



Süleyman Demirel Üniversitesi *YEKARUM e-DERGİ* *(Journal of YEKARUM)*

Cilt 10, Sayı 1, 46-60, 2025
E - ISSN:1309-9388



Taşıt ve Endüstri Kaynaklı Hava Kirleticilerinin Atmosferik Taşınımı ve Partikül Madde Dağılımlarının Model Temelli Değerlendirilmesi

Muhammet Yunus PAMUKOĞLU ^{1*}, Burcu ATAY ²

^{1*} Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye (ORCID: 0000-0003-3337-0860), yunuspamukoglu@sdu.edu.tr

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-2072-1804), burcuatay@sdu.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 13/05/2025 ve Kabul Tarihi 26/05/2025)

(DOI: 10.71208/yekarum.1698734)

ÖZET:

Bu çalışma, taşıt ve endüstri kaynaklı hava kirleticilerinin atmosferdeki taşınım süreçlerini ve partikül madde (PM₁₀: 10 mikrometreden küçük parçacıklar, PM_{2.5}: 2.5 mikrometreden küçük parçacıklar) dağılımlarını model temelli bir yaklaşımla değerlendirmektedir. Hava kalitesi modelleme çalışmaları, kirleticilerin yayılım dinamiklerinin anlaşılması, etkili kontrol stratejilerinin geliştirilmesi ve çevresel karar süreçlerinin desteklenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda, HYSPLIT (Hibrit Tek Parçacıklı Lagrangian Bütünleşik İz Sürme Modeli), AERMOD (Amerikan Meteoroloji Derneği / EPA Regülasyon Modeli), CALPUFF (Kaliforniya Puff Modeli) ve CMAQ (Çok Ölçekli Topluluk Hava Kalitesi Modeli) gibi önde gelen atmosferik modelleme araçları, teorik yapılarına, çözüm yöntemlerine ve uygulama potansiyellerine göre karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Model seçiminde veri erişimi, emisyon kaynağının niteliği, çalışma ölçeği, kullanıcı kabiliyeti ve bölgesel koşullar gibi çeşitli faktörlerin belirleyici olduğu vurgulanmıştır. Isparta ili özelinde yapılan değerlendirme ile, yerel topografya, meteorolojik yapı ve kaynak dağılımına göre model uygulanabilirliği tartışılmış; mevcut veri sınırlılıkları ve potansiyel çözüm önerileri ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, partikül madde kirliliğinin modellenmesinde uygun model seçiminin, yerel çevre yönetimi ve hava kalitesi iyileştirme stratejileri açısından önemli katkılar sunabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: AERMOD, Atmosferik Taşınım, CALPUFF, CMAQ, Hava Kalitesi Modellemesi, HYSPLIT, Isparta Bölgesel Değerlendirme, Partikül Madde (PM₁₀, PM_{2.5})

Model-Based Evaluation of Atmospheric Transport and Particulate Matter Distributions of Vehicle- and Industry-Originated Air Pollutants

ABSTRACT

This study evaluates the atmospheric transport processes of air pollutants originating from vehicles and industrial activities, as well as the distribution of particulate matter (PM₁₀: particles with aerodynamic diameters less than 10 micrometers, PM_{2.5}: particles smaller than 2.5 micrometers), using a model-based approach. Air quality modeling plays a critical role in understanding the dispersion dynamics of pollutants, developing effective control strategies, and supporting environmental decision-making processes. In this context, prominent atmospheric modeling systems such as HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), AERMOD (American Meteorological Society/EPA Regulatory Model), CALPUFF (California Puff Model), and CMAQ (Community Multiscale Air Quality Model) are comparatively examined based on their theoretical frameworks, solution methodologies, and application capabilities. Key factors affecting model selection, including data availability, emission source characteristics, study scale, user expertise, and regional context, are emphasized. A regional case assessment specific to the city of Isparta is presented, analyzing the applicability of different models in terms of local topography, meteorological structure, and emission distribution. Identified data limitations and proposed solutions are also discussed. The results reveal that selecting an appropriate model significantly contributes to the effective assessment of particulate matter pollution and provides practical insights for improving local air quality management and strategy development.

Keywords: *Air Quality Modeling, Atmospheric Transport, CALPUFF, CMAQ, HYSPLIT, AERMOD, Particulate Matter (PM₁₀, PM_{2.5}), Regional Assessment (Isparta)*

1. GİRİŞ

Hava kirliliği, atmosferde bulunan zararlı gazlar, kimyasal bileşikler ve partikül maddelerin doğal dengeyi bozacak şekilde artış göstermesiyle ortaya çıkan, hem yerel hem de küresel ölçekte çevresel, ekolojik ve toplumsal sonuçlar doğuran önemli bir problemdir [1], [2]. Sanayileşme, hızlı kentleşme ve motorlu taşıt kullanımındaki artışla birlikte, özellikle büyük ve orta ölçekli kentlerde hava kalitesi ciddi şekilde bozulmakta; bu durum, insan sağlığını tehdit ettiği kadar, bitki örtüsü ve doğal yaşam üzerinde de geri dönüşü zor etkiler bırakmaktadır [3], [4], [5]. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Avrupa Çevre Ajansı (EEA) tarafından yayınlanan son raporlar, partikül madde kaynaklı hava kirliliğinin her yıl milyonlarca erken ölümle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır [6], [7]. Günümüzde hava kirliliğinin başlıca kaynakları arasında fosil yakıt kullanan ulaşım araçları ve enerji-yoğun endüstriyel tesisler yer almaktadır [8], [9]. Bu kaynaklardan atmosfere yayılan başlıca kirleticiler arasında kükürt

