



Karayolu Ulaşımında Bitkisel Yeşil Dokunun Hava Kalitesine Etkisi

Sezer ÜNAL^{1*} Necla TEKTAŞ² Mehmet TEKTAŞ³

¹Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojileri Ana Bilim Dalı, Bandırma, Türkiye

²Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yöneylem Anabilim Dalı, Bandırma,

³Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojileri Ana Bilim Dalı Başkanı, Bandırma,

Geliş Tarihi: 11.02.2025

Kabul Tarihi: 12.06.2025

Basım Tarihi: 31.07.2025

Atıf yapmak için: Ünal, S., Tektaş, N., & Tektaş, M. (2025). Karayolu Ulaşımında Bitkisel Yeşil Dokunun Hava Kalitesine Etkisi. *Anadolu Çev. Hay. Bil. Derg.*, 10(4), 381-391. <https://doi.org/10.35229/jaes.1637057>

How to cite: Ünal, S., Tektaş, N., & Tektaş, M. (2025). The Effect of Vegetal Green Texture on Air Quality in Highway Transportation. *J. Anatol. Env. Anim. Sci.*, 10(4), 381-391. <https://doi.org/10.35229/jaes.1637057>

*ID: <https://orcid.org/0000-0003-1567-852X>
ID: <https://orcid.org/0000-0002-8190-4532>
ID: <https://orcid.org/0000-0001-9564-8069>

*Sorumlu yazarın:

Sezer ÜNAL
Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi Yapı İşleri
ve Teknik Daire Başkanlığı / Yeni Mahalle
Şehit Astsubay Mustafa Soner Varlık Caddesi
No:7, 10250 Bandırma/Balıkesir, Türkiye.
✉: sunal@bandirma.edu.tr

Öz: Bandırma kent merkezinde karayolu ulaşımından kaynaklanan emisyonların çevresel etkileri incelenmiş ve bu etkileri azaltmada yeşil altyapı uygulamalarının rolü araştırılmıştır. Artan nüfus ve motorlu araç sayısı, kent içinde trafik yoğunluğunu yükselterek hava kalitesini olumsuz etkilemektedir. Çalışmada yerel emisyon kaynakları analiz edilmiş, Bandırma Hava İzleme İstasyonu verilerine göre belirli dönemlerde kirlenici konsantrasyonlarının ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) standartlarını aştığı tespit edilmiştir. Mevcut ulaşım altyapısındaki yeşil doku eksiklikleri, özellikle liman bölgesi ve ana arterlerde, emisyonların birikimine neden olmaktadır. Bu kapsamda yoğun trafik alanlarında yol kenarı bitkilendirme ve yeşil bariyer uygulamalarının hava kirliliğini azaltmadaki etkisi değerlendirilmiştir. EPA emisyon verileri ve (European Monitoring and Evaluation Programme) EMEP/ (Coordination of information on the environment) CORINAIR standartları kullanılarak Bandırma için yaklaşık trafik emisyon envanteri oluşturulmuştur. Ayrıca çok kriterli karar verme yöntemleri (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) TOPSIS ve (Evaluation Based on Distance from Average Solution) EDAS ile Bandırma şartlarına en uygun ağaç türü belirlenmiştir. Değerlendirilen 10 farklı ağaç türü arasında Cedrus Atlantica (Atlas sediri), yüksek kirlenici tutma kapasitesi, düşük bakım ihtiyacı ve uzun ömürlülüğü sayesinde en başarılı tür olarak saptanmıştır. Sonuçlar, yeşil altyapı uygulamalarının Bandırma'daki trafik kaynaklı emisyonları azaltmada kritik önem taşıdığını göstermektedir. Bu doğrultuda, yerel yönetimlere doğru bitki türü seçimi ve stratejik bitkilendirme politikaları benimsemeleri önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Trafik emisyonları; hava kirliliği; yeşil altyapı; çok kriterli karar verme.

The Effect of Vegetal Green Texture on Air Quality in Highway Transportation [*]

Abstract: This study examines the environmental impacts of road transport emissions in Bandırma's city center and explores the role of green infrastructure in mitigating these impacts. The increase in population and number of motor vehicles is intensifying urban traffic and deteriorating air quality. Local emission sources were analyzed, and air quality monitoring data indicate that pollutant levels exceed EPA standards during certain periods. Insufficient green cover in the current transport infrastructure, especially around the port and main arteries, contributes to the accumulation of emissions. In this context, the effectiveness of roadside planting and green barrier applications in high-traffic areas for reducing air pollution was evaluated. Using EPA emission data and EMEP/CORINAIR standards, an approximate traffic emission inventory for Bandırma was calculated. In addition, multi-criteria decision-making methods (TOPSIS and EDAS) were applied to select the most suitable tree species for Bandırma's conditions. Among 10 different species evaluated, Atlas cedar (Cedrus atlantica) emerged as the top-ranked species due to its high pollutant adsorption capacity, low maintenance needs, and longevity. The results show that green infrastructure is critically important for reducing traffic-related emissions in Bandırma. Accordingly, local authorities are recommended to adopt correct plant species selection and strategic roadside planting to improve urban air quality.

Keywords: Traffic emissions, air pollution, green infrastructure, multi-criteria decision making.

GİRİŞ

Modern kentlerde trafik kaynaklı emisyonlar, hava kirliliğinin başlıca nedenlerinden biri olarak öne

çıkılmaktadır. Motorlu taşıtlardan atmosfere salınan karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂), azot oksitler (NO_x), hidrokarbonlar (HC) ve partikül maddeler (PM) gibi kirlenitçiler, çevre ve insan sağlığı üzerinde ciddi tehditler

oluşturmaktadır (Zhang & Wang, 2023; Bourne ve ark., 2018). Söz konusu kirleticiler, iklim değişikliği, asit yağmurları ve ozon tabakasının incilmesi gibi çevresel sorunlara yol açarken; solunum yolu hastalıkları, kalp-damar rahatsızlıkları ve kanser gibi ciddi sağlık problemlerini tetiklemektedir (Fuglestedt ve ark., 2008; Sausen ve ark., 2010). Avrupa Çevre Ajansı'na göre ulaşım sektörü, Avrupa Birliği'nde toplam sera gazı emisyonlarının %23'ünü oluşturmaktadır (Emberger, 2017). Önlem alınmadığı takdirde, karayolu taşımacılığı kaynaklı emisyonların önümüzdeki on yılda %41 oranında artacağı öngörülmektedir (Fan ve ark., 2018).

Türkiye'de de özellikle büyük kentlerde trafik kaynaklı hava kirliliği ciddi boyutlara ulaşmıştır. Örneğin, orta büyüklükte bir kent olan Malatya'da karayolu trafiği nedeniyle yıllık yaklaşık 768 ton CO, 154 ton NO_x, 14 ton PM ve 122 ton Uçucu Organik Bileşik (VOC) atmosfere salınmaktadır (Behçet & Yakın, 2020). Bu veriler, motorlu taşıtların yarattığı kirlilik yükünün büyük boyutlara ulaştığını göstermektedir. Son yıllarda Türkiye'de trafik kaynaklı emisyonları azaltmaya yönelik çeşitli projeler hayata geçirilmiş (sürdürülebilir ulaşım projeleri, toplu taşımanın teşviki vb.), ancak özellikle kent merkezlerinde hava kalitesinin iyileştirilmesi için ilave çözümlere ihtiyaç duyulmaya devam edilmektedir.

