Journal of Engineering Faculty

| cumfad.cumhuriyet.edu.tr | Founded: 2023 Available online, ISSN:3023-7203 Publisher: Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Modeling and Future Simulation of Water Area Change in Tokat Almus Dam with *GIS-Based* Ca-Markov and Machine Learning

Yağmur Seren Şıkel[1,a,*], Nuray Baş[2,b]

[1]*Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, 58140, Türkiye*

[2] *Department of Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, 58140, Türkiye*

**Corresponding author*

Research Article

History

Received: 07/05/2025
Accepted: 27/05/2025

Copyright

This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International License

ABSTRACT

Sustainable management of water resources is increasingly important, especially under climate change and increasing environmental pressures. Reservoirs are among the critical areas in this context due to their use for both drinking water supply, energy, and irrigation purposes. Monitoring the spatial and temporal changes of water areas is vital for the conservation and management of these sensitive ecosystems. This study was conducted to analyze the temporal changes of the water areas around Almus Dam in Tokat province and to develop predictions for the future. The study is important in terms of both understanding environmental changes and contributing to decision support processes at the regional scale. Satellite images from 2016, 2020, and 2024 were processed using the supervised classification method, and the study area was divided into two classes: Water and Other. Classification accuracy was tested with reference points obtained from Google Earth data. In the modeling phase, the Logistic Regression (LR) algorithm was applied using temperature, precipitation, and humidity data from the ERA5 dataset. The 2016 and 2020 transition potential maps were combined with the CA-Markov method to produce future forecast projections for the years 2028 and 2032. According to the results, simulation maps of 2024 were compared with the reference maps; the overall accuracy of the model was 94% and the kappa coefficient was 0.85. These findings indicate that the model can be used as a reliable and practical forecasting tool. The overall findings of the study indicate a declining trend in water bodies, especially in the coastal areas of the dam, and suggest that climatic factors play an important role in these changes. The results can be considered as a valuable source of information to understand the impacts of climate change and contribute to water resources management strategies.

Keywords: CA-Markov model, Machine learning, Water area change, Remote sensing

Tokat Almus Barajında Su Alanı Değişiminin CBS Tabanlı Ca-Markov ve Makine Öğrenmesi Yaklaşımlarıyla Modellenmesi ve Geleceğe Yönelik Simülasyonu

Süreç

Geliş: 07/05/2025
Kabul: 27/05/2025

ÖZ

Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, özellikle iklim değişikliği ve artan çevresel baskılar altında giderek daha büyük bir önem taşımaktadır. Baraj gölleri hem içme suyu temini hem de enerji ve sulama amaçlı kullanımları nedeniyle bu bağlamda kritik alanlar arasında yer almaktadır. Su alanlarının mekânsal ve zamansal değişimlerinin izlenmesi, bu hassas ekosistemlerin korunması ve yönetimi için hayati bir öneme sahiptir. Bu çalışma, Tokat ili sınırları içinde yer alan Almus Barajı çevresindeki su alanlarının zamansal değişimlerini analiz etmek ve geleceğe yönelik tahminler geliştirmek amacıyla yürütülmüştür. Çalışma hem çevresel değişimleri anlamak hem de bölgesel ölçekte karar destek süreçlerine katkı sağlamak açısından önem taşımaktadır. 2016, 2020 ve 2024 yıllarına ait uydu görüntüleri denetimli sınıflandırma yöntemi kullanılarak işlenmiş ve çalışma alanı Su ve Diğer olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Sınıflandırma doğruluğu, Google Earth verilerinden elde edilen referans noktaları ile test edilmiştir. Modelleme aşamasında, ERA5 veri setinden sağlanan sıcaklık, yağış ve nem verileri kullanılarak Lojistik Regresyon (LR) algoritması uygulanmıştır. 2016 ve 2020 yılları haritaları kullanılarak elde edilen geçiş potansiyel haritaları CA-Markov yöntemiyle birleştirilerek 2028 ve 2032 yıllarına yönelik gelecek tahmin projeksiyonları üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 2024 yılı için üretilen simülasyon haritaları referans haritalar ile karşılaştırılması sonucu modelin genel doğruluk oranı %94, kappa katsayısı ise 0.85 olarak bulunmuştur. Bu bulgular, modelin güvenilir ve pratik bir tahmin aracı olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Çalışmanın genel bulguları, özellikle barajın kıyı bölgelerindeki su kütlelerinde bir küçülme eğilimine işaret etmekte ve iklimsel faktörlerin bu değişikliklerde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Sonuçlar, iklim değişikliğinin etkilerini anlamak ve su kaynakları yönetim stratejilerine katkıda bulunmak için değerli bir bilgi kaynağı olarak değerlendirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Arazi kullanımı modellemesi; CA-Markov modeli; Makine öğrenmesi; Su alanı değişimi; Uzaktan algılama

[a] *yagmur.sikell@gmail.com* *ORCID* | [b] *mail* *ORCID*

How to Cite: Şıkel Y.S., Baş N. (2025) Modeling and Future Simulation of Water Area Change in Tokat Almus Dam with GIS-Based Ca-Markov and Machine Learning, Journal of Engineering Faculty, 3(1): 64-73.

Giriş

Küresel alanda her geçen gün etkilerini daha fazla hissettiren iklim değişikliği ve yanlış arazi kullanımından ötürü giderek ciddi bir hal almaktadır. Bu bakımdan gerek günümüzde gerekse de ilerleyen yıllarda bu durumun çok ciddi bir soruna dönüşmemesi için su kaynaklarının ve arazi kullanımının etkilerinin izlenmesi gerekmektedir [1]. Gelişen teknoloji ile birlikte günümüzde bu etkileri daha kolay ve etkili bir şekilde izlemek mümkündür [2]. Yanlış arazi kullanımının yanında arazi degradasyonu da su potansiyelinde zayıflamaya neden olmakta, bunun sonucunda su kaynaklarından gerektiği kadar yararlanılamamaktadır. Bu durumun temel sebepleri arasında, sanayi faaliyetleri, tarım, aşırı su çekimi ve sulak alanların tahribi gibi etkiler karşımıza çıkmaktadır [3]. Bu bakımdan bu olumsuz etkilerin önlenmesi için hem küresel hem de yerel ölçekte planlama ve politika çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır [4].

2030 yılına gelindiğinde ortalama olarak dünya nüfusunun 9 milyara yaklaşabileceği öngörülmektedir [5]. Bu artış ile birlikte doğal olarak ihtiyaçlarda artış gösterecektir. Bu noktada insanoğlunun belki de en önemli ihtiyaçları arasında ilk sırada su gelmektedir. Bu bakımdan bu doğal kaynak küresel alanda sürdürülebilir stratejik planlamaların gerçekleştirilmesi ve yönetilmesi açısından da önemlidir [6]. Her yıl yaklaşık olarak 500 bin metreküp civarında su buharlaşmaktadır. Suyun buharlaşarak atmosfere karışmasından ötürü her yıl ortalama olarak toplamda 70 bin metreküp civarında su kaybedilirken, yağışlar yoluyla ise yaklaşık olarak 110 bin metreküp su toplanmaktadır [7]. Aradaki 40 bin metreküp göllere ve denizlere akmaktadır. Bir diğer kayıp ise küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkilerinden dolayı hidrolojik çevrim olumsuz etkilendiğinden mevcut dengeler de bozulabilmektedir [8], [9].

