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-1853-2018>
- Wang, R., Wan, B., Hu, M., & Zhou, S. (2017). Mapping regional urban extent using npp-viirs dnb and modis ndvi data. *Remote Sensing*, 9(8), 862. <https://doi.org/10.3390/rs9080862>
- Wilkinson G G 2005 Results and implications of a study of fifteen years of satellite image classification experiments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43: 433–440
- Xu, E. and Yi-meng, C. (2019). Modeling intersecting processes of wetland shrinkage and urban expansion by a time-varying methodology. *Sustainability*, 11(18), 4953. <https://doi.org/10.3390/su11184953>
- Yang X and Lo C P 2003 Modelling urban growth and landscape change in the Atlanta metropolitan area. *International Journal of Geographical Information Science* 17: 463–88
- Yeh A G and Li X 2006 Errors and uncertainties in urban cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems* 30: 10–28

- Yerli, S. K., Aksaker, Nazım., Bayazit, M., Kurt, Z., Aktay, A., & Erdoğan, M. A. (2021). The temporal analysis of light pollution in Turkey using VIIRS data. *Astrophysics and Space Science*, 366(4), 34.
- Zhang, J. C., Ge, L., Lu, X. M., Cao, Z. H., Chen, X., Mao, Y. N., & Jiang, X. J. (2015). Astronomical observing conditions at Xinglong Observatory from 2007 to 2014. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 127(958), 1292.
- Zhang, J., Jaker, S. L., Reid, J. S., Miller, S. D., Solbrig, J., & Toth, T. D. Characterization and application of artificial light sources for nighttime 5 aerosol optical depth retrievals using the VIIRS Day/Night Band 6. *Atmospheric Measurement Techniques*, 26(27), 28.
- Zhang, J., Jaker, S., Reid, J., Miller, S., Solbrig, J., & Toth, T. (2018). Characterization and application of artificial light sources for nighttime
- Zhang, J., Reid, J., Miller, S., Román, M., Wang, Z., Spurr, R., ... & Jaker, S. (2022). Sensitivity studies of nighttime toa radiances from artificial light sources using a 3-d radiative transfer model for nighttime aerosol retrievals.. <https://doi.org/10.5194/amt-2022-232>
- Zhou, Y., Varquez, A. C., & Kanda, M. (2019). High-resolution global urban growth projection based on multiple applications of the SLEUTH urban growth model. *Scientific Data*, 6(1), 34.
- Zhou, Y., Ma, T., Zhou, C., & Xu, T. (2015). Nighttime light derived assessment of regional inequality of socioeconomic development in china. *Remote Sensing*, 7(2), 1242-1262. <https://doi.org/10.3390/rs70201242>
- Ścieżor, T. (2020). The impact of clouds on the brightness of the night sky. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 247, 106962.

ÖZGEÇMİŞ

Zühal KURT, İlk, Orta ve Lise öğrenimini Adana’da tamamladı. 2009 yılında başladığı Çukurova Üniversitesi İstatistik Lisans eğitimini 2014 yılında tamamladı. 2021 yılında Çukurova Üniversitesi Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilimdalı’nda Yüksek Lisansını tamamladıktan sonra aynı yıl aynı anabilim dalında doktora programına başladı.



EKLER

Ek 1. SLEUTH modeline girdi olacak kentsel alan verisini model kareleri kapsamında kesen ön işleme adımı için çalıştırılan python kodu.

```
import arcpy
import os
shp_folder = r"I:\MODEL_DATA\obss\obs_kare_shps"
raster_file = r"I:\MODEL_DATA\1KM-2KM-3KM\1km\GROADS_1KM.tif"
output_folder = r"I:\MODEL_DATA\1KM-2KM-3KM\KARELER_1KM\2010_ROAD_1KM"
arcpy.env.workspace = shp_folder
shp_files = arcpy.ListFeatureClasses("*.shp")
for shp_file in shp_files:
    shp_name = os.path.splitext(shp_file)[0]
    output_raster = os.path.join(output_folder,
"2010_ROAD_1KM_{ }.tif".format(shp_name.split("_")[1]))
    arcpy.sa.ExtractByMask(raster_file, shp_file).save(output_raster)
```

Ek 2. SLEUTH modeline girdi olacak verilerin isim formatları.

< > = kullanıcı tarafından seçilen dosyalar

[< >] = opsiyonel dosyalar

Kentsel alan katmanı veri formatı: <location>.urban.<date>.[<user info>].gif

URBAN_DATA= demo200.urban.2000.gif

URBAN_DATA= demo200.urban.2007.gif

URBAN_DATA= demo200.urban.2014.gif

URBAN_DATA= demo200.urban.2022.gif

Ulaşım katmanı veri formatı: <location>.roads.<date>.[<user info>].gif

ROAD_DATA= demo200.roads.2010.gif

ROAD_DATA= demo200.roads.2022.gif

Land use data GIFs:

Çıkarma katmanı veri formatı: <location>.excluded.[<user info>].gif

EXCLUDED_DATA= demo200.excluded.gif

Eğim Katmanı veri formatı: <location>.slope.[<user info>].gif

SLOPE_DATA= demo200.slope.gif

Arkaplan tepe gölgesi veri formatı: <location>.hillshade.[<user info>].gif

HILLSHADE: demo200.hillshade.gif

Ek 3. Verilerin isim formatlarını SLEUTH modeli formatına dönüştürmek için kullanılan

python kodu

```
import os
dizin = r"C:\zh\FINAL\KARELER_1KM\HILLSHADE_WATER_1KM"
dosyalar = [dosya for dosya in os.listdir(dizin) if dosya.endswith('.tif')]
def dosya_siralama(dosya_adi):
    return int(dosya_adi.split('_')[-1].split('.')[0])

dosyalar.sort(key=dosya_siralama)
for indeks, dosya in enumerate(dosyalar, start=1):
    yeni_dosya_adi = f'demo200.hillshade.water_{indeks}.tif'
    eski_dosya_yolu = os.path.join(dizin, dosya)
    yeni_dosya_yolu = os.path.join(dizin, yeni_dosya_adi)
    os.rename(eski_dosya_yolu, yeni_dosya_yolu)
    print(f'{dosya} dosyası {yeni_dosya_adi} olarak değiştirildi.")
```

Ek 4. TIF formatındaki görüntüleri GIF formatına dönüştüren Python kodu

```
import os
from osgeo import gdal
folder_path = r"C:\zh\FINAL\KARELER_1KM\SLOPE_1KM"
new_folder_name = "GIFS"
new_folder_path = os.path.join(folder_path, new_folder_name)
if not os.path.exists(new_folder_path):
    os.makedirs(new_folder_path)
tif_files = [file for file in os.listdir(folder_path) if file.endswith('.tif')]
wgs84 = "+proj=latlong +datum=WGS84"
for tif_file in tif_files:
    tif_path = os.path.join(folder_path, tif_file)
    gif_file = os.path.splitext(tif_file)[0] + ".gif"
    gif_path = os.path.join(new_folder_path, gif_file)
    gdal.Warp(gif_path, tif_path, dstSRS=wgs84, format='GIF')
    print(f'{tif_file} dosyası WGS_84 datumuna göre referanslandırıldı ve .gif formatına
dönüştürüldü ve {new_folder_name} klasörüne kaydedildi.")
```

Ek 5. SLEUTH modelinin test, kalibrasyon ve demo adımlarından oluşan C kodlarının Cygwin arayüzüne çalıştırılması için gerekli komutlar.

```
prompt% gunzip SLEUTH3.0beta.tar.gz
prompt% tar xvf SLEUTH3.0beta.tar
prompt% cd GD
prompt% make
prompt% cd ../Whirlgif
prompt% make
prompt% cd ..
prompt% make
prompt% ../grow.exe test scenario.demo200_test
prompt% ../grow.exe calibrate scenario.demo200_calibrate
prompt% ../grow.exe predict scenario.demo200_predict
```

Ek 6. Cygwin arayüzünde modelin test, kalibrasyon ve tahmin modunu çalıştırmak için gerekli olan komutlar.

```
cd SLEUTH
cd SLEUTH3.0beta_p01_linux
cd GD
make
cd Whirlgif
make
cd ..
make
cd Scenarios
make
../grow.exe test scenario.demo200_test
#../grow.exe calibrate scenario.demo200_calibrate
#../grow.exe predict scenario.demo200_predict
```

Ek 7. Kaba kalibrasyon sonucu ilk 30 model karesi için “control_stats.log” dosyasından elde edilen Lesale istatistiği ve ince kalibrasyon için kullanılacak hesaplanmış katsayıların tablosu.

