

Üniversite Kampüslerinde Sürdürülebilir Atık Yönetimi: Araç ve Yürüme Odaklı P-Medyan Yaklaşımı

Sustainable Waste Management on University Campuses: A P-Median Approach Based on Vehicle and Walking Models

Metehan Atay^{1*}, Meliha Yaz², Hülya Damla Yılmaz³, Zuhale Yaman⁴, Sude Naz Tekden⁵

Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma, üniversite kampüsü içerisinde oluşan geri dönüştürülebilir atıkların etkin yönetimini sağlamak amacıyla atık toplama sisteminin optimizasyonunu incelemektedir. Çalışma kapsamında, plastik, kâğıt ve cam gibi geri dönüştürülebilir atıklar için toplama noktalarının konumlandırılması ve toplama rotalarının planlanması, maliyet minimizasyonu perspektifinden ele alınmıştır. Yönetim sistemi çerçevesinde, kampüs içindeki farklı kullanım alanlarından (fakülteler, yemekhane, kütüphane, kafeteryalar, yurtlar, restoranlar ve sosyal alanlar) elde edilen alan bazlı kullanıcı sayıları ve geri dönüştürülebilir atık üretim miktarlarına ilişkin veriler kullanılmıştır. Bu doğrultuda, GAMS (General Algebraic Modeling System) yazılımı kullanılarak; toplama noktaları ile atık işleme tesisleri arasındaki mesafeler, araç kapasite kısıtları ve taşıma maliyetlerini dikkate alan bir matematiksel model geliştirilmiş ve çözülmüştür. Modelin uygulanabilirliği incelenmiş; birden farklı senaryo analizleri kapsamında toplama rotalarının kampüs genelindeki kullanım yoğunluğuna bağlı olarak oluşan doluluk oranları, taşıma mesafeleri ve toplam maliyetler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan önerilen optimizasyon yaklaşımının toplam taşıma maliyetlerini düşürdüğünü ve kampüs içi atık toplama faaliyetlerinin daha etkin ve verimli bir şekilde yürütülmesine fayda sağladığını göstermektedir. Bu bağlamda, geliştirilen ve önerilen modelin üniversite kampüslerinde sürdürülebilir geri dönüşüm sistemlerinin planlanması ve yönetilmesi amacıyla etkin bir karar destek aracı olarak kullanılabilirliği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Atık Yönetimi, Geri Dönüştürülebilir Atık, Matematiksel modelleme, Rota Optimizasyonu, Sürdürülebilirlik, P-Medyan Modeli.

ABSTRACT

This study examines the optimization of the waste collection system to ensure the efficient management of recyclable wastes generated within a university campus. Within the scope of the study, the positioning of collection points and the planning of collection routes for recyclable wastes such as plastic, paper, and glass are addressed from a cost minimization perspective. Within the framework of the management system, data on area-based user numbers and recyclable waste production amounts obtained from different usage areas within the campus (faculties, cafeteria, library, cafes, dormitories, restaurants, and social areas) were utilized. Accordingly, using GAMS (General Algebraic Modeling System) software, a mathematical model was developed and solved, taking into account the distances between collection points and waste processing facilities, vehicle capacity constraints, and transportation costs. The applicability of the model was examined; the effects of collection routes on occupancy rates, transportation distances, and total costs depending on the intensity of use throughout the campus were evaluated within the framework of different scenario analyses. The results obtained show that the proposed optimization approach reduces total transportation costs and contributes to more effective and efficient execution of campus waste collection activities. In this context, it has been demonstrated that the developed and proposed model can be used as an effective decision support tool for planning and managing sustainable recycling systems in university campuses.

Keywords: Waste Management, Recyclable Waste, Mathematical Modeling, Route Optimization, Sustainability, P-Median Model.

Başvuru: 27.02.2026 Kabul: 24.03.2026

Doi: 10.51764/smutgd.1898592

^{1*}Sorumlu yazar: Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye. E-mail: metehan.atay@hku.edu.tr ; ORCID:0000-0003-2025-9899

² E-mail: melihayaz04@gmail.com ; ORCID:0009-0007-5805-1213

³ E-mail: hulyadamlayilmaz@gmail.com ; ORCID:0009-0000-8340-8340

⁴ E-mail: yamanzuhale862@gmail.com ORCID:0009-0006-9003-3165

⁵E-mail: sudenaztekden21@gmail.com ; ORCID:0009-0009-8469-0873

1.GİRİŞ

Günümüzde hızla artan nüfus, kentleşme ve tüketim alışkanlıklarındaki büyük çaplı değişimler, katı atık miktarlarında önemli artışlara yol açmakta ve bu durum atık yönetimini sadece bir lojistik sorun olmaktan çıkarıp, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir konu hâline getirmektedir. Özellikle geri dönüştürülebilir atıkların (kâğıt, plastik, metal, cam vb.) etkin biçimde toplanması, ayrıştırılması ve yönetilmesi, doğal kaynakların korunmasında, enerji tasarrufu sağlanmasında ve karbon emisyonlarının azaltılmasında büyük bir önem taşımaktadır (Xu et al., 2020; Wang & Chen, 2022). Ancak, geri dönüştürülebilir atıkların yönetimindeki yetersizlikler ve eksiklikler, atık depolama alanlarının dolmasına ve sonuç olarak ciddi boyutlarda çevresel kirliliğe neden olmaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen yeni ve sürdürülebilir atık yönetim sistemleri, yalnızca ekonomik maliyetleri değil; çevresel etkileri (ekolojik ayak izi) ve sosyal sonuçları (halk sağlığı) da kapsayan çok boyutlu ve bütüncül karar süreçlerinin uygulanmasını gerekli kılmaktadır.

Üniversite kampüsleri; öğrenci, akademik ve idari personel yoğunluğu, sosyal alanlar ve eğitim yapıları ile küçük ölçekli kentsel alanlar niteliğindedir. Bu özellikleri nedeniyle üniversite kampüsleri, kontrol edilebilir ve ölçülebilir yapılarıyla bu tür sürdürülebilir yönetim modellerinin test edilebileceği ideal "pilot bölgeler" ve "akıllı şehir" prototipleridir. Yapılan testler sonucunda elde edilen sonuçlar benzer özellikler taşıyan diğer kapalı kurumsal alanlara ve hatta ölçeklendirme yöntemleriyle kentsel yerleşimlere ve akıllı şehir uygulamalarına genellenebilir sonuçlar üretme potansiyeline sahiptir. Ancak literatürde de belirtildiği üzere, geri dönüşüm konteynerlerinin plansız yerleştirilmesi kullanıcı erişimini zorlaştırmakta ve atık toplama sistemlerinin etkinliğini azaltmaktadır (López-Sánchez et al., 2021; Fernández & Ruiz, 2024).

Atık toplama sistemlerinin verimliliğini belirleyen en temel unsurlar arasında konteyner yerleşimi ve talep noktalarının uygun konteynerlere atanması yer almaktadır. Bu iki karar unsuru hem operasyonel maliyetleri hem de çevresel etkileri doğrudan etkileyen kritik bileşenler olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda; tesis yer seçimi problemleri ve araç rotalama problemleri, atık yönetimi literatüründe sıklıkla ele alınmaktadır (Buhrkal vd., 2019; Sampaio vd., 2021). Konteyner yerleşimi, kullanıcıların geri dönüşüm noktalarına erişimini doğrudan etkilerken, talep noktalarının uygun konteynerlere atanması, toplam ulaşım mesafesi, yakıt tüketimi ve buna bağlı karbon emisyonlarını doğrudan etkilemektedir.

Özellikle p-medyan modeli, talep noktaları ile tesisler arasındaki toplam mesafeyi minimize etmeye yönelik yapısı sayesinde geri dönüşüm konteynerlerinin konumlandırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Modelin temel amacı, belirli sayıda tesisin en uygun noktalara konumlandırarak, talep noktalarına olan ortalama ulaşım mesafesini minimize etmektir. Bu özellik, kullanıcıların geri dönüşüm davranışlarını olumlu yönde etkileyerek sistemi amaçladığı hedefe yaklaştırmaktadır. Kampüs gibi homojen talep dağılımına sahip alanlarda ve yaya erişiminin önemli olduğu alanlarda p-medyan yaklaşımının daha dengeli ve erişilebilir çözümler sunduğu vurgulanmaktadır (Fernández & Ruiz, 2024). Ayrıca p-medyan tabanlı yerleşim modellerinde, farklı konteyner sayıları için senaryo analizlerinin gerçekleştirilmesine olanak tanınarak karar vericilere esneklik sağlanıyordu.

Bu çalışma, üniversite kampüsü ölçeğinde geri dönüştürülebilir atıkların daha verimli ve sürdürülebilir biçimde toplanabilmesi amacıyla GAMS (General Algebraic Modeling System) yazılımı üzerinden geliştirilen iki temel matematiksel modele dayanmaktadır. Geliştirilen modellerden ilki olan 'Araç Yakıt Modeli', atık toplama araçlarının yakıt tüketimi ve buna bağlı karbon emisyonu minimize edilirken; ikinci model olan 'Yürüme Esaslı Model' kullanıcıların geri dönüşüm konteynerlerine erişiminde kat ettikleri yürüme mesafesi ve harcanan fiziksel enerji ile çevresel etki birlikte değerlendirilmiştir. Her iki modelin veri seti, kampüs içerisindeki 32 farklı talep noktasının öğrenci yoğunluğu ve bu noktalar arasındaki gerçek yaya/araç güzergâhlarının Google Earth üzerinden hassas manuel ölçüleriyle oluşturulmuştur. Araç Yakıt Modeli'nde operasyonel maliyetler 0,08 lt/km yakıt tüketimi ve 2630 gr/km CO₂ katsayıları üzerinden hesaplanırken; Yürüme Esaslı Model'de insan eforu 100 kalori/km ve 110 gr/km CO₂ salınımı parametreleri ile çok amaçlı bir maliyet matrisine dönüştürülmüştür. Yapılan senaryo analizleri ve maliyet-etkinlik eğrileri sonucunda hem ekonomik verimlilik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kampüs lojistiği için en optimal çözümün altı tesis (p=6) kurulumu olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmanın temel katkısı; üniversite kampüslerinde mevcut atık toplama kaynaklarının etkin yerleşim ve rota stratejileriyle çevresel ve ekonomik faydaya dönüştürülmesini sağlayacak, sürdürülebilir ve ölçeklenebilir bir sistem önerisinde bulunmasıdır. Bu yönüyle çalışma, yalnızca lojistik bir optimizasyon değil,

aynı zamanda üniversitelerin karbon ayak izini azaltmayı ve sürdürülebilir kampüs vizyonuna sosyal bir katkı sunmayı hedefleyen yenilikçi bir model ortaya koymaktadır. Geliştirilen bu model, yalnızca tekil bir kampüs örneğiyle sınırlı kalmayıp, diğer kurumsal alanlarda ve akıllı şehir projelerinde de uygulanabilecek ölçeklenebilir bir karar destek sistemi olarak değerlendirilebilir. Dolayısıyla bu çalışmanın, üniversite yönetimleri ve yerel yönetimlerin sürdürülebilir atık politikaları geliştirmeleri sürecinde yol gösterici bir akademik kaynak olması beklenmektedir.