dioksit (SO_2), azot oksitler (NO_x), karbon monoksit (CO), uçucu organik bileşikler (VOC’ler) ve partikül maddeler (PM_{10} ve $\text{PM}_{2.5}$) bulunmaktadır. Partikül maddeler, sadece kimyasal içerikleri ile değil; aynı zamanda atmosferde uzun süre askıda kalabilmeleri, farklı bölgelerde taşınıp çökerek kirleticiler etkililerini geniş alanlara yaymaları ve çeşitli atmosferik süreçlerle kimyasal dönüşüme uğrayabilmeleri nedeniyle özel olarak ele alınmalıdır [8], [10]. PM_{10} ve $\text{PM}_{2.5}$, büyüklükleri nedeniyle solunum sistemine nüfuz ederek akciğer dokusuna kadar ulaşabilmekte ve özellikle kronik solunum yolu hastalıkları, kardiyovasküler rahatsızlıklar ve bağışıklık sistemi zayıflamalarıyla ilişkilendirilmektedir [11]. Bunun yanında, bu parçacıkların bitki yaprakları üzerine birikmesi sonucu gaz alışverişinin ve fotosentez süreçlerinin engellenmesi; stomal tıkanmalar ve yaprak yüzeyinde fiziksel hasarların oluşması gibi etkiler nedeniyle tarımsal üretkenlik ve doğal flora da olumsuz etkilenmektedir [5], [12]. Ek olarak, partikül maddeler atmosferde ışık geçirgenliğini azaltarak fotokimyasal süreçleri etkileyebilmekte, asit yağmurlarına zemin hazırlayabilmekte ve genel iklim dengesine doğrudan etki edebilmektedir [13], [14]. Bu derece karmaşık ve çok boyutlu etkiler içeren partikül madde kirliliği, yalnızca fiziksel gözlemler veya lokal ölçümler ile tam anlamıyla analiz edilememektedir. Kirleticilerin kaynaktan atmosfere yayılma, taşınma, seyreltme ve çökme süreçlerini anlayabilmek için matematiksel ve sayısal modelleme araçlarına ihtiyaç duyulmaktadır [15]. Atmosferik taşınım modelleri, bu ihtiyaca yanıt olarak geliştirilmiş; farklı coğrafi koşullarda, çeşitli emisyon senaryoları altında hava kalitesinin bilimsel temelde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır [16], [17]. Bu modeller sayesinde belirli bir bölgede kirleticiler kaynakların etkileri öngörülebilme, sınır ötesi taşınım analizleri yapılabilme ve çevre yönetimi kararları daha sağlam bilimsel temellere dayandırılabilir [18].

Bu çalışmanın amacı, taşıt ve endüstri kaynaklı hava kirleticilerinin atmosferdeki taşınım süreçlerini ve özellikle partikül madde (PM_{10} ve $\text{PM}_{2.5}$) dağılımlarını model temelli bir bakış açısıyla değerlendirmektir. Bu kapsamda, hava kalitesi modelleme araçlarının kuramsal dayanakları ve çözüm yaklaşımları incelenecek; HYSPLIT, AERMOD, CALPUFF ve CMAQ gibi önde gelen modellerin farklı koşullardaki performansları literatür ışığında karşılaştırmalı olarak ele alınacaktır. Ayrıca, Türkiye özelinde Isparta ili gibi orta büyüklükteki kentlerde model uygulamalarına dair veri altyapısı, topografik özellikler ve saha sınırlılıkları dikkate alınarak bölgesel uygulanabilirlik analizleri yapılacaktır. Böylece, bu çalışma yalnızca model karşılaştırması değil, aynı zamanda yerel çevre politikaları açısından da yönlendirici olabilecek bilimsel bir zemin sunmayı hedeflemektedir.

2. ATMOSFERİK TAŞINIM SÜREÇLERİNİN TEORİK TEMELLERİ

Atmosferdeki kirleticilerin dağılımı, yalnızca kaynağın özelliklerine değil, aynı zamanda atmosferik hareketliliği yönlendiren fiziksel ve kimyasal süreçlere bağlı olarak şekillenmektedir [19]. Bu süreçlerin başında adveksiyon, difüzyon, çökeltme ve kimyasal dönüşüm yer almaktadır [20]. Bu etkileşimli mekanizmalar, hava kalitesi modelleme çalışmalarının temelini oluşturan matematiksel yapıların belirleyicileridir. Adveksiyon, kirleticilerin rüzgâr gibi yönlü atmosferik hareketlerle taşınmasını ifade eder. Bu süreç, kirleticilerin kısa sürede büyük mesafeler kat edebilmesini mümkün kılar. Özellikle sınır ötesi taşınım olaylarının modellenmesinde kritik bir rol oynar. Difüzyon ise atmosferik türbülans etkisiyle kirleticilerin daha küçük ölçekli, rastlantısal hareketlerle yayılmasını ifade eder. Adveksiyon genellikle belirli bir yön ve hızla gerçekleşirken, difüzyon daha düzensiz ve lokal düzeyde yayılma sürecini temsil eder.