1						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
23	54.174	1	1	1	100	75
12	54.147	1	1	1	50	50
13	54.141	1	1	1	50	75
19	53.966	1	1	1	75	100
24	53.806	1	1	1	100	100
		0-20/5	0-20/5	0-20/5	50-100/10	50-100/10
2						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
3255	298	100	25	1	25	1
3635	296	100	100	1	50	1
3631	294	100	100	1	25	25
3502	291	100	75	1	1	50
2255	287	60	75	1	25	1
		60-100/10	20-100/16	0-20/5	25-50/5	1-50/10
3						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
35	11.405	1	1	25	50	1
38	11.162	1	1	25	50	75
40	11.136	1	1	25	75	1
74	11.088	1	1	50	100	100
42	11.042	1	1	25	75	50
		0-20/5	0-20/5	25-50/5	50-100/10	0-100\25
4						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
385	1.977	1	75	1	50	1
111	1.756	1	1	100	50	25
63	1.659	1	1	50	50	75
397	1.657	1	75	1	100	50
259	1.655	1	50	1	25	100
		0-20/5	1-75/15	1-100/20	25-100/15	1-100/25

5						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
24	4.716	1	1	1	100	100
19	4.696	1	1	1	75	100
514	4.685	1	100	1	50	100
20	4.683	1	1	1	100	1
513	4.678	1	100	1	50	75
		0-20/5	1-100/25	0-20/5	50-100/10	1-100/25
6						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
21	21.557	1	1	1	100	25
22	19.551	1	1	1	100	50
48	19.281	1	1	25	100	75
46	19.221	1	1	25	100	25
19	18.381	1	1	1	75	100
		0-20/5	0-20/5	1-25/5	75-100/5	25-100/15
7						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
297	47.871	1	50	25	100	50
72	47.760	1	1	50	100	50
21	47.750	1	1	1	100	25
521	47.693	1	100	1	100	25
49	47.675	1	1	25	100	100
		0-20/5	1-100/25	1-50/10	0-100/20	25-100/15
8						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
24	77.096	1	1	1	100	100
18	76.002	1	1	1	75	75
20	75.888	1	1	1	100	1
23	75.625	1	1	1	100	75
15	75.501	1	1	1	75	1
17	75.231	1	1	1	75	50
		0-20/5	0-20/5	0-20/5	75-100/15	1-100/25
9						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG

19	1.975	1	1	1	75	100
42	1.894	1	1	25	75	50
45	1.867	1	1	25	100	1
47	1.867	1	1	25	100	50
268	1.861	1	50	1	75	75
265	1.855	1	50	1	75	1
		0-20/5	1-50/10	1-25/5	75-100/5	1-100/25
10						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
70	18.370	1	1	50	100	1
73	18.136	1	1	50	100	75
68	17.557	1	1	50	75	75
45	17.503	1	1	25	100	1
38	17.495	1	1	25	50	75
		0-20/5	0-20/5	25-50/5	50-100/10	1-75/15
11						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
0	91.667	1	1	1	1	1
750	90.000	25	25	1	1	1
1875	87.333	75	1	1	1	1
1000	86.667	25	75	1	1	1
1125	84.444	25	100	1	1	1
		1-75/15	1-100/25	0-20/5	0-20/5	0-20/5
12						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
140	12.182	1	25	1	75	1
270	11.814	1	50	1	100	1
520	11.592	1	100	1	100	1
20	11.589	1	1	1	100	1
35	11.526	1	1	25	50	1
		0-20/5	25-100/15	1-25/5	50-100/10	0-20/5
13						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
35	12.961	1	1	25	50	1
45	12.833	1	1	25	100	1

40	12.749	1	1	25	75	1
15	12.658	1	1	1	75	1
20	12.599	1	1	1	100	1
		0-20/5	0-20/5	1-25/5	50-100/10	0-20/5
14						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
270	27.951	1	50	1	100	1
390	27.298	1	75	1	75	1
140	27.181	1	25	1	75	1
20	27.110	1	1	1	100	1
265	26.985	1	50	1	75	1
		0-20/5	1-75/25	0-20/5	75-100/5	0-20/5
15						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
30	21.298	1	1	25	25	1
40	20.854	1	1	25	75	1
25	20.680	1	1	25	1	1
45	20.672	1	1	25	100	1
35	20.569	1	1	25	50	1
		0-20/5	0-20/5	20-30/2	1-100/25	0-20/5
16						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
15	41.507	1	1	1	75	1
20	41.128	1	1	1	100	1
270	40.955	1	50	1	100	1
273	40.889	1	50	1	100	75
10	40.831	1	1	1	50	1
		0-20/5	1-50/10	0-20/5	50-100/10	1-75/25
17						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
0	13.619	1	1	1	1	1
46	13.407	1	1	25	100	25
2	13.228	1	1	1	1	50
145	13.207	1	25	1	100	1
5	13.152	1	1	1	25	1

		0-20/5	1-25/5	1-25/5	1-100/25	1-50/10
18						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
20	43.464	1	1	1	100	1
10	42.549	1	1	1	50	1
15	42.472	1	1	1	75	1
145	42.453	1	25	1	100	1
5	42.329	1	1	1	25	1
		0-20/5	1-25/5	0-20/5	25-100/15	0-20/5
19						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
45	3.945	1	1	25	100	1
172	3.930	1	25	25	100	50
20	3.913	1	1	1	100	1
10	3.909	1	1	1	50	1
267	3.881	1	50	1	75	50
		0-20/5	1-50/10	1-25/5	50-100/10	1-50/10
20						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
95	3.816	1	1	75	100	1
45	3.718	1	1	25	100	1
74	3.718	1	1	50	100	100
145	3.715	1	25	1	100	1
20	3.711	1	1	1	100	1
		0-20/5	1-25/5	1-75/15	90-100/2	1-100/25
21						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
140	88.354	1	25	1	75	1
170	88.297	1	25	25	100	1
115	88.234	1	1	100	75	1
315	88.072	1	50	50	75	1
30	88.046	1	1	25	25	1
		0-20/5	1-50/10	1-100/25	25-100/15	0-20/5
22						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG

110	14.895	1	1	100	50	1
80	14.790	1	1	75	25	1
50	14.678	1	1	50	1	1
120	14.609	1	1	100	100	1
90	14.130	1	1	75	75	1
		0-20/5	0-20/5	50-100/10	1-100/25	0-20/5
23						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
35	50.216	1	1	25	50	1
0	50.135	1	1	1	1	1
160	50.015	1	25	25	50	1
540	49.984	1	100	25	75	1
535	49.945	1	100	25	50	1
		0-20/5	1-100/25	1-25/5	1-75-15	0-20/5
24						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
20	45.167	1	1	1	100	1
15	44.825	1	1	1	75	1
135	44.706	1	25	1	50	1
145	44.348	1	25	1	100	1
10	44.062	1	1	1	50	1
		0-20/5	1-25/5	0-20/5	50-100/10	0-20/5
25						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
545	26.455	1	100	25	100	1
70	25.381	1	1	50	100	1
73	25.164	1	1	50	100	75
65	25.151	1	1	50	75	1
45	24.789	1	1	25	100	1
		0-20/5	1-100/25	25-50/5	75-100/5	1-75/15
26						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
35	40.862	1	1	25	50	1
40	40.764	1	1	25	75	1
45	40.720	1	1	25	100	1

