



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.08.2023
Kabul Tarihi : 06.09.2023

Received Date : 07.08.2023
Accepted Date : 06.09.2023

KAPASİTELİ TEK ATAMALI YEŞİL ANADAĞITIM ÜSSÜ KAPSAMA AKIŞ PROBLEMİ

CAPACITATED SINGLE ALLOCATION GREEN HUB COVERING FLOW PROBLEM

Nazmi ŞENER¹ (ORCID: 0000-0002-4027-5143)

¹ Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nazmi ŞENER, nazmi.sener@alanya.edu.tr

ÖZET

Yeşil tedarik zinciri uygulamalarına geçişin arkasında yükselen çevresel ve ekonomik endişeler bulunmaktadır. Düzenleyici kurumlar, karbon emisyonları ve gürültü kirliliği gibi unsurlara odaklanarak, taşımacılığın çevresel etkilerini hafifletmeyi amaçlamaktadırlar. Çalışmamız, ideal anadağıtım üssü konumlarını belirleyerek tek atamalı anadağıtım üssü kapsama akış problemiyle başa çıkan yenilikçi bir optimizasyon modeli sunmaktadır. Standart anadağıtım üssü problemlerinden farklı olarak, modelimiz anadağıtım üssü kapasite sınırlarını anlamaktadır. Bir kapasite maliyet fonksiyonunu sisteme entegre ederek, genel ağ emisyonlarını yönetirken kapasiteyi de yönlendirmektedir. Ayrıca, anadağıtım üssü kapasitelerinin kısıtlamaları gibi çeşitli parametrelerin, en iyi çözümleri nasıl dönüştürebileceğini de dikkate almaktadır. Geleneksel modelleri geride bırakmak için, endüstri ve geleneksel kaynaklardan elde edilen yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Ardından, önerilen model kapasite düşüncelerini göz ardı eden modellerle karşılaştırılmıştır. Bu bütüncül anlayış, önerilen modellerin daha iyi performans ve yeşil sonuçlar sağladığını göstermektedir. Özünde, çevresel korumayı lojistik optimizasyon ile birleştirerek, tedarik zinciri yönetiminde yeni başlayan çağa katkıda bulunulmuştur. Diğer modellerin göz ardı ettiği karbon salınım maliyeti düşüncesini dikkate alarak daha verimli ve çevre bilincine sahip bir lojistik ağı oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yeşil anadağıtım üssü, tekli atama, kapsama

ABSTRACT

Driving the shift to green supply chain practices are rising environmental and economic concerns. Regulatory bodies aim to mitigate transportation's environmental repercussions, focusing on aspects such as carbon emissions and noise pollution. Our study introduces a revolutionary optimization model that handles a single allocation green hub covering flow problem by determining ideal hub locations. Distinct from standard hub issues, our model comprehends hub capacity limits. With a capacity cost function integrated into the system, it simultaneously manages overall network emissions while maneuvering the capacity. Additionally, this takes into account how various parameters, like the constraints of hub capacities, can transform optimal solutions. To outperform traditional models, we amalgamate a new dataset drawn from industry and conventional resources. Subsequently, we juxtapose our model with those foregoing capacity considerations. This holistic understanding displays how our model fosters enhanced performance and green outcomes. In essence, we are merging environmental preservation with logistics optimization, ushering a new era in supply chain management, taking into account the carbon emission cost considerations that most other models ignore, leading to a more efficient and environmentally conscious logistic network.

Keywords: Green hub, single allocation, covering

GİRİŞ

Günümüzde, tedarik zinciri yönetimi ve lojistikte çevresel sürdürülebilirlik ve karbon salınımının azaltılması önemli faktörler haline gelmektedir. Özellikle, taşımacılık faaliyetleri karbon salınımı ve gürültü kirliliği yoluyla çevre üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, taşımacılık otoriteleri bu olumsuz etkileri azaltmak için sıkı düzenlemeler getirmektedir.

Taşıma ağları tasarımındaki odak noktalardan biri, taşımacılık, telekomünikasyon ve lojistik gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılan merkez-çember sistemleridir. Bu tür sistemlerin en iyi bilinen örneklerinden biri anadağıtım üssü problemidir. Ağdaki anadağıtım üssü problemi, bir grup düğümün anadağıtım üssü olarak seçilmesini içerir. Bu anadağıtım üssü düğümleri birbirine bağlı olduğu varsayılırken, anadağıtım üssü olmayan düğümler tekli ya da çoklu atama kuralına göre anadağıtım üssüne bağlanır. Tekli atama ağında, her düğüm yalnızca bir anadağıtım üssüne bağlanırken, çoklu atama ağında her düğüm en az bir anadağıtım üssüne bağlanır. Bu tip ağ yapılandırması, her kaynak-hedef düğüm çifti arasında en az bir yol oluşturur ve tamamen bağlı bir ağdan daha az bağlantı kullanır.

Bu makale yalnızca tekli atama ağlarını ele alacak olsa da sunulan modeller çoklu atama ağları için kolayca genişletilebilir. Ağdaki anadağıtım üslerinin konumunu en iyileyerek, verimliliği artırabilir, maliyetleri azaltabilir ve genel performansı geliştirebilirsiniz. Bu tür analizler, kuruluşların kaynakları nasıl tahsis etmeleri, hizmet teslimatını nasıl iyileştirmeleri ve stratejik hedeflerine nasıl ulaşabilecekleri konusunda daha bilinçli kararlar vermelerine yardımcı olabilir. Ancak, geleneksel anadağıtım üssü modelleri taşımacılık faaliyetlerinin çevresel etkisini dikkate almaz.

Bu boşluğu doldurmak için, araştırmacılar çevreye duyarlı "yeşil" anadağıtım üssü kapsama akış problemleri kavramını tanıtmıştır. Bu problemler, lojistik ağda kaynak/hedef akışlarının atamasını optimize etmek ve karbon emisyonları ve diğer çevresel etkileri en aza indirmeyi amaçlar. Bu makalede, kapasitesiz (TAYAÜKAP) ve kapasiteli (KTAYAÜKAP) tek atamalı yeşil anadağıtım üssü kapsama akışı problemi incelenecektir. Bu problem, çevresel etki azaltma ile maliyet optimizasyonunu dengelemek için bir yol sunarak, daha sürdürülebilir bir taşıma ağı tasarımını benimseyen şirketler için özellikle önemlidir. Bu problemi çözerek, şirketler çevre ve operasyonlarını fayda sağlayacak daha sürdürülebilir bir taşıma ağı tasarımı elde edebilirler.