Yeşil altyapı, kentlerde hava kirliliği sorununa yönelik çevre dostu çözümler arasında önemli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Yeşil altyapı (Green Infrastructure), doğal ve yarı-doğal alanların; kentte ekolojik, sosyal ve ekonomik faydalar sağlayacak şekilde planlanması, tasarımı ve yönetilmesi sürecidir. Bu kavram, yalnızca bitkisel peyzajı değil, aynı zamanda ekosistem hizmetlerini destekleyen bütünsel yeşil alan ağlarını da kapsar. Yeşil altyapı, kentlerde biyolojik çeşitliliği korurken, su yönetimi, hava kalitesinin iyileştirilmesi, iklim değişikliğiyle mücadele ve insan sağlığı gibi çok boyutlu katkılar sağlar (Benedict & McMahon, 2006). Yeşil altyapı; parklar, kent ormanları, çatı bahçeleri, yeşil duvarlar, yeşil yollar, su yolları (mavi altyapı ile bütünsel), kent tarımı alanları gibi öğeleri içerir (European Environment Agency [EEA], 2011). Bu sistemler hem doğal süreçleri destekler hem de insan yaşam kalitesini artırır. Bitki örtüsü, zararlı gazları ve partikülleri tutma kapasitesi sayesinde şehir içi hava kalitesini iyileştirme potansiyeli sunmaktadır (Nowak ve ark., 2000; Baldauf, 2017). Yapılan çalışmalar, yol kenarlarında bulunan ağaç ve bitkilerin hava kirleticilerinin konsantrasyonlarını azaltabileceğini ortaya koymuştur (Baldauf, 2008; Gallagher ve ark., 2015; Janhäll, 2015). Özellikle yaprak yüzeylerinin kirletici partikülleri tutma kapasitesi, çevredeki PM seviyelerinin düşürülmesinde önemli katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, şehirlerde yol ağaştırılması hava kalitesini iyileştirme, gürültüyü azaltma ve estetik değer katma gibi fonksiyonlarla kritik bir

rol oynamaktadır (Küçük, 2010; Tong ve ark., 2015). Yoğun trafik alanlarında, boylu ve yoğun yapraklı ağaç türleriyle oluşturulan yeşil bariyerlerin hava kirliliğini azaltmada etkili olduğu belirlenmiştir (Ürgenç, 1998; Janhäll, 2015).

Bandırma kenti, Balıkesir iline bağlı olup Marmara Denizi kıyısında stratejik bir konuma sahip sanayi ve liman merkezi niteliğindedir. 2023 itibarıyla kentin nüfusu 166.836'ya ulaşmıştır (Nüfusu.com, 2024). Artan nüfusla birlikte trafiğe kayıtlı araç sayısı 81.084'e yükselmiştir (Sondakika.com, 2024). Çanakkale-Bursa devlet karayolunun Bandırma kent merkezinden geçmesi, transit trafik yoğunluğuyla birlikte şehir içi emisyonların artışına neden olmaktadır. Özellikle liman faaliyetleri kaynaklı ağır vasıta trafiği, hava kirliliğini ciddi boyutlara oluşturmaktadır (Köroğlu & Karabulut, 2018). Tektaş ve ark. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, Bandırma'daki trafik yoğunluğunun hava ve gürültü kirliliği ile otopark eksikliği ve uzun seyahat süreleri gibi sorunlara neden olduğu belirtilmiştir. Mevcut yeşil altyapının yetersizliği, özellikle liman çevresi ve ana arterlerde trafik kaynaklı emisyonların yayılımının kontrol altına alınmasını güçleştirmektedir. Yol kenarı ağaştırılmalarının artırılması ve yeşil bariyerlerin oluşturulması hem trafik akışının düzenlenmesi hem de hava kalitesinin iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Altınçekiç & Altınçekiç, 1996; Gedikli, 2022). Ayrıca, Bandırma'da hâkim rüzgârların yıllık ortalama 17,45 km/s hızında esmesi, kirleticilerin şehir geneline yayılımını hızlandırarak hava kalitesinin düşmesine neden olmaktadır (Weatherspark, 2024). Bu doğrultuda, Bandırma'da yeşil altyapı planlamalarının iyileştirilmesi ve trafik kaynaklı emisyonların azaltılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesi acil bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma, Bandırma kent merkezinde trafik kaynaklı emisyonların dağılımını analiz etmekte ve yeşil altyapının bu emisyonları azaltmadaki potansiyelini ortaya koymaktadır. Bandırma gibi sanayi ve liman faaliyetlerinin yoğun olduğu orta ölçekli kentlerde, yeşil altyapı planlamalarının yerel iklim, ulaşım yapısı ve araç filosu dikkate alınarak gerçekleştirilmesi gerektiği değerlendirilmektedir. Bu kapsamda çalışmanın amacı, (i) Bandırma'daki mevcut trafik kaynaklı emisyon yükünü nicel olarak belirlemek, (ii) mevcut yeşil dokunun etkisini analiz etmek ve (iii) çok kriterli karar verme yöntemleri ile en uygun yeşil altyapı unsurlarını önermektedir.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışma kapsamında Bandırma kent merkezi (Balıkesir, Türkiye) araştırma alanı olarak seçilmiştir. Bandırma, artan nüfusu ve yoğun karayolu trafiği ile dikkat çeken bir ilçe merkezidir. Özellikle liman ve ana arterler etrafındaki yüksek araç yoğunluğu, kentsel hava kalitesini

olumsuz etkileyen bir faktör olduğu için, çalışma alanı olarak Bandırma'nın seçilmesi uygun görülmüştür.



Şekil 1. Bandırma kent merkezi (paintmaps.com, 2025).
Figure 1. Bandırma city center (paintmaps.com, 2025).

Trafik Verilerinin Toplanması: Çalışmada kullanılan trafik verileri, Bandırma Belediyesi trafik birimi kayıtları, yerinde gerçekleştirilen manuel araç sayımları ve karayolu üzerindeki trafik sensörlerinden elde edilmiştir. Veri güvenilirliğini sağlamak amacıyla araç sayımları, sabah ve akşam zirve saatlerinde farklı noktalarda periyodik olarak gerçekleştirilmiştir. Sayım verileri doğrultusunda araçlar; binek otomobil, kamyonet ve ağır vasıta gibi kategorilere ayrılarak sınıflandırılmış ve her bir araç türünün trafikteki ortalama yüzdesi hesaplanmıştır. Bandırma'ya özgü filo kompozisyonu, bölgesel emisyon hesaplamalarının temel girdisini oluşturmuştur.

Tablo 1. Araç türleri ve ortalama emisyon faktörleri (www.eea.europa.eu, 2023)

Table 1. Vehicle types and average emission factors (www.eea.europa.eu, 2023)

Araç Türü	CO ₂ (g/km)	NO _x (g/km)	PM _{2.5} (g/km)
Benzinli Binek Araç	160	0,3	0,02
Dizel Binek Araç	180	0,4	0,03
Hafif Ticari Araç	250	1,8	0,1
Ağır Ticari Araç	320	5,5	0,25
Otobüs	400	8	0,3

Emisyon Hesaplama Yaklaşımı: Emisyon hesaplamalarında, Avrupa'da atmosferik emisyonların izlenmesi ve raporlanmasına yönelik standartlar sunan EMEP/CORINAIR metodolojisi ile EPA verileri temel alınmıştır. EMEP/CORINAIR, özellikle karayolu taşımacılığından kaynaklanan emisyonların hesaplanmasına yönelik detaylı faktörler içermekte olup, tahmin sürecinde araç türü, model yılı, hızı, yakıt türü ve motor hacmi gibi parametreler dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada, Bandırma'daki araç filosuna özgü ortalama emisyon faktörleri EMEP/CORINAIR rehberinden alınmış olup, temel parametreler Tablo 1'de yer almaktadır. Örneğin, dizel

ağır taşıtlar için CO₂ emisyon faktörü ortalama 200–350 g/km, NO_x emisyon faktörü 3–7 g/km, PM₁₀ emisyon faktörü ise 0,15–0,30 g/km aralığında hesaplanmıştır. Benzinli otomobiller için bu değerler sırasıyla CO₂: 140–180 g/km, NO_x: 0,2–0,5 g/km ve PM₁₀: 0,01–0,03 g/km olarak belirlenmiştir. Hesaplamalarda, Bandırma'daki toplam araç sayısının gün içinde kat ettiği mesafe göz önüne alınmış ve tahmini günlük toplam emisyon yükü belirlenmiştir. Varsayımsal olarak, binek araçların günlük ortalama yaklaşık 15 km, ağır vasıtaların ise yaklaşık 40 km kent içinde yol aldığı varsayılmıştır. Bu varsayımlara göre Bandırma'da günlük CO₂ emisyonunun 150–200 ton, NO_x emisyonunun 4–6 ton ve PM₁₀ emisyonunun 0,2–0,4 ton aralığında olduğu tahminen belirlenmiştir.