Sıcaklık artışı [10] kuraklığa, baraj ve göl seviyelerinde düşüşe neden olurken, yağışın beklenilen potansiyelin üzerinde olması durumunda ise sel ve su taşkınları gibi benzer olumsuzluklar yaşanmaktadır. Yağış rejimindeki değişimler, başta erozyon sorunlarına ve nehirlerin akış rejimlerinde bazı olumsuzluklara neden olabilmektedir [11], [12]. Hem altyapı çalışmaları hem de su çekimleri nehirlerdeki su akışının düşmesine neden olmaktadır. Bu durum yeraltı sularında azalmaya yol açmaktadır. Böylece sulak ve göl alanlarında kuruma meydana gelmektedir [13], [14].

Bu durumla ilgili olarak küresel alandaki Birleşmiş Milletler gibi kuruluşlar önümüzdeki 20 yıllık süreçte su kıtlığının ortaya çıkabileceğine vurgu yapmakta ve şimdiden önlemlerin alınması için girişimlerin yapılması gerektiğine dikkat çekmektedirler [15]. Yapılan araştırmalar gelecekte, dünyanın 2050'li yıllarda çok ciddi su kıtlığı yaşayabileceğini ileri sürmektedir [5].

Ekosistem üzerinde olumsuz etki yaratacak bir diğer husus ise, su sıcaklığının yükselmesidir [16]. İklim değişikliği, sel ve taşkınlarına neden olurken aynı zamanda çeşitli kirleticilerin ve sıcaklıktan dolayı artan patojenlerin de su kaynaklarına sızmasına neden olmaktadır [17]. Aşırı yağışlar bazı durumlarda sele bazı durumlarda da kuraklığa neden olmakta, azalan yağışlar ise tarım ve içme suyu kaynaklarında dengesizlik oluşturmaktadır [18]. Kar ve büyük buz kütlelerinin erimesi neticesi de nehir ve göl gibi su kaynaklarının seviyelerinde düşüşler meydana getirmektedir.

Bu problemlerin çözümü ve alınabilecek önlemler arasında dünya genelinde olduğu gibi Ülkemizde de önemli adımlar atılmıştır. Çünkü gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülke iklim değişikliği ile ilgili aldıkları tedbirlerde suyun önemini kavramış durumdadır. Geleceğe yönelik olarak yapılan modellemelerde ve planlamalarda su sorununun yaşanacağı tahmin edildiğinden, bu konuda önlem alınmaya başlanmıştır [19]. Sonuç olarak su kaynaklarında azalma; ekolojik dengenin bozulmasına, çölleşmeye ve erozyona sebebiyet verecektir [20].

Oluşabilecek bu değişikliklerin bilimsel çerçevede izlenebilmesi için pek çok araştırmacı coğrafi bilgi sistemi (CBS) ve uzaktan algılama (UA) tekniklerini kullanmaktadır [21]. Bu teknoloji ile yeryüzü hakkında bilgi toplamak veriler elde ermek ve bu verileri işlemek mümkündür [22], [23], [24]. Veriler yeryüzü ile fiziksel temas olmadan, elektromanyetik dalgalar aracılığıyla toplandığından geniş alanlar dahi gözlemlenebilir [25], [26], [27].

Bazı araştırmacılar yeryüzündeki su alanı değişimlerini belirlemek için CA-Markov modeli kullanmaktadır [28]. CA-Markov modeli, Hücresel Otomata (Cellular Automata) ve Markov Zinciri yöntemlerini birleştirerek su alanı ve arazi değişikliklerini tahmin etmek için kullanılan bir modeldir. Bu model, özellikle çevresel ve bölgesel su yönetimi planlama çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [29]. Çalışmalarda sıkça kullanılan modeller arasında istatistiksel modeller, evrimsel modeller, hücresel modeller, Markov modelleri, hibrit modeller, uzman sistem modelleri ve çoklu ajan modelleri bulunmaktadır [28], [29], [30].Bu model ile birlikte makine öğrenimi algoritmalarını kullanmak modellemenin başarısını artırır [31], [32]. Makine öğrenimi teknikleri, farklı veri türlerini analiz etmek ve tahmin yapmak amacıyla kullanılan algoritmalarıdır.

Bu çalışmanın temel amacı; uzaktan algılama verileri ile makine öğrenmesi temelli modeller kullanarak, Tokat ilinde yer alan Almus Barajı çevresindeki su alanlarının zamansal değişimini analiz etmek ve bu değişimin gelecekteki yönünü öngörecek mekânsal-temporal modeller geliştirmektir.

Bu çalışmanın özgün yönü, arazi örtüsünün genel sınıflandırılmasıyla ilgilenmeyip, yalnızca su alanlarındaki değişime odaklanmasıdır. Bu amaç doğrultusunda yalnızca su değişimini etkileyen değişkenler seçilmiş ve sürece dahil edilmiştir. Çalışmada uydu görüntülerinin ArcGIS ortamında Maximum Likelihood algoritması ile sınıflandırılması sağlanmaktadır. Elde edilen sınıflandırmalar daha sonra MOLUSCE eklentisi ile modelleme sürecine dahil edilmiştir. CA-Markov modeli yardımıyla arazi değişimlerinin mekânsal ve zamansal yönleri bir arada değerlendirilmiş; buna ek olarak, lojistik regresyon (LR) yöntemiyle farklı veri gruplarına dayalı geçiş potansiyelleri modellenmiştir.

Literatür Çalışması

Literatürde sulak alanların değişim çalışmaları ile ilgili son 10 yılda gerçekleştirilmiş farklı araştırmalar bulunmaktadır.

Wang vd. (2020), arazi kullanımı ile arazi örtüsü değişikliklerini saptamak ve ilerleyen yıllara dönük olarak tahminleri modellemek için UA ve CBS'den yararlanılmıştır. Çalışmanın amacı ise, arazi kullanım değişikliklerinin durumu ve bunların etkenleri ile ilgili doğal kaynakların yönetiminde karar vericilere yardımcı olmaktır. 1990 ve 2010 yıllarına ait uydu görüntüleri üzerinden kontrollü ve kontrolsüz

sınıflandırma doğrultusunda arazi 7 sınıfa ayırılmıştır. Veri eğitimi amaçlı olarak her yıl için ortalama olarak 180 civarında rastgele nokta seçilmiş ve Hata matrisi ve Kappa indeksi ile görüntülerde doğruluk testi yapılmıştır. 1990 ve 2010 görüntüleri arasında arazi kullanımı arazi örtüsü geçişinin kapsamını, büyüklüğünü ve değişim oranını belirlemek için CA-Markov modeli kullanılmıştır. Sınıflandırma doğruluk testi incelendiğinde, 1990, 2010 ve 2030 yıllarına ait Kappa istatistikleri sırasıyla %77, %74 ve %73 olduğu gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan tahminler, sınıflandırma doğruluklarının büyük ölçüde uyum içinde olduğunu gösterdiği, yerleşim alanının 2010 yılına göre 2030 yılına kadar yaklaşık %19 oranında genişleyeceğini, tarım arazileri ve çalılıkların sırasıyla yaklaşık %17 ve %33 oranında azalacağı, su kütlelerinin ise %25 oranında azalacağı gözlemlenmiştir [33].