Bu çalışmanın öne çıkan yanlarını sıralayacak olursak,

- Son yıllarda artan çevreci eğilimlerle, karbon salınımının azaltılması için hükümetler tarafından uygulanan karbon salınım vergilendirmesi yaklaşımı tekli anadağıtım üssü kapsama akış problemine entegre edilmiştir,
- Tekli anadağıtım üssü kapsama akış problemine kapasite kavramı eklenerek gerçek hayat problemlerine daha yakın bir modelleme bakış açısı sağlanmıştır,
- İki farklı türdeki veri kümesi kullanılarak modelde ortaya atılan vergilendirmenin salınımına etkisi incelenmiştir.

Makalenin geri kalanının yapısı şu şekildedir: konuya ilişkin yazın taraması 2. Bölümde verilmiştir. Kısaltma gösterimler ve matematik modeller 3. Bölümde tanımlanmıştır. 4. Bölümde ise kullanılan veri kümeleri tanımlanmış ve bu kümeler kullanılarak elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. 5. Bölümde ise sonuçlar yorumlanmış ve geleceğe yönelik araştırma konuları tartışılmıştır.

YAZIN TARAMASI

Bu bölümde anadağıtım üssü kapsama problemleri ve bunun yeşil tipleri hakkındaki yazın taraması verilecektir. Anadağıtım Üssü Kapsama Problemi (ADKP), küme kapsama problemine (Sener, 2020) benzeyen ihmal edilmiş bir anadağıtım üssü konum problemleri tipidir. ADKP'nin amacı, tüm düğümleri kapsayan en az sayıda anadağıtım üssü açmaktır. Alumur Alev ve Yetis Kara (2009) ADKP'nin karmaşıklığının NP-Zor olduğunu kanıtlamışlardır. Campbell (1994), hem tek hem de çoklu tahsis sürümlerini keşfeden, ancak taşıma maliyetlerinin çalışmada ihmal edildiği ADKP'yi anlatan ilk çalışmayı önermiştir.

Yetis Kara ve Tansel (2003), tek atamalı ADKP için bir doğrusal karışık tamsayılı modelini önermişlerdir ve bu önerme ile Campbell (1994)'ın modelinin doğrusallaştırmasını sağlamışlardır. Yapılan hesaplama çalışmaları, modellerin doğrusallaştırılmış sürümlerinin, doğrusal olmayan modellere göre daha az bellek gerektirdiğini ve daha iyi çözüm kalitesi sunduğunu ortaya koymuştur. Tan ve Yetis Kara (2007), anadağıtım üslerindeki bekleme sürelerini

dikkate alan son varış ADKP'sini incelediler ve bu sorun için bir tam sayılı matematiksel programlama modeli geliştirmişler ve Türkiye'deki bir kargo operasyonuna uygulamışlardır.

Wagner (2008), hem tek hem de çoklu atama ADKP için önerilen modelleri iyileştirmiş ve modellere miktara bağımlı olmayan azalan akış sürelerini eklemiştir. Önceki modellere göre formülasyonlarının üstün olduğunu belirtmişlerdir. Alumur Alev ve Yetis Kara (2009), eksik ağ yapısı için yeni bir tek tahsis ADKP tanıtmış ve anadağıtım üsleri arasında bağlantıların oluşturulmasını dikkate almışlardır. Calik vd. (2009), eksik ağ yapısıyla bütünleşik tek atamalı ADKP için Tabu Arama sezgiselini geliştirmişlerdir.

Lowe ve Sim (2013), tek tahsis ADKP'deki taşıma maliyetlerinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları, ADKP'ye taşıma maliyetlerini ilk kez dahil eden ve problemin toplam maliyetini azalttığını kanıtlayan ilk çalışmaydı. Karimia, Bashiri ve Nickel (2016), ilk kapasiteli tek tahsis p-ADKP'yi tanıttı ve ADKP üzerinde çoklu modlu ağların etkisini incelemişlerdir. Problemlerini bir karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli olarak formüle ettiler ve çözmek için Tabu Arama tabanlı bir sezgisel geliştirmişlerdir. Sener ve Feyzioğlu (2021), ilk kapasiteli ve kapasitesiz çoklu tahsis ADKP'yi tanıttı ve çoklu tahsis ADKP üzerinde taşıma maliyetlerinin etkisini incelemişlerdir.

Yeşil anadağıtım üssü konum problemi üzerine yazarın bildiği kadarıyla yazında yalnız birkaç çalışmanın var olduğu görülmüştür. Mohammadi, Torabi ve Tavakkoli-Moghaddam (2014), çevresel sorunları dikkate alan ilk tek atama yeşil anadağıtım üssü konum problemi çözümünü önermişlerdir. Önerilen çok hedefli rassal model, bağlantı ve anadağıtım üssü kapasite kısıtlamaları ile toplam taşıma maliyetlerini, toplam gürültü kirliliği maliyetlerini ve toplam enerji tüketimi maliyetlerini en aza indirmiştir. Sonuçları, enerji tüketimini en aza indirmenin sera gazı salınımlarını en aza indirmekle ilgili olduğunu göstermektedir.

Niknamfar ve Niaki (2016), bir zaman penceresi ile tek atama yeşil anadağıtım üssü konum problemi için çok hedefli bir en iyileme modeli geliştirmişlerdir. Özellikle, anadağıtım üssü kapasite kısıtlamaları ile birlikte holding şirketinin toplam karını ve taşıyıcı şirketlerin toplam karını en üst düzeye çıkarmayı amaçlamışlardır. Ayrıca, araç hızının bir fonksiyonu olarak araç salınımlarını da dikkate almışlar. Elde edilen problem formülasyonu, en kötü performans gösteren amaç fonksiyonunu en üst düzeye çıkararak çözmüşler.