30	40.543	1	1	25	25	1
25	40.421	1	1	25	1	1
		0-20/5	0-20/5	20-30/2	1-100/25	0-20/5
27						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
48	7.908	1	1	25	100	75
45	7.832	1	1	25	100	1
40	7.708	1	1	25	75	1
27	7.582	1	1	25	1	50
37	7.425	1	1	25	50	50
		0-20/5	0-20/5	20-30/2	1-100/25	1-75-15
28						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
15	5.516	1	1	1	75	1
20	5.488	1	1	1	100	1
265	5.483	1	50	1	75	1
45	5.469	1	1	25	100	1
35	5.468	1	1	25	50	1
		0-20/5	1-50/10	1-25/5	50-100/10	0-20/5
29						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
253	2.990	1	50	1	1	75
1020	2.575	25	75	1	100	1
970	2.540	25	50	75	100	1
798	2.519	25	25	25	100	75
1123	2.506	25	75	100	100	75
		1-25/5	25-75/10	1-100/25	1-100/25	1-75/15
30						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
265	29.651	1	50	1	75	1
20	29.025	1	1	1	100	1
15	28.908	1	1	1	75	1
270	28.695	1	50	1	100	1
272	28.624	1	50	1	100	50
		0-20/5	1-50/10	0-20/5	75-100/5	1-50/10

Ek 8. İnce kalibrasyon sonucu ilk 30 model karesi için “control_stats.log” dosyasından elde edilen Lesale istatistiği ve final kalibrasyonu için kullanılacak hesaplanmış katsayıların tablosu.

1						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
180	63.379	1	1	5	85	5
55	63.355	1	1	1	55	55
146	63.309	1	1	5	45	65
57	63.266	1	1	1	55	75
56	63.210	1	1	1	55	65
		1-5/1	1-5/1	1-5/1	45-85/10	5-75/14
2						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
730	8.590	60	84	1	50	1
733	8.585	60	84	1	50	31
865	6.401	60	84	20	45	1
235	4.190	60	36	5	45	1
345	4.176	60	36	20	50	1
		55-65/2	36-84/8	1-20/5	45-55/2	0-32/8
3						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
20	28.323	1	1	25	90	1
55	27.881	1	1	30	100	1
15	27.820	1	1	25	80	1
27	27.653	1	1	25	100	50
0	27.492	1	1	25	50	1
		1-5/1	1-5/1	24-32/2	50-100/10	1-50/10
4						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
256	29.352	1	31	1	85	1
142	28.377	1	16	1	100	51
140	27.944	1	16	1	100	1
16	27.766	1	1	1	85	1
22	27.691	1	1	1	100	51
		1-5/1	1-32/8	37012	80-100/4	1-52/13

5						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
152	18.241	1	26	5	70	1
112	18.134	1	1	20	90	1
184	18.025	1	26	10	90	1
4	17.977	1	1	1	60	1
188	17.749	1	26	10	100	1
		1-5/1	1-28/7	1-20/5	60-100/10	1-5/1
6						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
176	31.289	1	1	21	100	55
102	30.977	1	1	11	100	25
128	30.896	1	1	16	90	55
143	30.731	1	1	16	100	100
109	30.485	1	1	16	75	40
		1-5/1	1-5/1	10-22/3	75-100/5	25-100/15
7						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
428	34.468	1	51	11	100	55
60	33.321	1	1	11	80	25
61	32.870	1	1	11	80	40
570	32.777	1	76	1	100	25
32	32.464	1	1	1	100	55
		1-5/1	1-78/6	1-12/2	80-100/5	25-55/5
8						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
4	37.392	1	1	1	90	1
0	37.034	1	1	1	75	1
2	36.902	1	1	1	75	51
22	36.673	1	1	10	90	51
92	36.385	1	5	1	90	1
		1-5/1	1-5/1	1-10/2	75-95/4	1-52/13
9						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
42	14.699	1	11	1	75	51

0	14.483	1	1	1	75	1
12	14.356	1	1	6	90	1
43	14.353	1	11	1	75	76
36	14.221	1	1	21	90	1
		1-5/1	1-12/6	1-24/4	75-95/5	50-80/5
10						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
25	36.536	1	1	25	100	1
28	36.255	1	1	25	100	46
10	35.563	1	1	25	70	1
0	35.515	1	1	25	50	1
54	35.170	1	1	30	90	61
		1-5/1	1-5/1	24-32/2	50-100/10	1-66/11
11						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
2420	4.006	61	76	5	20	1
2395	2.858	61	76	1	20	1
2385	2.569	61	76	1	10	1
2205	1.698	61	26	15	5	1
1250	1.500	31	51	1	1	1
		30-65/7	26-76/10	1-15/3	1-20/4	1-5/1
12						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
25	18.364	1	25	1	100	1
310	16.739	1	55	1	70	1
325	15.785	1	55	1	100	1
770	15.780	1	100	1	90	1
10	15.734	1	25	1	70	1
		1-5/1	25-100/15	1-5/1	70-100/6	1-5/1
13						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
620	31.917	1	80	1	90	1
5	31.184	1	20	1	60	1
625	31.025	1	80	1	100	1
160	30.884	1	35	1	70	1

175	30.720	1	35	1	100	1
		1-5/1	34-82/6	1-5/1	70-100/6	1-5/1
14						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
20	36.599	1	1	1	95	1
50	36.101	1	1	5	95	1
45	36.093	1	1	5	90	1
40	36.080	1	1	5	85	1
470	35.888	5	1	1	95	1
		1-6/1	1-5/1	1-6/1	85-95/2	1-5/1
15						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
15	30.357	1	1	20	76	1
0	30.310	1	1	20	1	1
10	30.292	1	1	20	51	1
35	30.050	1	1	22	76	1
5	29.985	1	1	20	26	1
		1-5/1	1-5/1	18-22-1	26-76/10	1-5/1
16						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
15	37.737	1	1	1	100	1
3	37.620	1	1	1	60	1
14	37.565	1	1	1	90	51
11	37.424	1	1	1	80	51
0	37.109	1	1	1	50	1
		1-5/1	1-5/1	1-5/1	50-100/10	1-52/13
17						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
10	39.971	1	1	1	51	1
15	39.896	1	1	1	76	1
89	39.868	1	6	1	26	41
0	39.852	1	1	1	1	1
4	39.822	1	1	1	1	41
		1-5/1	1-6/1	1-5/1	1-78/13	1-42/7
18						

Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
55	16.186	1	1	5	100	1
45	16.087	1	1	5	70	1
65	15.788	1	1	10	40	1
105	15.658	1	1	15	70	1
5	15.439	1	1	1	40	1
		1-5/1	1-5/1	1-10/2	40-100/10	1-5/1
19						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
20	33.489	1	1	1	90	1
15	33.473	1	1	1	80	1
25	32.661	1	1	1	100	1
320	32.053	1	21	1	90	1
475	32.043	1	31	1	100	1
		1-5/1	1-32/8	1-5/1	80-100/5	1-5/1
20						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
8	30.445	1	1	1	94	1
256	29.873	1	11	1	98	1
124	29.844	1	6	1	92	1
0	29.813	1	1	1	90	1
40	29.702	1	1	16	98	1
		1-5/1	1-12/2	1-16/3	90-98/2	1-5/1
21						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
10	23.714	1	1	1	55	1
40	23.586	1	1	26	55	1
385	23.292	1	31	1	100	1
280	23.210	1	21	26	55	1
650	23.004	5	1	26	85	1
		1-5/1	1-32/8	1-28/7	55-100/9	1-5/1
22						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
135	43.797	1	5	50	76	1
15	42.428	1	1	50	76	1