2.YÖNTEM

2.1 Literatür Taraması

Son yıllarda üniversite kampüsleri gibi yoğun nüfuslu alanlarda çevresel sürdürülebilirlik ve geri dönüştürülebilir atık yönetimi (plastik, kâğıt, cam vb.) kritik bir araştırma konusu haline gelmiştir. Kampüslerde oluşan geri dönüştürülebilir atıkların doğru şekilde toplanması, yalnızca çevresel fayda sağlamakla kalmayıp operasyonel verimliliğin artırılmasına da katkı sağlamaktadır (Tchobanoglous & Kreith, 2015). Atık toplama süreçlerinde verimlilik temel olarak iki karar mekanizmasına dayanmaktadır: toplama noktalarının optimum biçimde belirlenmesi (Facility Location Problem-FLP) ve atık toplama araçlarının izleyeceği rotaların planlanması (Vehicle Routing Problem-VRP). Literatürde bu iki kararın birlikte ele alınmasının, operasyonel maliyetleri minimize ederken çevresel faydayı maksimize ettiği vurgulanmaktadır (Farahani vd., 2010; Sampaio vd., 2021).

Lojistik optimizasyona yönelik yapılan çalışmalar, etkin bir konumlandırma ve rota planlamasının atık yönetim performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Teixeira vd. (2004), Portekiz'de gerçekleştirdikleri uygulamada geri dönüştürülebilir atık toplama sistemini optimize ederek taşıma maliyetlerinde %17 oranında iyileşme sağlamıştır. Güncel literatürde ise yapay zekâ ve derin öğrenme algoritmalarının sürece entegre edilmesiyle bu başarımın daha ileri düzeye taşındığı görülmektedir. Zhang vd. (2024), IoT destekli dinamik rotalama yaklaşımıyla operasyonel maliyetlerde %30, karbon emisyonlarında %31 düzeyinde azalma elde ederek teknolojik dönüşümün atık yönetimine sağladığı katkıyı somut olarak ortaya koymuştur. Benzer şekilde Xu vd. (2020) ile Wang ve Chen (2022), klasik mesafe minimizasyonu odaklı yaklaşımların ötesine geçerek karbon emisyonunu karar modellerine doğrudan dahil eden Yeşil Araç Rotalama (Green VRP) modellerinin çevresel sürdürülebilirlik açısından daha rasyonel ve etkili sonuçlar ürettiğini göstermiştir.

Üniversite kampüsleri gibi mikro ölçekte ancak karmaşık yapıya sahip alanlarda, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve matematiksel modelleme yaklaşımlarının entegrasyonu önemli bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır (Zsigraiová vd., 2013; Mohsen & Reddy, 2020). Bu çerçevede p-medyan tabanlı yer seçimi yöntemleri, talep noktaları ile konteyner merkezleri arasındaki mesafeyi minimize ederek erişilebilirliği artırmakta ve sistem performansını güçlendirmektedir (López-Sánchez vd., 2021). Fernández ve Ruiz (2024), yaptıkları karşılaştırmalı analizde özellikle kampüs yerleşkeleri gibi homojen talep dağılımına sahip alanlarda p-medyan yaklaşımının p-center ve k-means yöntemlerine kıyasla daha dengeli, adil ve kararlı sonuçlar sunduğunu ortaya koymuştur.

Atık toplama süreçlerinin doğası gereği belirsizlik içermesi, literatürde deterministik yaklaşımlardan stokastik ve bulanık temelli modellere doğru bir yönelime neden olmuştur. Amani ve Geroliminis (2022), yoğun insan hareketinin bulunduğu alanlarda talep dalgalanmalarını stokastik modellerle ele alırken; Alavi vd. (2023), belirsizlik koşullarında dahi esnek ve uygulanabilir çözümler üreten bulanık optimizasyon yaklaşımlarının etkinliğini ortaya koymuştur. Bu akademik birikim doğrultusunda yürütülen mevcut çalışma, literatürde sunulan modelleme yaklaşımlarını üniversite kampüsü ölçeğine uyarlayarak mevcut boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Çalışma, araç yakıt tüketimi, kullanıcı erişim mesafesi ve karbon emisyonu gibi çevresel ve operasyonel göstergeleri p-medyan tabanlı bütünlük bir yapı içerisinde ele alarak hem lojistik verimliliği hem de kullanıcı deneyimini eş zamanlı olarak optimize eden özgün bir karar destek sistemi önermektedir.

2.2. Materyal Metod

Bu çalışma, bir üniversite kampüsü içerisinde oluşan geri dönüştürülebilir atıkların (plastik, kâğıt ve cam) etkin yönetimi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada önerilen modelin uygulanabilirliğini test etmek amacıyla vaka analizi olarak Gaziantep'te bulunan Hasan Kalyoncu Üniversitesi ana kampüsüne ait gerçek veriler kullanılmıştır. Çalışma sahası olarak kullanılan kampüs yerleşkesi 500.000 metrekarelik bir alana kuruludur. Yaklaşık 10.902 öğrenciye ve 272 akademik/idari personeli bünyesinde barındırmaktadır. Kampüs içerisinde yer alan fakülteler, idari birimler, öğrenci yurtları ve sosyalleşme alanları atık üretim merkezleri olarak tanımlanmış ve bu noktalar hem talep noktası hem de potansiyel konteyner yerleşim alanı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda kampüs genelinde toplam 32 konum çalışmaya dahil edilmiştir.

Çalışma, literatürdeki Konum–Yönlendirme Problemi (Location–Routing Problem, LRP) çerçevesiyle teorik bir yakınlık gösterse de önerilen matematiksel model klasik LRP formülasyonundan farklılaşmaktadır. Klasik LRP modellerinde tesis konumu ile detaylı araç rotalama kararları eş zamanlı olarak optimize edilirken; bu çalışmada, hesaplama karmaşıklığını yönetmek adına rota optimizasyonu model kapsamı dışında tutulmuş veya basitleştirilmiştir. Önerilen modelin temel yapısı, p-medyan yaklaşımına dayalı bir tesis yer seçimi ve talep atama problemine odaklanmaktadır. Bu doğrultuda model; belirli sayıdaki konteynerin en uygun konumlara yerleştirilmesini ve talep noktalarının bu ünitelere optimum şekilde atanmasını hedeflemektedir. Ancak geliştirilen bu yaklaşım, klasik p-medyan modellerinden farklı olarak, maliyet fonksiyonuna karbon emisyonu (CO₂) ve enerji tüketimi gibi çevresel parametreleri entegre eden çok amaçlı bir optimizasyon yapısı sunmaktadır.

Dolayısıyla geliştirilen model, klasik bir p-medyan formülasyonunun çevresel ve operasyonel maliyet unsurlarıyla zenginleştirilmiş bir türevi olarak ele alınmalıdır. Metin içerisinde yer verilen LRP kavramı ise, problemin bütünleşik yapısını ve literatürdeki teorik konumunu tanımlamak amacıyla genel bir çerçeve olarak kullanılmıştır. Talep miktarlarını temsil eden veriler, ilgili birimlerin kullanıcı yoğunlukları, nüfus hareketliliği ve fonksiyonel kullanım düzeyleri dikkate alınarak belirlenmiş, kampüste oluşan geri dönüştürülebilir atık potansiyelinin mekânsal dağılımı oluşturulmuştur. Bu çalışmada modelde kullanılan talep parametresi $h(i)$, doğrudan fiziksel atık miktarını değil, talep noktalarındaki kullanıcı yoğunluğunu temsil eden ve atık üretim potansiyelini dolaylı olarak yansıtan bir büyüklük olarak tanımlanmıştır.

Bu kapsamda, kampüs içerisindeki her bir nokta için belirlenen kullanıcı sayıları, ilgili birimin fonksiyonel kullanım düzeyi ve günlük kullanım yoğunluğu dikkate alınarak normalize edilmiş ve talep büyüklüğü olarak modele entegre edilmiştir. Dolayısıyla $h(i)$ parametresi, atık üretim miktarının doğrudan ölçümü yerine, bu miktarla orantılı olduğu varsayılan bir temsil değişkeni olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, veri erişimindeki kısıtlar ve modelin stratejik karar verme yapısı göz önünde bulundurularak tercih edilmiş olup, literatürde talep tahmini temelli tesis yer seçimi modelleri ile uyumludur.

Coğrafi konum bilgileri ve mesafe ölçümleri, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) destekli analizler ve kampüs haritaları üzerinden elde edilmiştir. Modelde kullanılacak taşıma maliyetleri ve çevresel etki katsayıları literatürden alınan standart değerler ve çevresel sürdürülebilirlik çalışmalarında yaygın kabul gören dönüşüm katsayıları kullanılarak oluşturulmuştur. Araç kullanımına dayalı senaryoda yakıt tüketimi 0,08 litre/km, buna bağlı CO₂ salınımı 2630 g/km olarak kabul edilmiştir. Yürüme esaslı senaryoda ise insan enerji tüketimi 100 kcal/km, yürüme kaynaklı CO₂ salınımı ise 110 g/km olarak varsayılmıştır.

Bu araştırmada, operasyonel giderler (yakıt/kalori) ile çevresel etkiler (CO₂ emisyonu) karar verme mekanizmasında eş değerde konumlandırılmış; bu doğrultuda her iki parametrenin ağırlık katsayısı 0,5 olarak atanmıştır. Belirli bir politika önceliğinin bulunmadığı senaryolarda tercih edilen bu yöntem, ekonomik verimlilik ile çevresel sürdürülebilirlik hedefleri arasında optimum dengeyi gözeten, tarafsız bir yaklaşımı yansıtmaktadır. Farklı senaryoların model üzerindeki etkisini gözlemlemek adına ağırlık katsayıları üzerinde varyasyonlar denenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, ağırlıklar değiştikçe maliyet kalemlerinin genel toplama etkisi farklılaşsa da modelin önerdiği ideal çözümün sabit kaldığı görülmüştür. Bu sonuç, sistemin farklı karar verme önceliklerine karşı dirençli olduğunu ve tutarlı çıktılar sunduğunu göstermektedir.