Dukkanci, Peker ve Kara (2019), kapasite içermeyen tek atama yeşil anadağıtım üssü konum problemi için tek amaç fonksiyonuna sahip ilk doğrusal olmayan en iyileme formülasyonunu tanıtmışlardır. Araç hızı ve yükü göz önünde bulundurarak enerji tüketimini hesaplamışlardır. Modeli, perspektif kesimlerinin faydalarını ve ikinci dereceden koni programlama yaklaşımını doğrusal olmayan en iyileme modellerine uygulayarak çözmüşlerdir.

Parsa vd. (2019), birkaç tamsayılı değişkeni olan çoklu atama yeşil anadağıtım üssü konum problemi için çok hedefli bir en iyileme modeli önermişlerdir. Toplam taşıma ve anadağıtım üssü açma maliyetlerini, toplam sera gazı salınımlarını, enerji tüketimini ve gürültü kirliliğini en aza indirmeyi amaçlanmıştır. Her amaç fonksiyonunun bir ticari çözücünden elde edilen çözümünü, birkaç çok kriterli karar verme yöntemini kullanarak birleştirmişlerdir.

Bu çalışmada yeşil anadağıtım üssü kapsama akış problemine odaklanarak, yeşil yaklaşımları ele alan yeşil anadağıtım üssü konum problemi gibi üzerinde az sayıda çalışma olan bir konuya katkıda bulunmak amaçlanmıştır. Yazında yukarıdaki makaleler incelenerek, yazarın bildiği kadarıyla bu makale doğrusal tamsayılı ve kapasiteli ilk tek amaç fonksiyonlu yeşil anadağıtım üssü kapsama modelini içermektedir.

MATEMATİK MODEL

Bu bölümde kapasitesiz (TAYAÜKAP) ve kapasiteli (KTAYAÜKAP) tek atamalı yeşil anadağıtım üssü kapsama akış problemi tanıtılmıştır. Bu makalede geliştirilen formülasyonlar Lowe ve Sim (2013)'in çalışmasına hem bağlantılar hem de düğümler üzerinde kapasite kısıtlarıyla birlikte karbon salınım maliyeti eklenerek oluşturulmuştur. Bütün modellerde kullanılacak olan matematiksel kısaltma gösterimleri şu şekildedir:

d	Düğümler kümesi
t_{ij}	i . düğümden j . düğüme olan talep miktarı ($i, j \in d$)
T	Sistemdeki toplam talep miktarı
o_i	i . düğümden gönderilen toplam talep miktarı ($i \in d$)
q_j	j . düğüme gelen toplam talep miktarı ($j \in d$)

k_i^D	i . düğümdeki en büyük kapasite miktarı ($i \in d$)
k_{ik}^B	i . düğümle k . anadağıtım üssü arasındaki bağlantının en büyük kapasite miktarı ($i, j \in d$)
f_k	k . anadağıtım üssünü açma maliyeti
c_{ij}	Bir birim ürünün i . düğümle j . düğüm arasında taşınmasının maliyeti ($i, j \in d$)
ρ	Bir birim karbon salınımının maliyeti
e_{ij}	Bir birim ürünün i . düğümle j . düğüm arasında taşınmasından doğan karbon salınım miktarı ($i, j \in d$)
m_{ij}	i . düğümle j . düğüm arasındaki mesafe ($i, j \in d$)
A_{ik}	i . düğümün k . anadağıtım üssü tarafından kapsanıp ($A_{ik} = 1$) kapsanmaması ($A_{ik} = 0$) parametresi
α	Anadağıtım üsleri arasındaki taşıma için indirim çarpanı

Burada $o_i = \sum_{j \in d} t_{ij}$, $q_j = \sum_{i \in d} t_{ij}$ ve $T = \sum_{i,j \in d} t_{ij}$ olduğu açıktır. x_{ik} sıfır-bir değişkeni ($\forall i, k \in d$), i . düğümünün k . anadağıtım üssüne bağlı olup olmadığını simgeler ('1' bağlantının var olduğunu ve '0' ise bağlantının olmadığını gösterir). x_{kk} 1'e eşit olduğunda k . düğüm bir anadağıtım merkezi olarak hizmet vermesi genel kabuldür. k . düğümde bir anadağıtım üssü kurmak ve işletmekle ilişkili yıllık maliyetler, için f_k ($\forall k \in d$) tarafından ifade edilir. y_{ikl} değişkeni ($\forall i, k, l \in d$) başlangıcı i . düğümünden olan ve ilk olarak k . anadağıtım üssüne daha sonra l . anadağıtım üssüne ilerleyen akışın veya 'emtiyanın' miktarını temsil eder. İlk olarak önerdiğimiz TAYAÜKAP modelinin matematiksel gösterimini yapacak olursak:

$$enk. \varpi = \sum_{k \in d} f_k x_{kk} + \alpha \sum_{i,k,l \in d} c_{kl} y_{ikl} + \sum_{i,k \in d} c_{ik} x_{ik} (o_i + q_i) + \rho (\sum_{i,k,l \in d} e_{kl} y_{ikl} + \sum_{i,k \in d} e_{ik} x_{ik} (o_i + q_i)) \quad (1)$$

$$\text{öyle ki } x_{ik} \leq A_{ik} x_{kk} \quad \forall i, k \in d, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in d} x_{ik} = 1 \quad \forall i \in d, \quad (3)$$

$$\sum_{j \in d} t_{ik} x_{jk} + \sum_{l \in d} y_{ikl} - \sum_{l \in d} y_{ilk} = o_i x_{ik} \quad \forall i, k \in d, \quad (4)$$

$$\sum_{l \in d, l \neq k} y_{ikl} \leq o_i x_{ik} \quad \forall i, k \in d, \quad (5)$$

$$y_{ikl} \geq 0 \quad \forall i, k, l \in d, \quad (6)$$

$$z_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in d. \quad (7)$$

Amaç fonksiyonu (1) ndaki dört terim sırasıyla; yıllık anadağıtım üssü açma sabit maliyeti, anadağıtım üsleri arasındaki taşımanın maliyeti, bir ana dağıtım üssü olmayan düğümünden anadağıtım üssüne olan taşımanın maliyeti ve toplam taşımalarından kaynaklı oluşan karbon salınımının maliyetidir. İkinci kısıt (2), belirli bir i . düğümünün, i . düğümünü kapsayan bir k . anadağıtım üssüne atanmasını garanti eder. Üçüncü (3) ve yedinci (7) kısıt, her bir düğümün sadece ve sadece bir anadağıtım üssüne atanmasını sağlar. Dördüncü kısıt (4) ise akış miktarlarının korunması içindir. Beşinci kısıt (5), Correia vd., (2014) tarafından gösterimden kaynaklanan akış miktarlarındaki eksikliği gidermek için önerilmiştir. Altıncı (6) ve yedinci (7) kısıtlar karar değişkenlerinin işaret kısıtlarını göstermektedir.