35	39.757	1	1	60	76	1
30	35.708	1	1	60	51	1
635	34.539	5	1	60	76	1
		1-6/1	1-6/1	50-60/2	50-78/13	1-5/1
23						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
5	27.672	1	1	1	16	1
570	27.388	5	1	11	61	1
595	27.293	5	1	16	61	1
95	26.983	1	1	16	61	1
45	26.815	1	1	6	61	1
		1-6/1	1-5/1	6-18/3	16-64/8	1-5/1
24						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
20	28.968	1	1	1	90	1
325	28.126	1	11	1	100	1
25	28.031	1	1	1	100	1
0	27.847	1	1	1	50	1
175	27.815	1	6	1	100	1
		1-5/1	1-12/2	1-5/1	50-100/10	1-5/1
25						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
88	33.282	1	1	35	100	46
100	32.883	1	1	40	85	1
85	32.850	1	1	35	100	1
30	32.843	1	1	30	75	1
115	32.509	1	1	40	100	1
		1-5/1	1-5/1	30-40/2	75-100/5	1-48/12
26						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
15	42.989	1	1	20	76	1
0	42.958	1	1	20	1	1
5	42.745	1	1	20	26	1
10	42.672	1	1	20	51	1
615	42.606	5	1	20	76	1

		1-6/1	1-5/1	18-22/1	50-78/7	1-5/1
27						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
19	27.033	1	1	20	76	61
15	26.756	1	1	20	76	1
28	26.098	1	1	22	26	46
10	26.063	1	1	20	51	1
29	25.555	1	1	22	26	61
		1-5/1	37012	20-24/1	26-76/10	1-65/16
28						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
20	28.337	1	1	1	90	1
55	28.112	1	1	6	100	1
25	27.824	1	1	1	100	1
200	27.699	1	11	6	90	1
475	27.582	1	31	1	100	1
		1-5/1	1-32/8	1-8/2	90-100/2	1-5/1
29						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
99	31.270	1	35	1	76	61
15	29.859	1	25	1	76	1
198	28.927	1	45	26	76	46
179	28.648	1	45	1	76	61
415	28.529	1	75	1	76	1
90	27.936	1	35	1	51	1
		1-5/1	25-75/10	1-28/4	51-71/4	1-65/16
30						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
165	36.434	1	11	1	90	1
0	35.857	1	1	1	75	1
15	35.791	1	1	1	90	1
460	35.340	1	31	1	85	1
305	35.082	1	21	1	80	1

Ek 9. Final kalibrasyon sonucu ilk 30 model karesi için “control_stats.log” dosyasından elde edilen Lesale istatistiği ve öngörü aşaması için kullanılacak hesaplanmış katsayıların tablosu.

1						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
3028	66.891	5	1	1	85	61
		5-5/1	1-1/1	1-1/1	85-85/1	61-61/1
2						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
1149	4.698	57	52	11	47	32
		57-57/1	52-52/1	11-11/1	47-47/1	32-32/1
3						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
130	49.240	1	1	32	70	1
		1-1/1	1-1/1	32-32/1	70-70/1	1-1/1
4						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
115	30.798	1	1	5	96	40
		1-1/1	1-1/1	5-5/1	96-96/1	40-40/1
5						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
405	31.926	2	1	1	70	1
		2-2/1	1-1/1	1-1/1	70-70/1	1-1/1
6						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
66	36.960	1	1	13	100	25
		1-1/1	1-1/1	13-13/1	100-100/1	25-25/1
7						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
0	36.455	1	1	1	80	25
		1-1/1	1-1/1	1-1/1	80-80/1	25-25/1
8						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
140	39.032	1	2	1	95	1
		1-1/1	2-2/1	1-1/1	95-95/1	1-1/1

9						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
28	36.641	1	1	1	95	50
		1-1/1	1-1/1	1-1/1	95-95/1	50-50/1
10						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
34	41.854	1	1	24	100	45
		1-1/1	1-1/1	24-24/1	100-100/1	45-45/1
11						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
2140	15.755	44	76	1	13	1
		44-44/1	1-1/76	1-1/1	13-13/1	1-1/1
12						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
170	27.797	1	40	1	94	1
		1-1/1	40-40/1	1-1/1	94-94/1	1-1/1
13						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
615	41.048	1-1/1	58-58/1	1-1/1	88-88/1	1-1/1
14						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
265	46.935	1-1/1	2-2/1	3-3/1	95-95/1	1-1/1
15						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
775	37.381	2-2/1	1-1/1	18-18/1	76-76/1	1-1/1
16						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
140	45.359	1-1/1	2-2/1	1-1/1	100-100/1	1-1/1
17						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
184	45.687	1-1/1	2-2/1	1-1/1	1-1/1	29-29/1
18						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
80	28.273	1-1/1	1-1/1	5-5/1	60-60/1	1-1/1
19						

Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
20	54.459	1-1/1	1-1/1	1-1/1	100-100/1	1-1/1
20						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
130	29.586	1-1/1	3-3/1	1-1/1	73-73/1	1-1/1
21						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
495	40.507	2-2/1	1-1/1	1-1/1	82-82/1	1-1/1
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
100	53.211	1-1/1	2-2/1	50-50/1	76-76/1	1-1/1
23						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
2860	46.991	4-4/1	2-2/1	9-9/1	56-56/1	1-1/1
24						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
25	50.529	1-1/1	1-1/1	1-1/1	100-100/1	1-1/1
25						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
112	31.110	1-1/1	1-1/1	38-38/1	95-95/1	1-1/1
26						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
15	47.735	1-1/1	1-1/1	18-18/1	71-71/1	1-1/1
27						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
19	36.169	1-1/1	1-1/1	20-20/1	66-66/1	49-49/1
28						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
535	35.866	2-2/1	1-1/1	3-3/1	100-100/1	1-1/1
29						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
14	27.946	1-1/1	25-25/1	1-1/1	63-63/1	33-33/1
30						
Run	Leesalee	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
15	46.017	1-1/1	10-10/1	1-1/1	90-90/1	1-1/1

Ek 10. Öngörü aşaması sonucu 30 kare için “average.log” dosyasından elde edilen beş parametre ve tahmin aşaması için kullanılacak yuvarlanmış katsayıların tablosu.

1					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	1	1	1	39,67	0,75
0	0,09	0,09	0,09	56,9	0,26
0	0,09	0,09	0,09	76,75	0,53
	0	0	0	77	1
2					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	59,92	11,56	54,66	31,57	33,54
0	64,23	12,4	58,6	8,97	35,8
0	69,56	13,42	63,46	1,89	39,21
	70	13	63	2	40
3					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	1,06	33,97	1,06	61,11	1,89
0	1,14	36,42	1,14	50,47	2,95
0	1,23	39,44	1,23	37,86	4,21
	1	39	1	38	4
4					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,95	4,16	0,95	91,47	40,45
0	0,94	3,6	0,94	86,88	40,91
0	0,88	3,13	0,88	82,32	41,37
5					
	1	3	1	82	41
	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	1,3	0,68	90,89	39,9	41,52
0	0,96	0,58	88,14	39,42	41,68
0	0,81	0,53	88,47	38,56	180,69
	1	1	88	39	180
6					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	1,06	13,8	1,06	93,51	25,65

0	1,14	14,79	1,14	85,78	26,42
0	1,23	16,01	1,23	76,74	27,33
	1	16	1	77	27
7					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,76	0,76	0,76	78,29	25,17
0	0,69	0,69	0,69	76,95	25,3
0	0,67	0,67	0,67	75,75	25,43
	1	1	1	76	25
8					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,77	0,77	1,02	92,7	1,23
0	0,75	0,75	0,79	90,21	1,48
0	0,65	0,65	0,58	88,35	1,66
	1	1	1	88	2
9					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,83	0,83	0,83	91,2	50,38
0	0,81	0,81	0,81	87,51	50,75
0	0,77	0,77	0,77	83,2	51,18
	1	1	1	83	51
9					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	1,06	25,48	1,06	91,78	45,82
0	1,14	27,31	1,14	81,75	46,82
0	1,23	29,58	1,23	69,49	48,05
	1	30	1	70	48
10					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	1,23	0,75	1,6	98,04	3,43
0	0,3	0,3	0,3	99,02	1,25
0	0,32	0,32	0,32	100	1
	0	0	0	100	1
11					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav

0	0,77	0,77	15,45	90,02	1,39
0	0,81	0,81	12,35	85,22	1,87
0	0,86	0,86	10,83	79,67	2,43
	1	1	11	80	2
12					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,92	0,92	45,53	79,52	1,9
0	0,94	0,94	44,56	71,66	2,79
0	0,98	0,98	45,39	62,02	3,82
	1	1	45	62	4
13					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,69	1,12	0,86	93,92	1,16
0	0,56	0,8	0,71	95,25	1
0	0,59	0,64	0,6	96,69	0,86
	1	1	0	97	1
14					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	2,12	19,11	1,06	61,07	2,49
0	2,28	20,49	1,14	42,55	4,34
0	2,46	22,18	1,23	19,64	6,64
	2	22	1	20	7
15					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,58	0,58	0,73	98,79	0,84
0	0,58	0,58	0,57	99,38	0,68
0	0,5	0,5	0,59	99,86	0,61
	1	1	1	100	1
16					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,62	0,62	0,55	10,17	28,19
0	0,46	0,46	0,62	23,02	26,91
0	0,54	0,54	0,55	38,73	25,34
	1	1	1	39	25
17					

run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	1,01	4,92	1,01	46,78	2,32
0	1,09	5,1	1,09	31,04	3,9
0	1,19	5,46	1,19	12,75	5,72
	1	5	1	13	6
18					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,68	0,68	0,68	95,92	1,11
0	0,58	0,58	0,58	94,19	1,25
0	0,7	0,7	0,7	92,03	1,38
	1	1	1	92	1
19					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,75	0,75	0,62	71,84	1,26
0	0,58	0,58	0,57	74,85	1,27
0	0,55	0,55	0,55	77,14	1,36
	1	1	1	77	1
20					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,62	0,55	0,55	86,24	0,93
0	0,59	0,51	0,51	92,82	0,81
0	0,53	0,56	0,56	95,46	0,78
	1	1	1	95	1
21					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	1,05	52	2,09	50,19	3,6
0	1,13	55,74	2,24	18,92	6,74
0	1,22	60,36	2,42	2,96	10,52
	1	60	2	3	11
22					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,61	0,84	0,52	70,74	1,28
0	0,79	0,96	0,72	89,69	0,8
0	0,66	0,79	0,62	94,88	0,96
	1	1	1	95	1

23					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,74	0,74	0,74	92,59	1,56
0	0,79	0,79	0,79	85,19	2,27
0	0,65	0,65	0,65	78,34	2,95
	1	1	1	78	3
24					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	1,06	39,95	1,06	86,17	1,88
0	1,13	42,82	1,13	75,57	2,95
0	1,23	46,38	1,23	62,97	4,21
	1	46	1	63	4
25					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	1,06	19,11	1,06	46,74	3,43
0	1,14	20,49	1,14	14,27	6,67
0	1,23	22,18	1,23	1	10,81
	1	22	1	1	11
26					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	1,06	21,23	1,06	53,6	50,24
0	1,14	22,76	1,14	38,82	51,72
0	1,23	24,65	1,23	21,43	53,46
	1	25	1	21	53
27					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,95	1,31	0,71	95,35	1,29
0	0,73	0,85	0,58	93,48	1,43
0	0,67	0,75	0,58	93,02	1,44
	1	1	1	93	1
28					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,6	0,6	2,28	63,06	32,99
0	0,69	0,69	0,93	63,7	32,93
0	0,64	0,64	0,64	65,12	32,79

	1	1	1	65	33
29					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,69	0,69	3,42	88,37	1,18
0	0,59	0,59	2,3	89,8	1,29
0	0,63	0,63	1,32	91,41	1,21
	1	1	1	91	1
30					
run	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	0,82	0,82	7,39	74,32	1,57
0	0,83	0,83	5,44	68,07	2,22
0	0,86	0,86	5,25	61,03	2,93
	1	1	5	61	3

Ek 11. SLEUTH modelinin simüle ettiği ve var olan kentsel alan görüntülerini piksel bazında okun Python kodu.

```
from PIL import Image
import numpy as np
import os

gif1_path=
r"C:\zh\FINAL\KARELER_1KM\2022_URBAN_1KM\GIFS\demo200.urban.2022_13.gif"
gif2_path = r"C:\zh\PREDICTION\13\Yeni klasör\demo200_urban_2022.gif"

if not os.path.exists(gif1_path):
    raise FileNotFoundError(f'Birinci dosya bulunamadı: {gif1_path}')
if not os.path.exists(gif2_path):
    raise FileNotFoundError(f'İkinci dosya bulunamadı: {gif2_path}')

gif1 = Image.open(gif1_path)
gif2 = Image.open(gif2_path)
frame1 = gif1.convert('RGB')
frame2 = gif2.convert('RGB')
pixels1 = np.array(frame1)
pixels2 = np.array(frame2)
if pixels1.shape != pixels2.shape:
    raise ValueError("GIF dosyaları aynı boyutlarda değil!")

output_path = 'output.txt'
with open(output_path, 'w') as f:
    height, width, _ = pixels1.shape
    for y in range(height):
        for x in range(width):
            pixel_no = y * width + x + 1
            pixel1 = pixels1[y, x]
            pixel2 = pixels2[y, x]
            f.write(f"Pixel {pixel_no}: {pixel1.tolist()} {pixel2.tolist()}\n")
print(f"Karşılaştırma tamamlandı, sonuçlar {output_path} dosyasına yazıldı.")
```

Ek 12. SLEUTH modelinin simüle ettiği ve var olan kentsel alan görüntüleri için Kappa istatistiğini hesaplayan Python kodu.

```
import numpy as np
from sklearn.metrics import cohen_kappa_score
output_path = r"C:\zhl\2_sonuc\for_kappa\output.txt"
values1 = []
values2 = []
with open(output_path, 'r') as file:
    for line in file:
        parts = line.strip().split()
        if len(parts) >= 3:
            values1.append(eval(parts[1]))
            values2.append(eval(parts[2]))
kappa_score = cohen_kappa_score(values1, values2)
print(f"Cohen'in kappa skoru: {kappa_score}")
```

Ek 13. SLEUTH modelinin çıktısı olan GIF görünüsünü TIF formatına dönüştüren Python kodu.

```
import os
import rasterio
import numpy as np
from PIL import Image
input_dir = "D:/TEZ_25/URBAN_GIF/"
output_dir = "D:/TEZ_24/URBAN_TIF/"
reference_tiff_path = "D:/TEZ_25/AL_44_YEARLY_CUTS/AL_2023_44.tif"
rgb_to_value = {
    (0, 0, 0): 'nodata',
    (249, 209, 110): 0,
    (0, 255, 51): 10,
    (0, 204, 51): 20,
    (0, 153, 51): 30,
    (0, 102, 102): 40,
    (0, 51, 102): 50,
    (0, 0, 102): 60,
    (255, 106, 106): 70,
    (255, 127, 0): 80,
    (255, 62, 150): 90,
    (255, 0, 51): 100,
}
with rasterio.open(reference_tiff_path) as ref_tiff:
    reference_meta = ref_tiff.meta.copy()
    transform = ref_tiff.transform
    crs = ref_tiff.crs
reference_meta.update({
    "dtype": "float32",
    "count": 1,
    "nodata": np.nan
})
for file_name in os.listdir(input_dir):
    if file_name.endswith(".gif"):
        gif_path = os.path.join(input_dir, file_name)
        output_tif_path = os.path.join(output_dir, file_name.replace(".gif", ".tif"))
        img = Image.open(gif_path)
```

```

img_palette = img.getpalette()
palette_rgb = [img_palette[i:i + 3] for i in range(0, len(img_palette), 3)]
img = img.convert('P')
gif_array = np.array(img)
mapped_array = np.zeros_like(gif_array, dtype='float32')
for i in range(gif_array.shape[0]):
    for j in range(gif_array.shape[1]):
        rgb_value = tuple(palette_rgb[gif_array[i, j]])
        mapped_array[i, j] = rgb_to_value.get(rgb_value, 200)
mapped_array[mapped_array == 200] = np.nan
reference_meta.update({
    "height": gif_array.shape[0],
    "width": gif_array.shape[1],
    "transform": transform,
    "crs": crs
})
with rasterio.open(output_tif_path, 'w', **reference_meta) as dest:
    dest.write(mapped_array, 1)
print(f'Dönüştürüldü: {gif_path} → {output_tif_path}')
print("Tüm GIF dosyaları başarıyla TIFF'e dönüştürüldü.")

