

ASTRONOMİ SİTELERİNİN GELECEKTEKİ IŞIK KİRLİLİĞİNİN SLEUTH KENTSEL GELİŞİM MODELİ İLE TAHMİNİ

Zühal KURT^{1,2}, Nazım AKSAKER^{2,3}, Sinan Kaan YERLİ⁴, Mehmet Akif ERDOĞAN⁵,

Anıl AKIN TANRIÖVER⁶

¹Çukurova Üniversitesi Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı, Adana, 01330, Türkiye, zkurt@student.cu.edu.tr

²Uzay Bilimleri ve Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (UZAYMER), Çukurova Üniversitesi, Adana, 01330, Türkiye

³Adana Organize Sanayi Bölgeleri Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Çukurova Üniversitesi, Adana, 01410, Türkiye, naksaker@cu.edu.tr

⁴Fizik Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 06800, Türkiye, yerli@metu.edu.tr

⁵Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, 03160, Türkiye, maerdogan@mku.edu.tr

⁶Bursa Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Bursa, 16310, Türkiye, anil.tanriover@btu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, dünya genelindeki 84 profesyonel astronomi sitesi için 2050 yılına yönelik ışık kirliliği tahminleri yapılması hedeflenmiştir. 2012-2022 yılları arasında 84 astronomi sitesinin mevcut ve geçmişteki ışık kirliliği durumu uydu verileri kullanılarak incelenmiştir. Mevcut ışık kirliliği durumunun yanı sıra, hücresel otomata dayalı bir model olan SLEUTH kentsel gelişim modeli de kullanılmıştır. SLEUTH modeli için uydu tabanlı ve modellenmiş veriler arasında kentsel alan, eğim, ulaşım, çıkarma katmanı ve tepe gölgesi gibi veriler işlenmiştir. Bu veriler CBS ortamında değerlendirilmiş ve 2050 yılı için model çalıştırılmıştır. 2022 yılı SLEUTH modelinden elde edilen kentsel alan çıktısı ile 2022 yılı yapay ışık uydu görüntüsü karşılaştırılarak her bir gözlemevi için bir denklem oluşturulmuştur. Daha sonra, 2050 yılına ait SLEUTH modeli kentsel alan tahminlerine dayalı olarak bu denklemler kullanılarak 2050 yılı için her bir gözlemevinin yapay ışık değerleri hesaplanmış ve tahmin edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: astronomi, CBS, ışık kirliliği, kentsel modelleme, uzaktan algılama

ABSTRACT

PREDICTION OF FUTURE LIGHT POLLUTION OF ASTRONOMY SITES WITH THE SLEUTH URBAN DEVELOPMENT MODEL

In this study, light pollution estimates for 2050 were projected for 84 professional astronomy sites worldwide. The current and historical light pollution levels at these 84 astronomy sites were analyzed using satellite data from 2012 to 2022. In addition to the current light pollution situation, a cellular automata-based model, the SLEUTH urban growth model, was also employed. The SLEUTH model processed satellite-based and modeled data, including urban area, slope, transportation, exclusion layers, and hillshade. These data were evaluated in a GIS environment, and the model was run for the year 2050. The urban area output from the 2022 SLEUTH model was compared with the 2022 artificial light satellite imagery to create an equation for each observatory. Subsequently, using the urban area projections from the 2050 SLEUTH model, these equations were applied to calculate and estimate the artificial light levels for each observatory in 2050.

Keywords: astronomy, GIS, light pollution, remote sensing, urban modelling

1 GİRİŞ

Işık kirliliği, astronomik gözlemler açısından büyük bir engel teşkil etmektedir. Gözlem kalitesini etkileyen çeşitli atmosferik faktörler arasında bulut örtüsü, nem oranı, rüzgar hızı ve atmosferdeki aerosol miktarı yer alır (Aksaker vd., 2020). Bununla birlikte, şehirleşmenin yaygınlaşması ve dünya nüfusunun hızla artması, insan faaliyetlerine bağlı olarak ortaya çıkan ışık kirliliğini artıran temel etkenlerdendir (Sánchez de Miguel vd., 2021). Yapay aydınlatma, 24 saat kesintisiz insan faaliyetlerine olanak sağlarken, bunun olumsuz bir sonucu olan ışık kirliliği de giderek yaygınlaşmaktadır. Işık kirliliği, insan yapımı ışıkların doğal gece aydınlığını bozması olarak tanımlanır (Cinzano vd., 2000) ve bu durum gecenin doğal karanlığının bozulmasına yol açar (Green vd., 2020).