Pınarlık vd. (2023), iklim değişikliğinin Burdur Gölü su seviyesinin değişimine olan etkileri istatistiksel bir şekilde incelenmiştir. 1975-2020 arasındaki göl parametreleri ile iklim parametrelerinin karşılaştırılması için ilişki korelasyon yönteminden yararlanılmıştır. 2021-2050 arası, göl seviyesindeki hacim değişim tahminlerine iklim projeksiyonu tahminleri eklenmiştir. Projeksiyondan elde edilen veriler incelendiğinde; referans döneme göre sıcaklıklarda %11,38 artış olduğu, yağışlarda %4,5 gibi önemli bir azalış gözlemlenmiştir. Buharlaşma oranının ise %15 arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan analizler neticesinde Burdur Gölü su seviyesinin 1975-2020 periyodunda düşüş eğiliminde olduğu, benzer durumun 2021-2050 periyodunda da olacağı öngörülmüştür. Bu yıllar arasında da sıcaklıklarda ciddi şekilde artış yaşanırken, yağışlarda düşüş ve buharlaşma düzeyinde de artış olacağı gözlemlenmiştir. Korelasyon analizleri incelendiğinde, göl seviyesi ile buharlaşma arasında (0,6452) negatif yönlü orta düzeyde bir anlamlı ilişkinin olduğu tespit edilirken, göl seviyesi ile yağış arasında (-0,1066) negatif yönlü zayıf ilişki olduğu tespit edilmiştir [11].

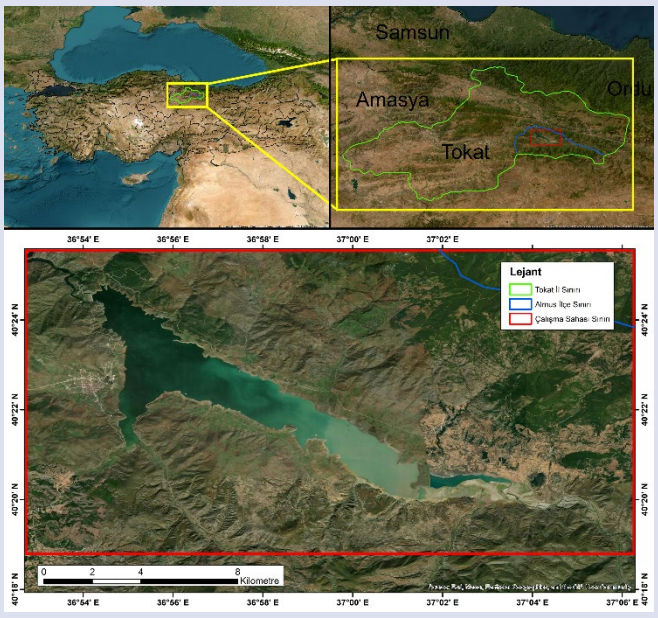
Göncüler (2024), UA ve CBS aracılığıyla AKAÖ değişimi incelenmiş ve geleceğe dönük modelleme ise Kayseri ili örneği üzerinden incelenmiştir. Landsat ETM ve Landsat 8 uydu görüntülerinden yararlanılan çalışmada arazi kullanım haritalarını yapmak amacıyla kontrollü sınıflandırma yöntemi kapsamındaki maksimum olabilirlik yönteminden yararlanılmıştır. Sonuç olarak, Melikgazi ilçesinin belirtilen yıllar arasında (2030-2040) şehir alanlarının genişleyeceği tespit edilmiştir. Ayrıca su alanlarında ciddi azalmanın söz konusu olacağı, kentleşme adımlarının hızlanmasıyla doğal yapının olumsuz yönde etkileneceği tespit edilmiştir [4].

Toplu (2024), arazi kullanımının zamansal ve konumsal değişiminin öngörülebilmesi için Markov zincirleri ile modelleme yapmıştır. Çalışma Kastamonu ilinde yapılmıştır. Amaç ise; 1999, 2009 ve 2019 yıllarına ait Landsat uydu görüntüleri ve CBS ile AKAÖ saptamak ve Hücresel Otomat (CA-Markov) modeli yardımıyla çalışma alanının 2029 yılı ile ilgili ait arazi kullanımını tahmin etmektir. Sonuç olarak, 1999-2019 arasındaki süreçte orman alanının 131845.4 hektar alandan 116020,8 hektar alana, orman alanlarının 109495,2 hektardan 87752,8 hektara, yapraklı orman alanının 32942,3 hektardan 2010,1 hektara düşebileceği öngörülmüştür. 2029 ile ilgili tahminler incelendiğinde, verimli orman alanının %0,2 (191,3 hektar), boşluklu kapalı orman alanının %19,5 (5511,8 hektar) ve toplam orman alanının ise %4,9 (5703,1 hektar) azalacağı saptanmıştır. Toplu (2024) tarafından yapılan dikkat çeken CA-Markov modeli, CBS ve UA üçlüsünün entegrasyonudur. Bu çalışmada da CA-Markov modeli, CBS ve UA üçlüsü birbirine entegre edilmesi durumunda, ilerleyen yıllara yönelik arazi kullanımının tahmin edilmesinde etkin bir şekilde kullanılabileceği ortaya konulmuştur [32].

Materyal ve Yöntem

Çalışma sahasına ait bilgiler

Çalışma sahası, Tokat iline bağlı Almus ilçesinde 36° 52' - 37° 6' Doğu boylamları ve 40° 18' - 40° 25' Kuzey enlemleri arasında bulunan Almus Barajı olarak seçilmiştir. Alanın yüzölçümü yaklaşık 24 bin hektardır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma Sahası

Tokat, Orta Karadeniz bölümünün iç kısımlarında yer almaktadır. Kuzeyinde Samsun, kuzeydoğusunda Ordu ili yer almaktadır. Tokat ilinin güneyinde Sivas, güneybatısında Yozgat, batısında ise Amasya illeriyle çevrilidir. Yüzölçümü ise 9958 km^2'dir. Tokat ili yakın bölgeler olan İç Anadolu ve Karadeniz iklimi arasında bir geçit özelliğine sahiptir. Yıllık ortalama sıcaklık değerleri; en düşük sıcaklık 8,1 °C, en yüksek sıcaklık ise ortalama olarak 14,2 °C olmaktadır.

Materyal

Bu çalışmada kullanılan materyaller, iklimsel değişkenlere dayalı raster verilerden oluşmaktadır. Ana veri setleri, 2016, 2020 ve 2024 yıllarına ait Landsat 8 uydu görüntüleridir. Uydu görüntüleri, çalışma alanındaki su alanlarının belirlenmesi amacıyla sınıflandırma analizlerinde temel girdi olarak kullanılmıştır. İklimsel değişkenler ise sıcaklık, yağış ve nem verilerini içermekte olup, Copernicus Climate Change Service'in ERA5 veri setinden elde edilmiştir. ERA5 iklim verileri, çalışma sahası ölçeğinde kesilmiş, enterpolasyon yöntemi (IDW) ile raster formata dönüştürülmüş ve yeniden sınıflandırılarak analizlerde kullanılmaya uygun hâle getirilmiştir. Tüm veri setleri coğrafi uyum açısından aynı piksel boyutuna ve projeksiyon sistemine dönüştürülmüş, analizler QGIS ve ArcGIS yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelleme sürecinde bir makine öğrenmesi algoritması olan lojistik regresyon (LR) algoritması tercih edilmiştir ve CA-Markov simülasyonları MOLUSCE eklentisi aracılığıyla yürütülmüştür.

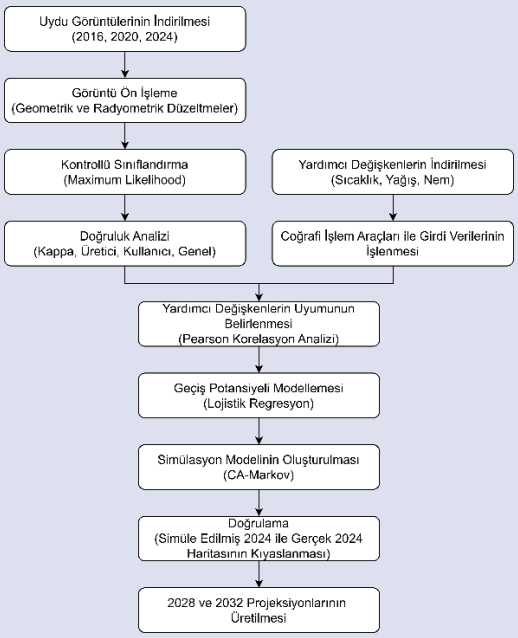
Metot

Çalışmanın iş akış şeması Şekil 2'de gösterilmektedir.