```

Ek 13. α_t katsayısı hesaplanan model karelerinin Çizelge 4.7.'de verilen parametreler ile Spearman, Pearson ve Kendall korelasyon katsayılarını hesaplayan ve görselleştiren Python kodu.

```

import pandas as pd
from scipy.stats import spearmanr, kendalltau, pearsonr
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
input_path = r"D:\TEZ_ALPHA\ALFA_TABLO_2.xlsx"
output_path = r"D:\TEZ_ALPHA\ALFA_KORELASYON_SONUCLARI.xlsx"
df = pd.read_excel(input_path)
pearson_results = {}
spearman_results = {}
kendall_results = {}
for column in df.columns:
    if column != "ALFA":
        valid_data = df[["ALFA", column]].dropna()
        pearson_corr, _ = pearsonr(valid_data["ALFA"], valid_data[column])
        spearman_corr, _ = spearmanr(valid_data["ALFA"], valid_data[column])

```

```

kendall_corr, _ = kendalltau(valid_data["ALFA"], valid_data[column])
pearson_results[column] = pearson_corr
spearman_results[column] = spearman_corr
kendall_results[column] = kendall_corr
result_df = pd.DataFrame({
    "Değişken": list(pearson_results.keys()),
    "Pearson": list(pearson_results.values()),
    "Spearman": list(spearman_results.values()),
    "Kendall": list(kendall_results.values())
})
result_df.to_excel(output_path, index=False)
df_corr = pd.read_excel(output_path)
df_corr.set_index("Değişken", inplace=True)
plt.figure(figsize=(10, 12))
sns.heatmap(df_corr, annot=True, cmap="YlGnBu", center=0, fmt=".2f", linewidths=0.5,
cbar_kws={'label': 'Korelasyon'})
plt.title("ALFA ile Diğer Değişkenlerin Korelasyonları", fontsize=14)
plt.tight_layout()
plt.savefig(r"D:\TEZ_ALPHA\ALFA_KORELASYON_HEATMAP.png", dpi=300)
plt.show(<

```

Ek 14. Tüm Dünyadaki profesyonel astronomi sitelerinin yıllık yapay ışık, ortalama standart sapma eğim ve R² değerleri.

No	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Ortalama	Standart Sapma	Eğim	R ²
1	0,6	0,8	0,8	1,1	0,8	1,2	0,2	0,8	0,3	0,5	0,4	0,7	1031,9	0,2	-0,04
2	-1,5	-1,5	-1,5	0,1	0,0	0,3	0,3	-0,1	0,2	0,3	0,3	-0,3	1032,4	0,7	0,19
3	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,1	1032,2	0,8	0,03
4	-1,5	-1,5	-1,5	0,1	0,0	0,3	0,3	-0,1	0,2	0,3	0,3	-0,3	1032,4	0,7	0,19
5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	1032,1	0,8	0,03
6	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,5	0,4	0,5	0,6	0,9	0,6	0,5	1032,0	0,7	0,05
7	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	1032,2	0,8	0,03
8	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	1032,2	0,7	0,03
9	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,1	1032,2	0,8	0,03
10	13,0	13,0	11,2	10,1	10,4	9,9	10,8	9,9	6,8	7,1	6,6	9,9	1027,2	0,9	-0,63
11	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	1032,1	0,7	0,03
12	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	1032,2	0,8	0,03
13	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	1032,1	0,8	0,03
14	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	1032,1	0,8	0,03
15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	1032,1	0,8	0,03
16	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	1032,1	0,8	0,03
17	52,6	72,9	74,3	66,0	64,3	60,0	57,6	47,6	43,9	39,9	33,7	55,7	1003,8	0,7	-3,28
18	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,1	1032,2	0,7	0,03
19	0,4	0,7	0,6	0,8	0,3	0,9	0,9	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	1031,9	0,3	0,03
20	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,5	1032,0	0,6	0,04
21	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	1032,1	0,8	0,03

22	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,2	1032,1	0,8	0,03
23	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	1,2	0,4	0,5	0,4	1032,0	0,4	0,05
24	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	1032,2	0,9	0,03
25	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	1032,2	0,8	0,03
26	0,4	0,5	1,1	0,5	0,4	0,7	0,6	0,6	0,7	0,9	0,9	0,7	1031,9	0,2	0,03
27	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	1032,1	0,6	0,02
28	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,2	1032,1	0,8	0,03
29	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,2	1032,1	0,7	0,03
30	0,7	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	1032,1	0,0	0,00
31	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	1032,1	0,8	0,03
32	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	1032,1	0,7	0,03
33	0,5	0,6	0,5	1,5	0,6	0,7	0,7	0,9	0,9	1,0	1,3	0,8	1031,8	0,3	0,05
34	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	1032,1	0,7	0,03
35	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	1032,1	0,8	0,03
36	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	1032,1	0,7	0,03
37	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,5	0,7	0,5	0,7	0,8	0,7	0,5	1032,0	0,8	0,06
38	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	1032,1	0,8	0,03
39	0,5	1,5	1,1	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	1,6	1,9	0,9	1031,8	0,1	0,05
40	0,8	1,1	0,9	0,7	0,7	0,8	1,0	1,2	1,1	1,0	1,0	0,9	1031,8	0,2	0,03
41	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	1032,1	0,7	0,03
42	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,2	1032,1	0,8	0,03
43	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	1032,1	0,7	0,02
44	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,3	1032,1	0,8	0,04

45	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	1032,2	0,7	0,03
46	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,6	0,7	0,8	0,8	0,6	1031,9	0,9	0,04
47	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	1032,2	0,8	0,03
48	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	1032,1	0,8	0,03
49	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,9	0,8	1,1	1,4	1,4	1,3	0,8	1031,8	0,9	0,13
50	3,1	3,2	3,2	3,4	2,6	2,8	2,6	2,2	2,5	2,8	2,5	2,8	1030,8	0,6	-0,08
51	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,2	1032,1	0,8	0,03
52	6,7	6,7	6,2	5,1	5,0	5,4	6,0	5,8	6,0	6,0	5,7	5,9	1029,2	0,1	-0,06
53	3,0	5,0	4,1	3,0	3,4	3,9	4,9	4,5	4,0	4,0	5,3	4,1	1030,2	0,2	0,11
54	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,8	0,9	0,6	1031,9	1,0	0,06
55	7,8	9,0	9,4	9,5	8,1	8,0	8,0	8,2	7,6	7,2	8,1	8,3	1028,0	0,3	-0,12
56	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,5	0,3	1032,1	0,6	0,04
57	-0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	1032,2	0,8	0,03
58	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	1032,2	0,7	0,03
59	3,6	4,2	4,1	4,5	4,3	4,8	4,9	5,4	5,0	5,0	4,9	4,6	1029,9	0,7	0,13
60	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,2	1032,1	0,7	0,03
61	0,5	0,3	0,4	0,3	0,3	0,5	0,5	0,6	0,8	0,6	0,6	0,5	1032,0	0,5	0,04
62	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	1032,2	0,8	0,03
63	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	0,5	0,7	0,3	1032,1	0,8	0,05
64	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,2	1032,1	0,7	0,03
65	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,3	1032,1	0,6	0,03
66	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	1032,1	0,8	0,03
67	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	1032,1	0,7	0,02