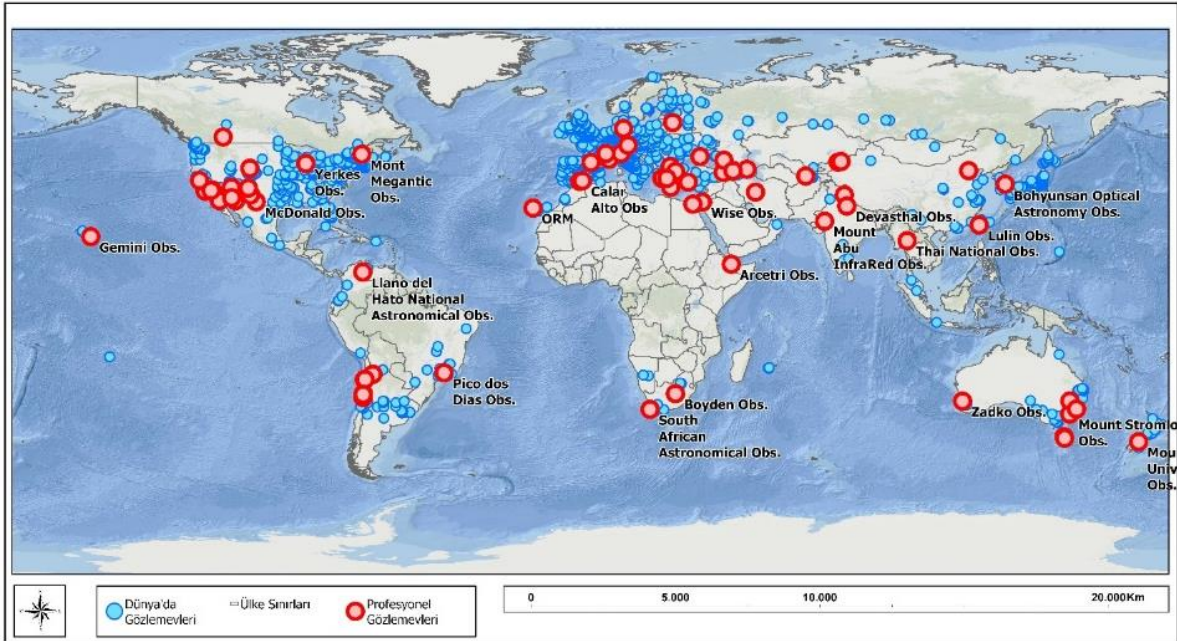
Son on yılda, küresel ölçekte hem aydınlatılan alanların kapsamı hem de bu alanlardaki ışık yoğunluğu yıllık %2 oranında artış göstermiştir. Bu oran, dünya nüfus artış hızının iki katıdır (Kyba vd., 2017). Işık kirliliğinin yayılmasında nüfus artışı, ekonomik büyüme, artan gelir düzeyi ve göç gibi faktörler önemli rol oynar (Henderson vd., 2012; Yerli vd., 2020; Phan, 2023). Işık kirliliğinin insanlar, hayvanlar ve bitkiler üzerindeki olumsuz etkileri geniş çapta belgelenmiştir. Benzer şekilde, astronomik gözlemler de ışık kirliliğinden olumsuz etkilenmektedir. Artan ışık kirliliği, özellikle yıldızların gözlemlenebilirliğini büyük ölçüde azaltır; ışık kirliliğinin yoğun olduğu bölgelerde gözlemlenebilir yıldız sayısı kayda değer şekilde düşer (Cinzano vd., 2000; Falchi vd., 2016). Dünya nüfusunun yaklaşık %80'i ışık kirliliği altında yaşamaktadır ve insanların üçte biri çıplak gözle Samanyolu'nu

gözlemleyememektedir (Falchi vd., 2016). Astronomik gözlemler, ışık kirliliğinin artmasıyla daha zor hale gelir ve gözlemlenebilir kaynakların sayısında azalma yaşanır (Cinzano vd., 2000; Falchi vd., 2016). Gelecekte, ışık kirliliğinin etkilerinden korunmak amacıyla doğal alanlarda gözlemleri kurmak ve mevcut kaynakları verimli kullanmak önem arz etmektedir. Ayrıca, ışık kirliliğine karşı yasal düzenlemeler yapılması da gereklidir.