Çökeltme süreçleri, partikül maddelerin atmosferden yer yüzeyine geçişini kapsar. Kuru çökeltme, partiküllerin yerçekimi etkisiyle doğrudan yüzeylere taşınmasını ifade ederken; ıslak çökeltme, yağmur veya kar gibi yağışlarla taşınım sonucu oluşur [21]. Bu süreçler, kirleticilerin ortamdan uzaklaştırılması kadar, yer yüzeyine ulaşan konsantrasyonlar açısından da büyük öneme sahiptir. Kimyasal dönüşüm süreçleri ise atmosferdeki kirleticilerin fotokimyasal reaksiyonlarla başka bileşiklere dönüşmesini içerir. Bu dönüşümler, özellikle PM_{2.5} gibi ikincil partikül maddelerin oluşumunda belirleyici olmaktadır. Bu süreçleri ifade etmek üzere hava kalitesi modellerinde en sık kullanılan fiziksel çerçeve adveksiyon-difüzyon denklemidir. Bu denklem şu şekilde tanımlanır [22]:

$$\partial C / \partial t + u \cdot \nabla C = \nabla \cdot (K \nabla C) + S - R$$

Burada;

- C: Kirleticinin konsantrasyonu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$),
- u: Ortalama rüzgâr vektörü (m/s),
- K: Türbülans difüzyon katsayısı (m^2/s),
- S: Emisyon kaynağından gelen katkı,
- R: Kimyasal reaksiyonlar, çökeltme gibi kayıpları temsil eder.

Bu denklem hem Eulerian hem de Lagrangian modelleme yaklaşımlarının temelini oluşturur. Eulerian yaklaşım, sabit bir gözlem noktasında zamana bağlı konsantrasyon değişimini esas alırken; Lagrangian yaklaşım ise atmosferde hareket eden partiküllerin veya hava kütlelerinin izlenmesine dayanır. Eulerian modeller genellikle sabit ızgara sisteminde

çalışırken, Lagrangian modeller partikülleri “takip eder” ve rüzgâr alanı içinde serbestçe hareket ettirir [22].

Bu iki yaklaşım arasında model seçimini etkileyen temel farklar şunlardır:

- Eulerian modeller (örneğin CMAQ), kimyasal reaksiyonları ve bölgesel ölçekte dağılımı daha iyi simüle ederken;
- Lagrangian modeller (örneğin HYSPLIT), taşınım yönü ve kaynağa geri izleme gibi konularda daha esnek çözümler sunar [23], [24].

Atmosferik Sınır Tabaka (ABL) ise bu modellerin başarımını etkileyen en kritik meteorolojik parametrelerden biridir. Yer yüzeyinden itibaren yaklaşık ilk 1–2 kilometrelik atmosfer tabakası olan ABL, yüzeyle atmosfer arasındaki enerji ve kütle alışverişinin gerçekleştiği alandır. Gündüzleri artan güneş ışınlımlıyla karışım yüksekliği artar, bu da kirleticilerin daha fazla seyrelmesine yol açar. Gece ise yüzey soğumasına bağlı olarak kararlı sınır tabakası oluşur ve kirleticiler birikimi artar. Modellerin bu sınıf geçişlerine duyarlılığı, sonuçların doğruluğu açısından büyük önem taşır. Son olarak, partikül maddelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri de model tercihinde etkili olmaktadır [25].

3. HAVA KALİTESİ MODELLEMESİNDE KULLANILAN YAYGIN SİSTEMLER

Atmosferik taşınım ve hava kalitesi modelleme çalışmaları, kirleticilerin yayılım dinamiklerini anlamak, önlem geliştirmek ve çevre politikalarını yönlendirmek açısından vazgeçilmez araçlardır [26]. Bu amaçla geliştirilen sayısal modeller, farklı mekânsal ve zamansal çözünürlüklerde çalışmakta; kaynak özellikleri, meteorolojik koşullar ve topografik yapı gibi çok sayıda değişkeni dikkate alarak partikül madde konsantrasyonlarını simüle etmektedir. Bu bölümde, dünya genelinde yaygın olarak kullanılan dört temel model sistemi olan HYSPLIT, AERMOD, CALPUFF ve CMAQ yapısal özellikleri ve uygulama potansiyelleri bağlamında değerlendirilmektedir [24], [27], [28].

3.1. HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)

HYSPLIT, Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration) Air Resources Laboratory tarafından geliştirilen ve Lagrangian yaklaşımı temel alan bir atmosferik taşınım modelidir [24]. Model, bireysel parçacıkların üç boyutlu atmosferik rüzgâr alanlarında adveksiyon ve türbülansla hareketini izler. HYSPLIT’in en belirgin avantajı, NOAA’nın sağladığı küresel meteorolojik

veri setleriyle doğrudan entegre çalışabilmesi ve düşük işlem gücüyle yüksek verim sağlayan kullanıcı dostu bir yapıya sahip olmasıdır [29]. Bu model hem ileri (forward) hem de geri (backward) yönlü taşınım izleme özelliğine sahiptir. Özellikle sınır ötesi hava kirliliği, volkanik kül bulutları, yangın dumanı taşınımı ve radyoaktif serpinti analizleri gibi senaryolarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaynağa geri izleme kapasitesi sayesinde ölçülen bir kirleticinin potansiyel çıkış noktası belirlenebilir, bu da çevresel olayların analizinde etkili bir karar destek mekanizması sunar [30].

3.2. AERMOD (American Meteorological Society/EPA Regulatory Model)

AERMOD, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından regülasyonlarda standart model olarak kabul edilen Gaussian plume temelli kısa mesafeli dağılım modelidir. Sabit kaynaklı emisyonların (örneğin sanayi bacaları) yatay ve dikey yönlü dağılımını simüle etmede yaygın olarak kullanılmaktadır [31]. Model, atmosferik sınır tabaka koşullarını dikkate alarak rüzgâr hızı, baca yüksekliği, karışım yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerle yer düzeyindeki kirleticiler konsantrasyonlarını hassas biçimde hesaplar. AERMOD’un güçlü yönlerinden biri, düzenleyici kurumlar tarafından onaylanmış olması ve standartlaştırılmış meteorolojik ön işlemeçiler (AERMET) ile birlikte kullanılabilmesidir. Ancak, modelin doğruluğu meteorolojik veri çözünürlüğüne ve saha emisyon envanterinin detaylılığına bağlıdır [32].