Bu gösterim için ayrıca bir kapasite kısıt kümesi geliştirilmiştir:

$$\sum_{i,l \in d} y_{ikl} \leq k_k^D \quad \forall k \in d, \quad (8)$$

Sekizinci kısıt (8), k . anadağıtım üssünün depolayabileceği en büyük kapasitenin k_k^D olmasını sağlamaya yöneliktir. TAYAÜKAP modelinin kapasiteli hali:

KTAYAÜKAP: Denklem (1-7) ve (8),

Burada amaç fonksiyonundaki (1) karbon salınım maliyeti çıkarılarak modeldeki değişimi incelemeyi amaçladığımız TAYAÜKAP ve KTAYAÜKAP modelleri ile ilişkili olarak sırasıyla TAAÜKAP ve KTAAÜKAP, modelleri de çözdürülmüştür.

SAYISAL ANALİZ

Bu çalışmada, sayısal çalışmamızda popüler ve açık kaynaklı 25 ABD şehrini içeren CAB (Beasley, 1990) ve 81 Türkiye şehrini içeren TR (Yetis Kara, 2017) veri setleri kullanıldı. TR veri seti, birim akış maliyetleri, anadağıtım üssü açılış maliyetleri, ağ bağlantılarının uzunlukları ve talep akışları da dahil olmak üzere tam bir veri setidir. TR ve CAB veri setleri arasındaki en büyük fark, CAB veri setinde uzaklıklar simetrik iken, TR veri setinde asimetrik

bir yapıya sahiptir. CAB veri seti sadece düğümler arasındaki bağlantı uzunluklarını ve talep akışlarını içerir. CAB için eksik verileri tamamlamak için Lowe ve Sim (2013)'in çalışmasındaki yaklaşımlar kabul edilmiştir. c_{ij} 'nin, m_{ij} 'nin bir oranı olduğu varsayılmıştır ($c_{ij} = \frac{m_{ij}}{25000} \forall i, j$). TR veri kümesi için, anadağıtım üssü açma maliyetini ise 100'le çarpılarak modelden daha makul sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. CAB veri kümesi için anadağıtım üssü açma maliyeti tüm düğümler için aynı kabul edilmiştir.

Anadağıtım üssü kapsama mesafesini hesaplamak için; ağdaki en uzun bağlantı mesafesi ve bir kapsama oranı, Δ , çarpılarak hesaplanır. Burada Δ 'yı belirlerken alt ağlarda bağlantısız bir yapı kalmamasına dikkat edilir. Bağlantı, k_{ik}^B , ve anadağıtım üssü, k_i^D , kapasiteleri hem CAB hem de TR veri kümesinde bulunmamaktadır. Bu sebeple Sener ve Feyzioğlu (2021)'nin geliştirdiği yöntem kullanılmıştır. Burada belirlenen kapasite sistemdeki toplam akışın bir yüzdesidir. Karbon salınım miktarlarının tespitinde Smart Freight Centre (2021)'in önerdiği yöntem kullanılmıştır. Birim karbon salınım maliyeti, ρ , için The World Bank (2021)'tan CAB için California, İsviçre ve Massachusetts; TR için ise MIKTA üyesi ülkelerden, Avustralya, Güney Kore ve Meksika verileri kullanılmıştır. Kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Seçilmiş Parametreler

Parametreler	CAB	TR
f_k	[10.000;20.000;30.000]	Veri Kümesinde Var
α	[0,2;0,5;0,8]	[0,4;0,6;0,8]
Δ	[0,6;0,7;0,8]	[0,55;0,65;0,75]
ρ	[8,26;16,89;104,65]	[4,07;10,64;11,24]
k_i^D	T * [0, 1; 0, 2; 0, 3]	

Burada üç temel performans ölçütünü inceleyeceğiz. Bunlardan ilki açılan anadağıtım üssü sayısı (AÜS)'dir. İkincisi ise, karbon salınım miktarlarındaki yüzdesel değişim (KSD) ise karbon salınım maliyetli modellerdeki salınımın ($\sum_{i,k,l \in d} e_{kl} y_{ikl} + \sum_{i,k \in d} e_{ik} x_{ik} (o_i + q_i)$) yüzdesel olarak karbon salınım maliyeti olmayan modellerden yüzdesel olarak ne kadar fazla olduğudur. Üçüncüsü ise toplam maliyetteki değişim (TMD) kapasitesiz model için şu şekilde hesaplanır:

$$TMD = 100 * \frac{\omega_{TAAÜKAP} - \omega_{TAYAÜKAP}}{\omega_{TAAÜKAP}}$$

Kapasiteli model için de aynı yaklaşım kullanılarak hesaplama yapılır.

Tüm modeller Gurobi 10.0.1 ticari çözücüsü kullanılarak, Intel i9 işlemcili (2.50 GHz) 16 GB rame sahip bir dizüstü bilgisayarda çözdürülmüştür. Tüm çözüm zamanları gerçek zaman ölçümü olarak saniye cinsinden verilmiştir. Çözüm süresi istatistikleri Tablo 2'de verilmiştir. Beklenildiği gibi ağdaki düğüm sayısı arttıkça ve anadağıtım üssüne kapasite kısıtı koyuldukça çözüm süresi artmaktadır.