Mevcut ya da yapım aşamasındaki birçok gözlemevi, şehirleşme ve nüfus artışının bir sonucu olarak artan ışık kirliliği tehdidi altındadır. Işık kirliliğinin gelecekte daha da artmasını önlemek için gözlemlerinin doğal ve az kirlenmiş alanlara inşa edilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, kirlenme tehdidi altındaki alanlar için uzun vadeli etkileri azaltmak amacıyla yasal önlemler alınmalıdır. Bu çalışmada, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri kullanılarak dünya genelindeki astronomi siteleri için yapay ışık kirliliğinin mevcut durumu analiz edilmiştir. Uydu görüntüleri ve modeller aracılığıyla kentsel gelişime dayalı olarak ışık kirliliğinin gelecekteki durumu tahmin edilmiştir.

2. METOD

Dünya genelinde, amatör ve profesyonel olmak üzere toplamda 2470 gözlemevi bulunmaktadır. Bu gözlemlerinin listesi ilgili web sitesinden indirilmiş olup, 284'ü kuzey yarımkürede, 2185'i ise güney yarımkürede yer almaktadır. Liste, filtrelenmemiş bir veri seti olduğundan içerisinde amatör, profesyonel, tarihi ve popüler nitelikte birçok gözlemevini barındırmaktadır. Gözlemlerinin küresel dağılımı Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekildeki mavi noktalar gözlemlerini, gri çizgiler ise ülke sınırlarını temsil etmektedir. Gözlemlerinin yoğunluğunun özellikle Batı Avrupa ve Güney Amerika bölgelerinde olduğu dikkat çekmektedir. Bu çalışmada yalnızca profesyonel gözlemlerini belirlemek için bir filtreleme süreci uygulanmıştır. 1 metre ve üzeri (+1m) ayna çapına sahip teleskopları bünyesinde barındıran gözlemleri, resmi web siteleri üzerinden doğrulanmıştır. 1 metre altındaki (-1m) teleskoplara sahip gözlemleri çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Şekil 1'de kırmızı noktalarla işaretlenmiş gözlemleri, bu filtreleme sürecinin ardından elde edilen 84 profesyonel gözlemevini temsil etmektedir.



Şekil 1. Dünya'da bulunan tüm astronomi siteleri ve +1m teleskop çapına sahip profesyonel 84 gözlemin haritada gösterimi.

2. 1. Yararlanılan Veriler ve Temini

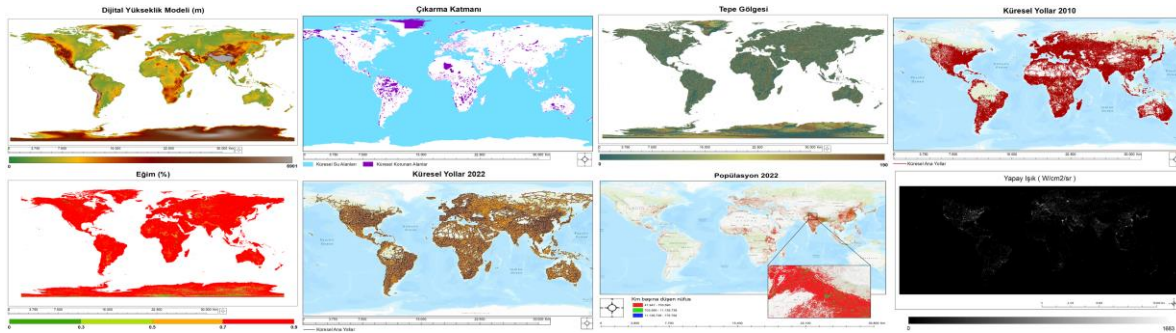
Çalışmada kullanılan yapay ışık ve SLEUTH kentsel gelişim modeli için kullanılan veriler Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelgede verilerin özellikleri ve indirilen web adresleri de bulunmaktadır.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan verilerin özellikleri.