Hava Kalitesi Verilerinin Toplanması: Elde edilen tahmini emisyon değerleri, Bandırma'daki mevcut hava kalitesi ölçüm verileriyle karşılaştırılmıştır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığına ait Bandırma Hava Kalitesi İzleme İstasyonu verileri analiz edilerek, 2024 yılına ait saatlik ve günlük SO₂, PM₁₀ ve NO₂ ölçümleri incelenmiştir (Tablo 3). Analizler sonucunda, bazı zaman dilimlerinde ulusal sınır değerlerin ve EPA standartlarının aşıldığı tespit edilmiştir. 2024 yılına ait PM₁₀, SO₂ ve AQI (Air Quality Index/ Hava Kalitesi İndeksi) değerleri incelendiğinde, Bandırma kent merkezinde yıl boyunca hava kalitesinin mevsimsel değişim gösterdiği ancak çoğu zaman ulusal ve uluslararası sınır değerlerin üzerinde seyrettiği tespit edilmiştir. Özellikle Ocak, Mart, Mayıs, Temmuz, Eylül ve Kasım aylarında PM₁₀ konsantrasyonlarının sırasıyla 110, 120, 130, 140, 150 ve 160 µg/m³ seviyelerine ulaştığı; buna paralel olarak SO₂ değerlerinin de 80 ila 130 µg/m³ arasında değiştiği görülmektedir. Bu yüksek kirletici konsantrasyonları, AQI değerlerinin de 150'nin üzerine çıkmasına neden olmuş ve bu dönemlerde hava kalitesi "sağlıksız" kategorisine girmiştir. Özellikle 5 Kasım ve 20 Aralık tarihlerinde ölçülen 160–170 µg/m³ PM₁₀, 130–140 µg/m³ SO₂ ve 200–210 AQI değerleri, "kötü" seviyesine ulaşarak halk sağlığı açısından ciddi risk taşımaktadır. AQI değerleri, ülkeden ülkeye farklılık gösterebilir ancak genel prensipler Dünya Sağlık Örgütü (WHO), ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) ve Avrupa Çevre Ajansı (EEA) gibi kuruluşlar tarafından belirlenmektedir. Türkiye, AQI hesaplamasında genellikle ABD EPA sistemiyle uyumlu bir yaklaşım kullanmakla birlikte yerel sınır değerleri esas almaktadır.

Tablo 2. Türkiye ve Avrupa Birliği AQI değer aralıkları (sim.csb.gov.tr,2025; eea.europa.eu/tr, 2025)

Table 2. AQI value ranges of Türkiye and the European Union (sim.csb.gov.tr, 2025; eea.europa.eu/tr, 2025)

Kategori	Türkiye AQI	AB / WHO (Rehber)
İyi	0–50 (≤50 µg/m ³)	0–20 µg/m ³
Orta	51–100	21–50 µg/m ³
Hassas	101–150	51–100 µg/m ³
Sağlıksız	151–200	100+ µg/m ³ (yüksek)
Kötü/Tehlikeli	200+	— (uyarı düzeyi)

Bununla birlikte, Şubat, Nisan, Haziran, Ağustos ve Ekim aylarında ölçülen PM₁₀ ve SO₂ değerlerinin göreceli olarak daha düşük olduğu, AQI değerlerinin 115–135 aralığında kaldığı ve bu dönemlerde hava kalitesinin “hassas” düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, 22 Şubat’ta AQI değeri 135 olarak ölçülmüş ve bu durum özellikle yaşlılar, çocuklar ve solunum problemi olan bireyler için riskli kabul edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, yılın yaklaşık yarısında hava kalitesinin “sağlıksız” düzeyde olduğu ve bu dönemlerin çoğunlukla ilkbahar-sonbahar geçişleri ile kış aylarına denk geldiği söylenebilir. Bu da, meteorolojik faktörlerin (örneğin düşük rüzgâr hızı, inversiyon, nem) ve ısınma ile trafik kaynaklı emisyonların birlikte etkili olduğunu göstermektedir. Yıl boyunca ölçülen bu değerler, Bandırma’da kalıcı bir yeşil altyapı stratejisinin uygulanması gerektiğini ve özellikle kirletici emisyonlarının yüksek seyrettiği dönemlerde hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik önlemlerin önceliklendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Bandırma ilçesi yıllık ortalama ve günlük SO₂, PM₁₀ ve NO₂ değişim değerleri (sim.csb.gov.tr, 2024)

Table 3. Bandırma district annual average and daily SO₂, PM₁₀ and NO₂ change values (sim.csb.gov.tr, 2024)

Yıl	PM ₁₀ Yıllık Ortalama (µg/m ³)	SO ₂ Yıllık Ortalama (µg/m ³)	NO ₂ Yıllık Ortalama (µg/m ³)
2024	40,16	8,77	24,74

Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri: Trafik kaynaklı emisyonları azaltmada en uygun yeşil altyapı unsurunu (bitki/ ağaç türünü) belirlemek amacıyla çalışmada çok kriterli karar verme (ÇKKV) tekniklerinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda iki farklı ÇKKV yöntemi olan TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) ve EDAS (Evaluation Based on Distance from Average Solution) tercih edilmiştir.

TOPSIS yöntemi, alternatiflerin ideal çözüme yakınlığına ve en kötü çözüme uzaklığına göre sıralanmasını sağlayan etkin bir tekniktir. Yeşil altyapı alternatiflerinin belirlenen birden çok kritere göre çok boyutlu değerlendirilmesi gerektiği için, alternatiflerin en iyi ve en

kötü durum senaryolarına olan göreceli mesafelerini hesaplayabilen TOPSIS yöntemi uygun görülmüştür. EDAS yöntemi ise alternatifleri ortalama bir çözüm noktasından olan pozitif ve negatif uzaklıklarına göre değerlendirerek en uygun seçeneği belirlemeye odaklanan yaygın bir karar tekniğidir (Stanujkic et al., 2017). TOPSIS’e kıyasla, hesaplama süreçlerinde uç değerlere karşı daha az duyarlı olup daha dengeli sonuçlar üretebilme avantajı vardır. Bu nedenle, emisyon azaltma potansiyeli, bakım maliyeti ve estetik katkı gibi birbirinden farklı özelliklere sahip kriterler çok yönlü bir şekilde değerlendirildiğinde, EDAS yönteminin de kullanılması uygun görülmüştür. Her iki yöntemin birlikte uygulanması, sonuçların güvenilirliğini artırmakta ve farklı matematiksel yaklaşımların karar verme sürecine etkisini karşılaştırma imkânı sunmaktadır. Böylelikle Bandırma koşulları için en uygun bitki türünün belirlenmesi daha bilimsel ve sistematik bir yaklaşımla gerçekleştirilmiştir. Karar verme analizinde kullanılan kriterler, ilgili literatür taraması ve uzman görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. Bu kriterler, kentsel yeşil altyapı elemanlarının trafik kaynaklı emisyonları azaltma performansını çok boyutlu olarak değerlendirebilmek amacıyla şu başlıklardan oluşmaktadır:

- Emisyon azaltma kapasitesi (örneğin, bir ağacın partikül madde (PM) tutma yeteneği),
- Dayanıklılık ve ömür (şehrin iklim koşullarına uyum sağlama ve uzun ömürlülük),
- Bakım maliyeti (sulama ve budama gereksinimleri),
- Estetik değer (kentsel peyzaja katkı sağlama potansiyeli),
- Su tutma kapasitesi (yağmur suyunu depolayarak sel riskini azaltma yeteneği).

Belirlenen bu beş kriter çerçevesinde, Bandırma’nın iklim ve çevre koşullarına uyum sağlayabilecek 10 farklı bitki türü alternatif olarak belirlenmiştir. Bu alternatifler arasında hem iğne yapraklı hem de geniş yapraklı türler (ör. çam, servi, sedir, meşe, akçaağaç vb.) yer almaktadır.