Bu çalışmada, Tokat ilinde yer alan Almus Barajı çevresindeki su alanlarının zamansal değişimi analiz edilmiş ve geleceğe yönelik projeksiyonlar üretilmiştir. Çalışmanın temel amacı, uzaktan algılama verileri ve lojistik regresyon (LR) algoritması kullanılarak su alanlarında meydana gelen değişikliklerin modellenmesi ve ilerleyen yıllarda ortaya çıkabilecek değişim senaryolarının ortaya konulmasıdır. Araştırma kapsamında 2016, 2020 ve 2024 yıllarına ait Landsat 8 uydu görüntüleri, USGS EarthExplorer platformu üzerinden temin edilmiştir. Veri ön işleme aşamalarında bant birleştirme, çalışma sahasına göre kırpma, atmosferik düzeltme ve geometrik düzeltme işlemleri yapılmış, tüm görüntüler mekânsal çözünürlük ve projeksiyon sistemi açısından standardize edilmiştir. Sınıflandırma işleminde ArcGIS yazılımında kontrollü sınıflandırma yöntemi olan Maximum Likelihood algoritması uygulanmış, çalışma sahası yalnızca "Su" ve "Diğer" olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Sınıflandırmanın doğruluğu, Google Earth yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden rastgele belirlenen 300 referans noktası ile değerlendirilmiş ve hata matrisi üzerinden hesaplanmıştır.

İklimsel veriler, Inverse Distance Weighted (IDW) enterpolasyon yöntemi kullanılarak raster formatına dönüştürülmüş ve analizlerde kullanılmak üzere çalışma sahasına uygun şekilde hazırlanmıştır. İklimsel veri katmanları, mekânsal çözünürlük ve koordinat sistemi uyumlu hâle getirilerek analizlerin entegre biçimde yürütülmesi sağlanmıştır.

Modelleme süreci QGIS yazılımına entegreli MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) eklentisi kullanılarak yürütülmüştür. LR algoritması, bağımlı değişken olarak arazi sınıfı değişimlerini (su/diğer), bağımsız değişken olarak ise iklimsel değişkenleri alarak geçiş potansiyel rasterları oluşturmuştur. Model, 5000 örnekleme noktası, 3 piksel komşuluk değeri ve 500 iterasyon parametreleriyle çalıştırılmış ve modelin uygunluğu Pseudo R-Squared değeri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen geçiş potansiyel rasterları, Cellular Automata-Markov (CA-Markov) modeliyle entegre edilmiş, 2024 yılı için arazi örtüsü simülasyonu üretilmiştir. Daha sonra geleceğe yönelik senaryolar oluşturulmuş ve 2028 ile 2032 yıllarına ait projeksiyon haritaları üretilmiştir.



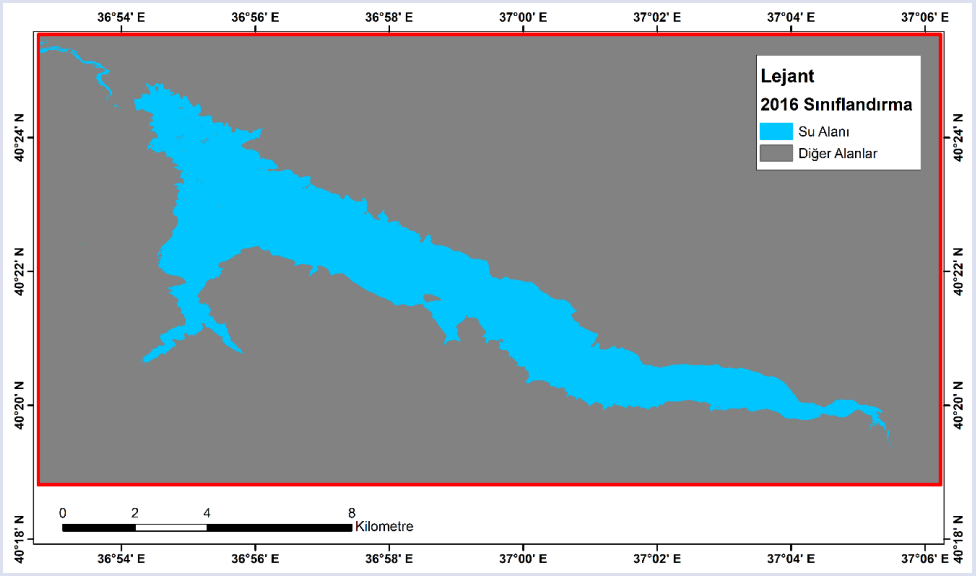
Şekil 2. İş Akış Şeması

Bulgular

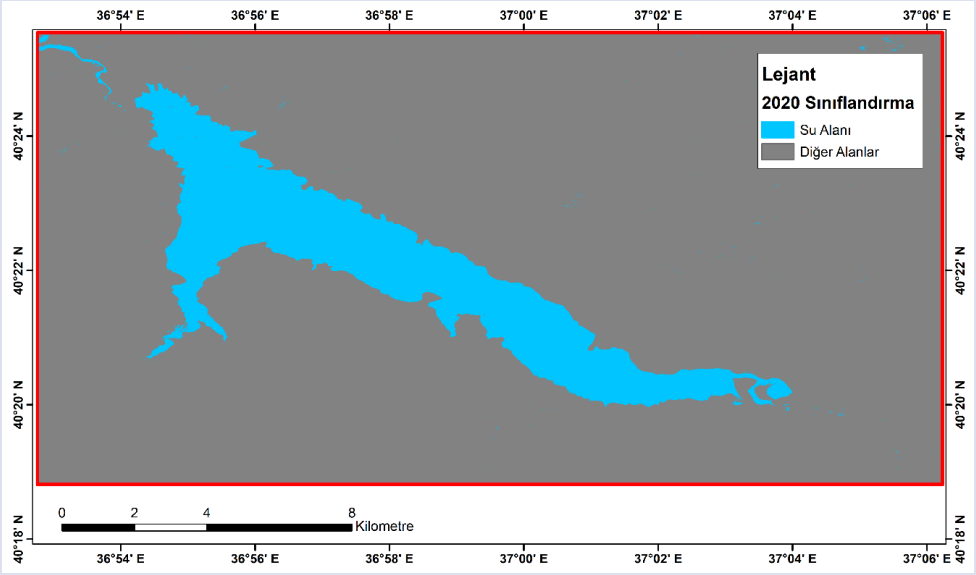
Landsat 8 uydu görüntülerinden elde edilen verilerle 2016, 2020 ve 2024 yıllarına ait sınıflandırmalar gerçekleştirilmiş ve "Su" ile "Diğer" sınıfları arasındaki değişimler belirlenmiştir (Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5).

Maximum Likelihood algoritması ile yapılan sınıflandırma sonuçlarına göre, 2016–2020 döneminde su alanlarında yaklaşık %1.97'lik bir daralma gözlemlenmiş, bu da yaklaşık 468 hektarlık bir su kaybına karşılık gelmektedir. Google Earth'ün yüksek çözünürlüklü görüntüleri üzerinden referans noktaları ile yapılan doğrulama sonucunda; üretici doğruluğu %89, kullanıcı doğruluğu %92, genel doğruluk %93 ve kappa doğruluğu %85 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar çalışma sahasında su ve diğer alanların güvenilir bir şekilde ayrılabildiğini ve sınıflandırma yönteminin istatistiksel olarak güvenilir sonuçlar ürettiğini ortaya koymuştur.