Veri	Uydu/Enstrüman/Model	Veri Tipi	Yersel Çözünürlük	Zamansal Çözünürlük	Boyut	İndirilen web adresi
Yapay Işık	Suomi-NPP VIIRS/DNB	Raster	742 m	2012-2022	1 TB	https://payneinstitute.mines.edu/eog/

Kentsel Alan	LandScanTM	Raster	0,08 m	2000-2022	3 GB	https://landscan.ornl.gov
Ulaşım	gROADS	Vektör	-	2010	1 GB	http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/groads-global-roads-data-v1
Ulaşım	OpenStreet Map	Vektör	-	2022	65 GB	https://www.openstreetmap.org/#map=9/36.9192/37.4139
Eğim	GTOPO30	Raster	1 km	1996	2,50 GB	https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive

Çalışmada kullanılan veriler Şekil 2.'de ise örnek olarak verilmiştir. Sol üst panelden itibaren sırasıyla dijital yükseklik modeli, çıkarma katmanı, tepe gölgesi, küresel yollar (2010), eğim, küresel yollar (2022), popülasyon (2022) ve yapay ışık olarak gösterilmiştir. Tepe gölgesi ve eğim katmanları DEM verisinden elde edilmiştir. Bu yüzden çizelgeye de eklenmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan kentsel alan girdi verileri ve yapay ışık verisi.

2. 1. 1. Yapay Işık

Bu çalışmada kullanılan yapay ışık verileri, Dünya yüzeyinden 833 km yukarıda, Güneş ile eş zamanlı bir yörüngede dönen Suomi National Polar-Orbiting Partnership (Suomi NPP) uydusundaki Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) enstrümanının Day Night Band (DNB) sensörü ile toplanmıştır.

2. 1. 2. Kentsel Alan

Hüresel otomat tabanlı modellerde, kentsel büyümenin temelinde tohum yılına ait kentsel alan verileri yer almaktadır. Modelin kalibrasyonu için en erken tarihli kentsel alan tohum olarak seçilirken, sonraki yıllara ait kentsel katmanlar veya kontrol yılları, istatistiksel olarak en iyi uyumun belirlenmesi için kullanılır. Bu nedenle, kalibrasyon aşamasında en az dört kentsel katmana ihtiyaç duyulur: ilki başlangıç yılı, diğer üçü ise en küçük kareler yöntemiyle hesaplamalar yapmak içindir. Geçmiş çalışmalarda, şehir haritalarının ve hava fotoğraflarının sayısallaştırılması, uzaktan algılanan görüntülerin eşleştirilmesi ya da nüfus sayımı verilerine dayalı blok yoğunluklarının analizi gibi yöntemler kullanılmıştır. Bu çalışma için ise kentsel alan verileri, 2000-2022 yılları arasında elde edilen LandScanTM yıllık küresel nüfus dağılımı veri setlerinden temin edilmiştir.

2.1.3. Ulaşım

Bu çalışmada, küresel kapsama sahip ve 1980-2010 yıllarını kapsayan güncellemeleri içeren gROADS (Küresel Yollar Açık Erişim Veri Seti – Global Roads Open Access Data Set v1) veri seti eski tarihli yol verisi olarak kullanılmıştır. Bu veri seti, Global Roads Data Development Task Group himayesinde geliştirilmiş olup, veriye açık erişimle ilgili web adresinden ulaşılabilir. İkinci ve daha güncel tarihli veri seti olarak ise, Birleşik Krallık tarafından finanse edilen ve dünya çapında coğrafi veri setleri oluşturmayı amaçlayan ücretsiz bir proje olan OpenStreetMap kullanılmıştır. OpenStreetMap'in veri güncelleme tarihi 2022'dir.