3.3. CALPUFF (California Puff Model)

CALPUFF, zamana bağlı meteorolojik değişimleri ve karmaşık arazi koşullarını dikkate alan Lagrangian temelli bir "puff" modelidir[33]. Diğer modellerden farklı olarak, hava kütlelerini zaman içinde parçacık bulutları (puff) halinde izleyerek taşıyan bu sistem, özellikle dağlık, kıyı şeridi gibi değişken topografyaya sahip alanlarda üstün performans sergilemektedir. CALPUFF, değişken rüzgâr alanları, sıcaklık gradyanları ve deniz karasal geçişlerinin olduğu bölgelerde AERMOD’a göre daha gerçekçi sonuçlar verebilir. Ancak bu avantajlarının yanında, yüksek çözünürlüklü meteorolojik veri setlerine ve ön işlemci yazılımlara (örneğin CALMET) olan ihtiyacı nedeniyle kullanım süreci daha karmaşık ve zaman alıcıdır [34].

3.4. CMAQ (Community Multiscale Air Quality Model)

CMAQ, kimyasal dönüşüm süreçlerini de içeren Eulerian temelli bir modelleme sistemidir [35]. ABD EPA tarafından geliştirilen bu model; gaz-fazı reaksiyonları, aerosoller, fotokimyasal dönüşümler, depozisyon ve ikincil partikül oluşumu gibi çoklu süreçleri entegre bir yapıda çözümleyebilir. Bu özelliği sayesinde, bölgesel ölçekte hava kalitesi tahmini ve çevresel etki değerlendirmeleri için güçlü bir araçtır. CMAQ, yüksek çözünürlüklü meteorolojik veriler (örneğin WRF modeli çıktıları) ile entegre çalışarak PM_{2.5} gibi ikincil kirleticilerin zaman ve mekân içindeki dağılımını detaylı biçimde simüle edebilir. Özellikle iklim-etkileşimli hava kalitesi senaryolarının test edilmesinde ve politika analizlerinde tercih edilmektedir [36].

4. MODEL SEÇİMİNDE ETKİLİ FAKTÖRLER

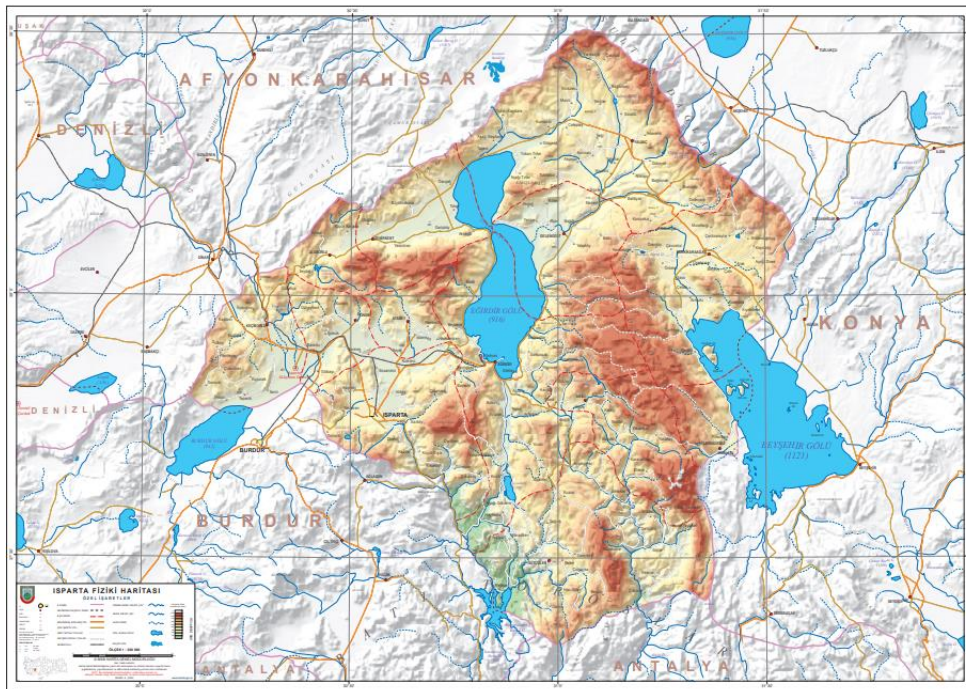
Atmosferik taşınım modelleri, hava kirleticilerinin dağılımını öngörmek amacıyla geliştirilen güçlü araçlar olmakla birlikte, modelleme sürecinin başarısı büyük ölçüde modelin seçiminde dikkate alınan faktörlere bağlıdır[37]. Modelin uygunluğu, çalışmanın amacına, coğrafi bağlamına, veri altyapısına ve kullanıcı yeterliliğine göre değişkenlik göstermektedir. Bu bölümde, model seçimini etkileyen temel faktörler sistematik olarak ele alınmaktadır. Her modelin doğru ve güvenilir sonuçlar üretebilmesi için yüksek kalitede meteorolojik veri ile beslenmesi gerekmektedir[38]. Modellerin çoğu, rüzgâr hızı ve yönü, sıcaklık, bağıl nem, karışım yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü gibi girdilere ihtiyaç duyar. HYSPLIT gibi modeller, NOAA gibi küresel meteorolojik veri tabanlarına doğrudan entegre çalışarak veri erişimini kolaylaştırırken; AERMOD ve CALPUFF gibi modellerin performansı, saha temelli yüksek çözünürlüklü veri setlerinin varlığına bağlıdır[32], [33], [35]. Türkiye özelinde, bu veriler genellikle sınırlı sayıda gözlem istasyonundan sağlandığı için çözünürlük eksiklikleri model hassasiyetini düşürebilmektedir.