Tablo 2. Çözüm Süresi İstatistikleri (Saniye)

	Modeller	En Küçük	En Büyük	Ortalama
CAB	TAYAÜKAP	0,61	29,57	6,13
	KTAYAÜKAP	0,66	344,24	34,73
TR	TAYAÜKAP	154,83	658,38	370,77
	KTAYAÜKAP	168,03	26643,24	2061,73

Tüm sonuçları incelediğimizde Δ 'nın CAB veri kümesi kullanılarak çözülen modeller üstünde çok büyük bir etkisi bulunmadığından yarıçap ortalamaları alınarak Tablo 3 ve 4 oluşturulmuştur. Tablo 3'teki performans ölçütlerini incelersek;

- AÜS değeri en fazla ρ 'dan etkilenmektedir. Burada ρ 'daki artış neredeyse AÜS değerini iki katına çıkarmaktadır. AÜS üzerindeki diğer çok önemli faktör f_k 'dir. Bu değer arttıkça, AÜS ρ 'ya bağlı olarak neredeyse üçte birine inmektedir. AÜS üstündeki en az öneme sahip parametre ise α 'dır. α arttıkça diğer parametrelere bağlı hafif bir azalma olmaktadır.
- KSD, AÜS gibi en fazla ρ değişimine tepki göstermektedir. Burada KSD en iyi değerlere ρ 'nun en yüksek değerlerinde ulaşmaktadır. Ölçek ekonomisi kaynaklı indirim miktarı arttıkça KSD değerleri karbon

salımsız modele göre iyi olmasına rağmen kötüleşmektedir. f_k 'ya karşı KSD'nin tepkisi kubbe şekli teşkil etmektedir.

- TMD için en anlamlı değişim en yüksek karbon salınım maliyeti seviyesinde görülmektedir. α azaldıkça TMD değerleri de azalmaktadır. f_k ile TMD arasında anlamlı bir ilişki kurulamamaktadır.

Tablo 3. TAYAÜKAP Çözüm İstatistikleri (CAB Veri Kümesi için, Δ üzerine ortalama alınmış)

ρ		8,26			16,89			104,65		
f_i	α	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD
10.000	0,8	10	13,7	2,16	12	20,4	4,96	24	34,6	19,96
	0,5	12	10,3	0,75	12	10,3	2,47	24	26,3	13,90
	0,2	12	10,3	1,54	12	10,3	3,48	24	26,3	15,26
20.000	0,8	6	19,0	2,32	6	19,0	5,25	15	39,5	23,74
	0,5	6	6,3	0,59	7	10,4	1,69	15	30,0	16,36
	0,2	6	6,7	0,76	7	10,8	2,63	16	31,3	17,86
30.000	0,8	4	12,9	0,62	4	12,9	2,73	12	37,7	20,50
	0,5	5	13,6	1,89	5	13,6	4,05	12	35,3	20,01
	0,2	5	0,3	0,04	5	0,3	0,10	12	25,4	15,26

Tablo 4'te verilen elde edilen sonuçlar incelenirse;

- AÜS, ρ 'ya karşı kapasite miktarı belirli bir seviyenin üstünde iken kapasitesiz modeldeki davranışları sergilediği, bu değer belirli bir miktarın altına düştüğünde ise tam tersi olarak değişime uğradığı görülmektedir. Yine aynı şekilde kapasitenin bir sınırdan fazla olduğu durumlarda kapasite AÜS'te çok büyük değişimlere sebep olmazken, aksi durumda AÜS'te aşırı bir azalmaya sebep olacaktır. AÜS, f_k ve α 'daki değişimlere kapasitesiz modele benzer tepkiler göstermektedir.
- Kapasite üzerine konulan kısıtın daha sınırlayıcı olduğu durumlarda karbon salınım miktarındaki değişim aşırı azalmaktadır. KSD, f_k , ρ ve α 'daki değişimlere kapasitesiz modeldekine benzer tepkiler göstermektedir.
- k_i^D ne kadar fazlaysa TMD'yi de o kadar arttırmaktadır. Tam aksi durumda da genellikle azalmasına neden olmaktadır. TMD de AÜS ve KSD gibi genellikle diğer parametrelere kapasitesiz modelde gösterdiği tepkiyi göstermektedir.

Tablo 5 ve 6'da TR veri kümesi kullanılarak elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. Tablo 5'ten yola çıkarak sonuçları incelersek;

- AÜS, Δ ve α azaldıkça artmaktadır. Bu iki parametreye ters olarak, ρ ile AÜS aynı yönlü hareket etmektedirler.
- KSD, parametrelere AÜS'ün gösterdiği tepkilerin aynısını göstermektedir.
- TMD, parametrelere AÜS ve KSD'ye benzer reaksiyonlar oluşturmaktadır.

Tablo 6'daki performans ölçütlerinin değişimleri incelenecek olursa;

- AÜS ve ρ arasındaki ilişkiyi inceleyecek olursak, k_i^D belirli bir seviyenin üstündeyse bu ilişki TAYAÜKAP modelinin sonuçlarında gözlemlenen ilişki ile aynıdır, bu değer belirli bir miktarın altına düştüğünde ise tam tersi olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek kapasite seviyelerinde AÜS'te genellikle aşırı bir değişim gözlenmezken, daha düşük kapasite seviyelerinde aşırı bir düşüş olmaktadır. AÜS, Δ ve α 'daki değişimlere genellikle kapasitesiz modele benzer tepkiler göstermektedir.
- k_i^D azaldıkça genellikle KSD de azalmaktadır. Kapasitesiz modelin aksine KSD, Δ ve α arasındaki ilişki doğrusal ifadelerle açıklanamamaktadır.
- k_i^D ile TMD arasındaki ilişki KSD ile olan ilişki ile benzer yapıdadır. TMD'nin diğer parametrelerle olan ilişkisi genellikle kapasite miktarına bağlı olarak değişkenlik gösteren bir yapıdadır.