Tablo 4. Seçilen bitkiler ve menşeleri (<https://www.treesandshrubsonline.org/>, 2025)

Table 4. Selected plants and their origins (<https://www.treesandshrubsonline.org/>, 2025)

Tür ve Cins İsimleri	Türkçe Adı	Doğal Yayılış (Menşe)
<i>Cedrus atlantica</i>	Atlas Sediri	Kuzey Afrika – Fas ve Cezayir (Atlas Dağları)
<i>Cupressus arizonica</i>	Mavi Servi	Kuzey Amerika – ABD (Arizona, New Mexico)
<i>Platanus orientalis</i>	Doğu Çınarı	Güneydoğu Avrupa, Batı Asya, Türkiye, İran
<i>Fraxinus excelsior</i>	Dişbudak	Avrupa, Kuzey Asya – Orta ve Batı Avrupa
<i>Pinus nigra</i>	Karaçam	Güney Avrupa, Türkiye, Balkanlar, Batı Asya
<i>Liquidambar orientalis</i>	Sığla Ağacı	Güneybatı Türkiye (Muğla, Fethiye, Köyceğiz yöresi)
<i>Acer saccharinum</i>	Gümüşü Akçaağaç	Kuzey Amerika – ABD ve Kanada
<i>Thuja occidentalis</i>	Batı Mazısı	Kuzey Amerika – Doğu Kanada ve Kuzeydoğu ABD
<i>Castanea sativa</i>	Kestane	Güney Avrupa, Batı Asya – Türkiye dahil
<i>Carpinus betulus</i>	Gürgen	Orta ve Batı Avrupa

Her bir alternatifin belirlenen kriterlere göre performansı, 10 kişilik bir uzman grubunun (peyzaj mimarları, ziraat mühendisleri ve botanikçiler) 1 (çok

düşük) ile 10 (çok yüksek) arasında verdiği puanlarla değerlendirilmiştir. Uzman değerlendirmelerinden elde edilen puanlar ile başlangıç karar matrisi oluşturulmuş ve

bu matrise çok kriterli analiz yöntemleri uygulanmıştır. TOPSIS ve EDAS yöntemlerinin adımları literatürde detaylı bir şekilde tanımlandığı için burada tekrar tüm matematiksel formüller verilmemektedir. Ancak özetle, önce karar matrisi normalizasyonu ve kriter ağırlıkları ile değerlendirme yapılmış, ardından TOPSIS yöntemi ile her bir alternatif için göreceli yakınlık değerleri hesaplanmıştır. Paralel olarak EDAS yöntemi ile her bir alternatifin toplam performans skoru elde edilmiştir. Son olarak, her iki yöntemle göre alternatif ağaç türleri en iyi seçenekten en kötüye doğru sıralanmış ve karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. Bu süreç sonucunda Bandırma'daki trafik kaynaklı emisyonların azaltılmasında etkili olması beklenen bitki türü belirlenmiştir.

Karar Matrisinin Oluşturulması: Karar matrisi, alternatiflerin her bir kriter için değerlendirmesini içerir. Karar matrisi karar verici tarafından oluşturulur ve satırlarda üstünlüklerine göre sıralanmak istenen alternatifler, sütunlarda ise karar verici tarafından belirlenen ve karar vermede kullanılmak istenilen kriterler yer almaktadır. A matrisi karar verici için başlangıç matrisidir ve aşağıdaki şekilde gibidir:

$$A = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Normalize Edilmiş (Standart) Karar Matrisinin Oluşturulması: Karar matrisi, kriterlerin farklı ölçeklerini normalize etmek için aşağıdaki formülle normalize edilir:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

Ağırlıklı Normalize Karar Matrisi (V): Normalize edilmiş matris, kriter ağırlıkları ile çarpılır:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (3)$$

Burada; w_j , j-inci kriterin ağırlığıdır.

Pozitif ve Negatif İdeal Çözümler (A^+ ve A^-):

Pozitif ideal çözüm (A^+):

$$A^+ = \{ \max(v_{ij}) | j \in J_1; \min(v_{ij}) | j \in J_2 \} \quad (4)$$

Negatif ideal çözüm (A^-):

$$A^- = \{ \min(v_{ij}) | j \in J_1; \max(v_{ij}) | j \in J_2 \} \quad (5)$$

Burada; J_1 fayda kriterlerini, J_2 ise maliyet kriterlerini ifade eder.

Alternatiflerin İdeal Çözüme Uzaklıkları (S_i^+ ve S_i^-): Pozitif ideal çözüme uzaklık (S_i^+):

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - A_j^+)^2} \quad (6)$$

Negatif ideal çözüme uzaklık (S_i^-):

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - A_j^-)^2} \quad (7)$$

Göreceli Yakınlık (C_i^*): Her alternatif için göreceli yakınlık aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (8)$$

C_i^* 0 ile 1 arasında bir değer alır. Değeri 1'e en yakın olan alternatif en iyi seçenektir.

Alternatiflerin Sıralanması: C_i^* değerlerine göre alternatifler sıralanır.

I. **EDAS**, alternatiflerin sıralanması için yaygın olarak kullanılan çok kriterli karar tekniğidir (Stanujkic ve ark. 2017). Çözüm adımları aşağıda yer almaktadır.

Karar Matrisinin Oluşturulması: EDAS yönteminin ilk adımı eşitlik TOPSİS (3.1)'de görülen başlangıç karar matrisi ve kriter ağırlıklarının belirlenmesi ile aşağıdaki karar matrisi oluşturulur.

Ortalama Çözümün Hesaplanması: Her kriter için ortalama değer AV_j hesaplanır.

$$AV_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n} \quad (9)$$

Pozitif ve Negatif Uzakların Belirlenmesi: Pozitif uzaklık PDA_{ij} :

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, x_{ij} - AV_j)}{AV_j} \quad (\text{fayda kriteri için}) \quad (10)$$

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, AV_j - x_{ij})}{AV_j} \quad (\text{maliyet kriteri için}) \quad (11)$$

Negatif uzaklık NDA_{ij} :

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, x_{ij} - AV_j)}{AV_j} \quad (\text{fayda kriteri için}) \quad (12)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, AV_j - x_{ij})}{AV_j} \quad (\text{maliyet kriteri için}) \quad (13)$$

Toplam Pozitif ve Negatif Uzaklıkların Hesaplanması: Her alternatif için toplam pozitif SP_i ve negatif SN_i uzaklıklar aşağıdadır.

$$SP_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot PDA_{ij} \quad (14)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot NDA_{ij} \quad (15)$$

Normalizasyon: SP_i ve SN_i normalize edilir.

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max(SP_i)} \quad (16)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{\max(SN_i)} \quad (17)$$

Skorların Hesaplanması: Her alternatifi skor AS_i skoru aşağıdaki gibi hesaplanacak.

$$AS_i = \frac{1}{2}(NSP_i + NSN_i) \quad (18)$$

Sıralama: AS_i skorlarına göre alternatifler sıralanır. En yüksek skor en iyi alternatifi gösterir.

BULGULAR

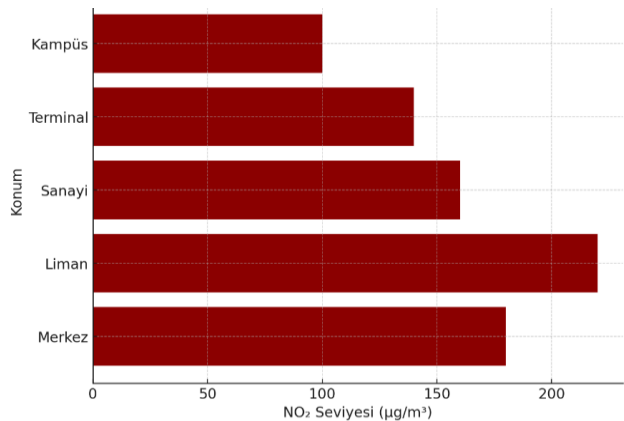
Trafik Kaynaklı Emisyon Değerleri: Bandırma hava izleme istasyonundan alınan PM_{10} , SO_2 ve NO_2 ölçüm verileri, saatlik ortalamalar ile en yüksek ve en düşük değerleri içerecek şekilde analiz edilmiştir (Tablo 4).