Model tercihinde, kirletici kaynakların tipi (noktasal, alansal, hacimsel) ve yayılım karakteristiği büyük öneme sahiptir. Sabit ve yüksek bacalı endüstriyel kaynaklar için AERMOD gibi Gaussian temelli modeller uygunluk gösterirken; hareketli kaynaklar (örneğin taşıt trafiği) veya dağlık arazi koşullarında değişken rüzgâr alanlarına sahip bölgeler için Lagrangian yapıya sahip CALPUFF veya HYSPLIT tercih edilebilir [29]. Ayrıca kimyasal dönüşüm süreçlerinin önemli olduğu durumlarda CMAQ gibi Eulerian temelli modeller daha uygun sonuçlar verir. Modelin kapsayacağı coğrafi ölçek de seçimde belirleyicidir[23]. Lokal ölçekte kısa mesafeli analizler için AERMOD yeterli olurken; orta ölçekli bölgesel taşınım

çalışmaları için HYSPLIT veya CALPUFF, kıtasal düzeyde senaryo bazlı hava kalitesi projeksiyonları için ise CMAQ daha uygundur. Isparta gibi orta büyüklükteki kentlerde, hem lokal hem de bölgesel etkilerin aynı anda analiz edilebileceği modellerin (örneğin CALPUFF) tercih edilmesi önerilebilir. Modelleme araçlarının teknik altyapısı kadar kullanıcıya sunduğu erişilebilirlik ve arayüz kolaylığı da önemlidir. HYSPLIT’in NOAA üzerinden sunulan çevrimiçi platformu kullanıcı dostu bir deneyim sunarken; CALPUFF ve CMAQ gibi sistemlerin kurulumu, veri formatlama süreçleri ve çalıştırılması ileri düzey yazılım ve hesaplama bilgisi gerektirir. AERMOD ise arayüz destekli yazılımlarla orta düzeyde kullanıcılar için erişilebilir hâle gelmiştir [32]. Özellikle kamu kurumları ve üniversiteler bünyesinde yürütülen projelerde, kullanıcı eğitimi ve teknik destek olanakları model seçimini doğrudan etkilemektedir.

5. ISPARTA ÖRNEĞİ VE BÖLGESEL DEĞERLENDİRME

Isparta ili, Türkiye’nin Akdeniz Bölgesi’nde yer alan ve Göller Yöresi olarak bilinen coğrafi kuşakta konumlanmış, topografik açıdan karmaşık yapıya sahip bir yerleşim merkezidir [39]. Yüzölçümünün yaklaşık %68’ini dağlık alanlar oluştururken, ortalama rakım 1050 metre civarındadır. Isparta ilinin topoğrafik özelliklerini yansıtan fiziki haritası Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Isparta fiziki il haritası (<https://www.harita.gov.tr>)