Modelde kurulacak konteyner sayısı (p) dışsal bir parametre olarak tanımlanmış ve sistemin duyarlılığını ölçmek amacıyla $p = 1$ ile $p = 10$ aralığında farklı senaryo analizleri yürütülmüştür. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, maliyet ve erişilebilirlik dengesi gözetilerek en makul çözümün $p = 6$ değerinde sağlandığı tespit edilmiştir ve her konteyner için sabit kurulum maliyeti 1000 TL olarak modele dahil edilmiştir. Bu çalışmada her bir konteyner için sabit kurulum maliyeti 1000 TL olarak modele dahil edilmiştir. Ancak sonuç tablolarında sunulan “kurulum maliyeti” değerleri yalnızca konteyner başına sabit maliyetin toplamını ($p \times 1000$ TL) değil, bu maliyetin toplam sistem maliyeti üzerindeki etkisini de içeren bileşik bir gösterimdir. Bu kapsamda Tablo 6’da verilen değerler, sabit kurulum maliyetinin modelin toplam maliyet fonksiyonuna entegre edilmesiyle elde edilen sonuçları yansıtmaktadır. Dolayısıyla tabloda yer alan “kurulum maliyeti” ifadesi, yalnızca yatırım maliyetini değil, bu maliyetin operasyonel ve çevresel bileşenlerle birlikte sistem üzerindeki toplam etkisini temsil etmektedir.

Çalışmanın temel amacı, kampüs içerisinde oluşan geri dönüştürülebilir atıkların toplanmasına yönelik en uygun konteyner yerleşim noktalarının belirlenmesi ve bu süreçte toplam taşıma maliyeti, enerji tüketimi ve CO₂ salınımının minimize edilmesidir. Ele alınan bu problem, tesis yer seçimi ile talep atama kararlarını bütünlük bir yapıda sunması nedeniyle literatürdeki Konum–Yönlendirme Problemleri (LRP) ile kavramsal bir paralellik taşımaktadır. Ancak önerilen model, klasik LRP yaklaşımlarının aksine araç rotalama süreçlerini içermemektedir; bunun yerine, stratejik kararları p -medyan temelli bir yer seçimi–atama kurgusu üzerinden yürütmektedir.

Geliştirilen matematiksel model, Araç Yakıt ve Yürüme Esaslı senaryolar için ortak ve senaryoya özgü değişkenlerle formüle edilmiştir. Modelin temelini ikili karar değişkenleri oluşturur: $x(j)$ bir konteynerin j konumuna kurulup kurulmayacağını, $y(i,j)$ ise i noktasındaki talebin j konteynerine atanıp atanmayacağını belirler. Toplam maliyetin minimize edilmesi amacıyla tanımlanan sürekli değişken Z , her iki senaryo için toplam maliyeti temsil eden amaç fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Araç Yakıt Modeli’nde maliyetler yakıt tüketimi (lit) ve karbon salımı (carb) üzerinden, Yürüme Esaslı Model’de ise kalori harcaması (cal) ve karbon salımı (carb) üzerinden hesaplanmaktadır. Böylece model, yerleşim kararlarını ve bu kararların çevresel-ekonomik etkilerini nicel olarak değerlendirmektedir.

Model aşağıdaki varsayımlar altında geliştirilmiştir:

- Kampüs genelinde 32 talep noktası bulunmaktadır.
- Her talep noktası yalnızca bir konteynere atanır.
- Talep yalnızca kurulmuş konteynere yönlendirilebilir.
- Kurulacak konteyner sayısı sabittir ($p=6$).
- Operasyonel ve çevresel maliyetler birlikte değerlendirilmiştir.
- Sistem hem araç temelli hem de yürüme temelli iki senaryoda analiz edilmiştir.
- Modelde konteyner kapasite kısıtları dikkate alınmamış olup, her konteynerin talebi karşılayabilecek yeterli kapasiteye sahip olduğu varsayılmıştır.

Bu çalışmada iki temel küme bulunmaktadır: potansiyel tesis yerleri ve talep noktaları. Modelin daha açık, sistematik ve anlaşılabilir bir şekilde sunulabilmesi amacıyla, kullanılan indeksler, parametreler ve karar değişkenleri aşağıda özetlenmiştir.

İndeksler:

- i : Talep noktaları ($i = 1, \dots, 32$)
- j : Potansiyel konteyner yerleri ($j = 1, \dots, 32$)

Parametreler:

- $h(i)$: i noktasındaki talep miktarı (öğrenci sayısı)
- $c(i,j)$: i noktasından j noktasına ulaşım maliyeti (Araç modelinde yakıt, yürüme modelinde kalori)
- $co2(i,j)$: i noktasından j noktasına oluşan CO₂ salınım maliyeti
- p : Kurulacak konteyner sayısı
- f_m : Sabit konteyner kurulum maliyeti
- W_{litre} : Araç yakıt maliyetinin ağırlık katsayısı
- W_{calori} : Yürüme modelinde kalori maliyetinin ağırlık katsayısı
- W_{co2} : Karbon emisyon maliyetinin ağırlık katsayısı

Karar Değişkenleri:

- $x(j)$: j konumuna konteyner kurulursa 1, aksi halde 0
- $y(i,j)$: i noktasındaki talep j noktasındaki konteynere atanırsa 1, aksi halde 0

Sürekli Değişkenler:

- lit : Toplam yakıt tüketimi (Araç Yakıt Modeli)
- cal : Toplam kalori tüketimi (Yürüme Esaslı Model)
- $carb$: Toplam karbon emisyonu
- Z : Amaç fonksiyonu (toplam maliyet)

Model iki farklı senaryo üzerinden ele alınmıştır: Araç Yakıt Modeli ve Yürüme Esaslı Model. Her iki modelde de karar değişkenleri ve temel yapı aynı olup, farklılık maliyet parametrelerinin tanımlanmasında ortaya çıkmaktadır. Araç Yakıt Modeli'nde ulaşım maliyetleri araç yakıt tüketimi ve buna bağlı karbon emisyonu üzerinden hesaplanırken, Yürüme Esaslı Model'de maliyetler kullanıcıların yürüme mesafesine bağlı kalori harcaması ve karbon emisyonu dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu sayede model hem operasyonel hem de kullanıcı odaklı çevresel etkileri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmektedir.

Yürüme Esaslı Model Parametreleri:

$h(i)$: i noktasındaki talep (öğrenci sayısı)

Talep Karşılama(i):

$$\sum_j y_{ij} = 1 \quad (1)$$

Her talep noktasının yalnızca bir konteynere atanmasını zorunlu kılarak %100 hizmet kapsamı sağlar ve atıkların dışarıda kalmasını önler.

Atama Kısıtı(i,j):

$$y_{i,j} \leq x_j \quad (2)$$

Talep atamasının yalnızca kurulmuş konteynerlere yapılabilmesini garanti ederek modelin sahada uygulanabilirliğini sağlar.

Tesis Sayısı:

$$\sum_j x_j = p \quad (3)$$

Kurulacak konteyner sayısını sabit bir değerle ($p=6$) sınırlandırarak yatırım ve operasyon dengesini kontrol eder.

1) Araç Yakıt Modeli Denklemleri

Amaç Fonksiyonu:

$$\min Z = \sum_{i,j} h_i \cdot (W_{litre} \cdot c_{i,j} + W_{co2} \cdot co2) \cdot y_{i,j} + \sum_{j_j^x} f_m \quad (4)$$

Araç Yakıt Modeli için yakıt tüketimi, CO₂ salımı ve sabit tesis maliyetlerini içeren toplam ağırlıklı maliyetin minimize edilmesini amaçlar.

Araç Yakıt:

$$\sum_{i,j} h_i \cdot W_{litre} \cdot c_{i,j} \cdot y_{i,j} = lit \quad (5)$$

Araç Yakıt Model’inde tüm lojistik faaliyetlerden kaynaklanan toplam yakıt tüketimini hesaplar.

Karbon:

$$\sum_{i,j} h_i \cdot W_{co_2} \cdot co_{2,i,j} \cdot y_{i,j} = carb \quad (6)$$

Araç Yakıt Modeli sonucunda oluşan toplam CO₂ salımını nicel olarak belirler.

2) Yürüme Esaslı Model Denklemleri

Amaç Fonksiyonu:

$$\min Z = \sum_{i,j} h_i \cdot (W_{calori} \cdot c_{i,j} + W_{co_2} \cdot co_{2,i,j}) \cdot y_{i,j} + \sum_j x_j \cdot fm \quad (7)$$

Yürüme Esaslı Model’de sabit kurulum maliyetleri ile kalori harcaması ve CO₂ salımını içeren toplam ağırlıklı maliyeti minimize eder.

Kalori:

$$\sum_{i,j} h_i \cdot W_{calori} \cdot c_{i,j} \cdot y_{i,j} = cal \quad (8)$$

Yürüme Esaslı Model’de yürüyerek taşımadan kaynaklanan toplam kalori tüketimini hesaplar.

Karbon:

$$\sum_{i,j} h_i \cdot W_{co_2} \cdot co_{2,i,j} \cdot y_{i,j} = carb \quad (9)$$

Yürüme Esaslı Model’de yaya taşımacılığı sonucu oluşan toplam CO₂ salımını ölçer.

2.3 Kampüs İçi Yerleşim Krokisi

Şekil 1, Hasan Kalyoncu Üniversitesi ana kampüsün mevcut yerleşim planını ve lojistik analiz kapsamında tanımlanan 32 talep noktasını göstermektedir. Bu harita, tesis yer seçimi optimizasyon modelinin temel mekânsal girdisini oluşturarak, talep yoğunlukları dikkate alınmak suretiyle operasyonel maliyetlerin (yakıt/kalori) ve çevresel etkilerin (CO₂) minimize edildiği en uygun konteyner yerleşimlerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 1. Kampüs İçi Yerleşim Krokisi

1- Mühendislik Fakültesi	10- Öğrenci İşleri Müdürlüğü	21- Mağaza
2- Eğitim Fakültesi	11- Kalyon Garaj	22- Kütüphane
3- Güzel Sanatlar ve Mimarlık Fakültesi	12- Restoran	23- Laboratuvar
4- Hukuk Fakültesi	13- Restoran 4	24- Acil
5- İktisadi, İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi	14- Restoran 5	25- KYK A/B
6- Sağlık Bilimleri Fakültesi	15- Kafe 2	26- KYK C
7- Yabancı Diller Yüksekokulu	16- Kırtasiye	27- Market
8- FTR	17- Kırtasiye 2	28- Konukevi
9- Kongre ve Kültür Merkezi	18- Restoran 2	29- Golf Sahası
	19- Kafe	31- Gösteri ve Sanat Merkezi
	20- Restoran 3	32- Hukuk Amfi

2.3.1 Araç yakıt modeli' nde coğrafi mesafe matrisinin oluşturulması

Bu çalışmada kullanılan temel veri seti, kampüs içindeki 32 talep noktası arasındaki tüm ikili mesafeleri içeren bir güzergâh matrisinden oluşmaktadır. Mesafeler, kampüs içi gerçek yol ve yaya aksları dikkate alınarak Google Earth üzerinden manuel olarak ölçülmüş ve elde edilen gerçek seyahat mesafeleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Coğrafi Mesafe Matrisi