2.1.4. Eğim

Bu çalışmada, eğim parametresini üretmek amacıyla küresel kapsama sahip ve 30 yay saniyelik (yaklaşık 1 km) yatay ızgara aralığında veri sunan GTOPO30 sayısal yükseklik modeli (Varga vd., 2015) kullanılmıştır. Şekil 2'de, GTOPO30 veri setinden elde edilen küresel dijital yükseklik modeli haritası örnek olarak sunulmuştur.

2.1.5. Çıkarma Katmanı

Bu katmanda, kentleşme için uygun olmayan bölgelerin belirtilmesi gerekmektedir. Bu alanlar genellikle kent içindeki yeşil alanlar, nitelikli tarım arazileri, su kaynakları ve koruma altındaki özel bölgeler gibi ortak kullanım alanları olup, simülasyonun dışında bırakılacaktır. Bu çalışmada, küresel kapsama sahip bir veri seti olan Dünya Korunan Alanlar Veritabanı (WDPA) kullanılmıştır.

2.1.6. Tepe Gölgesi

Kentsel verileri mekânsal bir bağlamda sunmak için, görüntü çıktıklarına bir arka plan görüntüsü eklenmektedir. Bu görüntü gri tonlamalı olmalı ve yaygın olarak tepe gölgesi bir sayısal yükseklik modeli (DEM) kullanılmaktadır. Bölgeye daha fazla ayrıntı katmak amacıyla, su kütleleri de bu girdi katmanında temsil edilebilir. Bu, arka plan görüntüsündeki sıfır (0) değerine sahip piksellerin, senaryo dosyasında su (SU) olarak tanımlanmasına olanak tanımlanır.

2.2. Veri Ön İşleme

Bu çalışmada kullanılan yapay ışık veri seti, nanowatt/str biriminden SQM (Sky Quality Meter) birimine dönüştürülerek SQM kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir (Sánchez de Miguel vd., 2017; Aksaker vd., 2020; Kurt vd.,). Bu sayede, astronomi siteleri için verilerin yorumlanması daha kolay hale getirilmiştir. Ayrıca, kentsel modelleme için gerekli olan tüm veriler modele uygun bir formata dönüştürülmüştür. SLEUTH modelinin çalıştırılabilmesi için verilerin belirli koşullara uygun olması gerekmektedir. Bu koşullardan ilki, tüm giriş parametrelerinin 200x200 piksel boyutunda karelerden oluşmasıdır. Bu nedenle, tüm kentsel alan veri seti, seçilen 84 gözlemevinin konumlarını merkez alacak şekilde kesilmiştir. Bir karede birden fazla gözlemevi yer aldığı durumlarda, gözlemevleri aynı karenin içine yerleştirilmiştir. Görüntülerdeki piksel değerleri "0-1" şeklinde ikili formata dönüştürülmüş ve verilerin gri tonlamalı GIF formatında olması sağlanmıştır. Ayrıca, tüm verilerin aynı projeksiyonda olması zorunludur, bu nedenle veriler Python yazılımı kullanılarak gri tonlamalı GIF formatına dönüştürülmüş ve ortak bir projeksiyona getirilmiştir. Son olarak, verilerin web sitesinde belirtilen isimlendirme kurallarına uygun hale getirilmesi için yeniden adlandırılmıştır. Tüm bu işlemler tamamlandıktan sonra, her bir model karesi için 10 adet kentsel alan verisi GIF formatında hazırlanmış ve elde edilmiştir.

2.3. Kentsel Modelleme

Kentsel modelleme aşaması dört kısımdan oluşmaktadır. Veri setinin hazırlanması ve uygun formata dönüştürülmesinin ardından Project Gigalopolis web 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.

2.3.1 Test Aşaması

SLEUTH modelinin sistemle uyumu, bu aşamada test edilmektedir (Silva ve Clarke, 2002). Test modunda kullanılan senaryo dosyası, simülasyon sırasında modelin davranışını kontrol eden çeşitli ayarları ve parametreleri içerir. Test modu, kullanıcıya modelin doğru çalıştığını doğrulamak ya da belirli bir katsayı seti için çıktı dosyaları üretmek amacıyla veri seti üzerinde tek bir çalışma yürütmenin pratik bir yolunu sunmayı amaçlar. Test aşaması sorunsuz bir şekilde tamamlandıktan sonra, kalibrasyon aşamasına geçilmiştir.