Tablo 5. Bandırma ilçesi yıllık ortalama, PM_{10} , SO_2 , O_3 ve NO_2 değerleri (sim.csb.gov.tr, 2024)

Table 5. Bandırma district annual average PM_{10} , SO_2 , O_3 , PM_{10} and NO_2 values (sim.csb.gov.tr, 2024)

	Ortalama ($\mu g/m^3$)	Minimum ($\mu g/m^3$)	Maksimum ($\mu g/m^3$)	Tarih (Min)	Tarih (Max)
PM_{10} ($\mu g/m^3$)	49,27	7,93	122,67	2025-03-18 09:00:56	2025-03-15 22:00:56
SO_2 ($\mu g/m^3$)	23,31	13,09	34,08	2025-03-20 04:00:56	2025-03-13 22:00:56
NO_2 ($\mu g/m^3$)	34,72	7,95	134,54	2025-03-16 14:00:56	2025-03-15 21:00:56

PM_{10} için ortalama değer $49,27 \mu g/m^3$ olarak ölçülmüş olan bu değer, Dünya Sağlık Örgütü'nün (DSÖ) önerdiği yıllık ortalama limit değer olan $20 \mu g/m^3$ 'ün üzerindedir. SO_2 ortalama $23,31 \mu g/m^3$ değeri, genel olarak kabul edilebilir sınırlar içindedir. Ancak değişkenlik göstermekte ve maksimum $34,08 \mu g/m^3$ 'e kadar çıkmaktadır. NO_2 ortalama $34,72 \mu g/m^3$ değeri normal kabul edilebilir, ancak maksimum değer $134,54 \mu g/m^3$ 'e ulaşması da endişe verici olarak görülebilir. Bu gözlem, Bandırma'da trafik kaynaklı emisyonların mevcut yeşil altyapının absorbe edebileceği kapasitenin üzerinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Bandırma kent merkezi NO_2 ortalama seviyeleri (sim.csb.gov.tr, 2024).

Figure 2. Bandırma city center NO_2 average levels (sim.csb.gov.tr, 2024).

Şekil 1'de Bandırma kent merkezindeki NO_2 konsantrasyonlarının mekânsal dağılımını trafik yoğunluğuna bağlı olarak göstermektedir. Elde edilen

bulgular, kentsel çevrede hava kirleticilerinin heterojen dağılımına ve bu dağılımı etkileyen faktörlere ışık tutmaktadır. Gözlemler, Çanakkale–Bursa karayolu aksı boyunca ve liman çevresinde NO_2 konsantrasyonlarının belirgin biçimde yükseldiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, söz konusu bölgelerdeki yoğun taşıt trafiği ve liman faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonların kümülatif etkisine atfedilebilir. Kentsel ana arterler boyunca gözlemlenen yüksek NO_2 seviyeleri, motorlu taşıtlardan salınan primer kirleticilerin atmosferik birikiminin doğrudan bir sonucudur. Literatürde de benzer kentsel koridorlarda NO_2 konsantrasyonlarının, arka plan değerlerinin 2-3 katına ulaşabildiği belirtilmektedir (Vardoulakis ve ark., 2011). Buna karşın, yeşil doku yoğunluğunun arttığı doğu bölgelerinde NO_2 seviyelerinde anlamlı bir azalma tespit edilmiştir. Bu bulgu, kentsel yeşil alanların atmosferik kirleticilerin seyreltilmesinde ve hava kalitesinin iyileştirilmesinde oynadığı önemli rolü doğrulamaktadır. Vejetasyonun NO_2 gibi gaz kirleticileri absorbe etme kapasitesi, yaprak stoma açıklıkları ve yaprak yüzey alanı ile doğrudan ilişkilidir (Nowak ve ark., 2018). Söz konusu abiyotik-biyotik etkileşim, kirleticiler konsantrasyonlarının azaltılmasında önemli bir ekolojik hizmet sunmaktadır. Bandırma özelinde gözlemlenen bu mekânsal farklılaşma, Baldauf (2017) ve Tong ve arkadaşlarının (2015) bulguları ile paralellik göstermektedir. İlgili çalışmalarda belirtildiği üzere, yeterli yoğunlukta tesis edilmiş yeşil altyapı sistemleri, PM_{10} ve NO_2 gibi kentsel kirleticilerin konsantrasyonlarını %10-20 oranında azaltabilmektedir; bu iyileşme hem vejetasyonun doğrudan absorpsiyon kapasitesi hem de oluşturduğu mikroklima etkisiyle sağlanmaktadır.

Tablo 6. Bandırma trafik emisyon envanteri.

Table 6. Bandırma traffic emission inventory.

Kirleticiler	Binek Araçlar	Ağır Vasıtalar	Toplam
CO_2 (ton/gün)	100	70	170
NO_x (ton/gün)	2,5	2,6	5,1
$PM_{2.5}$ (ton/gün)	0,1	0,2	0,3

Trafik Emisyon Envanteri Sonuçları: Bandırma için hazırlanan trafik emisyon envanteri, kentteki taşıt kategorilerinin emisyon profillerini ortaya koymaktadır (Tablo 6). Araştırma bulgularına göre, günlük toplam CO_2 emisyonu 170 ton, NO_x emisyonu 5,1 ton ve $PM_{2.5}$ emisyonu 0,3 ton olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, emisyon dağılımının araç tiplerine göre heterojen bir yapı sergilediğini göstermektedir. Özellikle ağır vasıtaların emisyon yoğunluklarının, filodaki sayısal oranlarından daha yüksek bir paya sahip olduğu tespit edilmiştir. Bandırma kentsel alanı için hesaplanan trafik kaynaklı emisyon verileri incelendiğinde, CO_2 , NO_x ve $PM_{2.5}$ parametrelerinin araç kategorilerine göre farklı dağılım örüntüleri sergilediği görülmektedir. Binek araçlar, CO_2 emisyonlarının yaklaşık %60'ını (100 ton/gün) oluşturarak bireysel motorlu taşıtların sera gazı emisyonlarına yüksek

katkısını ortaya koymaktadır. Buna karşın, günlük trafiğin yalnızca %15'ini oluşturan ağır vasıtalar, NO_x emisyonlarının %51'ini (2,6 ton/gün) ve PM_{2.5} emisyonlarının %67'sini (0,2 ton/gün) üretmektedir. Bu asimetrik katkı, dizel motorlu ağır taşıtların emisyon faktörlerinin binek araçlara kıyasla çok daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (EEA, 2023). Nitekim literatürde de dizel ağır vasıtaların, özellikle NO_x ve partikül madde emisyonları bakımından birim yakıt tüketimi başına orantısız derecede yüksek kirletici ürettiği vurgulanmaktadır (Anenberg ve ark., 2017). Bandırma'nın günlük NO_x emisyon yükünün (5,1 ton) benzer özelliklere sahip kentlerle karşılaştırıldığında yüksek olması, kentin ulaşım ağındaki stratejik konumu ve liman-karayolu entegrasyonuna bağlı yoğun ağır vasıta trafiği ile açıklanabilir. Gerçekten de liman bağlantılı kentsel bölgelerde ağır vasıta trafiği ve buna bağlı NO_x emisyon artışları çeşitli çalışmalarda raporlanmıştır (Merico ve ark., 2016; Viana ve ark., 2014).

Yeşil Altyapı İçin Bitki Türü Seçimi (TOPSIS & EDAS Sonuçları): Bandırma'da hava kalitesini iyileştirmek amacıyla değerlendirilen 10 farklı bitki türü, TOPSIS ve EDAS yöntemleri ile çok kriterli analizlere tabi tutulmuştur. Tablo 7, bu türlerin belirlenen kriterlere göre TOPSIS yöntemiyle hesaplanan göreceli yakınlık (C_i) değerlerini ve sıralamalarını göstermektedir. Benzer şekilde, Tablo 8, EDAS yöntemiyle hesaplanan toplam performans (AS) skorlarını ve sıralamalarını sunmaktadır. Her iki yöntemin sonuçları büyük ölçüde tutarlıdır.

Tablo 7. TOPSIS göreceli yakınlık (C_i) sıralamaları.

Table 7. TOPSIS relative closeness (C_i) rankings.

Ağaç Türü	TOPSIS Göreceli Yakınlık (C _i)	Sıralama
<i>Cedrus atlantica</i>	0,88	1
<i>Cupressus arizonica</i>	0,75	2
<i>Platanus orientalis</i>	0,6	3
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,55	4
<i>Pinus nigra</i>	0,52	5
<i>Liquidambar orientalis</i>	0,49	6
<i>Acer saccharinum</i>	0,45	7
<i>Thuja orientalis</i>	0,4	8
<i>Castanea sativa</i>	0,38	9
<i>Carpinus betulus</i>	0,35	10

Tablo 8. EDAS toplam performans (AS) skorları ve sıralaması.