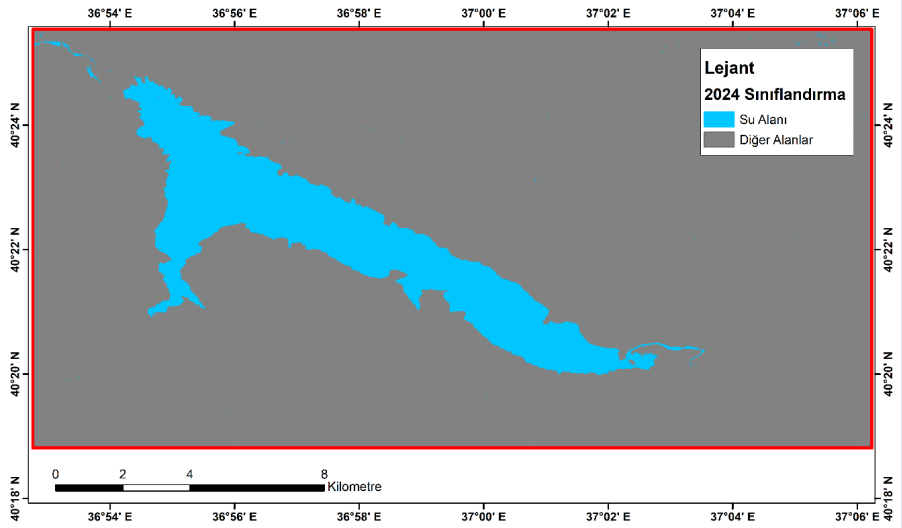
Modelleme sürecinde sıcaklık (Şekil 6), yağış (Şekil 7) ve nem (Şekil 8) verileri sınıflandırılmış ve girdi formatına uygun hale getirilmiştir.



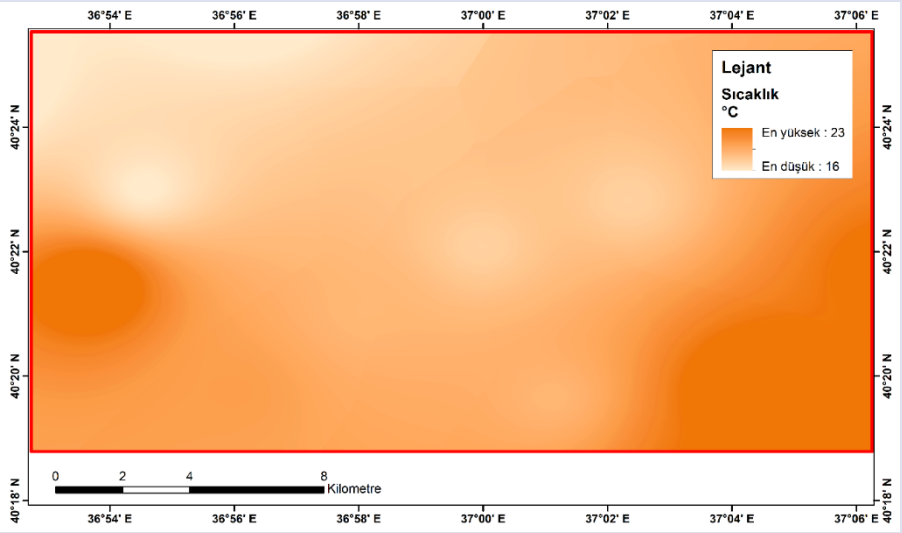
Şekil 3. 2016 yılına ait sınıflandırılmış uydu görüntüsü



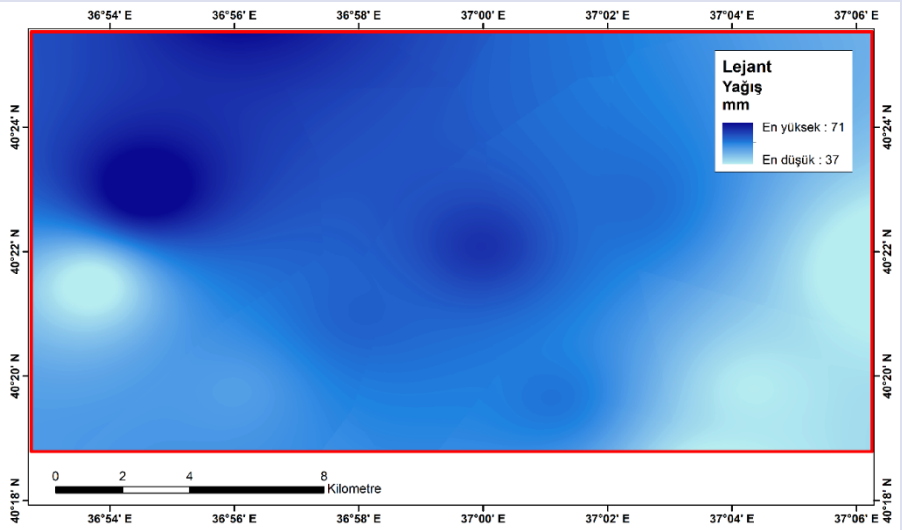
Şekil 4. 2020 yılına ait sınıflandırılmış uydu görüntüsü



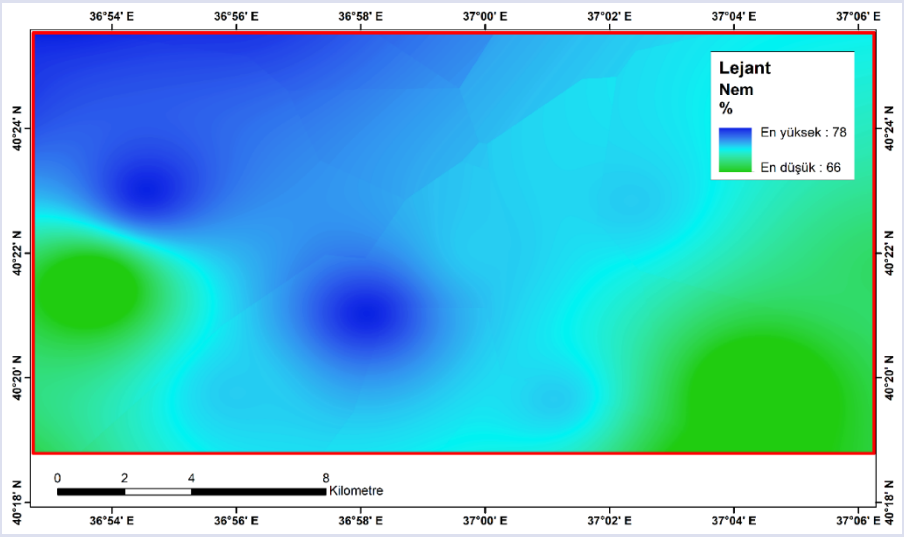
Şekil 5. 2024 yılına ait sınıflandırılmış uydu görüntüsü



Şekil 6. Sıcaklık haritası



Şekil 7. Yağış haritası



Şekil 8. Nem haritası

Tüm veriler QGIS'e aktarılmış ve lojistik regresyon (LR) algoritması MOLUSCE eklentisi aracılığıyla uygulanmıştır.

Eklenen verilerin Pearson's Correlation skorları Tablo 1'deki gibidir.