2.3.2 Kalibrasyon Aşaması

Kentsel gelişimi doğru şekilde simüle edebilmek için büyüme kurallarının yerel koşullara uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu bağlamda, SLEUTH ile yapılan modelleme çalışmasında en kritik basamak kalibrasyon aşamasıdır (Clarke ve Gaydos, 1998; Silva ve Clarke, 2002). Kalibrasyon süreci, modelin geçmişten günümüze kentsel büyümeyi simüle edebilmesine ve simüle edilen yıllar ile kontrol yılları arasında yüksek derecede uyum sağlamasına olanak tanır (Goldstein vd., 2004; Xi vd., 2009). Kalibrasyon üç aşamadan oluşur: kaba kalibrasyon, ince kalibrasyon ve final kalibrasyon.

- **Kaba Kalibrasyon:** Bu, kalibrasyonun ilk aşamasıdır. Beş katsayının tüm aralığı (0-100), büyük adımlarla araştırılır. Bu aşamada kullanılan veriler 3 km x 3 km yersel çözünürlüktedir. Kaba kalibrasyon aşamasında, gözlemevlerinin bulunduğu 64 karelik bir senaryo dosyası kullanılarak model, C kodu ile Cygwin arayüzünde çalıştırılmıştır. İşlem, 11th Gen Intel(R) Core(TM) i9-11900H 2.50 GHz işlemciye ve 128 GB belleğe sahip 64-bit

işletim sistemli bir iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Her bir karenin süreci yaklaşık 1 saat sürmüş olup toplam kaba kalibrasyon işlemi 64 saat içinde tamamlanmıştır.

- **İnce Kalibrasyon:** İkinci aşama olan ince kalibrasyonda, katsayı aralığı final kalibrasyona doğru daraltılır. Bu aşamada kullanılan raster verilerin yersel çözünürlüğü 2 km x 2 km olarak ayarlanmış, kaba kalibrasyonda kullanılan 3 km x 3 km çözünürlük yaklaşık %66 oranında azaltılmıştır. Tek bir karenin ince kalibrasyonunun tamamlanması, aynı iş istasyonunda yaklaşık 45 dakika sürmüş ve toplam süreç yaklaşık 40 saatte tamamlanmıştır.
- **Final Kalibrasyon:** Bu, kalibrasyonun son aşamasıdır. İnce kalibrasyon sırasında üretilen "control_stats.log" dosyasındaki en iyi uyum değerleri kullanılarak olası katsayı değerleri aralığı daha da daraltılır. Bu süreçte, hedeflenen en olası parametre değerlerine ulaşmak amaçlanır. Tek bir karenin final kalibrasyonu, aynı iş istasyonunda yaklaşık 15 dakika sürmüş ve toplam 54 kare için final kalibrasyonu süreci yaklaşık 810 dakikada tamamlanmıştır. Kaba, ince ve final kalibrasyonlarının toplam süreci yaklaşık 2.6 gün sürmüştür. Final kalibrasyonda senaryo dosyasındaki en iyi uyum değeri, diğer kalibrasyon aşamalarında olduğu gibi sabit bırakılmıştır.

2.3.3 Öngörü Aşaması:

Bu aşamada, geçmişten günümüze kadar olan simülasyon sürecinde katsayıların değerleri göz önünde bulundurularak en iyi uyum değeri belirlenir. Bu şekilde, mevcut zamandan geleceğe tahmin edilecek yıllar boyunca beş büyüme parametresi yönlendirilir. Final kalibrasyonundan elde edilen "control_stats.log" dosyasındaki katsayılar, Lee Sale istatistiğine göre sıralanır ve en büyük değer seçilir.