Table 8. EDAS total performance (AS) scores and rankings.

Ağaç Türü	EDAS Performans Skoru (AS)	Sıralama
<i>Cedrus atlantica</i>	0,98	1
<i>Cupressus arizonica</i>	0,85	2
<i>Platanus orientalis</i>	0,68	3
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,6	4
<i>Pinus nigra</i>	0,58	5
<i>Liquidambar orientalis</i>	0,55	6
<i>Acer saccharinum</i>	0,5	7
<i>Thuja orientalis</i>	0,45	8
<i>Castanea sativa</i>	0,42	9
<i>Carpinus betulus</i>	0,38	10

Yapılan analizlerde Atlas sediri, TOPSIS yöntemiyle C_i = 0,88 ve EDAS yöntemiyle AS = 0,98 değerleri alarak her iki metodolojide de birinci sırada yer almıştır. Mavi servi türü ise her iki yöntemde de ikinci sırada çıkarak Atlas sedirine yakın bir performans sergilemiştir. Bu sıralama sonuçları, kriter

ağırlıklandırması ve türlerin morfolojik-fizyolojik özellikleri bağlamında anlamlıdır. Uzman değerlendirmelerine dayalı kriter ağırlıklarında, “emisyon tutma/azaltma kapasitesi” en yüksek öneme sahip kriter olarak belirlenmiştir. Atlas sedirinin bir iğne yapraklı olması ve yıl boyunca yaprak dökmemesi (her dem yeşil), partikül madde ve NO_x gibi kirleticileri tutma kapasitesini artıran özelliklerdir. İğne yapraklı yapı, birim ağaç başına toplam yaprak yüzey alanını maksimize ederek kirletici absorpsiyonunu yükseltmektedir. Atlas sedirinin mavi servi karşısındaki üstünlüğü kısmen daha fazla boylanabilmesi ve daha güçlü bir kök/yaprak yapısı ile oluşturduğu rüzgâr perdesi etkisine bağlanabilir. Ayrıca Bandırma'nın Marmara Bölgesi iklim koşullarına iyi adaptasyon göstermesi, uzun ömürlü ve düşük bakım gerektirmesi de bu türün tercih edilmesinde etkili olmuştur. Elde edilen bulgular, Van Hove ve ark. (2015)'in Kuzey Avrupa kentsel alanlarında iğne yapraklı türlerin PM azaltımında yaprak döken türlere kıyasla daha başarılı olduğunu bildiren çalışmasıyla da uyumludur. Yeşil altyapı önlemlerinin planlanmasında, bitki türü seçimi kritik bir adımdır. Çok kriterli karar analizi ile Atlas sediri türü kuramsal olarak en uygun ağaç olarak belirlenmiştir. Nitekim Atlas sedirinin Avrupa'da sanayi devrimi sonrasında kent ağaçlandırmalarında sık tercih edilmesi, hava kirliliğine görece dayanıklı olmasından kaynaklanmıştır. Bununla birlikte, Atlas sediri Türkiye'nin yerli bir türü değildir; anavatanı Kuzey Afrika'daki Atlas Dağları'dır. Bu nedenle Bandırma gibi bir bölgede geniş çaplı bitkilendirme yaparken, ekolojik olarak yerli türlerin kullanımı daha sürdürülebilir ve tercih edilir bir yaklaşım olacaktır. Türkiye'nin güney Anadolu bölgelerinde doğal yayılış gösteren *Cedrus Libani* (Lübnan/Toros sediri), Atlas sedirine çok benzeyen bir ağaç türüdür. Lübnan sediri (yerel adıyla Toros sediri), Güney Anadolu Toroslarında yaygın olarak bulunur ve bölgenin iklim ve toprak koşullarına binlerce yıldır uyum sağlamıştır. 40 metreyi bulabilen boyu, geniş ve yatay yayılım gösteren tacı ile kentsel peyzajda etkileyici bir görünüme sahiptir. Bu tür de herdem yeşildir ve yapraklarını dökmediği için yıl boyu hava filtrasyonu sağlayabilir. Dolayısıyla kirletici tutma kapasitesi açısından Atlas sedirine yakın derecede etkilidir. Toros sedirinin Atlas sedirine kıyasla tek dezavantajı, literatürde bazı kaynaklarda kentsel hava kirliliğine duyarlılığının biraz daha yüksek olduğunun belirtilmesidir. Özellikle endüstriyel kirliliğin çok yoğun olduğu kent ortamlarında Atlas sedirinin daha dayanıklı olduğu rapor edilmiştir (treesandshrubsonline.org,2025).

Bununla birlikte, Bandırma ölçeğinde mevcut hava kirliliği seviyeleri dikkate alındığında, *Cedrus libani* türünün de uygun bakım ve yetiştirme koşulları altında kentsel alanlarda başarılı bir şekilde kullanılabileceği öngörülmektedir. Nitekim Türkiye'nin çeşitli şehir

parklarında ve üniversite kampüslerinde uzun yıllardır sağlıklı biçimde yetiştirilen örnekleri, bu türün kent içi yeşil altyapı uygulamaları açısından uygulanabilirliğini desteklemektedir. Ayrıca Toros sediri, Anadolu'ya özgü yerli bir tür olması dolayısıyla ekolojik uyum bakımından önemli avantajlar sunmaktadır. Yerel flora ile biyolojik çeşitliliği destekleyici nitelikte olup, istilacı tür riski taşımamaktadır. Bunlara ilaveten, Toros sedirinin Anadolu kültüründeki tarihsel ve sembolik önemi, bu türün halk tarafından benimsenmesini kolaylaştırmakta ve yeşil altyapı projelerinde toplumsal sahiplenmeyi artırıcı bir etki yaratabilmektedir. Bu yönüyle söz konusu tür, sadece çevresel değil, aynı zamanda sosyo-kültürel sürdürülebilirlik açısından da değerlidir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında Bandırma kent merkezindeki trafik kaynaklı hava kirliliği değerlendirilmiş ve yeşil altyapının bu kirlilik üzerindeki etkisi çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, giriş bölümünde ortaya konan çevresel ve sağlık temelli sorunlara karşı yeşil altyapının somut bir çözüm potansiyeli taşıdığını göstermektedir.

Yapılan emisyon hesaplamaları ve hava kalitesi analizleri Bandırma'da özellikle liman çevresi ve ana arterlerde yoğun bir NO_x ve PM₁₀ birikimi olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum hem EPA hem de Dünya Sağlık Örgütü standartlarının bazı günlerde aşıldığını göstermekte ve kent sakinleri için doğrudan bir sağlık riski oluşturduğunu düşündürmektedir. Özellikle solunum yolu hastalıkları ve kardiyovasküler problemlerle ilişkilendirilen bu tür kirlleticilerin (Nowak et al., 2018; Baldauf, 2017) yoğunlaştığı bölgelerde, yeşil altyapı eksiklikleri önemli bir faktördür.