Tablo 4. KKTAYAÜKAP Çözüm İstatistikleri (CAB Veri Kümesi için, Δ üzerine ortalama alınmış)

	ρ		8,26			16,89			104,65		
	f_i	α	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD
$k_i^p = 0,3 * T$	10.000	0,8	10,0	13,7	2,2	12,0	20,4	5,0	24,0	34,6	20,0
		0,5	12,0	10,3	0,7	12,0	10,3	2,5	24,0	26,3	13,9
		0,2	12,0	10,3	1,5	12,0	10,3	3,5	24,0	26,3	15,3
	20.000	0,8	6,0	19,0	2,3	6,0	19,0	5,2	15,0	39,5	23,7
		0,5	6,0	6,3	0,6	7,0	10,4	1,7	15,0	30,0	16,4
		0,2	6,0	6,7	0,8	7,0	10,8	2,6	16,0	31,3	17,9
	30.000	0,8	4,0	12,9	0,6	4,0	12,9	2,7	12,0	37,7	20,5
		0,5	5,0	13,6	1,9	5,0	13,6	4,1	12,0	35,3	20,0
		0,2	5,0	0,3	0,0	5,0	0,3	0,1	12,0	25,4	12,0
$k_i^p = 0,2 * T$	10.000	0,8	10,0	13,7	2,2	12,0	19,9	4,9	24,0	34,6	20,0
		0,5	12,0	7,2	0,1	12,0	7,2	1,4	24,0	24,2	12,1
		0,2	12,0	7,2	0,7	12,0	7,2	2,1	24,0	24,2	13,4
	20.000	0,8	6,0	13,3	1,6	6,0	13,3	3,6	16,0	37,0	20,5
		0,5	6,0	1,9	0,2	8,0	9,8	0,6	16,0	28,7	14,3
		0,2	6,0	0,0	0,0	8,0	9,8	1,3	17,0	29,9	15,6
	30.000	0,8	4,0	13,5	1,2	4,0	13,5	3,3	12,0	37,7	20,7
		0,5	6,0	21,7	2,4	6,0	21,7	6,1	12,0	38,1	23,1
		0,2	6,0	0,0	0,0	6,0	2,0	0,2	12,0	22,4	10,1
$k_i^p = 0,1 * T$	10.000	0,8	3,0	9,6	1,4	3,0	10,7	3,0	1,0	13,9	8,8
		0,5	3,3	2,6	0,2	3,3	2,6	0,6	3,0	5,9	2,6
		0,2	3,7	2,2	0,3	3,7	2,2	0,6	4,0	3,6	2,4
	20.000	0,8	2,0	10,0	1,3	1,7	11,3	2,9	1,0	14,9	9,9
		0,5	2,0	0,9	0,1	2,0	2,1	0,3	2,3	5,2	2,7
		0,2	2,0	0,9	0,0	2,3	3,1	0,3	2,6	7,1	3,1
	30.000	0,8	1,7	9,1	1,0	1,3	10,2	2,5	1,0	12,7	8,5
		0,5	2,0	0,9	0,1	2,0	2,1	0,3	1,0	7,4	3,3
		0,2	2,0	0,9	0,0	2,0	1,8	0,2	2,3	7,4	2,9

Tablo 5. TAYAÜKAP Çözüm İstatistikleri (TR Veri Kümesi için)

α	ρ	4,07			10,64			11,24		
	Δ	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD
0,8	0,75	23	24,3	9,0	32	33,5	20,0	32	33,5	20,6
	0,65	25	23,9	6,5	32	32,4	18,3	32	32,9	18,9
	0,55	25	25,1	7,9	32	33,7	19,5	32	34,1	20,1
0,6	0,75	28	27,2	11,9	38	35,1	22,5	38	35,4	23,1
	0,65	30	26,9	10,8	37	34,9	21,8	39	35,6	22,4
	0,55	31	27,6	10,8	38	35,6	22,1	39	36,0	22,7
0,4	0,75	34	30,9	15,6	46	38,3	25,8	47	38,5	26,4
	0,65	34	30,4	15,3	48	38,4	25,7	47	38,7	26,3
	0,55	35	29,6	14,9	48	37,8	25,4	48	38,6	26,0

Şekil 1 ve Şekil 3'te TAYAÜKAP modeli için CAB ve TR veri kümesi kullanılarak, orta parametre değerleri için karbon salınım maliyetlerindeki değişimin her bir düğümden salınan karbon miktarları ve açılan anadağıtım üslerinin konumları görülmektedir. Bu şekilden açıkça anlaşılacağı gibi Şekil 3'te karbon maliyetinin artırılması anadağıtım üssü sayısını arttırdığı ve aşırı karbon salınımı olan düğüm sayısında ise azalmayla sonuçlandığı çıkarımı yapılabilir.

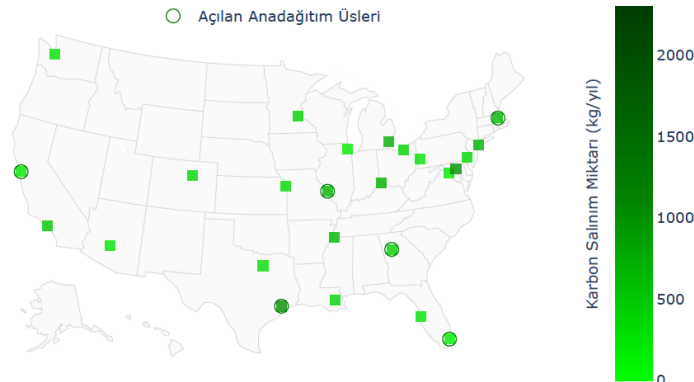
Şekil 4'te ise maliyet değişiminin karbon salınımı fazla olan düğüm sayısına etkisinin gözlemlenemediği sonucu çıkarılabilir.