Lojistik regresyon (LR) algoritmasıyla elde edilen geçiş potansiyeli modelleme sonuçları Şekil 9'da gösterilmektedir. Model, 5000 örnekleme noktası, 3 piksel komşuluk ve 500 iterasyon ile çalıştırılmış; Pseudo R-squared değeri 0.82 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, değişimin büyük ölçüde bağımsız değişkenlerle açıklandığını göstermekte olup, model doğruluk ve istikrar açısından simülasyon aşamasına uygun bulunmuştur.

Sonraki aşamada LR ile elde edilen geçiş potansiyeli raster'ı kullanılarak, CA yöntemiyle 2024 yılına ait harita simüle edilmiştir (Şekil 10).

Model çıktısı olan 2024 yılına ait simülasyon haritası, gerçek 2024 uydu sınıflandırması ile MOLUSCE üzerinde karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda genel doğruluk %94, genel Kappa katsayısı 0.85, histogram Kappa 0.91 ve lokasyon Kappa 0.88 olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek doğruluk ve tutarlılık değerleri, modelin mekânsal tahmin kapasitesinin güçlü olduğunu ve 2024 yılı için üretilen senaryonun güvenilirliğini doğrulamaktadır. Elde edilen başarılı sonuçlar, 2028 ve 2032 projeksiyonlarının üretilmesi için sağlam bir temel oluşturmuştur.

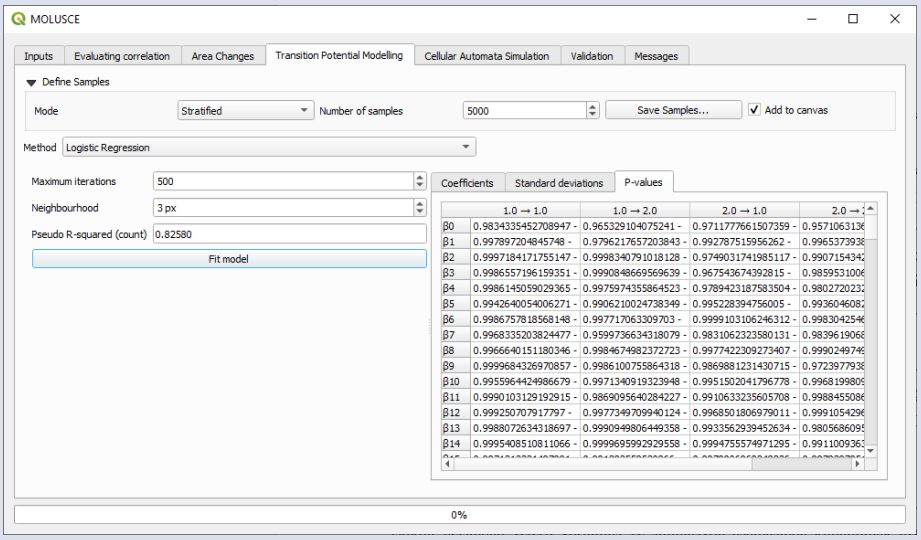
2028 ve 2032 yıllarına ait projeksiyon haritaları (Şekil 11 ve Şekil 12) hazırlanmıştır. Bu projeksiyonlar, özellikle kıyı şeritlerindeki su alanlarında belirgin daralma eğilimlerinin devam ettiğini ve yoğunlaştığını ortaya koymaktadır.

Çalışmanın bulguları, geliştirilen modelin tahmin aracı olarak kullanılabileceğini ve MOLUSCE eklentisinin istatistiksel modellemede kullanımının doğruluk oranlarını artırdığını göstermiştir. Böylece farklı senaryolara bağlı değişimlerin simüle edilebilineceği ortaya konulmuştur. Aynı zamanda Almus Barajı gibi çevresine sulama ve elektrik enerjisi anlamında potansiyel sağlayan su kaynaklarının yönetimi açısından önemli katkı sunmaktadır. Böylece baraj ve çevresinin ileride oluşabilecek olumsuzlukları önceden görülebilecektir. Su alanlarının özellikle kıyı bölgelerinde daralma eğiliminin devam edeceğini ve hidrolojik hassasiyetin ilerleyen yıllarda artacağını göstermektedir. Bu sonuçlar, baraj gölü çevresindeki su alanlarının iklim değişikliği ve çevresel faktörlerden nasıl etkileneceği konusunda önemli bilgiler sunmakta ve yerel su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

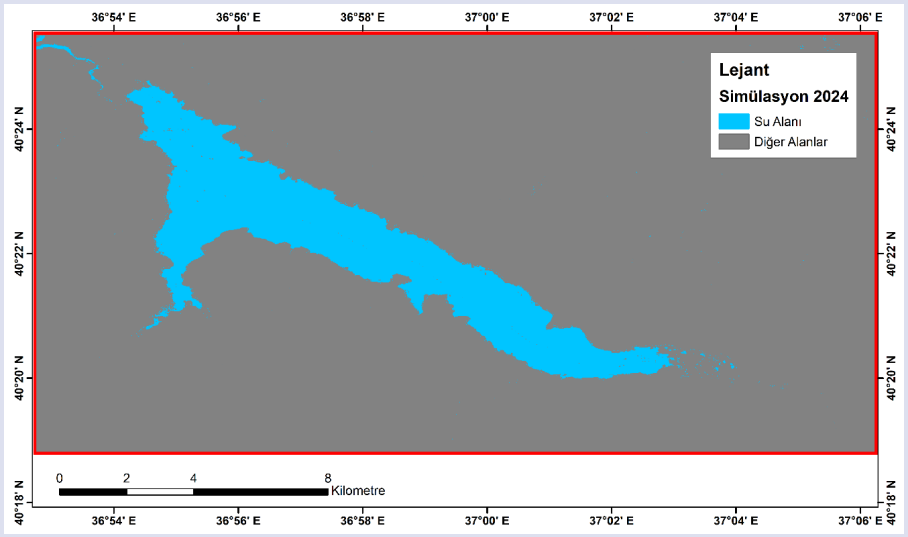
Çalışmanın tüm analizleri ArcGIS ve QGIS yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiş, veri setlerinin mekânsal ve zamansal uyumu titizlikle sağlanmıştır. Elde edilen bulgular, çevresel değişimlerin izlenmesi, iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilir su yönetimi açısından değerli bilimsel çıktılar sunmaktadır.

Tablo 1. İklimsel değişkenlerin Pearson's Korelasyon skorları

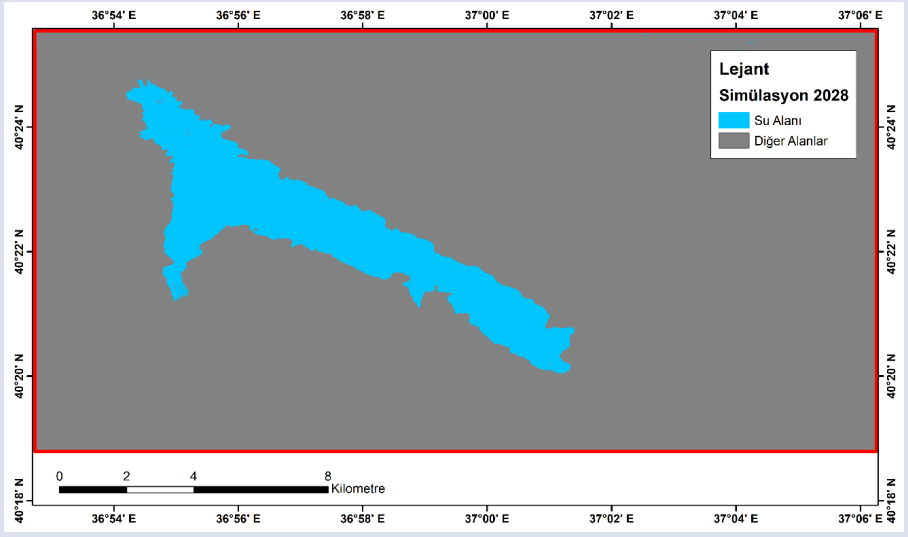
Değişkenler	Yağış	Sıcaklık	Nem
Yağış	-	0.75	0.81
Sıcaklık		-	0.83
Nem			-