Çalışma kapsamında uygulanan çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS ve EDAS, *Cedrus atlantica* türünün Bandırma'nın iklim koşulları, kentsel yapısı ve hava kirliliği profili açısından en uygun bitki türü olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuç, literatürde yer alan ve iğne yapraklı ağaçların partikül tutma kapasitesinin daha yüksek olduğunu gösteren bulgularla tutarlıdır (Van Hove et al., 2015). İğne yapraklı ağaçların partikül madde (PM) tutma kapasitesinin geniş yapraklı türlere kıyasla daha yüksek olduğu, çeşitli araştırmalarla ortaya konmuştur. Bu durum; iğne yapraklı türlerin yıl boyunca yeşil kalması, yaprak yüzeyinin mikroskobik pürüzlülüğü, balmumsu kaplama özellikleri ve yoğun iğne formu gibi morfolojik yapılarla ilişkilendirilmektedir (Zhang et al., 2022). Yaprak yüzey mikro morfolojisi, özellikle stoma yoğunluğu, tüy (trikom) yapısı ve epikutiküler mum tabakası, partikül madde yakalama kapasitesini doğrudan

etkileyen faktörler arasında yer alır. Bu bağlamda, Zhang ve arkadaşları (2022), iğne yapraklı türlerin yüzey mikro yapılarının, geniş yapraklılara kıyasla PM₁₀ ve PM_{2.5} gibi partikülleri daha etkili tuttuğunu göstermiştir. Benzer şekilde, Kwak ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan çalışmada, yol kenarları ve kent ormanlarındaki çeşitli ılıman iklim ağaç türleri karşılaştırılmış ve *Pinus densiflora* (Japon Kızılçamı) ve benzeri iğne yapraklı türlerin, geniş yapraklı türlere göre anlamlı ölçüde daha yüksek partikül madde tutma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Tzoulas ve arkadaşları (2007) ise, yeşil altyapı unsurlarının halk sağlığı üzerindeki etkilerini ele alırken, özellikle iğne yapraklı ağaçların hava kalitesini iyileştirmedeki rolüne dikkat çekmektedir. Dar ve uzun iğne yaprakların partikül yakalama verimliliğinin, düz yapraklı türlere göre belirgin biçimde daha fazla olması, şehir planlamasında tür seçimi açısından önemli bir kriter haline gelmektedir. Aynı zamanda bu bitkinin düşük bakım ihtiyacı, uzun ömürlülüğü ve estetik katkısı da kent peyzajı açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Çalışmanın sağlığa etkileri, çevresel sürdürülebilirlik ve kent yaşam kalitesinin artırılması gibi hedefler açısından değerlendirildiğinde, elde edilen bulgular bu amaçlara hizmet eden uygulanabilir çözümler önermektedir. Özellikle yoğun trafiğe sahip kentsel koridorlarda bitkilendirme uygulamaları ile yerel hava kalitesinin %10-20 oranında iyileştirilebileceği, yapılan akademik çalışmalarla da desteklenmektedir (Tong et al., 2015). Bununla birlikte, Bandırma'da uygulanacak yeşil altyapı stratejilerinin başarısı, yalnızca doğru bitki seçimine değil; aynı zamanda bu sistemlerin kentsel planlama ile entegrasyonuna, bakım politikalarına ve kamu farkındalığına da bağlıdır. Özellikle liman-karayolu entegrasyon bölgelerinde stratejik yeşil tampon bölgeler oluşturulması, sadece çevresel etkileri değil aynı zamanda ulaşım konforunu da olumlu yönde etkileyebileceği düşünülmektedir.

Bu araştırmanın bulguları, ulaşımdan kaynaklanan emisyonların çevresel etkilerini azaltmada yeşil altyapı uygulamalarının etkili bir araç olduğunu açık biçimde ortaya koymuştur. Özellikle yol kenarı bitkilendirmesi ve yeşil bariyerler gibi uygulamaların, motorlu taşıtlardan kaynaklanan partikül madde ve zararlı gazların filtrasyonu üzerinde önemli derecede olumlu etkiler yarattığı tespit edilmiştir. Nitekim literatürde de benzer şekilde, bitkisel bariyerlerin hava kalitesini iyileştirme potansiyeline sahip olduğu vurgulanmaktadır (Nowak ve ark., 2000; Baldauf, 2017; Janhöll, 2015). Bu doğrultuda, kentsel ulaşım politikalarında yeşil altyapı bileşenlerine daha fazla yer verilmesi çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışma, Bandırma kenti özelinde yürütülen analizlerle, kent içi ulaşım kaynaklı emisyonların çevresel etkilerinin azaltılmasında yeşil altyapı uygulamalarının önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur. Araştırma bulgularına göre, trafik kaynaklı emisyonlar özellikle ağır vasıta trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde hava kirliliğinin başlıca belirleyicisi konumundadır. Liman çevresi ile ana ulaşım arterleri, kirlletici yoğunluğunun yüksek olduğu ve dolayısıyla insan sağlığı açısından risk taşıyan başlıca alanlar olarak tanımlanmıştır. Bandırma'da yeşil altyapı unsurlarının yetersizliği, bu kirleticilerin atmosferde birikimini kolaylaştırmakta ve kentsel hava kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Ancak stratejik biçimde planlanmış ve doğru bitki türleriyle desteklenmiş yeşil altyapı uygulamalarının, bu olumsuz etkileri anlamlı düzeyde azaltabileceği görülmüştür. Özellikle atlas sediri türü, iklimsel ve çevresel koşullara uygunluğu bakımından Bandırma için en uygun ağaç türü olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, söz konusu türün liman çevresi ve kent içi yol kenarlarında yaygınlaştırılması, hava kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Araştırmanın bulguları, yalnızca Bandırma özelinde değil, benzer yapısal ve çevresel özellikler taşıyan orta ölçekli, liman bağlantılı kentlerde de genellenebilir politika önerilerine temel oluşturmaktadır. Yeşil altyapı planlaması, estetik kaygıların ötesine geçerek işlevsel çevresel faydaları da hedefleyen, çok boyutlu bir kent politikası aracı olarak ele alınmalıdır. Bu doğrultuda, yerel yönetimlerin yeşil altyapı uygulamalarını ulaşım planlamalarıyla entegre biçimde tasarlaması, sürdürülebilir kent yönetiminin önemli bir bileşeni olacaktır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, önerilen yeşil altyapı uygulamalarının uzun vadeli etkilerinin izlenmesi, hava kalitesi üzerindeki katkılarının kantitatif olarak değerlendirilmesi ve bu süreçlerin simülasyon tabanlı modellerle desteklenmesi önerilmektedir. Böylelikle, kent ölçeğinde sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak adına daha bütüncül ve bilim temelli kararlar alınabilmektedir.

KAYNAKLAR

- Altınçekiç, H., & Altınçekiç, Ç.S. (1996).** Karayollarında peyzaj düzenleme çalışmalarında bitkilendirme esasları. *Kentsel ve Kırsal Bölgelerde Karayolu Peyzajı Paneli, Bildiriler Kitabı*, 59-68. İstanbul.
- Anenberg, S. C., Miller, J., Minjares, R., Du, L., Henze, D. K., Lacey, F., Malley, C. S., Emberson, L., Franco, V., Klimont, Z., & Heyes, C. (2017).** Impacts and mitigation of excess diesel-related NOx emissions in 11 major vehicle markets. *Nature*, **545**(7655), 467-471. DOI: [10.1038/nature22086](https://doi.org/10.1038/nature22086)
- Aslanboğa, İ. (1997).** Kentlerde yol ve meydan ağaçlarının işlevleri, ağaçlamanın planlanması, uygulanması ve bakımlarıyla ilgili sorunlar. *Kent Ağaçlandırmaları ve İstanbul Sempozyumu*, 7-12. İstanbul.
- Baldauf, R. (2008).** Roadside vegetation design characteristics that can improve local, near-road air quality. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **14**(7), 451-460. DOI: [10.1016/j.trd.2009.01.001](https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.01.001)
- Baldauf, R. (2017).** Roadside vegetation and air quality: a synthesis of scientific research. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **52**, 354-361.
- Behçet, R., & Yakın, A. (2020).** Türkiye’de trafik kaynaklı emisyonlar ve çevresel etkileri. *Türk Çevre ve İklim Dergisi*, **8**(4), 23-33.
- Benedict, M.A., & McMahon, E.T. (2006).** *Green infrastructure: Linking landscapes and communities*. Island Press.
- Bourne, J., Scott, A., & Kendall, A. (2018).** Assessing traffic-related air pollution using community-based research methods. *Environmental Science & Policy*, **78**, 94-104. DOI: [10.1016/j.envsci.2018.04.001](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.04.001)
- Emberger, G. (2017).** The role of transport in environmental policy. *Journal of Urban Transport*, **15**(3), 75-85.
- EPA. (2023).** Air Quality and Emissions Reports. (Erişim tarihi: 05.01.2025) <https://www.epa.gov>
- EPA. (2024).** EPA releases MOVES5 mobile source emissions model: Questions and answers, EPA-420-F-24-031.
- European Environment Agency (EEA). (2023).** EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2022: Road transport. EEA Technical Report No. 2022/12. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Fan, Y., Meng, F., & Zhang, Y. (2018).** Future trends in CO₂ emissions from road transport: A global perspective. *Energy Policy*, **120**, 302-311. DOI: [10.1016/j.enpol.2018.06.025](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.06.025)
- Fuglestedt, J., Berntsen, T., Myhre, G., Stordal, F., & Berglen, T.F. (2008).** Climate forcing from the transport sectors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**(2), 454-458. DOI: [10.1073/pnas.0702958104](https://doi.org/10.1073/pnas.0702958104)
- Gallagher, J., Baldauf, R., Fuller, C.H., Kumar, P., Gill, L.W., & McNabola, A. (2015).** Passive methods for improving air quality in the built environment: A review of porous and solid barriers. *Atmospheric Environment*, **120**, 61-70. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2015.08.075](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.075)