BÖLGELER	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1	0	46	73	29	38	68	50	70	34	44	06	61	61	61	61	61	92	92	77	77	77	61	61	64	70	53	59	74	34	46	66	48
2	0	33	0	80	14	26	56	38	07	20	31	37	86	86	86	86	31	31	73	73	73	31	31	01	57	41	45	60	61	0	84	35
3	0	64	43	0	46	36	08	26	60	31	39	68	99	99	99	99	83	83	25	25	25	83	83	54	34	50	53	69	56	43	36	28
4	0	21	39	96	0	32	58	41	82	26	36	25	74	74	74	74	04	04	89	89	89	04	04	75	60	45	51	65	47	39	79	38
5	0	31	09	77	12	0	53	35	93	18	28	36	85	85	85	85	15	15	71	71	71	15	15	86	52	38	44	58	02	09	80	33
6	0	84	65	23	68	59	0	50	53	55	63	78	91	91	91	91	76	76	16	16	16	76	76	47	58	73	62	94	51	65	29	53
7	0	49	27	32	30	19	30	0	80	15	23	52	02	02	02	02	04	04	46	46	46	04	04	76	31	33	35	54	76	26	57	13
8	0	70	97	56	93	89	64	82	0	86	95	64	78	78	78	78	22	22	49	49	49	22	22	07	89	04	93	24	38	97	38	85
9	0	34	20	40	25	17	35	17	87	0	12	40	87	87	87	87	09	09	52	52	52	09	09	81	37	21	27	42	60	20	63	14
10	0	45	23	46	23	16	43	24	95	12	0	50	99	99	99	99	18	18	60	60	60	18	18	89	27	11	17	32	71	23	70	21
11	0	06	52	79	35	44	74	56	64	40	50	0	55	55	55	55	86	86	71	71	71	86	86	58	76	59	65	80	28	52	60	54
12	0	63	01	92	85	93	25	04	77	88	98	58	0	0	0	0	01	01	84	84	84	01	01	71	25	09	13	18	41	01	73	01
13	0	63	01	92	85	93	25	04	77	88	98	58	0	0	0	0	01	01	84	84	84	01	01	71	25	09	13	28	41	01	73	01
14	0	63	01	92	85	93	25	04	77	88	98	58	0	0	0	0	01	01	84	84	84	01	01	71	25	09	13	28	41	01	73	01
15	0	63	01	92	85	93	25	04	77	88	98	58	0	0	0	0	01	01	84	84	84	01	01	71	25	09	13	28	41	01	73	01
16	0	63	01	92	85	93	25	04	77	88	98	58	0	0	0	0	01	01	84	84	84	01	01	71	25	09	13	28	41	01	73	01
17	0	92	30	78	15	25	86	04	22	08	17	86	00	00	00	00	0	0	71	71	71	0	0	29	11	26	15	46	60	30	60	07
18	0	92	30	78	15	25	86	04	22	08	17	86	00	00	00	00	0	0	71	71	71	0	0	29	11	26	15	46	60	30	60	07
19	0	71	50	09	54	43	16	34	67	37	47	76	04	04	04	04	91	91	0	0	0	91	91	61	43	57	45	77	63	50	43	36
20	0	71	50	09	54	43	16	34	67	37	47	76	04	04	04	04	91	91	0	0	0	91	91	61	43	57	45	77	63	50	43	36
21	0	71	50	09	54	43	16	34	67	37	47	76	04	04	04	04	91	91	0	0	0	91	91	61	43	57	45	77	63	50	43	36
22	0	92	30	78	15	25	86	04	22	08	17	86	00	00	00	00	0	0	71	71	71	0	0	29	11	26	15	46	60	30	60	07
23	0	92	30	78	15	25	86	04	22	08	17	86	00	00	00	00	0	0	71	71	71	0	0	29	11	26	15	46	60	30	60	07
24	0	63	89	49	86	83	57	75	07	79	88	57	71	71	71	71	29	29	42	42	42	29	29	0	82	97	86	17	31	01	31	78
25	0	69	47	40	51	40	38	31	90	37	27	74	23	23	23	23	12	12	54	54	54	12	12	84	0	23	13	43	96	47	64	33
26	0	54	32	55	36	0	0	0	16	0	11	60	08	08	08	08	38	38	69	69	69	38	38	09	23	0	12	23	81	32	79	30
27	0	60	38	45	41	31	41	35	94	27	17	65	13	13	13	13	16	16	60	60	60	16	16	88	13	12	0	33	86	38	69	36
28	0	74	53	74	56	46	72	54	36	42	32	80	28	28	28	28	58	58	90	90	90	58	58	30	43	23	33	0	02	53	99	51
29	0	34	73	50	76	65	58	75	35	60	70	30	40	40	40	40	59	59	44	44	44	59	59	29	83	80	88	01	0	73	33	72
30	0	33	0	80	14	26	56	38	07	20	31	37	86	86	86	86	31	31	73	73	73	31	31	01	57	41	45	60	61	0	84	35
31	0	78	59	17	63	53	26	44	47	48	57	72	86	86	86	86	69	69	10	10	10	69	69	40	51	65	55	86	44	59	0	46
32	0	46	24	54	28	16	31	12	83	13	20	50	59	59	59	59	06	06	48	48	48	06	06	76	32	31	35	50	73	24	59	0

Elde edilen Coğrafi Mesafe Matrisi, çok amaçlı fonksiyonu oluşturmak üzere iki farklı maliyet matrisine dönüştürülmüştür. Bunlar Araç Yakıt Tüketimi Matrisi ve Karbondioksit (CO₂) Salınım Matrisidir. Araç Yakıt Tüketimi Matrisi (c(i,j)): Bu analizde, araçların ortalama yakıt tüketimi 0,08 Litre/km olarak kabul edilmiştir.

$$c(i,j) = \text{Mesafe(km)} \times 0,08 \frac{\text{litre}}{\text{km}}$$

Tablo 2. Araç Yakıt Tüketim Matrisi

BÖLGELER	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1	0,00	0,04	0,06	0,02	0,03	0,05	0,04	0,06	0,03	0,04	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,06	0,03	0,04	0,05	0,04	
2	0,03	0,00	0,06	0,01	0,02	0,04	0,03	0,09	0,02	0,02	0,03	0,07	0,07	0,07	0,07	0,10	0,10	0,06	0,06	0,06	0,10	0,10	0,08	0,05	0,03	0,04	0,05	0,05	0,00	0,07	0,03	
3	0,05	0,03	0,00	0,04	0,03	0,01	0,02	0,05	0,02	0,03	0,05	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,02	0,02	0,02	0,07	0,07	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	
4	0,02	0,03	0,08	0,00	0,03	0,05	0,03	0,07	0,02	0,03	0,02	0,06	0,06	0,06	0,06	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,06	0,03	
5	0,02	0,01	0,06	0,01	0,00	0,04	0,03	0,07	0,01	0,02	0,03	0,07	0,07	0,07	0,07	0,09	0,09	0,06	0,06	0,06	0,09	0,09	0,07	0,04	0,03	0,04	0,05	0,08	0,01	0,06	0,03	
6	0,07	0,05	0,02	0,05	0,05	0,00	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,01	0,01	0,01	0,06	0,06	0,04	0,05	0,06	0,05	0,08	0,04	0,05	0,02	0,04	
7	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,00	0,06	0,01	0,02	0,04	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,04	0,04	0,04	0,08	0,08	0,06	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,01	
8	0,06	0,08	0,04	0,07	0,07	0,05	0,07	0,00	0,07	0,08	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,07	0,08	0,07	0,10	0,03	0,08	0,03	0,07	
9	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	0,07	0,00	0,01	0,03	0,07	0,07	0,07	0,07	0,09	0,09	0,04	0,04	0,04	0,09	0,09	0,06	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,02	0,05	0,01	
10	0,04	0,02	0,04	0,02	0,01	0,03	0,02	0,08	0,01	0,00	0,04	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,05	0,05	0,05	0,09	0,09	0,07	0,02	0,01	0,01	0,03	0,06	0,02	0,06	0,02	
11	0,00	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,04	0,05	0,03	0,04	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,02	0,04	0,05	0,04	
12	0,05	0,08	0,07	0,07	0,07	0,10	0,08	0,06	0,07	0,08	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,06	0,10	0,09	0,09	0,10	0,03	0,08	0,06	0,08	
13	0,05	0,08	0,07	0,07	0,07	0,10	0,08	0,06	0,07	0,08	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,06	0,10	0,09	0,09	0,10	0,03	0,08	0,06	0,08	
14	0,05	0,08	0,07	0,07	0,07	0,10	0,08	0,06	0,07	0,08	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,06	0,10	0,09	0,09	0,10	0,03	0,08	0,06	0,08	
15	0,05	0,08	0,07	0,07	0,07	0,10	0,08	0,06	0,07	0,08	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,06	0,10	0,09	0,09	0,10	0,03	0,08	0,06	0,08	
16	0,05	0,08	0,07	0,07	0,07	0,10	0,08	0,06	0,07	0,08	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,06	0,10	0,09	0,09	0,10	0,03	0,08	0,06	0,08	
17	0,07	0,10	0,06	0,09	0,10	0,07	0,08	0,02	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,06	0,06	0,06	0,00	0,00	0,02	0,09	0,10	0,09	0,12	0,05	0,10	0,05	0,09	
18	0,07	0,10	0,06	0,09	0,10	0,07	0,08	0,02	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,06	0,06	0,06	0,00	0,00	0,02	0,09	0,10	0,09	0,12	0,05	0,10	0,05	0,09	
19	0,06	0,04	0,01	0,04	0,03	0,01	0,03	0,05	0,03	0,04	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07	0,05	0,03	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	
20	0,06	0,04	0,01	0,04	0,03	0,01	0,03	0,05	0,03	0,04	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07	0,05	0,03	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	
21	0,06	0,04	0,01	0,04	0,03	0,01	0,03	0,05	0,03	0,04	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07	0,05	0,03	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	
22	0,07	0,10	0,06	0,09	0,10	0,07	0,08	0,02	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,06	0,06	0,06	0,00	0,00	0,02	0,09	0,10	0,09	0,12	0,05	0,10	0,05	0,09		
23	0,07	0,10	0,06	0,09	0,10	0,07	0,08	0,02	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,06	0,06	0,06	0,00	0,00	0,02	0,09	0,10	0,09	0,12	0,05	0,10	0,05	0,09		
24	0,05	0,07	0,04	0,07	0,07	0,05	0,06	0,01	0,06	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,00	0,07	0,08	0,07	0,09	0,02	0,08	0,02	0,06	
25	0,06	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,07	0,03	0,02	0,06	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,04	0,04	0,04	0,09	0,09	0,07	0,00	0,02	0,01	0,03	0,08	0,04	0,05	0,03	
26	0,04	0,03	0,04	0,03	0,02	0,04	0,03	0,09	0,02	0,01	0,05	0,09	0,09	0,09	0,09	0,11	0,11	0,06	0,06	0,06	0,11	0,11	0,09	0,02	0,00	0,01	0,02	0,06	0,03	0,06	0,02	
27	0,05	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,08	0,02	0,01	0,05	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,05	0,05	0,05	0,09	0,09	0,07	0,01	0,01	0,00	0,03	0,07	0,03	0,06	0,03	
28	0,06	0,04	0,06	0,04	0,04	0,06	0,04	0,11	0,03	0,03	0,06	0,10	0,10	0,10	0,10	0,13	0,13	0,07	0,07	0,07	0,13	0,13	0,10	0,03	0,02	0,03	0,00	0,08	0,04	0,08	0,04	
29	0,03	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05	0,06	0,03	0,05	0,06	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,02	0,07	0,06	0,07	0,08	0,00	0,06	0,03	0,06	
30	0,03	0,00	0,06	0,01	0,02	0,04	0,03	0,09	0,02	0,02	0,03	0,07	0,07	0,07	0,07	0,10	0,10	0,06	0,06	0,06	0,10	0,10	0,08	0,05	0,03	0,04	0,05	0,05	0,00	0,07	0,03	
31	0,06	0,05	0,01	0,05	0,04	0,02	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,01	0,01	0,01	0,06	0,06	0,03	0,04	0,05	0,04	0,07	0,04	0,05	0,00	0,04	
32	0,04	0,02	0,04	0,02	0,01	0,02	0,01	0,07	0,01	0,02	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,08	0,04	0,04	0,04	0,08	0,08	0,06	0,03	0,02	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,00	