2.3.4 Tahmin Aşaması:

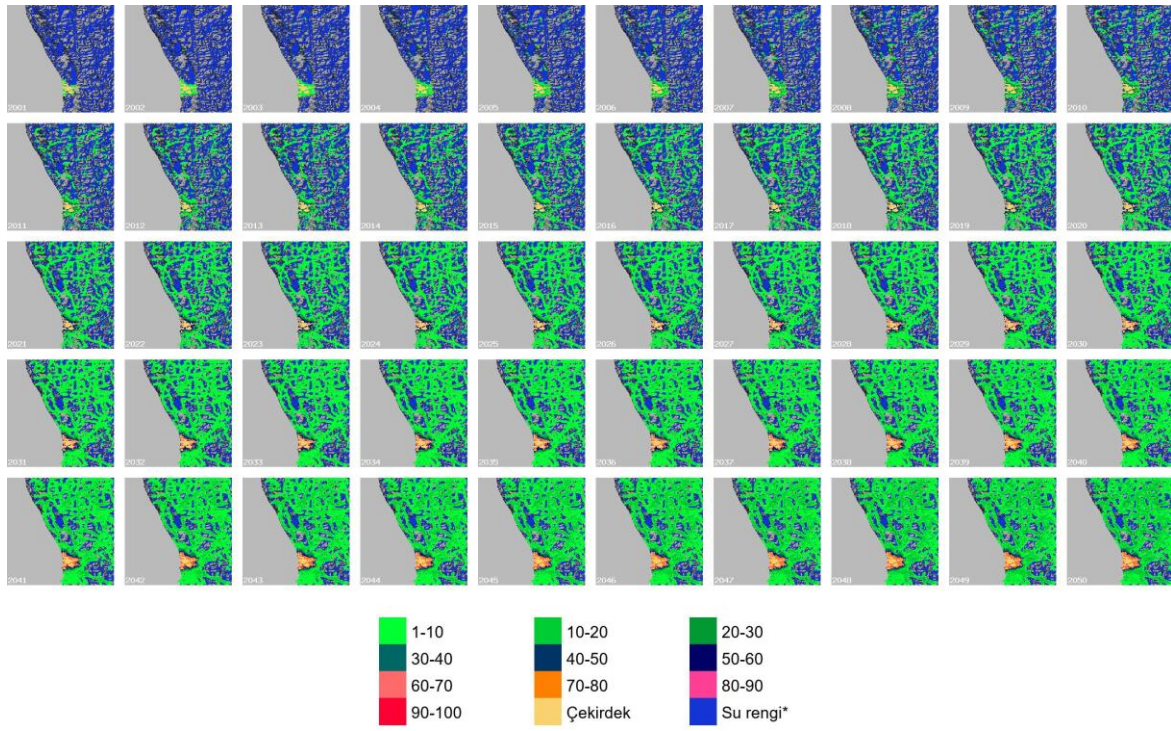
Tahmin aşaması, SLEUTH modelinin geçmişteki büyüme eğilimlerini tekrar ederek gelecekteki kentsel değişimleri öngörmesine dayanır. Kentsel değişimi tanımlayan katsayılar, gelecekteki büyümenin tahminini oluşturur (Candau, 2002). Yersel çözünürlük hedefi olarak 1 km x 1 km çözünürlük kullanılmıştır. Bu aşama, sürecin son aşamasıdır ve beş büyüme parametresiyle ilgili istatistiksel çıktılar burada üretilir. Aynı zamanda, GIF formatında görüntü çıktıları da bu aşamada elde edilir. Ortaya çıkan görüntülerde, en güncel kentsel alan, ulaşım, eğitim, çıkarma katmanı ve tepe gölgesi verileri kullanılır. Ek olarak, senaryo dosyasında tanımlanan olasılıksal çıktılar da bu görüntüler üzerinde gösterilir.