Bu topografik yapı, atmosferik taşınım süreçlerinde rüzgâr yönü, türbülans yapısı ve karışım yüksekliği gibi meteorolojik parametrelerin mekânsal olarak çeşitlenmesine neden olmaktadır. İl genelinde hâkim rüzgâr yönü kuzeydoğu – güneybatı ekseninde olup, kış aylarında termik inversiyon olaylarının sık yaşandığı bilinmektedir. Bu durum, özellikle soğuk havalarda kirleticilerin yer seviyesinde birikmesine yol açmakta ve hava kalitesi üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Isparta’daki başlıca emisyon kaynakları arasında şehir içi taşıt trafiği, merkezi ısıtma sistemleri, küçük ölçekli sanayi tesisleri ve yapılaşmanın etkisiyle artan toz yayılımı yer almaktadır. Özellikle Eğirdir Yolu, İstanbul Yolu ve Koçtepe gibi alanlarda hem endüstriyel faaliyetlerin hem de yoğun araç trafiğinin etkili olduğu görülmektedir. Buna karşın, ilin bazı bölgeleri (örneğin Ayazmana) hem trafik hem de sanayi kaynaklarından görece uzakta yer almakta ve kontrol noktası olarak değerlendirilmeye uygun konumlar sunmaktadır. Bu çeşitlilik, modelleme çalışmaları açısından farklılaştırılmış senaryolar üretmek adına önemli bir avantaj sağlamaktadır. Model seçimi açısından değerlendirildiğinde, Isparta’nın orta ölçekli ve yarı-kentsel yapısı, hem HYSPLIT hem de AERMOD modelleri için uygun koşullar sunmaktadır. HYSPLIT, NOAA tabanlı meteorolojik veri setlerini kullanarak özellikle bölgesel taşınımın ve kaynak geri izleme analizlerinin yapılmasında öne çıkmaktadır. Düşük işlem gücü ihtiyacı ve kullanıcı dostu arayüzü, saha temelli veri eksikliklerinin olduğu durumlarda önemli bir alternatif sunar. Öte yandan, AERMOD modeli, sabit kaynaklardan yayılan emisyonların kısa mesafeli yayılımını incelemek ve yer düzeyindeki konsantrasyonları tahmin etmek için uygundur. Özellikle sanayi kaynaklı sabit emisyonlar için yapılacak analizlerde, AERMOD’un meteorolojik ön işlemcilerle desteklenmiş çözüm algoritması daha detaylı çıktılar sağlayabilmektedir. Yerel hava kalitesi yönetimi açısından, bu modellerin bölgesel düzeyde uygulanabilirliği oldukça yüksektir. Isparta gibi gelişmekte olan şehirlerde, partikül madde kirliliği büyük oranda yakıt kalitesi, ısıtma sistemleri ve trafik kaynaklıdır. Bu bağlamda yapılacak modelleme çalışmaları, stratejik kirlilik haritalarının oluşturulması, emisyon azaltım senaryolarının test edilmesi ve yerel karar vericilere yol gösterici analizlerin sunulması açısından kritik rol oynamaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde artan kentleşme, sanayileşme ve motorlu taşıt kullanımı, hava kirliliğini hem çevresel hem de halk sağlığı açısından daha karmaşık ve çok boyutlu bir sorun hâline getirmiştir. Özellikle partikül madde (PM₁₀ ve PM_{2.5}) gibi yaygın kirleticiler, hem doğrudan insan sağlığını tehdit etmekte hem de bitki örtüsü ve ekosistemler üzerinde uzun vadeli etkiler oluşturmaktadır [5]. Bu çalışmada detaylı biçimde ele alındığı üzere, taşıt ve endüstri kaynaklı kirleticilerin atmosferdeki taşınım süreçlerinin modellenmesi, yalnızca mevcut durumu analiz etmekle kalmayıp aynı zamanda çevresel karar mekanizmalarının bilimsel temellere oturtulmasına olanak tanımaktadır. Hava kalitesi modelleme sistemleri arasında HYSPLIT, AERMOD, CALPUFF ve CMAQ gibi farklı düzeyde yapılar sunan modellerin her biri belirli kullanım senaryolarında avantajlı yönler taşımaktadır. HYSPLIT, düşük veri ihtiyacı ve geriye dönük taşınım analizleriyle özellikle saha verisi sınırlı bölgelerde öne çıkarken; AERMOD, sabit kaynaklı emisyonların kısa mesafeli dağılımını simüle etmekte oldukça başarılıdır. CALPUFF, karmaşık topografyalarda esnekliği ile dikkat çekerken, CMAQ gibi modeller kimyasal dönüşüm süreçleri ve ikincil partikül oluşumu açısından yüksek çözünürlüklü bölgesel analizler sunar. Ancak, bu modellerin her biri veri ihtiyacı, hesaplama gücü, yazılım erişimi ve kullanıcı deneyimi açısından çeşitli sınırlılıklar da içermektedir. Model tabanlı yaklaşımlar, yalnızca akademik düzeyde değil, aynı zamanda politika yapımcılar, yerel yönetimler ve çevre yönetimi otoriteleri açısından da büyük önem taşımaktadır. Doğru seçilmiş bir modelle elde edilen hava kirliliği dağılım haritaları, hangi bölgelerde hangi tür kirliliğin yoğunlaştığını gösterebilir, böylece kaynak odaklı önleyici stratejiler geliştirilebilir. Aynı şekilde, hava kalitesi yönetim planlarında veya yeni sanayi alanlarının planlanmasında model destekli karar verme süreçleri hem zamandan hem de kaynaklardan tasarruf sağlar. Bu bağlamda, hava kirliliğiyle mücadelede reaktif yaklaşımlardan proaktif ve öngörüye dayalı uygulamalara geçişin anahtarı, modelleme destekli çevre yönetimidir. Geleceğe dönük olarak, hava kalitesi modellerinin daha etkin, esnek ve karar destek sistemleriyle entegre çalışabilmesi için bazı gelişmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunların başında yapay zekâ (AI) destekli model öğrenme sistemleri, yüksek uzamsal ve zamansal çözünürlük sağlayan veri setlerinin geliştirilmesi, farklı modellerin hibrit şekilde entegre edilmesi ve bulut tabanlı hesaplama altyapılarının yaygınlaştırılması gelmektedir. Örneğin, makine öğrenmesi algoritmaları yardımıyla eksik meteorolojik verilerin tamamlanması veya model çıktılarının doğruluk seviyelerinin optimize edilmesi mümkün hâle gelmektedir. Sonuç olarak, taşıt ve endüstri

kaynaklı partikül madde kirliliğinin modellenmesi, hem bilimsel araştırmalar hem de çevresel politika geliştirme süreçleri açısından stratejik önemdedir. Model seçimi, uygulama alanı, veri kalitesi ve hedef çıktılar doğrultusunda titizlikle yapılmalı; yerel ve ulusal düzeyde veri altyapısı, teknik kapasite ve disiplinler arası iş birlikleri güçlendirilerek modelleme uygulamalarının yaygınlaştırılması sağlanmalıdır.

Teşekkür

Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2022-8791 numaralı proje kapsamında sağlanan mali destekle gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde yürütülen doktora tezi kapsamında hazırlanmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Çalışma, araştırma ve yayın etiğine uygundur.

KAYNAKLAR

- [1] K. Krishnan *et al.*, “Public Perception of Air Pollution in Malaysia Before and After Movement Control Order: A Case Study,” *Nat Eng Sci*, vol. 10, no. 1, pp. 14–30, Apr. 2025, doi: 10.28978/nesciences.1523895.
- [2] E. Fazakas, I. A. Neamtii, and E. S. Gurzau, “Health effects of air pollutant mixtures (volatile organic compounds, particulate matter, sulfur and nitrogen oxides) – a review of the literature,” *Rev Environ Health*, vol. 39, no. 3, pp. 459–478, Sep. 2024, doi: 10.1515/reveh-2022-0252.
- [3] Z. Li, K. Zhao, X. Yuan, Y. Zhou, L. Yang, and H. Geng, “Evolution and Control of Air Pollution in China over the Past 75 Years: An Analytical Framework Based on the Multi-Dimensional Urbanization,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 15, no. 9, p. 1093, Sep. 2024, doi: 10.3390/atmos15091093.
- [4] A. Palantzas and V. Beltsiou, “Air pollution and chronic respiratory diseases: A modern challenge for sustainable urban mobility,” *E3S Web of Conferences*, vol. 585, p. 06006, Nov. 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202458506006.