Karbondioksit Salınım Matrisi ($co_2(i,j)$): Bu analizde, katsayı 2.630 gram/km olarak belirlenmiştir.

$$co_2(i,j) = Mesafe(km) \times 2.630 \frac{gram}{km}$$

Tablo 3. Karbondioksit Salınım Matrisi

BÖLGELER	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1	0,00	0,04	0,06	0,02	0,03	0,05	0,04	0,06	0,03	0,04	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,06	0,03	0,04	0,05	0,04	
2	0,03	0,00	0,06	0,01	0,02	0,04	0,03	0,09	0,02	0,02	0,03	0,07	0,07	0,07	0,07	0,10	0,10	0,06	0,06	0,10	0,10	0,08	0,05	0,03	0,04	0,05	0,05	0,00	0,07	0,03		
3	0,05	0,03	0,00	0,04	0,03	0,01	0,02	0,05	0,02	0,03	0,05	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,02	0,02	0,02	0,07	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02		
4	0,02	0,03	0,08	0,00	0,03	0,05	0,03	0,07	0,02	0,03	0,02	0,06	0,06	0,06	0,06	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,06	0,03	
5	0,02	0,01	0,06	0,01	0,00	0,04	0,03	0,07	0,01	0,02	0,03	0,07	0,07	0,07	0,07	0,09	0,09	0,06	0,06	0,06	0,09	0,09	0,07	0,04	0,03	0,04	0,05	0,08	0,01	0,06	0,03	
6	0,07	0,05	0,02	0,05	0,05	0,00	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,01	0,01	0,01	0,06	0,06	0,04	0,05	0,06	0,05	0,08	0,04	0,05	0,02	0,04	
7	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,00	0,06	0,01	0,02	0,04	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,04	0,04	0,04	0,08	0,08	0,06	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,01	
8	0,06	0,08	0,04	0,07	0,07	0,05	0,07	0,00	0,07	0,08	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,07	0,08	0,07	0,10	0,03	0,08	0,03	0,07	
9	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	0,07	0,00	0,01	0,03	0,07	0,07	0,07	0,07	0,09	0,09	0,04	0,04	0,04	0,09	0,09	0,06	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,02	0,05	0,01	
10	0,04	0,02	0,04	0,02	0,01	0,03	0,02	0,08	0,01	0,00	0,04	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,05	0,05	0,05	0,09	0,09	0,07	0,02	0,01	0,01	0,03	0,06	0,02	0,06	0,02	
11	0,00	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,04	0,05	0,03	0,04	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,05	0,06	0,05	0,06	0,02	0,04	0,05	0,04	
12	0,05	0,08	0,07	0,07	0,07	0,10	0,08	0,06	0,07	0,08	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,06	0,10	0,09	0,09	0,10	0,03	0,08	0,06	0,08		
13	0,05	0,08	0,07	0,07	0,07	0,10	0,08	0,06	0,07	0,08	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,06	0,10	0,09	0,09	0,10	0,03	0,08	0,06	0,08		
14	0,05	0,08	0,07	0,07	0,07	0,10	0,08	0,06	0,07	0,08	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,06	0,10	0,09	0,09	0,10	0,03	0,08	0,06	0,08		
15	0,05	0,08	0,07	0,07	0,07	0,10	0,08	0,06	0,07	0,08	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,06	0,10	0,09	0,09	0,10	0,03	0,08	0,06	0,08		
16	0,05	0,08	0,07	0,07	0,07	0,10	0,08	0,06	0,07	0,08	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,06	0,10	0,09	0,09	0,10	0,03	0,08	0,06	0,08		
17	0,07	0,10	0,06	0,09	0,10	0,07	0,08	0,02	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,06	0,06	0,06	0,00	0,00	0,02	0,09	0,10	0,09	0,12	0,05	0,10	0,05	0,09	
18	0,07	0,10	0,06	0,09	0,10	0,07	0,08	0,02	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,06	0,06	0,06	0,00	0,00	0,02	0,09	0,10	0,09	0,12	0,05	0,10	0,05	0,09	
19	0,06	0,04	0,01	0,04	0,03	0,01	0,03	0,05	0,03	0,04	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07	0,05	0,03	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	
20	0,06	0,04	0,01	0,04	0,03	0,01	0,03	0,05	0,03	0,04	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07	0,05	0,03	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	
21	0,06	0,04	0,01	0,04	0,03	0,01	0,03	0,05	0,03	0,04	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07	0,05	0,03	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	
22	0,07	0,10	0,06	0,09	0,10	0,07	0,08	0,02	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,06	0,06	0,06	0,00	0,00	0,02	0,09	0,10	0,09	0,12	0,05	0,10	0,05	0,09	
23	0,07	0,10	0,06	0,09	0,10	0,07	0,08	0,02	0,09	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,06	0,06	0,06	0,00	0,00	0,02	0,09	0,10	0,09	0,12	0,05	0,10	0,05	0,09	
24	0,05	0,07	0,04	0,07	0,07	0,05	0,06	0,01	0,06	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,00	0,07	0,08	0,07	0,09	0,02	0,08	0,02	0,06	
25	0,06	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,07	0,03	0,02	0,06	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,04	0,04	0,04	0,09	0,09	0,07	0,00	0,02	0,01	0,03	0,08	0,04	0,05	0,03	
26	0,04	0,03	0,04	0,03	0,02	0,04	0,03	0,09	0,02	0,01	0,05	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,11	0,11	0,06	0,06	0,06	0,11	0,09	0,02	0,00	0,01	0,02	0,06	0,03	0,06	0,02	
27	0,05	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,08	0,02	0,01	0,05	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,05	0,05	0,05	0,09	0,09	0,07	0,01	0,01	0,00	0,03	0,07	0,03	0,06	0,03
28	0,06	0,04	0,06	0,04	0,04	0,06	0,04	0,11	0,03	0,03	0,06	0,10	0,10	0,10	0,10	0,13	0,13	0,07	0,07	0,07	0,13	0,13	0,03	0,02	0,03	0,00	0,08	0,04	0,08	0,04		
29	0,03	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05	0,06	0,03	0,05	0,06	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,02	0,07	0,06	0,07	0,08	0,00	0,06	0,03	0,06
30	0,03	0,00	0,06	0,01	0,02	0,04	0,03	0,09	0,02	0,02	0,03	0,07	0,07	0,07	0,07	0,10	0,10	0,06	0,06	0,10	0,10	0,08	0,05	0,03	0,04	0,05	0,05	0,00	0,07	0,03	0,06	
31	0,06	0,05	0,01	0,05	0,04	0,02	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,01	0,01	0,01	0,06	0,06	0,03	0,04	0,05	0,04	0,07	0,04	0,05	0,00	0,04	
32	0,04	0,02	0,04	0,02	0,01	0,02	0,01	0,07	0,01	0,02	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,08	0,04	0,04	0,04	0,08	0,08	0,06	0,03	0,02	0,03	0,04	0,06	0,02	0,05	0,00	

2.3.2 Yürüme esaslı model' in coğrafi mesafe matrisinin oluşturulması

Yürüme Esaslı Model'de kullanılan Coğrafi Mesafe Matrisi, Araç Yakıt Model'indeki Tablo1 ile aynı yöntemle hesaplanmış ve kampüs içindeki 32 talep noktası arasındaki gerçek yaya mesafelerini içermektedir. Mesafeler, Google Earth kullanılarak kampüs içi yaya yolları esas alınmak suretiyle manuel olarak ölçülmüştür. Bu veri seti, modelin gerçekçi ve uygulanabilir sonuçlar üretmesini sağlamakta olup, türetilen kalori ve yürüme kaynaklı

CO₂ salınım matrislerinin güvenilirliğinin temelini oluşturmaktadır.