68	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	1032,1	0,8	0,03
69	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	1,1	1,1	1,1	1,7	1,3	1,4	1,1	1031,7	0,7	0,07
70	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2	0,5	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	0,5	1032,0	0,7	0,06
71	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,4	1032,1	0,9	0,05
72	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,4	1032,0	0,8	0,05
73	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,3	1032,1	0,7	0,03
74	68,2	74,4	72,7	80,6	77,1	83,7	90,4	88,1	74,9	72,5	73,2	77,8	992,4	0,1	0,48
75	0,3	0,2	0,2	0,3	0,1	0,4	0,3	0,4	0,8	0,5	0,5	0,4	1032,1	0,5	0,04
76	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	1032,1	0,8	0,03
77	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	1032,2	0,8	0,03
78	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,3	1032,1	0,8	0,03
79	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2	1032,1	0,7	0,03
80	0,8	0,8	0,9	0,7	0,8	1,0	0,9	1,3	1,4	1,2	1,4	1,0	1031,7	0,8	0,07
81	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	1032,1	0,8	0,03
82	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	1032,2	0,8	0,03
83	9,8	10,1	10,9	10,3	8,3	10,2	11,1	9,6	11,1	11,3	11,0	10,3	1027,0	0,2	0,12
84	12,3	13,8	14,9	11,4	12,2	12,4	13,7	13,6	13,8	14,2	12,7	13,2	1025,5	0,0	0,06

Ek 15. Tüm Dünyadaki profesyonel astronomi sitelerinin yıllık yapay ışık ortalamalarından elde edilen regresyon denklemleri.

No	Gözlemevi	Denklem
1	NANTEN2	$y = -0,0405x + 82,3598$
2	Gemini	$y = 0,1903x + -384,1299$
3	Gemini -2	$y = 0,0257x + -51,7083$
4	Mauna Kea	$y = 0,1903x + -384,1299$
5	Mt. Graham International	$y = 0,0311x + -62,4988$
6	Eastern Anatolia (DAG)	$y = 0,0492x + -98,7859$
7	Cerro Pachon	$y = 0,0259x + -52,1081$
8	Paranal	$y = 0,0315x + -63,4015$
9	Las Campanas	$y = 0,0284x + -57,1463$
10	Lowell	$y = -0,6258x + 1272,1128$
11	Special Astrophysical	$y = 0,0306x + -61,4783$
12	Cerro Tololo Inter-American	$y = 0,0273x + -54,9301$
13	F. L. Whipple	$y = 0,0280x + -56,2802$
14	Kitt Peak National	$y = 0,0267x + -53,6435$
15	McDonald	$y = 0,0304x + -61,1291$
16	Palomar	$y = 0,0327x + -65,6844$
17	South African Astronomical	$y = -3,2827x + 6676,9162$

18	University of Tokyo Atacama	$y = 0,0277x + -55,7394$
19	Llano del Hato National Astronomical	$y = 0,0298x + -59,4077$
20	Sierra Nevada	$y = 0,0358x + -71,6965$
21	Vatican Advanced Technology Telescope	$y = 0,0311x + -62,4988$
22	Cloudcroft	$y = 0,0282x + -56,6740$
23	Mount Lemmon	$y = 0,0518x + -104,1079$
24	Cerro Armazones	$y = 0,0341x + -68,6497$
25	Lulin	$y = 0,0295x + -59,3560$
26	Tien Shan Astronomical	$y = 0,0299x + -59,6509$
27	Pic du Midi	$y = 0,0245x + -49,1496$
28	MMT	$y = 0,0292x + -58,6956$
29	ORM	$y = 0,0268x + -53,8743$
30	Maidanak Observatorium	$y = 0,0019x + -3,5202$
31	United States Naval	$y = 0,0293x + -58,8469$
32	TÜBİTAK National	$y = 0,0319x + -64,0445$
33	Table Mountain	$y = 0,0517x + -103,4525$
34	Rozhen	$y = 0,0282x + -56,6662$
35	Pico dos Dias	$y = 0,0281x + -56,4336$
36	Skinakas	$y = 0,0312x + -62,7108$

37	Mount Abu InfraRed	$y = 0,0632x + -126,9979$
38	Boyden	$y = 0,0293x + -58,8056$
39	Shamakhi Astrophysical	$y = 0,0522x + -104,3468$
40	Rothney Astrophysical	$y = 0,0255x + -50,4925$
41	Assy Turgen	$y = 0,0257x + -51,5602$
42	Mont Megantic	$y = 0,0268x + -53,8242$
43	Wise	$y = 0,0221x + -44,2565$
44	Bohyunsan Optical Astronomy	$y = 0,0354x + -71,0734$
45	Mount John University	$y = 0,0257x + -51,6713$
46	Mount Stromlo	$y = 0,0368x + -73,6308$
47	Greenhill	$y = 0,0269x + -54,1104$
48	Haute-Provence	$y = 0,0274x + -54,9997$
49	Kottamia Astronomical	$y = 0,1260x + -253,3494$
50	ÇOMÜ Ulupınar	$y = -0,0843x + 172,8250$
51	Las Cumbres	$y = 0,0324x + -65,1579$
52	Merate ,	$y = -0,0594x + 125,6689$
53	Yerkes	$y = 0,1091x + -215,9756$
54	Canopus Hill	$y = 0,0558x + -111,9165$
55	Lyon	$y = -0,1248x + 259,9878$

56	Moletai Astronomical	$y = 0,0366x + -73,4786$
57	Arcetri	$y = 0,0319x + -64,2491$
58	Zadko	$y = 0,0264x + -53,1088$
59	Hamburg	$y = 0,1347x + -267,0780$
60	Wyoming Infrared	$y = 0,0291x + -58,4972$
61	Lick	$y = 0,0357x + -71,5095$
62	National Astronomical of Mexico	$y = 0,0280x + -56,3129$
63	Thai National	$y = 0,0508x + -102,1607$
64	Nordic Optical Telescope	$y = 0,0268x + -53,8743$
65	Chelmos	$y = 0,0314x + -63,0543$
66	Guillermo Haro	$y = 0,0295x + -59,2464$
67	Indian Astronomical	$y = 0,0248x + -49,7839$
68	MDM	$y = 0,0271x + -54,4511$
69	Mount Wilson	$y = 0,0678x + -135,6647$
70	Byurakan Astrophysical	$y = 0,0629x + -126,3587$
71	Beijing Astronomical	$y = 0,0531x + -106,7418$
72	Xinglong Station (NAOC)	$y = 0,0528x + -106,1178$
73	Crimean Astrophysical	$y = 0,0346x + -69,5001$
74	National of Athens	$y = 0,4761x + -882,5014$

75	Iranian National	$y = 0,0397x + -79,7145$
76	Apache Point	$y = 0,0298x + -59,8988$
77	La Silla	$y = 0,0274x + -55,1332$
78	Devasthal	$y = 0,0287x + -57,5989$
79	Calar Alto	$y = 0,0289x + -58,0700$
80	Starfire Optical Range	$y = 0,0676x + -135,3325$
81	WIYN	$y = 0,0267x + -53,6435$
82	Siding Spring	$y = 0,0273x + -54,9598$
83	European Southern	$y = 0,1170x + -225,6801$
84	Anglo-Australian	$y = 0,0586x + -105,0166$

Ek 16. 84 astronomi sitesinin yıllık ortalamalarından elde edilen Spearman, Pearson Kendall korelasyon katsayı değerleri, Mann-Kendall test istatistiği ve Sen's Slope tahmin edicisinin tablosu.