- [5] Burcu ATAY, Bera EL RACEH, and M. Yunus PAMUKOĞLU, “Hava Kirleticilerinin Bitkiler Üzerindeki Etkileri,” in *MÜHENDİSLİKTE ÖNCÜ VE YENİLİKÇİ ÇALIŞMALAR*, Umut ÖZKAYA, Ed., All Sciences Academy, 2024, pp. 176–195.
- [6] D. Schwela, “Particulate Matter Pollution and Health Impacts in Six North African Countries,” *European Journal of Development Studies*, vol. 4, no. 3, pp. 1–22, May 2024, doi: 10.24018/ejdevelop.2024.4.3.350.
- [7] P. Franke, A. C. Lange, B. Steffens, A. Pozzer, A. Wahner, and A. Kiendler-Scharr, “European air quality in view of the WHO 2021 guideline levels: Effect of emission reductions on air pollution exposure,” *Elem Sci Anth*, vol. 12, no. 1, May 2024, doi: 10.1525/elementa.2023.00127.
- [8] G. A. Olah, G. K. S. Prakash, and A. Goeppert, “Anthropogenic Chemical Carbon Cycle for a Sustainable Future,” *J Am Chem Soc*, vol. 133, no. 33, pp. 12881–12898, Aug. 2011, doi: 10.1021/ja202642y.
- [9] M. Rahnema Mobarakeh and T. Kienberger, “Climate neutrality strategies for energy-intensive industries: An Austrian case study,” *Clean Eng Technol*, vol. 10, p. 100545, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100545.
- [10] D. A. Grantz, J. H. B. Garner, and D. W. Johnson, “Ecological effects of particulate matter,” *Environ Int*, vol. 29, no. 2–3, pp. 213–239, Jun. 2003, doi: 10.1016/S0160-4120(02)00181-2.
- [11] S. Esposito *et al.*, “How air pollution fuels respiratory infections in children: current insights,” *Front Public Health*, vol. 13, Apr. 2025, doi: 10.3389/fpubh.2025.1567206.
- [12] F. K. Nkansah, E. J. D. Belford, J. N. Hogarh, A. K. Anim, and S. E. Achoribo, “Photosynthetic Pigments and Heavy Metal Accumulation in Urban Tree Species as Bioindicators of Vehicular Pollution,” Mar. 03, 2025. doi: 10.21203/rs.3.rs-6085946/v1.
- [13] W. Hu *et al.*, “Photochemical Degradation of Organic Matter in the Atmosphere,” *Adv Sustain Syst*, vol. 5, no. 11, Nov. 2021, doi: 10.1002/adsu.202100027.
- [14] D. Vione *et al.*, “Photochemical reactions in the tropospheric aqueous phase and on particulate matter,” *Chem Soc Rev*, 2006, doi: 10.1039/b510796m.
- [15] M. Chin, T. Diehl, P. Ginoux, and W. Malm, “Intercontinental transport of pollution and dust aerosols: implications for regional air quality,” *Atmos Chem Phys*, vol. 7, no. 21, pp. 5501–5517, Nov. 2007, doi: 10.5194/acp-7-5501-2007.
- [16] Afifa, K. Arshad, N. Hussain, M. H. Ashraf, and M. Z. Saleem, “Air pollution and climate change as grand challenges to sustainability,” *Science of The Total Environment*, vol. 928, p. 172370, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.172370.