Harcanan Kalori Matrisi ($c(i,j)$): Tablo 1 matrisindeki her bir kilometre değerinin, literatürde yaygın olarak kabul gören ve bir insanın yürüme mesafesi başına sabit kabul edilen 100 Kalori/km katsayısı ile çarpılmasıyla türetilmiştir.

$$c(i,j) = \text{Mesafe}(km) \times 100 \frac{\text{kalori}}{km}$$

Tablo 4. Harcanan Kalori Matrisi

BÖL GEL ER	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32			
1	0	4	7	2	3	6	5	7	3	4	6	6	6	6	6	9	9	7	7	7	7	6	6	7	5	5	7	3	4	6	4				
2	3	0	8	1	2	5	3	1	2	3	3	8	8	8	8	8	1	1	7	7	7	1	1	1	5	4	4	6	6	0	8	3			
3	6	4	0	4	3	8	2	6	3	3	6	9	9	9	9	9	8	8	2	2	2	8	8	5	3	5	5	6	5	4	3	2			
4	2	3	9	0	3	5	4	8	2	3	2	7	7	7	7	7	1	1	8	8	8	1	1	7	6	4	5	6	4	3	7	3			
5	3	9	7	1	0	5	3	9	1	2	3	8	8	8	8	8	1	1	7	7	7	1	1	8	5	3	4	5	1	9	8	3			
6	8	6	2	6	5	0	5	5	5	6	7	9	9	9	9	9	7	7	1	1	1	6	6	6	6	6	7	8	7	6	9	5	6	2	5
7	4	2	3	3	1	3	0	8	1	2	5	1	1	1	1	1	1	1	4	4	4	1	1	7	3	3	3	5	7	2	5	1			
8	7	9	5	9	8	6	8	0	8	9	6	7	7	7	7	7	2	2	4	4	4	2	2	7	8	1	9	1	3	9	3	8			
9	3	2	4	2	1	3	1	8	0	1	4	8	8	8	8	8	1	1	5	5	5	1	1	8	3	2	2	4	6	2	6	1			
10	4	2	4	2	1	4	2	9	1	0	5	9	9	9	9	9	1	1	6	6	6	1	1	8	2	1	1	3	7	2	7	2			
11	6	5	7	3	4	7	5	6	4	5	0	5	5	5	5	5	8	8	7	7	7	8	8	5	7	5	6	8	2	5	6	5			
12	6	1	9	8	9	1	1	7	8	9	5	0	0	0	0	0	1	1	8	8	8	1	1	7	1	1	1	1	4	1	7	1			
13	6	1	9	8	9	1	1	7	8	9	5	0	0	0	0	0	1	1	8	8	8	1	1	7	1	1	1	1	4	1	7	1			
14	6	1	9	8	9	1	1	7	8	9	5	0	0	0	0	0	1	1	8	8	8	1	1	7	1	1	1	1	4	1	7	1			
15	6	1	9	8	9	1	1	7	8	9	5	0	0	0	0	0	1	1	8	8	8	1	1	7	1	1	1	1	4	1	7	1			
16	6	1	9	8	9	1	1	7	8	9	5	0	0	0	0	0	1	1	8	8	8	1	1	7	1	1	1	1	4	1	7	1			
17	9	1	7	1	1	8	1	2	1	1	8	1	1	1	1	1	0	0	7	7	7	0	0	2	1	1	1	1	6	1	6	1			
18	9	1	7	1	1	8	1	2	1	1	8	1	1	1	1	1	0	0	7	7	7	0	0	2	1	1	1	1	6	1	6	1			
19	7	5	9	5	4	1	3	6	3	4	7	1	1	1	1	1	9	9	0	0	0	9	9	6	4	5	4	7	6	5	4	3			
20	7	5	9	5	4	1	3	6	3	4	7	1	1	1	1	1	9	9	0	0	0	9	9	6	4	5	4	7	6	5	4	3			
21	7	5	9	5	4	1	3	6	3	4	7	1	1	1	1	1	9	9	0	0	0	9	9	6	4	5	4	7	6	5	4	3			
22	9	1	7	1	1	8	1	2	1	1	8	1	1	1	1	1	0	0	7	7	7	0	0	2	1	1	1	1	6	1	6	1			

23	9 2	1 3	7 8	1 1	1 2	8 6	1 0	2 2	1 0	1 1	8 6	1 0	1 0	1 0	1 0	0 0	0 0	7 1	7 1	7 1	0 0	0 0	2 9	1 1	1 2	1 1	1 4	6 0	1 3	6 0	1 0
24	6 3	8 9	4 9	8 6	8 3	5 7	7 5	7 9	7 8	8 7	5 7	7 1	7 1	7 1	7 1	2 9	2 9	4 2	4 2	4 2	2 9	2 9	0 8	8 2	9 7	8 6	1 1	3 1	1 0	3 1	7 8
25	6 9	4 7	4 0	5 1	4 0	3 8	3 1	9 0	3 7	2 7	7 4	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	5 4	5 4	5 4	1 2	1 2	8 4	0 3	2 3	1 3	4 3	9 6	4 7	6 4	3 3
26	5 4	3 2	5 5	3 6	2 5	5 2	3 3	1 1	2 1	1 1	6 0	1 0	1 0	1 0	1 0	1 3	6 9	6 9	6 9	1 3	1 3	0 3	2 0	0 3	1 2	2 3	8 1	3 2	7 9	3 0	
27	6 0	3 8	4 5	4 1	3 1	4 1	3 5	9 4	2 7	1 7	6 5	1 3	1 3	1 3	1 3	1 6	6 6	6 6	6 6	1 1	1 1	8 8	1 3	1 2	0 3	3 6	8 8	3 8	6 9	3 6	
28	7 4	5 3	7 4	5 6	4 6	7 2	5 4	1 3	4 2	3 2	8 0	2 2	2 2	2 2	2 2	1 5	5 5	9 0	9 0	9 0	5 5	5 5	8 0	4 3	2 3	3 3	0 2	1 5	9 9	5 1	
29	3 4	7 3	5 0	7 6	6 5	5 8	7 5	3 5	6 0	7 0	3 0	4 0	4 0	4 0	4 0	5 9	5 9	4 4	4 4	4 4	5 9	5 9	2 8	8 0	8 8	1 0	0 3	7 3	3 2	7 2	
30	3 3	0 0	8 0	1 4	2 6	5 6	3 8	1 0	2 0	3 1	3 7	8 6	8 6	8 6	8 6	1 3	1 3	7 3	7 3	7 3	1 3	1 3	1 5	4 7	4 5	6 0	6 1	0 4	8 5	3 5	
31	7 8	5 9	1 7	6 3	5 3	2 6	4 4	4 7	4 8	5 7	7 2	8 6	8 6	8 6	8 6	6 9	6 9	1 0	1 0	1 0	6 9	6 9	4 0	5 1	6 5	5 5	8 6	4 4	5 9	0 4	4 6
32	4 6	2 4	5 4	2 8	1 6	3 1	1 2	8 3	1 3	2 0	5 0	5 9	5 9	5 9	5 9	1 0	1 0	4 8	4 8	4 8	1 0	1 0	7 6	3 2	3 1	3 5	7 3	2 4	5 9	0 0	

Yürüme Kaynaklı (CO₂) Salınım Matrisi (co₂(i,j)): Çevresel etkiyi modelleyen bu matris, Tablo 1’ de bulunan her bir kilometre değerinin, yürüme eylemi sonucu kilometre başına gerçekleştiği bilimsel olarak kabul edilen, 110 gram/km CO₂ salınım katsayısı ile çarpılmasıyla elde edilmiştir.

$$co_2(i,j) = Mesafe(km) \times \frac{110gram}{km}$$

Tablo 5. Yürüme Kaynaklı Salınan Karbondioksit Miktar Matrisi

BÖLGELER	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1	0	50,6	80,3	31,9	41,8	74,8	55	77	37,4	48,4	6,6	67,1	67,1	67,1	67,1	10,12	10,12	8,8	8,8	8,8	14,4	14,4	11,1	62,7	45,3	49,5	66	67,1	0	92,4	38,5	
2	36,3	0	88	15,4	28,6	61,6	41,8	11	22	34,0	47,6	94,6	94,6	94,6	94,6	14,14	14,14	8,8	8,8	8,8	4,1	4,1	11,1	62,7	45,3	49,5	66	67,1	0	92,4	38,5	
3	70,4	47,3	0	50,6	39,6	8,8	28,6	66	34,1	42,9	74,8	10,8	10,8	10,8	10,8	91,3	91,3	2,2	2,2	2,2	91,3	91,3	59,4	37,4	55	58,3	75,6	61,4	47,3	39,6	30,8	
4	23,1	42,9	10,5	0	35,2	63,8	45,1	90,2	28,6	39,6	28,5	81,4	81,4	81,4	81,4	11,4	11,4	8,8	8,8	8,8	4,4	4,4	11,8	82,5	66	49,5	56,1	51,7	51,9	86,9	41,8	
5	34,1	9,9	84,7	13,0	0	58,3	38,5	10,2	19,3	30,8	39,5	93,5	93,5	93,5	93,5	12,6	12,6	7,7	7,7	7,7	12,6	12,6	94,6	57,4	41,8	48,6	63,1	11,9	88	36,3		
6	92,4	71,5	25,3	74,8	64,9	0	55	60,3	69,5	85,8	10,0	10,0	10,0	10,0	83,6	83,6	1,1	1,1	1,1	83,6	83,6	51,7	63,8	80,3	68,2	10,3	56,1	71,5	31,9	58,3		
7	53,9	29,2	35,2	33	20,9	33	0	88	16,5	25,3	57,2	11,2	11,2	11,2	11,2	4,4	4,4	5,5	5,5	5,5	11,4	11,4	83,6	34,1	36,3	38,5	59,4	83,6	28,6	14,3		
8	77	10,7	61,6	10,2	97,3	70,4	90,2	0	94,6	10,4	70,4	85,8	85,8	85,8	85,8	24,2	24,2	5,5	5,5	5,5	24,2	24,2	7,7	97,4	11,4	10,4	13,6	41,8	10,7	41,9	93,5	
9	37,4	22	44	27,5	18,7	18,5	18,7	95,7	0	13,4	44	95,7	95,7	95,7	95,7	11,9	11,9	5,5	5,5	5,5	11,9	11,9	89,9	40,7	23,1	29,7	46,2	66	22	69,3	15,4	
10	49,5	25,3	50,6	25,3	17,6	47,4	26,1	10,2	13,4	0	55	10,8	10,8	10,8	10,8	12,9	12,9	6,6	6,6	6,6	12,9	12,9	97,9	29,1	12,7	18,7	35,1	78,1	25,3	77	23,1	
11	6,6	57,2	86,9	38,5	48,4	81,4	61,6	70,4	44	55	0	60,5	60,5	60,5	60,5	94,6	94,6	7,7	7,7	7,7	94,6	94,6	63,8	83,6	64,9	71,5	88	30,8	57,2	66	59,4	
12	69,3	11,1	10,1	93,5	10,2	13,7	11,4	84,7	96,8	10,7	63,8	0	0	0	0	11,1	11,1	9,9	9,9	9,9	11,1	11,1	78,1	13,7	11,7	12,4	14,3	45,1	11,1	80,1	11,1	
13	69,3	11,1	10,1	93,5	10,2	13,7	11,4	84,7	96,8	10,7	63,8	0	0	0	0	11,1	11,1	9,9	9,9	9,9	11,1	11,1	78,1	13,7	11,7	12,4	14,3	45,1	11,1	80,1	11,1	
14	69,3	11,1	10,1	93,5	10,2	13,7	11,4	84,7	96,8	10,7	63,8	0	0	0	0	11,1	11,1	9,9	9,9	9,9	11,1	11,1	78,1	13,7	11,7	12,4	14,3	45,1	11,1	80,1	11,1	
15	69,3	11,1	10,1	93,5	10,2	13,7	11,4	84,7	96,8	10,7	63,8	0	0	0	0	11,1	11,1	9,9	9,9	9,9	11,1	11,1	78,1	13,7	11,7	12,4	14,3	45,1	11,1	80,1	11,1	
16	69,3	11,1	10,1	93,5	10,2	13,7	11,4	84,7	96,8	10,7	63,8	0	0	0	0	11,1	11,1	9,9	9,9	9,9	11,1	11,1	78,1	13,7	11,7	12,4	14,3	45,1	11,1	80,1	11,1	
17	10,1	14,3	85,1	12,1	13,7	94,4	11,2	24,8	11,1	12,9	94,4	11,1	11,1	11,1	11,1	0	0	7,7	7,7	7,7	0	0	31,9	12,1	13,8	12,1	16,6	66	14,3	66	11,7	
18	10,1	14,3	85,1	12,1	13,7	94,4	11,2	24,8	11,1	12,9	94,4	11,1	11,1	11,1	11,1	0	0	7,7	7,7	7,7	0	0	31,9	12,1	13,8	12,1	16,6	66	14,3	66	11,7	
19	78,1	55	9,9	59,4	47,3	17,6	37,4	73,7	40,7	51,8	83,6	11,4	11,4	11,4	11,4	10,0	10,0	0	0	0	10,0	10,0	67,1	47,3	62,7	49,5	84,7	69,3	55	47,3	39,6	
20	78,1	55	9,9	59,4	47,3	17,6	37,4	73,7	40,7	51,8	83,6	11,4	11,4	11,4	11,4	10,0	10,0	0	0	0	10,0	10,0	67,1	47,3	62,7	49,5	84,7	69,3	55	47,3	39,6	
21	78,1	55	9,9	59,4	47,3	17,6	37,4	73,7	40,7	51,8	83,6	11,4	11,4	11,4	11,4	10,0	10,0	0	0	0	10,0	10,0	67,1	47,3	62,7	49,5	84,7	69,3	55	47,3	39,6	