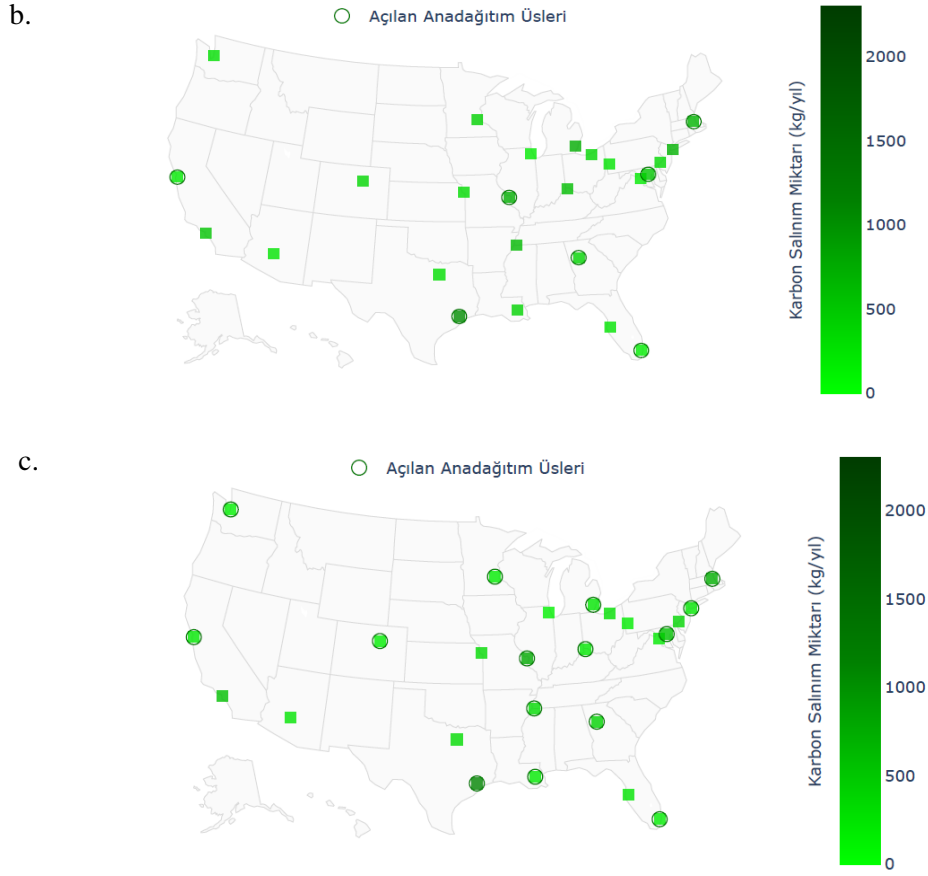
Şekil 2 ve Şekil 4'te ise KTAYAÜKAP modeli için CAB ve TR veri kümesi kullanılarak, orta parametre değerleri için karbon salınım maliyetlerindeki ve kapasitedeki değişimin her bir düğümde salınan karbon miktarları ve açılan anadağıtım üslerinin konumları görülmektedir. Şekil 2'de daha az miktarda belirlenen kapasitenin karbon salınımı fazla olan düğüm sayısını fazlaştırdığı açıkça gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra, bu model kapasitesizdeki gibi karbon salınım maliyetine tepki vermektedir. Şekil 4'te ise karbon salınımının aşırı karbon salınan düğüm sayısı üzerinde bir etkisi olmadığı bunu yerine kapasitenin artırılmasının düğüm sayısını aşırı bir şekilde azalttığı açıktır.

Tablo 6. KTAYAÜKAP Çözüm İstatistikleri (TR Veri Kümesi için)

	ρ	4,07			10,64			11,24			
		Δ	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD
$k_t^p = 0,3 * \Gamma$	0,8	0,75	23	24,3	9,0	32	33,5	20,0	32	33,5	20,6
		0,65	25	23,9	6,5	32	32,4	18,3	32	32,9	18,9
		0,55	25	25,1	7,9	32	33,7	19,5	32	34,1	20,1
	0,6	0,75	28	26,9	11,9	38	35,1	22,5	38	35,4	23,1
		0,65	30	26,9	10,8	37	34,9	21,8	39	35,6	22,4
		0,55	32	26,2	10,8	38	35,6	22,1	39	36,0	22,7
	0,4	0,75	34	30,9	15,6	46	38,3	25,8	47	38,5	26,4
		0,65	34	30,4	15,3	47	38,2	25,7	47	38,7	26,3
		0,55	35	29,6	14,9	48	37,8	25,4	48	38,6	26,0
$k_t^p = 0,2 * \Gamma$	0,8	0,75	25	28,7	7,9	32	33,7	19,9	32	33,7	20,6
		0,65	25	27,5	5,7	32	32,4	18,3	32	32,9	18,9
		0,55	28	29,0	7,3	32	33,7	19,5	32	34,1	20,1
	0,6	0,75	30	29,0	11,6	38	35,6	22,8	38	35,8	23,4
		0,65	31	29,4	10,3	37	34,9	21,8	39	35,6	22,4
		0,55	35	29,9	10,4	38	35,6	22,1	39	36,0	22,7
	0,4	0,75	34	32,5	15,7	46	38,6	26,2	47	38,9	26,8
		0,65	35	30,8	15,5	47	38,5	26,1	47	39,0	26,7
		0,55	25	30,5	15,4	48	38,4	26,0	48	39,2	26,6
$k_t^p = 0,1 * \Gamma$	0,8	0,75	5	2,6	1,1	5	2,6	1,9	5	2,6	1,9
		0,65	12	0,4	0,2	14	0,7	0,4	14	0,7	0,4
		0,55	9	1,7	0,6	5	5,3	2,5	5	5,3	2,6
	0,6	0,75	8	2,2	0,4	5	2,5	1,5	5	2,5	1,5
		0,65	14	0,4	0,2	14	0,6	0,4	14	0,6	0,4
		0,55	17	1,9	0,5	13	3,4	1,3	12	3,6	1,4
	0,4	0,75	19	0,2	0,1	9	2,0	0,7	9	2,0	0,8
		0,65	18	0,2	0,1	18	0,2	0,2	18	0,2	0,2
		0,55	22	1,3	0,7	21	1,4	1,0	21	1,4	1,1