NO	GÖZLEMEVİ	Spearman	Pearson	Kendall
1	NANTEN2	0,81	0,79	0,59
2	Gemini	0,90	0,85	0,75
3	Gemini -2	0,44	0,49	0,27
4	Mauna Kea	0,55	0,44	0,38
5	Mt. Graham International	-0,39	-0,35	-0,27
6	Eastern Anatolia (DAG)	-0,39	-0,56	-0,27
7	Cerro Pachon	0,80	0,89	0,57
8	Paranal	0,82	0,81	0,64
9	Las Campanas	0,82	0,86	0,62
10	Lowell	0,82	0,86	0,64
11	Special Astrophysical	0,81	0,82	0,60
12	Cerro Tololo Inter-American	0,55	0,43	0,48
13	F. L. Whipple	0,80	0,77	0,61
14	Kitt Peak National	0,41	0,47	0,31
15	McDonald	0,81	0,83	0,62
16	Palomar	0,81	0,85	0,61
17	South African Astronomical	0,46	0,36	0,31
18	University of Tokyo Atacama	0,90	0,94	0,80
19	Llano del Hato National Astronomical	0,88	0,91	0,73

20	Sierra Nevada	0,84	0,86	0,70
21	Vatican Advanced Technology Telescope	-0,75	-0,75	-0,51
22	Cloudcroft	0,81	0,82	0,62
23	Mount Lemmon	0,37	0,05	0,31
24	Cerro Armazones	0,80	0,80	0,64
25	Lulin	0,18	0,22	0,16
26	Tien Shan Astronomical	0,77	0,73	0,55
27	Pic du Midi	0,80	0,84	0,59
28	MMT	0,71	0,79	0,49
29	ORM	0,83	0,85	0,66
30	Maidanak Observatorium	0,85	0,91	0,70
31	United States Naval	0,80	0,85	0,61
32	TÜBİTAK National	-0,92	-0,93	-0,78
33	Table Mountain	0,85	0,90	0,72
34	Rozhen	0,88	0,89	0,71
35	Pico dos Dias	0,70	0,51	0,62
36	Skinakas	0,89	0,80	0,75
37	Mount Abu InfraRed	0,90	0,91	0,75
38	Boyden	0,79	0,69	0,62
39	Shamakhi Astrophysical	0,82	0,89	0,65
40	Rothney Astrophysical	0,84	0,89	0,66
41	Assy Turgen	0,83	0,86	0,67

42	Mont Megantic	0,84	0,88	0,64
43	Wise	0,77	0,87	0,61
44	Bohyunsan Optical Astronomy	0,77	0,87	0,61
45	Mount John University	0,84	0,59	0,62
46	Mount Stromlo	0,90	0,90	0,74
47	Greenhill	0,79	0,87	0,59
48	Haute-Provence	0,90	0,90	0,74
49	Kottamia Astronomical	0,86	0,89	0,69
50	ÇOMÜ Ulupınar	0,86	0,90	0,66
51	Las Cumbres	0,85	0,90	0,67
52	Merate ,	0,83	0,87	0,64
53	Yerkes	0,88	0,91	0,77
54	Canopus Hill	0,74	0,81	0,51
55	Lyon	0,95	0,94	0,85
56	Moletai Astronomical	0,79	0,88	0,55
57	Arcetri	0,79	0,85	0,55
58	Zadko	0,79	0,85	0,55
59	Hamburg	0,87	0,91	0,70
60	Wyoming Infrared	0,86	0,90	0,67
61	Lick	0,78	0,81	0,64
62	National Astronomical of Mexico	0,78	0,81	0,64
63	Thai National	0,91	0,87	0,78

64	Nordic Optical Telescope	0,89	0,89	0,75
65	Chelmos	0,49	0,52	0,33
66	Guillermo Haro	0,85	0,88	0,66
67	Indian Astronomical	-0,44	-0,45	-0,24
68	MDM	0,84	0,86	0,64
69	Mount Wilson	0,80	0,81	0,59
70	Byurakan Astrophysical	0,89	0,93	0,72
71	Beijing Astronomical	0,84	0,88	0,65
72	Xinglong Station (NAOC)	0,79	0,88	0,62
73	Crimean Astrophysical	0,88	0,92	0,70
74	National of Athens	0,85	0,90	0,69
75	Iranian National	0,82	0,88	0,59
76	Apache Point	0,86	0,89	0,66
77	La Silla	0,88	0,89	0,70
78	Devasthal	0,82	0,84	0,59
79	Calar Alto	0,25	0,19	0,24
80	Starfire Optical Range	-0,80	-0,81	-0,75
81	WIYN	0,95	0,93	0,85
82	Siding Spring	0,82	0,89	0,64
83	European Southern	0,99	0,98	0,95
84	Anglo-Australian	0,84	0,86	0,65

Ek 17. 84 astronomi sitesinin yıllık ortalamalarından elde edilen Mann-Kendall test istatistiği ve Sen's Slope tahmin edicisinin tablosu.

NO	GÖZLEMEVİ	Mann Kendall	Sen's Slope
1	NANTEN2	0,35	-0,03
2	Gemini	0,01	0,15
3	Gemini -2	0,02	0,02
4	Mauna Kea	0,01	0,15
5	Mt. Graham International	0,01	0,03
6	Eastern Anatolia (DAG)	0,01	0,05
7	Cerro Pachon	0,01	0,02
8	Paranal	0,02	0,03
9	Las Campanas	0,01	0,03
10	Lowell	0,00	-0,64
11	Special Astrophysical	0,01	0,03
12	Cerro Tololo Inter-American	0,00	0,03
13	F. L. Whipple	0,00	0,03
14	Kitt Peak National	0,00	0,03
15	McDonald	0,00	0,03
16	Palomar	0,01	0,03
17	South African Astronomical	0,00	-4,30
18	University of Tokyo Atacama	0,01	0,03
19	Llano del Hato National Astronomical	0,18	0,03
20	Sierra Nevada	0,04	0,03

21	Vatican Advanced Technology Telescope	0,01	0,03
22	Cloudcroft	0,01	0,03
23	Mount Lemmon	0,01	0,03
24	Cerro Armazones	0,00	0,03
25	Lulin	0,01	0,03
26	Tien Shan Astronomical	0,05	0,04
27	Pic du Midi	0,01	0,02
28	MMT	0,01	0,03
29	ORM	0,02	0,03
30	Maidanak Observatorium	0,21	0,02
31	United States Naval	0,00	0,03
32	TÜBİTAK National	0,01	0,03
33	Table Mountain	0,01	0,06
34	Rozhen	0,01	0,03
35	Pico dos Dias	0,01	0,03
36	Skinakas	0,01	0,03
37	Mount Abu InfraRed	0,00	0,06
38	Boyden	0,01	0,03
39	Shamakhi Astrophysical	0,21	0,03
40	Rothney Astrophysical	0,28	0,03
41	Assy Turgen	0,01	0,03

42	Mont Megantic	0,02	0,03
43	Wise	0,04	0,02
44	Bohyunsan Optical Astronomy	0,00	0,03
45	Mount John University	0,01	0,02
46	Mount Stromlo	0,00	0,04
47	Greenhill	0,01	0,03
48	Haute-Provence	0,01	0,03
49	Kottamia Astronomical	0,00	0,12
50	ÇOMÜ Ulupınar	0,04	-0,08
51	Las Cumbres	0,00	0,03
52	Merate ,	0,28	-0,07
53	Yerkes	0,21	0,13
54	Canopus Hill	0,00	0,06
55	Lyon	0,28	-0,13
56	Moletai Astronomical	0,02	0,03
57	Arcetri	0,00	0,03
58	Zadko	0,02	0,03
59	Hamburg	0,00	0,13
60	Wyoming Infrared	0,01	0,03
61	Lick	0,02	0,04
62	National Astronomical of Mexico	0,01	0,03
63	Thai National	0,00	0,05

64	Nordic Optical Telescope	0,02	0,03
65	Chelmos	0,01	0,03
66	Guillermo Haro	0,01	0,03
67	Indian Astronomical	0,01	0,03
68	MDM	0,02	0,02
69	Mount Wilson	0,00	0,06
70	Byurakan Astrophysical	0,00	0,07
71	Beijing Astronomical	0,00	0,05
72	Xinglong Station (NAOC)	0,00	0,05
73	Crimean Astrophysical	0,01	0,03
74	National of Athens	0,53	0,50
75	Iranian National	0,01	0,04
76	Apache Point	0,01	0,03
77	La Silla	0,00	0,03
78	Devasthal	0,02	0,03
79	Calar Alto	0,02	0,03
80	Starfire Optical Range	0,00	0,07
81	WIYN	0,00	0,03
82	Siding Spring	0,00	0,03
83	European Southern	0,12	0,13
84	Anglo-Australian	0,35	0,09