22	10 1,2	14 3	85, 8	12 6,5	13 7,5	94, 6	11 4,4	24, 2	11 8,8	12 8,7	94, .6	11 0	11 0	11 0	11 0	0	0	7 8	7 8	7 8	0	0	31, 9	12 2,1	13 8,6	12 6,5	16 0,6	66	14 3	66	11 7,7
23	10 1,2	14 3	85, 8	12 6,5	13 7,5	94, 6	11 4,4	24, 2	11 8,8	12 8,7	94, .6	11 0	11 0	11 0	11 0	0	0	7 8	7 8	7 8	0	0	31, 9	12 2,1	13 8,6	12 6,5	16 0,6	66	14 3	66	11 7,7
24	69, 3	97 3	53, 9	94, 6	91, 3	62, 7	82, 5	7,7	86, 9	96, 8	62, .7	78, 1	78, 1	78, 1	78, 1	31, 9	31, 9	4 6	4 6	4 6	31, 9	31, 9	0	90, 2	10 6,7	94, 6	12 8,7	34, 1	11 1	34, 1	85, 8
25	75, 9	51 3	44	56, 1	44	41, 8	34, 1	99	40, 7	29, 8	81, .4	13 5,3	13 5,3	13 5,3	13 5,3	12 3,2	12 3,2	5 9	5 9	5 9	12 3,2	12 3,2	92, 4	0	25, 3	14, 3	47, 3	10 5,6	51 7	70, 4	36, 3
26	59, 4	35 2	60, 5	39, 6	27, 5	57, 2	36, 3	12 7,6	23, 1	12, 1	66	11 8,8	11 8,8	11 8,8	11 8,8	15 1,8	15 1,8	7 6	7 6	7 6	15 7,6	15 7,6	11 8,8	25, 3	0	13, 2	25, 3	35 1	86, 2	33	
27	66	41 8	49, 5	45, 1	34, 1	45, 1	38, 1	10 3,4	29, 7	18, 7	11 .5	12 4,3	12 4,3	12 4,3	12 4,3	12 4,3	12 7,6	6 6	6 6	6 6	12 7,6	12 7,6	96, 8	14, 3	13, 2	0	36, 3	94, 6	41 8	75, 9	39, 6
28	81, 4	58 3	81, 4	61, 6	50, 6	79, 2	59, 4	14 9,6	46, 2	35, 2	88	14 0,8	14 0,8	14 0,8	14 0,8	17 3,8	17 3,8	9 9	9 9	9 9	17 3,8	17 3,8	14 3	47, 3	25, 3	36, 3	0	11 2,2	58 3	10 8,9	56, 1
29	37, 4	80 3	55	83, 6	71, 5	63, 8	82, 5	38, 5	66	77	33	44	44	44	44	64, 9	64, 9	4 8	4 8	4 8	64, 9	64, 9	31, 9	91, 3	88	96, 8	11 1,1	0	80 3	36, 3	79, 2
30	36, 3	0	88	15, 4	28, 6	61, 6	41, 7	11 7,7	22	34, 1	40 .7	94, 6	94, 6	94, 6	94, 6	14 4,1	14 4,1	8 0	8 0	8 0	14 4,1	14 4,1	11 1,1	62, 7	45, 1	49, 5	66	67, 1	0	92, 4	38, 5
31	85, 8	64 9	18, 7	69, 3	58, 3	28, 6	48, 4	51, 7	52, 8	62, 7	79 .2	94, 6	94, 6	94, 6	94, 6	75, 9	75, 9	1 1	1 1	1 1	75, 9	75, 9	44	56, 1	71, 5	60, 5	94, 6	48, 4	64 9	0	50, 6
32	50, 6	26 4	59, 4	30, 8	17, 6	34, 1	13, 2	91, 3	14, 3	22	55	64, 9	64, 9	64, 9	64, 9	11 6,6	11 6,6	5 3	5 3	5 3	11 6,6	11 6,6	83, 6	35, 2	34, 1	38, 5	55	80, 3	26 4	64, 9	0

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Hasan Kalyoncu Üniversitesi ana kampüsü ölçeğinde geri dönüştürülebilir atık toplama sisteminin etkinliğini artırmak amacıyla geliştirilen Çok Amaçlı p-Medyan Tesis Yer Seçimi Modeli uygulanmış ve model çıktıları çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik boyutları çerçevesinde analiz edilmiştir. Model, atık toplama ve konteyner yerleşim kararlarını eş zamanlı olarak ele alarak, toplam operasyonel maliyet, kurulum maliyeti ve CO₂ emisyonu kriterlerini bütünlük biçimde optimize etmektedir.

Modelin temel karar değişkenlerinden biri olan konteyner sayısı (p), sistemin hem finansal sürdürülebilirliği hem de çevresel performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu kapsamda, p değeri 1 ile 10 arasında değiştirilerek her senaryo için toplam maliyet ve kurulum maliyetleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6 incelendiğinde, konteyner sayısının artmasıyla birlikte toplam operasyonel maliyetin belirgin biçimde azaldığı görülmektedir. Bunun temel nedeni, konteynerlerin talep noktalarına daha yakın konumlandırılması sayesinde toplama mesafelerinin ve buna bağlı lojistik giderlerin azalmasıdır. Buna karşın, konteyner sayısındaki artış kurulum maliyetlerini yükseltmektedir. Analiz sonuçları, p=6 değerine kadar toplam maliyetteki azalışın anlamlı düzeyde devam ettiğini; ancak bu noktadan sonra elde edilen marjinal maliyet avantajının yeni bir konteynerin sabit kurulum maliyetini karşılamada yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu nedenle, p=6, operasyonel tasarruf ile yatırım maliyeti arasında en uygun maliyet-etkin denge noktası olarak belirlenmiştir.

Tablo 6. Konteyner Sayısına Göre Toplam ve Kurulum Maliyetlerinin Karşılaştırılması

KONTEYNER SAYISI	TOPLAM MALİYET(TL)	KURULUM MALİYETİ(TL)
1	540.614,00	572.614,00
2	357.864,00	421.864,00
3	251.734,00	347.734,00
4	189.911,00	317.911,00
5	138.355,00	298.355,00
6	95.672,00	287.672,00
7	66.084,00	290.084,00
8	54.564,00	310.564,00
9	46.123,00	334.123,00
10	37.807,00	357.807,00

Araç Yakıt Modeli sonuçları, konteyner sayısının artmasıyla birlikte toplam taşıma mesafesinin ve buna bağlı CO₂ emisyonunun sürekli olarak azaldığını ortaya koymaktadır. Ancak Tablo 7’de sunulan marjinal analiz, p=6 sonrasında CO₂ azaltım hızının belirgin biçimde yavaşladığını göstermektedir. Örneğin, p=6 ile p=7 arasındaki CO₂ azalımı, p=9 ile p=10 arasındaki azalıma kıyasla çok daha yüksektir. Bu durum, azalan marjinal çevresel fayda olgusunu açıkça ortaya koymakta ve çevresel kazanımların belirli bir kapasite seviyesinden sonra sınırlı hale geldiğini göstermektedir. Bu nedenle, mutlak çevresel minimumu temsil eden p=10 çözümü yerine, çevresel fayda ile ekonomik sürdürülebilirliği birlikte sağlayan p=6 çözümü tercih edilmiştir.

Tablo 7. *Konteyner Sayısı Artışının Marjinal CO₂ Azalımı Üzerindeki Etkisi*

KONTEYNER SAYISI(P)	KARBON MİKTARI(GRAM)	MARJİNAL CO ₂ AZALIMI
6	1.258.086,80	-
7	869.004,60	389.082,2
8	717.516,60	151.488
9	606.517,45	110.999,15
10	497.162,05	109.355,4

Yürüme Esaslı Model, konteyner yerleşim kararlarının kullanıcı erişilebilirliği ve yürüme kaynaklı CO₂ emisyonu üzerindeki etkisini değerlendirmektedir. Tablo 8’de sunulan sonuçlara göre, konteyner sayısındaki artış toplam yürüme mesafesini ve buna bağlı çevresel yükü azaltmaktadır. Ancak, p=6 sonrasında elde edilen marjinal iyileşmenin, ek kurulum maliyetlerini haklı çıkaracak düzeyde olmadığı görülmektedir. Bu bağlamda, p=6 çözümü; düşük kurulum maliyeti ile yüksek erişim kalitesini birlikte sunan en dengeli alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 8. *Konteyner Sayısına Bağlı Toplam ve Marjinal CO₂ Azalımı Değerleri*

KONTEYNER SAYISI(P)	KARBON MİKTARI(GRAM)	MARJİNAL CO ₂ AZALIMI
6	52.619,60	-
7	36.346,20	16.273,4
8	30.010,20	6.336
9	25.367,65	4.642,55
10	20.793,85	4.573,8

Elde edilen bulgular, kampüs ölçeğinde geri dönüştürülebilir atık yönetiminde mutlak çevresel minimizasyon yerine, maliyet-etkin çevresel optimizasyon yaklaşımının daha rasyonel olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda belirlenen p=6 konteyner yerleşimi, finansal sürdürülebilirlik ile çevresel hedeflerin dengeli biçimde uzlaştırıldığı stratejik bir çözüm sunmaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, yaklaşık 10.902 öğrenci ve 272 akademik/idari personele ev sahipliği yapan, 500.000 metrekairelik bir alana kurulu Hasan Kalyoncu Üniversitesi ana kampüsü ölçeğinde oluşan geri dönüştürülebilir atıkların toplanma süreçlerini daha etkin ve sürdürülebilir hâle getirmek amacıyla iki farklı matematiksel model yaklaşımının geliştirilmesini kapsamaktadır. Araç Yakıtı Modeli ve Yürüme Mesafesi Modeli olarak adlandırılan bu yaklaşımlar aktif bir sirkülasyonun yaşandığı kampüs içerisindeki 32 talep noktasının atık toplama konteynerlerine atanmasını farklı çevresel ve operasyonel bakış açılarıyla ele almıştır. Çalışmanın temel

amacı, bu mikro-şehir ekosistemindeki konteyner yerleşim kararlarını hem çevresel sürdürülebilirliği hem de operasyonel verimliliği maksimize edecek biçimde belirlemektir.