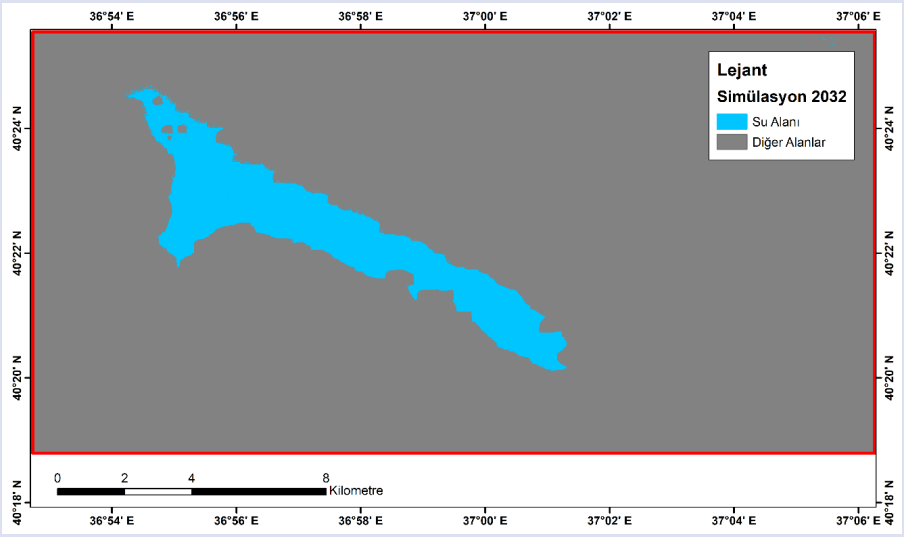
Şekil 9. Geçiş potansiyeli modellemesinde kullanılan LR yönteminin parametre ayarları



Şekil 10. 2024 yılına ait simüle edilmiş harita



Şekil 11. 2028 yılına ait simüle edilmiş harita



Şekil 12. 2032 yılına ait simüle edilmiş harita

Tartışma ve Öneriler

Bu çalışmada Tokat Almus Barajı çevresindeki su alanlarının zamansal değişimi analiz edilmiş, yalnızca iklimsel değişkenler temel alınarak lojistik regresyon (LR) modeliyle mekânsal-temporal modelleme gerçekleştirilmiş ve CA-Markov yöntemiyle geleceğe yönelik projeksiyonlar üretilmiştir. Elde edilen bulgular hem kullanılan yöntemlerin performansı hem de çalışma sahasının çevresel dinamikleri açısından önemli sonuçlar sunmuştur.

Sınıflandırma sürecinde elde edilen yüksek doğruluk oranları (genel doğruluk %93, kappa katsayısı 0.85), uydu görüntülerinden elde edilen verilerin çalışma sahasında su ve diğer alanları güvenilir bir şekilde ayırt edebildiğini göstermiştir. İki sınıflı yaklaşım ("Su" ve "Diğer") modeli basitleştirmiş ve odaklanmayı yalnızca su alanlarının değişimine yoğunlaştırmıştır. Bu yaklaşım, modelin temel hedefi olan su alanı değişimini yüksek hassasiyetle değerlendirmeyi mümkün kılmıştır.

Modelleme sürecinde yalnızca iklimsel değişkenlere dayalı LR algoritması kullanılması, bu değişkenlerin su alanı değişimlerini tahmin etmedeki belirleyici rolünü açıkça ortaya koymuştur. Elde edilen doğruluk oranları (genel doğruluk %94, kappa 0.85, histogram kappa 0.91, lokasyon kappa 0.88), LR modelinin güçlü bir tahmin aracı olduğunu ve mekânsal-temporal projeksiyonlarda güvenilir sonuçlar üretebildiğini kanıtlamıştır. Özellikle kıyı bölgelerinde gözlemlenen daralma eğilimleri, düşük eğimli alanların hidrolojik hassasiyetinin daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, uluslararası literatürde iklim değişikliği ve su kaynaklarının etkileşimi üzerine yapılan çalışmalarla tutarlıdır ve baraj gibi yapay su kütlelerinin iklim değişikliğine karşı savunmasız olduğunu teyit etmektedir.

Model yalnızca 2016 ve 2020 veri setine dayalı olarak eğitilmiş olsa da elde edilen çıktılar geleceğe dair önemli öngörüler sunmuştur. Ancak, daha uzun zaman serileri (örneğin 2000 ve 2010 verilerinin dâhil edilmesi) kullanılarak modelin zamansal genelleme kabiliyeti artırılabilir. Ayrıca, kullanılan ERA5 verilerinin mekânsal çözünürlüğü çalışma sahası ölçeğinde sınırlı kalmakta; bu nedenle yerel meteoroloji istasyonlarından sağlanacak yüksek çözünürlüklü verilerin kullanılması model doğruluğunu artıracaktır.

Gelecekteki çalışmalarda, modele buharlaşma oranı, toprak yapısı ve arazi kullanım türleri gibi ek çevresel değişkenlerin dâhil edilmesi önerilmektedir. Bu tür değişkenler, su alanı değişimlerinin daha karmaşık nedenlerini anlamada katkı sağlayabilir. Ayrıca, yalnızca LR değil, Random Forest, SVM veya XGBoost gibi alternatif makine öğrenmesi algoritmalarının kullanılması, model performanslarının karşılaştırılmasına ve en uygun modelin seçilmesine olanak tanıyabilir. Elde edilen projeksiyonlar, farklı iklim senaryoları altında test edilerek su yönetimi planlamalarına doğrudan katkı sağlayacak senaryo analizlerinin geliştirilmesi için de kullanılabilir.

Bu çalışma, MOLUSCE eklentisinin açık kaynaklı ve kullanıcı dostu yapısı sayesinde farklı algoritmaların entegre edilerek çevresel modelleme süreçlerinde nasıl etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Bulgular yalnızca Almus Barajı için değil, benzer hidrolojik alanlarda yapılacak çalışmalar için de örnek teşkil edebilecek metodolojik ve uygulamalı katkılar sunmaktadır. Çalışma, iklim değişikliğine uyum stratejilerinin geliştirilmesi, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve çevresel karar destek sistemlerinin güçlendirilmesi açısından önemli bir bilimsel temel oluşturmuştur.

Referanslar

[1] S. Karaman ve Z. Gökalp, "Küresel Isınma ve İklim Değişikliğinin Su Kaynakları Üzerine Etkileri", *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, c. 3, sy 1, ss. 59-66, 2010, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.nobel.gen.tr

[2] A. Akın, "Çukurova Deltası Kıyı Alanında Arazi Örtüsü Değişimlerinin Belirlenmesinde Farklı Uzaktan Algılama Yöntemlerinin Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2007.

[3] M. Demir, "CORINE Sistemine Göre Kars İlinde Arazi Örtüsü/Arazi Kullanımı, Değişimi ve Projeksiyonu", *Coğrafya Dergisi*, c. 1, sy 43, ss. 93-110, Ara. 2021, doi: 10.26650/jgeog2021-887753.

[4] K. N. Göncüler, "Uzaktan Algılama ve Cbs Kullanılarak Arazi Örtüsü/Arazi Kullanım Değişiminin İncelenmesi ve Geleceğe Dönük Modellenmesi: Kayseri İli Örneği", Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2024.