- Gedikli, B. (2022).** Sokak ağaçları: Mekân üretimine ve kentsel ekosistem hizmetlerine katkıları. *İDEALKENT*, 13(37), 1841-1872. DOI: [10.31198/idealkent.1119777](https://doi.org/10.31198/idealkent.1119777)
- Gurney, K.R., Liang, J., Patarasuk, R., Song, Y., Huang, J., & Roest, G. (2021).** The Vulcan version 3.0 high-resolution fossil fuel CO₂ emissions for the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(6), e2020JD034894. DOI: [10.1029/2020JD034894](https://doi.org/10.1029/2020JD034894)
- Janhäll, S. (2015).** Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105, 130-137. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2015.01.052](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052)
- Köroğlu, T., & Karabulut, U.C. (2018).** Transit kara trafiğinin Bandırma'nın hava kirliliğine katkısı üzerine bir inceleme. *Uluslararası Bandırma ve Çevresi Sempozyumu (UBS'18)*, Bildiriler Kitabı III, 363–374.
- Kuşkan, E., Yıldırım, M., & Aydın, Ö. L. (2024).** Trafik kaynaklı emisyonun azaltılabilmesi amacıyla sürdürülebilir ve çok modlu yol ağlarının tasarlanması; Erzurum–Tortum Yolu örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(3), 785-795. DOI: [10.21605/cukurovaumfd.1560198](https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1560198)
- Kuttler, W., Weber, K., & Schmidt, F. (2015).** Urban vegetation and air quality in Stuttgart: A case study on particle deposition. *Environmental Pollution*, 198, 73-82. DOI: [10.1016/j.envpol.2015.02.001](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.001)
- Küçük, V. (2010).** *Isparta kentiçi yol ağaçları yönetim planı*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Isparta, 176 s.
- Kwak, M.J., Lee, J., Kim, H., Park, S., Lim, Y., Kim, J.E., Baek, S.G., Seo, S.M., Kim, K.N., & Woo, S.Y. (2021).** The removal efficiencies of several temperate tree species at adsorbing airborne particulate matter in urban forests and roadsides. *Atmosphere*, 12(7), 829. DOI: [10.3390/atmos12070829](https://doi.org/10.3390/atmos12070829)
- MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü). (2024).** Bandırma meteorolojik verileri. (Erişim tarihi: 10.12.2024) <https://www.mgm.gov.tr>
- Merico, E., Donato, A., Gambaro, A., Cesari, D., Gregoris, E., Barbaro, E., Dinoi, A., Giovanelli, G., Masieri, S., & Contini, D. (2016).** Influence of in-port ships emissions to gaseous atmospheric pollutants and to particulate matter of different sizes in a Mediterranean harbour in Italy. *Atmospheric Environment*, 139, 1-10. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2016.05.024](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.024)
- Nowak, D.J., Crane, D.E., & Stevens, J.C. (2000).** The urban forest effects (UFORE) model: quantifying urban forest structure and functions. *Journal of Forestry*, 98(5), 24-31.
- Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Bodine, A.R., & Greenfield, E. (2018).** Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 193, 119-129. DOI: [10.1016/j.envpol.2014.05.028](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.05.028)
- Nüfusu.com. (2024).** Bandırma ilçe nüfus verileri 2023. (Erişim tarihi: 12.12.2024) https://www.nufusu.com/ilce/bandirma_balikesir-nufusu
- Paintmaps.com. (2025).** Bandırma lokasyon haritası. (Erişim tarihi: 30.05.2025) <https://tools.paintmaps.com/tr/harita-kirpma/TR/4-890462505>
- Sarı, D., Kurt, U., Resne, Y., & Çorbacı, Ö.L. (2020).** Kent parklarında kullanılan ağaç türlerinin sağladığı ekosistem hizmetleri: Rize örneği. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 5(4), 541-550. DOI: [10.35229/jaes.774967](https://doi.org/10.35229/jaes.774967)
- Sausen, R., Isaksen, I., Grewe, V., & Lee, D.S. (2010).** Aviation impacts on atmospheric composition and climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D7), 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009JD012037>
- Stanujkic, D., Zavadskas, E.K., Ghorabae, M.K., & Turskis, Z. (2017).** An extension of the EDAS method based on the use of interval grey numbers. *Studies in Informatics and Control*, 26(1), 5-12. DOI: <https://doi.org/10.24846/v26i1y201701>
- Sondakika.com. (2024).** Bandırma motorlu araç sayıları 2023. (Erişim tarihi: 12.12.2024) <https://www.sondakika.com/yerel/haber-bandirma>
- Tektaş, M., & Aslan, F. (2019).** Bandırma şehir içi ulaşım problemleri üzerine bir araştırma. *Uluslararası Bandırma ve Çevresi Sempozyumu (UBS'19)*, Bandırma.
- Todorova, A., Asakawa, S., & Aikoh, T. (2004).** Preferences for and attitudes towards street flowers and trees in Sapporo, Japan. *Landscape and Urban Planning*, 69(4), 403-416.
- Tong, Z., Whitlow, T.H., MacRae, P.F., Landers, A.J., & Harada, Y. (2015).** Quantifying the effect of vegetation on near-road air quality using brief campaigns. *Environmental Pollution*, 201, 141-149. DOI: [10.1016/j.envpol.2015.02.026](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.026)
- Treesandshrubsonline (2025).** Bitkiler ve çalılar (Erişim tarihi: 29.04.2025) <https://www.treesandshrubsonline.org/articles/ce>

[drus/#:~:text=C,often%20advocated%20for%20use%20in](#)

- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kazmierczak, A., Niemelä, J., & James, P. (2007).** Promoting ecosystem and human health in urban areas using green infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, **81**(3), 167-178. DOI: [10.1016/j.landurbplan.2007.02.001](#)
- Vardoulakis, S., Fisher, B.E., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N. (2011).** Modelling air quality in street canyons: A review. *Atmospheric Environment*, **37**(2), 155-182. DOI: [10.1016/s1352-2310\(02\)00857-9](#)
- Van Hove, B., Jacobs, C., Heusinkveld, B., & Elbers, J. (2015).** Green infrastructure as a means to reduce urban heat and air pollution. *Environmental Research Letters*, **10**(9), 094016.
- Viana, M., Hammingh, P., Colette, A., Querol, X., Degraeuwe, B., de Vlieger, I., & van Aardenne, J. (2014).** Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe. *Atmospheric Environment*, **90**, 96-105. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2014.03.046](#)
- Weatherspark. (2024).** Bandırma – Yıllık Rüzgar Hızı Verileri. (Erişim tarihi: 10.12.2024) <https://tr.weatherspark.com/y/98214/Bandırma-Balıkesir-Türkiye-Yıllık-Hava-Durumu>
- Zhang, Q., Zheng, Y., Tong, D., Shao, M., Wang, S., Zhang, Y., Xu, X., Wang, J., He, H., Liu, W., Ding, Y., Lei, Y., Li, J., Wang, Z., Zhang, X., Wang, Y., Cheng, J., Liu, Y., Shi, Q., ... & Hao, J. (2020).** Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **116**(49), 24463-24469. DOI: [10.1073/pnas.1907956116](#)
- Zhang, W., Zhang, Z., Meng, H., & Zhan, T. (2022).** How does leaf surface micromorphology of different trees impact their ability to capture particulate matter? *Forests*, **13**(6), 866. DOI: [10.3390/f13060866](#)