Modelleme sürecinde kampüs içerisindeki mekânsal dağılım ve talep yoğunluğu gibi gerçek dünya koşullarını yansıtan faktörler dikkate alınmış; böylece rota planlama ve yerleşim kararlarının uygulanabilirliği artırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kampüs içi atık toplama operasyonlarının zaman, maliyet ve kaynak kullanımı açısından daha verimli hâle getirilebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, arazi eğimi ve bina fiziksel özellikleri gibi daha karmaşık çevresel faktörler bu çalışmada doğrudan modele dahil edilmemiştir. Bu tür parametrelerin modele entegre edilmesi, gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir geliştirme alanı olarak değerlendirilmektedir.

Her iki modelde de konteyner yerleşimi p-medyan yapısı ile gerçekleştirilmiş olmakla birlikte, optimizasyonun temel hedefleri farklılaştırılmıştır. Araç Yakıtı Modeli, toplam yakıt tüketimi ve buna bağlı karbon emisyonunu minimize etmeyi amaçlarken; Yürüme Mesafesi Modeli, kullanıcıların konteynerlere erişimi sırasında harcadıkları fiziksel eforu ve buna bağlı çevresel etkileri minimize etmeyi hedeflemiştir. Bu yaklaşım, kampüs atık yönetimini yalnızca araç bazlı bir lojistik problem olarak değil, aynı zamanda kullanıcı davranışlarını da dikkate alan çok boyutlu bir karar problemi olarak ele almaktadır.

Analiz sonuçları, konteyner sayısındaki (p) artış ile yakıt tüketimi ve kullanıcı yürüme mesafesi arasında ters yönlü ve sistematik bir ilişki olduğunu açıkça ortaya koymuştur. 1 ile 10 konteyner arasında yapılan karşılaştırmalar, p değerindeki artışın her iki modelde de maliyet ve çevresel etkileri azalttığını göstermiştir. Ancak, altı konteynerden sonra bu azalışın marjinal düzeyde kaldığı, diğer bir ifadeyle eklenen her yeni konteynerin sisteme katkısının giderek azaldığı tespit edilmiştir. Araç yakıtı temelli model ile yürüme temelli model arasındaki karşılaştırmalar, farklı politika önceliklerine göre farklı çözüm avantajları sunduğunu göstermektedir. Araç Yakıtı Modeli çevresel maliyetlerin ve karbon emisyonunun azaltılmasında daha hızlı bir iyileşme sağlarken; Yürüme Mesafesi Modeli, erişilebilirlik ve kullanıcı deneyimi açısından daha belirgin kazanımlar sunmaktadır. Buna rağmen, her iki model için de altı konteynerin ortak optimum çözüm olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda, altı konteyner yerleşimi; toplam maliyetin kabul edilebilir seviyeye indiği, karbon emisyonunun anlamlı biçimde azaldığı ve kullanıcı erişilebilirliğinin maksimum düzeye ulaştığı denge noktasını temsil etmektedir. Kampüsün mekânsal büyüklüğü dikkate alındığında, altı konteynerin altındaki çözümlerin erişilebilirlik ve operasyonel verimlilik açısından yetersiz kaldığı; buna karşılık daha fazla konteyner kullanımının ise yatırım maliyetlerinde verimsiz bir artışa yol açtığı belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, kampüs içi geri dönüştürülebilir atık yönetim sistemlerinin iyileştirilmesine yönelik bazı öneriler sunulabilir. Öncelikle, konteyner yerleşim planlamasında sezgisel yaklaşımlar yerine matematiksel optimizasyon modellerinin kullanılması, karar alma süreçlerini daha rasyonel ve ölçülebilir hâle getirecektir. Bu çalışmada geliştirilen p-medyan tabanlı modeller, benzer ölçekli üniversite kampüsleri ve kamu yerleşkeleri için uyarlanabilir bir karar destek aracı niteliği taşımaktadır. İkinci olarak, konteyner sayısı belirlenirken yalnızca maliyet minimizasyonunun değil, kullanıcı davranışları ve erişim kolaylığının da dikkate alınması önerilmektedir. Yürüme mesafesinin azaltılmasının geri dönüşüm kullanım oranlarını artırabilecek önemli bir faktör olduğu değerlendirilmektedir. Bu nedenle, yoğun yaya hareketliliğinin bulunduğu alanlarda erişilebilirlik odaklı planlama yaklaşımları benimsenmelidir. Ayrıca, araç yakıt tüketimi ve karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik çevreci rota planlama yaklaşımlarının kampüs atık yönetimi politikalarına entegre edilmesi önem arz etmektedir. Çalışma sonuçları, çevresel maliyetlerin göz ardı edilmesi durumunda kısa vadeli ekonomik kazanımların uzun vadede sürdürülebilir olmadığını ortaya koymaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, konteyner doluluk oranlarının gerçek zamanlı olarak izlenebilmesi için IoT tabanlı sensör sistemlerinin kullanılması önerilmektedir. Bu tür sistemler sayesinde atık toplama süreçleri dinamik hâle getirilebilir, gereksiz araç seferleri azaltılabilir ve operasyonel verimlilik artırılabilir. Ayrıca, yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı tahmin modellerinin entegrasyonu, daha esnek ve gerçekçi planlama çözümlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Son olarak, modelin farklı atık türleri, değişken konteyner kapasiteleri ve zaman pencereli toplama senaryolarını kapsayacak şekilde genişletilmesi, çalışmanın hem akademik katkısını hem de uygulama alanındaki etkisini artıracaktır.

5. KAYNAKLAR

- Alavi, S., Esmaili, M., & Nahiduzzaman, M. (2023). Sustainable solid waste collection using p-median and fuzzy optimization approaches. *Journal of Environmental Management*, 329, 120440. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.120440>
- Alshuwaikhat, H. M., & Abubakar, I. (2008). An integrated approach to achieving campus sustainability: Assessment of the current campus environmental management practices. *Journal of Cleaner Production*, 16(16), 1777–1785. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.12.002>
- Amani, H., & Geroliminis, N. (2022). Optimizing recycling collection services in dense public venues. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 140, 103496. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103496>
- Anagnostopoulos, T., Zaslavsky, A., Kolomvatsos, K., Medvedev, A., Amirian, P., Morley, J., & Hadjieftymiades, S. (2013). Challenges and opportunities of waste management in IoT-enabled smart cities: A survey. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2(3), 275–289. <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2017.2691049>
- Buhrkal, V., Larsen, A., & Ropke, S. (2019). The waste collection vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.02.009>
- Cheng, K. W., & Lam, S. F. (2015). Optimization of waste collection bin locations in a university campus. *Sustainable Cities and Society*, 14, 80–89.
- Daskin, M. S. (2013). *Network and discrete location: Models, algorithms, and applications* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600828>
- Erkut, E., & Neuman, S. (1989). Analytical models for locating undesirable facilities. *European Journal of Operational Research*, 40(3), 275–291. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90420-7](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90420-7)
- Farahani, R. Z., SteadieSeifi, M., & Asgari, N. (2010). Multiple criteria facility location problems: A survey. *Applied Mathematical Modelling*, 34(7), 1689–1709. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.10.005>
- Fernández, J., & Ruiz, R. (2024). Comparative analysis of facility location methods for waste systems. *European Journal of Operational Research*, 315, 112–128. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.01.007>
- Francis, R. L., McGinnis, L. F., & White, J. A. (1992). *Facility layout and location: An analytical approach*. Prentice Hall.
- Gündüzalp, A. A., & Güven, S. (2016). Atık, çeşitleri, atık yönetimi, geri dönüşüm ve tüketici: Çankaya belediyesi ve semt tüketicileri örneği. *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi*, 9(1), 1–19.
- Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12(3), 450–459. <https://doi.org/10.1287/opre.12.3.450>
- Hidroğlu, A. G. Ç., & Bukova Güzel, D. D. E. (2013). Matematiksel modelleme sürecini açıklayan farklı yaklaşımlar. *Bartın Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 2(1), 127–145. <https://izlik.org/JA93CU59HR>
- López-Sánchez, A., García-Sánchez, P., & Riquelme-Santos, J. M. (2021). Location of recycling collection points in urban areas: A p-median based approach. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102876. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102876>
- Mohsen, M., & Reddy, K. (2020). GIS-based solid waste collection optimization using vehicle routing problem. *Journal of Environmental Management*, 259, 111243. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111243>
- Read, A. D. (1999). *Integrated solid waste management: A lifecycle inventory*. Blackwell Science.
- ReVelle, C. S., & Swain, R. W. (1970). Central facilities location. *Geographical Analysis*, 2(1), 30–42.
- Sampaio, A., Barbosa, J., & Oliveira, R. (2021). Integrated location–routing model for solid waste collection. *Waste Management*, 123, 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.031>
- Teixeira, J., Antunes, A. P., & de Sousa, J. P. (2004). Recyclable waste collection planning: A case study. *European Journal of Operational Research*, 158(3), 543–554. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00379-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00379-5)
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2015). *Handbook of solid waste management* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Wang, L., & Chen, H. (2022). Green vehicle routing problem for minimizing carbon emissions in waste collection. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 109, 103082. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103082>

- Xu, X., Li, Y., & Chen, Z. (2020). A multi-objective optimization model for municipal waste collection. *Journal of Cleaner Production*, 258, 121553. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121553>
- Yaman, K., & Gül, M. (2021). Türkiye’de atık yönetimi ve sıfır atık projesinin değerlendirilmesi: Ankara örneği. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İari Bilimler Dergisi*, 35(4), 1267–1296. <https://doi.org/10.16951/atauniiibd.870434>
- Zhang, P., Li, J., & Luo, X. (2024). AI-based dynamic optimization of waste collection systems using deep learning. *Waste Management*, 158, 105123. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.105123>
- Zsigraiová, Z., Semiao, V., & Beijoco, F. (2013). Operation costs and pollutant emissions reduction by definition of new collection scheduling and optimization of MSW collection routes. *Waste Management*, 33(4), 793–806. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.11.015>