2.4. Yapay Işığın Güncel Durumu ve Gelecek Tahmini

Gözlemlerindeki yapay ışığın gelecekteki durumu tahmin edilirken, kentsel gelişim sonuçlarına ait ".GIF" formatındaki görüntüler Python yazılımı kullanılarak piksel bazında karşılaştırılmıştır. SLEUTH modeli için kullanılan girdi parametrelerinin en güncel yılı olan 2022 yılına ait kentsel alan ve yapay ışık görüntüleri bu karşılaştırma için seçilmiştir. Bu işlem, 67 model karesi için tekrarlanmış ve sonuç olarak 2022 yılına ait kentsel gelişim ve yapay ışık görüntüleri kullanılarak bir doğrusal (lineer) regresyon denklemi elde edilmiştir. Bununla birlikte, kentsel alan çıktılarının olasılıksal sonuçlar veren kategorik bir veri seti olması ve yapay ışık verisinin sürekli bir veri olması nedeniyle, bu verilere lojistik regresyon modeli uygulanmıştır.

3. SONUÇ

SLEUTH modelinde kullanılan bütün model kareleri için modelin bütün adımları çalıştırılmıştır. 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. Şekil 4.8.'de Arcateri Gözlemlerinin bulunduğu model karesi örnek olarak 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 3. 46 numaralı model karesine ait başlangıç yılından 2050 yılına kadar olan SLEUTH modeli kentsel gelişim çıktısı.

Bu çalışmada tüm Dünya’da bulunan tüm profesyonel astronomi sitelerinin SLEUTH kentsel gelişim modeli kullanılarak 2050 yılı için kentsel gelişim olasılık değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu model sonuçlarına göre modele giren 64 karenin 2022 yılına ait piksel görüntüleri yine 2022 yılına ait yapay ışık görüntüleri ile piksel piksel karşılaştırılmıştır.

GIF ve TIF formatındaki görüntüler piksel piksel karşılaştırılarak 2022 yılı için saçılım grafiği ile bir denklem oluşturulmuş ve 2050 yılında yapay ışık değerleri bu denklemden tahmin edilmiştir. Bu saçılım grafiğinde $a=0.064$, $b=1.4782$ ve $x=P$ olmak üzere $AL=ax+b$ bağlantısı kullanılmıştır. Saçılım grafiğinden elde edilen denklem şu şekildedir:

$$AL = 0.064 (P)+1.4782 \quad (1)$$

Aynı veri seti kullanılarak yapay ışık ve kentsel alan arasında lojistik regresyon kullanılarak bir denklem elde edilmiştir. Elde edilen lojistik regresyon denkleminde $(P(Y=1|X) = 1/(1+\exp(-(\mathbf{b}_0+\mathbf{b}_1X_1+\mathbf{b}_2X_2+\dots+\mathbf{b}_nX_n)))$ denkleminde $\mathbf{b}_0 = -3.95$, $\mathbf{b}_1 = 0.014$, $Y=$ Kentsel Alan $X =$ Yapay Işık olmak üzere elde edilen denklem şu şekildedir:

$$P(Y = 1 | X) = 1 / (1 + \exp(-(-3.954435077943829 + -0.014554412384625029 * X))) \quad (2)$$

4. TEŞEKKÜR

Bu çalışma 123F244 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmekte olup Zühal Kurt’un doktora tezinin bir parçasını oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

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.

Candau, J. T., 2002. Temporal calibration sensitivity of the SLEUTH urban growth model (Doctoral dissertation, University of California, Santa Barbara).

Cinzano, P., Falchi, F., & Elvidge, C. D. 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.

- 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.
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., & Furgoni, R.**, 2016. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6): e1600377.
- Green, R. F., Luginbuhl, C. B., Wainscoat, R. J., et al.**, 2022. The growing threat of light pollution to ground-based observatories. *Astronomy & Astrophysics Review*, 30(1): 1-15.
- Henderson, J. V., Storeygard, A., & Weil, D. N.**, 2012. Measuring economic growth from outer space. *American Economic Review*, 102(2): 994-1028.
- Kurt, Z., Aksaker, N., Yerli, S.K., Erdoğan, M.A.**, 2024. Investigating potential Dark Sky Parks in Balkans. *Astrophys Space Sci* 369: 84 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10509-024-04324-4>
- Kyba, C. C. M., 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.
- Phan, D. H.**, 2023. Lights and GDP relationship: What does the computer tell us? *Empirical Economics*, 65, 1215-1252.
- 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.
- Silva, E. A., & Clarke, K. C.**, 2002. Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(6): 525-552.
- 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.