- [17] J. S. Apte and C. Manchanda, “High-resolution urban air pollution mapping,” *Science* (1979), vol. 385, no. 6707, pp. 380–385, Jul. 2024, doi: 10.1126/science.adq3678.
- [18] H. Achebak *et al.*, “Geographic sources of ozone air pollution and mortality burden in Europe,” *Nat Med*, vol. 30, no. 6, pp. 1732–1738, Jun. 2024, doi: 10.1038/s41591-024-02976-x.
- [19] R. Sivaranjane, P. Senthil Kumar, B. Chitra, and G. Rangasamy, “A critical review on biochar for the removal of toxic pollutants from water environment,” *Chemosphere*, vol. 360, p. 142382, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.142382.
- [20] Zolani Ndlovu, “Turbulent diffusion and air pollution: A comprehensive review of mechanisms, impacts, and modeling approaches,” *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 23, no. 3, pp. 1511–1525, Sep. 2024, doi: 10.30574/wjarr.2024.23.3.2784.
- [21] P. P. Nyayapathi, S. Namuduri, and S. K. Kolli, “A comprehensive review of vertical profiling of ambient air quality-particulate matter and its impacts on climatic & environmental health,” *Air Qual Atmos Health*, Feb. 2025, doi: 10.1007/s11869-025-01697-5.
- [22] D. Buske, M. T. Vilhena, T. Tirabassi, and B. Bodmann, “Air Pollution Steady-State Advection-Diffusion Equation: The General Three-Dimensional Solution,” *J Environ Prot (Irvine, Calif)*, vol. 03, no. 09, pp. 1124–1134, 2012, doi: 10.4236/jep.2012.329131.
- [23] D. Quevedo, K. Do, G. Delic, J. Rodríguez-Borbón, B. M. Wong, and C. E. Ivey, “GPU Implementation of a Gas-Phase Chemistry Solver in the CMAQ Chemical Transport Model,” *ACS ES&T Air*, vol. 2, no. 2, pp. 226–235, Feb. 2025, doi: 10.1021/acsestair.4c00181.
- [24] M. Yunus PAMUKOĞLU and Ali TEKELİ, “İSPARTA İLİNİN EKİM 2020-MART 2021 TARİHLERİ ARASINDAKİ HAVA KALİTE PARAMETRELERİNİN HYSPLIT PROGRAMI İLE MODELLENMESİ,” in *Mühendislik Bilimleri Alanında Yeni Trendler*, Prof. Dr. Birol KILIÇ and Prof. Dr. Gülden BAŞYİĞİT KILIÇ, Eds., Duvar Yayınları, 2022, pp. 399–434.
- [25] L. Canché-Cab, L. San-Pedro, B. Ali, M. Rivero, and M. Escalante, “The atmospheric boundary layer: a review of current challenges and a new generation of machine learning techniques,” *Artif Intell Rev*, vol. 57, no. 12, p. 331, Oct. 2024, doi: 10.1007/s10462-024-10962-5.
- [26] F. Tahir Bahadur, S. Rasool Shah, and R. Rao Nidamanuri, “Air Pollution Monitoring, and Modelling: An Overview,” *Environ Forensics*, vol. 25, no. 5, pp. 309–336, Sep. 2024, doi: 10.1080/15275922.2023.2297437.

- [27] S. Guttikunda, S. K. Dammalapati, and N. KA, “Landscape Review of Air Quality Modeling in India,” *SSRN Electronic Journal*, 2024, doi: 10.2139/ssrn.5004903.
- [28] F. Tahir Bahadur, S. Rasool Shah, and R. Rao Nidamanuri, “Air Pollution Monitoring, and Modelling: An Overview,” *Environ Forensics*, vol. 25, no. 5, pp. 309–336, Sep. 2024, doi: 10.1080/15275922.2023.2297437.
- [29] N. Lichiheb, F. Ngan, and M. Cohen, “Improving the atmospheric dispersion forecasts over Washington, D.C. using UrbanNet observations: A study with HYSPLIT model,” *Urban Clim*, vol. 55, p. 101948, May 2024, doi: 10.1016/j.uclim.2024.101948.
- [30] N. Gammoudi, J. Kovács, F. Gresina, and G. Varga, “Combined use of HYSPLIT model and MODIS aerosols optical depth to study the spatiotemporal circulation patterns of Saharan dust events over Central Europe,” *Aeolian Res*, vol. 67–69, p. 100899, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.aeolia.2024.100899.
- [31] M. Basso Dos Santos, N. Santini Baratto, T. Antunes Kelm, L. Pochmann de Souza, and L. Padilha Thives, “Air quality assessment through AERMOD model: a case study of an asphalt plant in Brazil,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 22, no. 9, pp. 7519–7532, May 2025, doi: 10.1007/s13762-024-06143-0.
- [32] S. H. Mohd Shafie, “Application of AERMOD dispersion model for assessment PM10 concentrations from mobile sources in Kuala Lumpur Metropolitan City, Malaysia,” *Environ Monit Assess*, vol. 196, no. 10, p. 969, Oct. 2024, doi: 10.1007/s10661-024-13088-x.
- [33] M. Li, C. Lo, D. Yang, Y. Li, and Z. Li, “Comparative Study of CALPUFF and CFD Modeling of Toxic Gas Dispersion in Mountainous Environments,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 15, no. 11, p. 1370, Nov. 2024, doi: 10.3390/atmos15111370.
- [34] O. M. Bayraktar and A. Mutlu, “Analyses of industrial air pollution and long-term health risk using different dispersion models and WRF physics parameters,” *Air Qual Atmos Health*, vol. 17, no. 10, pp. 2277–2305, Oct. 2024, doi: 10.1007/s11869-024-01573-8.
- [35] H. Wang *et al.*, “MEIAT-CMAQ: A modular emission inventory allocation tool for Community Multiscale Air Quality Model,” *Atmos Environ*, vol. 331, p. 120604, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.atmosenv.2024.120604.
- [36] T. da Costa, J. Carvalho, R. Pedruzzi, T. Albuquerque, and E. Martins, “Systematic Review of Tropospheric Ozone Modeling Using Community Multiscale Air Quality Model (CMAQ),” *J Braz Chem Soc*, 2024, doi: 10.21577/0103-5053.20240042.

- [37] K. S. Rautela, S. Singh, and M. K. Goyal, “Characterizing the spatio-temporal distribution, detection, and prediction of aerosol atmospheric rivers on a global scale,” *J Environ Manage*, vol. 351, p. 119675, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119675.
- [38] K. S. Rautela, S. Singh, and M. K. Goyal, “Resilience to Air Pollution: A Novel Approach for Detecting and Predicting Aerosol Atmospheric Rivers within Earth System Boundaries,” *Earth Systems and Environment*, vol. 9, no. 1, pp. 93–115, Jan. 2025, doi: 10.1007/s41748-024-00421-0.
- [39] S. Demir, “Determination of suitable agricultural areas and current land use in Isparta Province, Türkiye, through a linear combination technique and geographic information systems,” *Environ Dev Sustain*, vol. 26, no. 5, pp. 13455–13493, Feb. 2024, doi: 10.1007/s10668-023-04359-7.