[5] Ö. Işınkaralar, "Arazi Örtüsü Değişiminin CORINE Verisiyle Modellenmesi: Ankara İlinin Kentsel Büyüme Tahmini", *Artium*, c. 11, sy 1, ss. 54-60, 2023, doi: 10.51664/artium.1196926.

[6] A. Gülersoy, "Yanlış Arazi Kullanımı", *Elektronik Sosyal Bilgiler Eğitimi Dergisi*, c. 1, ss. 49-128, Oca. 2014.

[7] M. Kaçmaz ve M. F. Döker, "Sapanca Gölü Havzası'nda Arazi Kullanımı ve Mekânsal Değişim", *Coğrafi Bilimler Dergisi*, c. 19, sy 1, ss. 161-194, 2021, doi: 10.33688/aucbd.872216.

[8] C. Koç, R. Bakış, ve Y. Bayazıt, "A study on assessing the domestic water resources, demands and its quality in holiday region of Bodrum Peninsula, Turkey", *Tour Manag*, c. 62, ss. 10-19, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.tourman.2017.03.024.

[9] A. Şekertekin, "Uzaktan Algılama Teknolojisi ve Uydu Görüntüleri Yardımıyla Önemli Çevresel Su ve Kara Yüzeyi Etkilerin Gözlemlenmesi", *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 5, sy 2, ss. 105-112, 2015, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen/issue/57124/805980

[10] M. Türkeş, M. T. Turp, N. An, T. Öztürk, ve M. L. Kurnaz, "Impacts of Climate Change on Precipitation Climatology and Variability in Turkey", içinde *Water Resources of Turkey*, N. B. Harmancioglu ve D. Altinbilek, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2020, ss. 467-491. doi: 10.1007/978-3-030-11729-0_14.

[11] M. Pınarlık, A. İbiş, ve Z. Selek, "İklim Değişikliği Etkisi Altında Burdur Gölü Su Seviyesi Değişimlerinin İstatistiksel Olarak İncelenmesi", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, c. 11, sy 1, ss. 81-93, 2023, doi: 10.21923/jesd.1144586.

[12] İ. Yüksel, M. Sandalcı, G. Çeribaşı, ve Ö. Yüksek, "Küresel Isınma Ve İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkileri", 2011, *Trabzon*.

[13] N. Usul, *Mühendislik Hidrolojisi*. Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayınları ve İletişim A.Ş., 2009.

[14] TEMA, "Suyun Geleceği - İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkisi", 2025. Erişim: 12 Nisan 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://sutema.org/media/zh4d0smr/suyun-gelecegi.pdf

[15] E. Tunalı, "Silivri'de arazi kullanımı, mekansal değişim ve geleceğe yönelik modelleme", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2023.

[16] E. Şengün, "Arazi Örtüsü - Arazi Kullanımı Değişikliğinin Yer Yüzey Sıcaklığına Etkisinin Landsat Görüntüleri Ve Google Earth Engıne Platformu Kullanımıyla Uzun Vadeli İzlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2022.

[17] H. Lafçı, "Uzaktan Algılama Ve Fotogrametri Kullanılarak Taşlık Alanların Ekonomik Potansiyellerinin Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 2024.

[18] H. Clarke, "Conserving Biodiversity in the Face of Climate Change", *Agenda: A Journal of Policy Analysis and Reform*, c. 14, sy 2, ss. 157-170, 2007, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: http://www.jstor.org/stable/43199485

[19] H. N. Bayraç ve E. Doğan, "Türkiye'de İklim Değişikliğinin Tarım Sektörü Üzerine Etkileri", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, c. 11, sy 1, ss. 23-48, 2016, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/oguiibf/issue/56479/785160

[20] İ. Köse, "İklim Değişikliği Müzakereleri: Türkiye'nin Paris Anlaşması'nı İmza Süreci", *Ege Stratejik Araştırmalar Dergisi*, c. 9, sy 1, ss. 55-81, 2018, doi: 10.18354/esam.329348.

[21] N. İsak, "Aşağı Kelkit Havzası'nda Arazi Kullanımı Haritalarının Makine Öğrenme Algoritmalarıyla Hazırlanması Ve Gelecek (2030-2050) Arazi Kullanım Projeksiyonlarının Oluşturulması", Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat, 2023.

[22] G. Keçeli, "Arazi Kullanımı Ve Arazi Örtüsü Değişiminin Uzaktan Algılama Verileri ve Yapay Sinir Ağları Yöntemleriyle Modellenmesi (İzmit Örneği)", Yüksek Lisans Tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çankırı, 2022.

[23] D. Maktav, E. F. S., ve C. and Jürgens, "Remote sensing of urban areas", *Int J Remote Sens*, c. 26, sy 4, ss. 655-659, Şub. 2005, doi: 10.1080/01431160512331316469.

[24] G. Akın, "Küresel Isınma, Nedenleri Ve Sonuçları", *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, c. 46, sy 2, ss. 29-43, 2006, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.cevreorman.gov.tr/

[25] H. Oğuz ve N. Bozali, "Gaziantep Kentinde 2040 Yılına Kadar Oluşabilecek Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü Değişiminin Tahmini", *J Agric Sci (Belihuloya)*, c. 20, sy 1, ss. 83-101, 2014, doi: 10.15832/tbd.77489.

[26] F. A. Canpolat ve D. Dağlı, "Elazığ İli'nde Arazi Kullanımı Değişimi (2006-2018) Ve Simülasyonu (2030)", *International Journal of Geography and Geography Education*, sy 42, ss. 702-723, 2020, doi: 10.32003/igge.746668.

[27] J. Wang, M. Bretz, M. A. A. Dewan, ve M. A. Delavar, "Machine learning in modelling land-use and land cover-change (LULCC): Current status, challenges and prospects", *Science of The Total Environment*, c. 822, s. 153559, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153559.

[28] A. A. Kafy *vd.*, "Cellular Automata approach in dynamic modelling of land cover changes using RapidEye images in Dhaka, Bangladesh", *Environmental Challenges*, c. 4, Ağu. 2021, doi: 10.1016/j.envc.2021.100084.

[29] S. Y. Görentaş, "Mersin-Tarsus-Adana Hattında Şehirleşmenin Mekânsal Yapılanması Ve Markov Chaın Modeliyle Arazi Kullanım Senaryolarının Üretilmesi", Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2021.

[30] O. S. Yılmaz, F. Gülgen, R. Güngör, ve F. Kadı, "Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Uzaktan Algılama Teknikleri İle Arazi Kullanım Değişiminin İncelenmesi, Köprübaşı İlçesi Örneği", *Geomatik*, c. 3, sy 3, ss. 233-241, 2018, doi: 10.29128/geomatik.410987.

[31] A. F. Koko, W. Yue, G. A. Abubakar, R. Hamed, ve A. A. N. Alabsi, "Monitoring and predicting spatio-temporal land use/land cover changes in Zaria City, Nigeria, through an integrated cellular automata and markov chain model (CA-Markov)", *Sustainability (Switzerland)*, c. 12, sy 24, ss. 1-21, Ara. 2020, doi: 10.3390/su122410452.

[32] R. Toplu, "Arazi Kullanımının Zamansal ve Konumsal Değişiminin Markov Zincirleri İle Modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu, 2024.

[33] S. W. Wang, B. M. Gebru, M. Lamchin, R. B. Kayastha, ve W. K. Lee, "Land use and land cover change detection and prediction in the kathmandu district of nepal using remote sensing and GIS", *Sustainability (Switzerland)*, c. 12, sy 9, May. 2020, doi: 10.3390/su12093925.