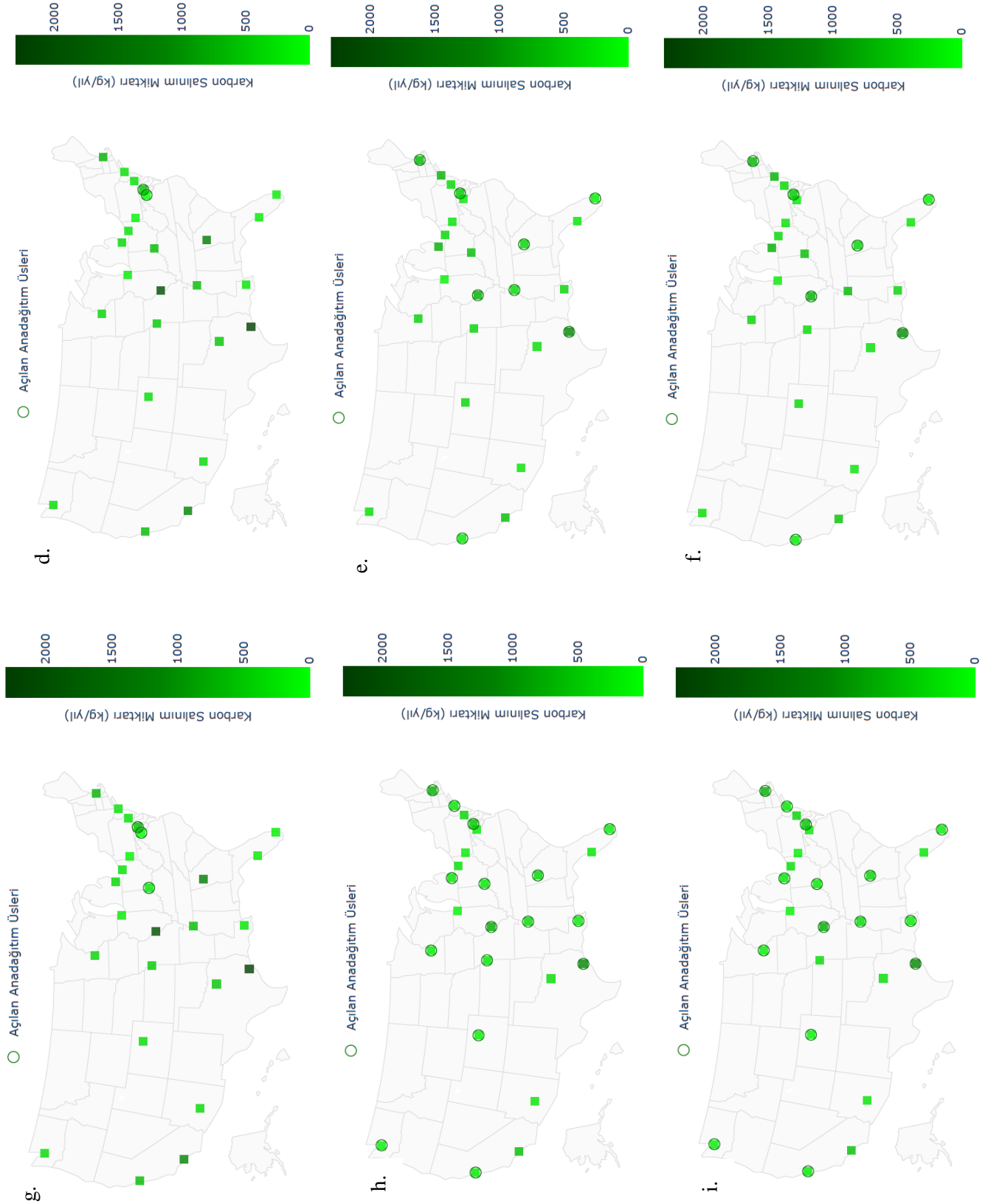
a.



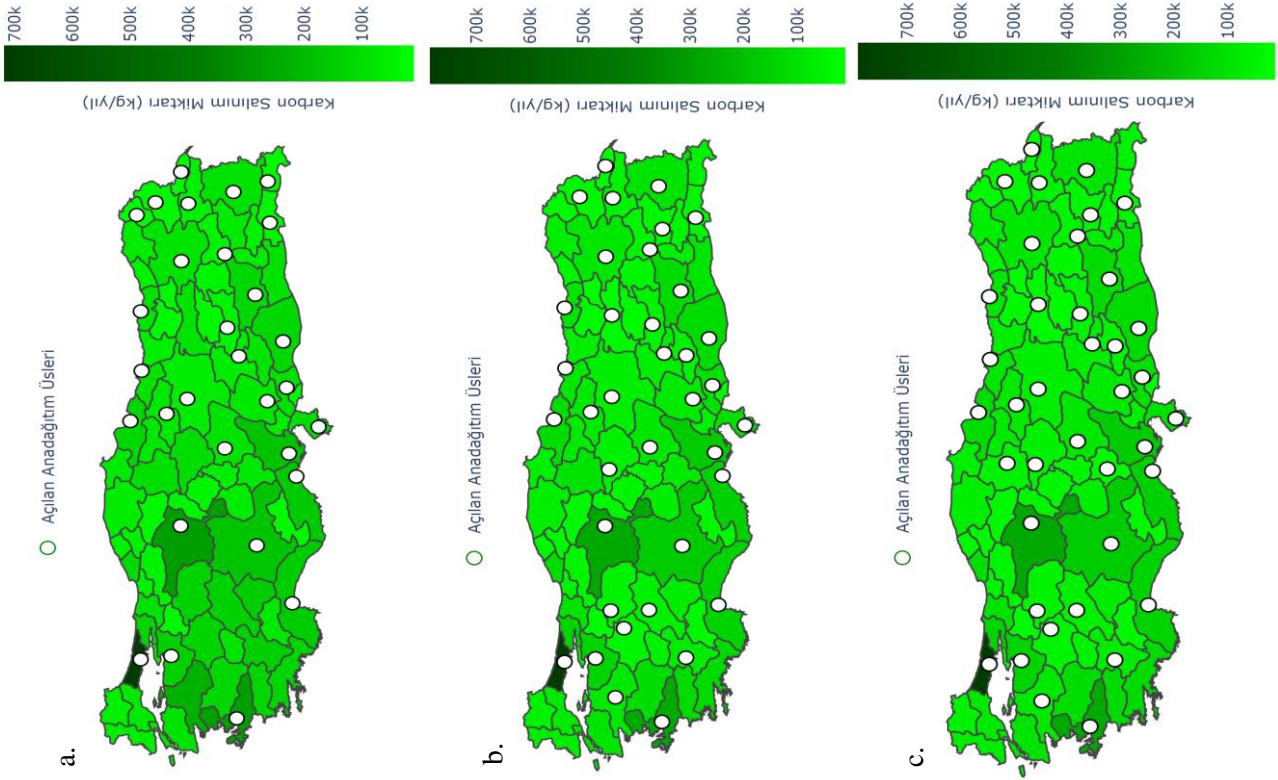


Şekil 1. TAYAÜKAP Modeli İçin Açılan Anadağıtım Üsleri ve Döğümlerin Karbon Salınım Miktarları (CAB Veri Kümesi, $f_k = 20.000$; $\alpha = 0,5$; $\Delta = 0.7$) a. $\rho = 8,26$ b. $\rho = 16,89$ c. $\rho = 104,65$

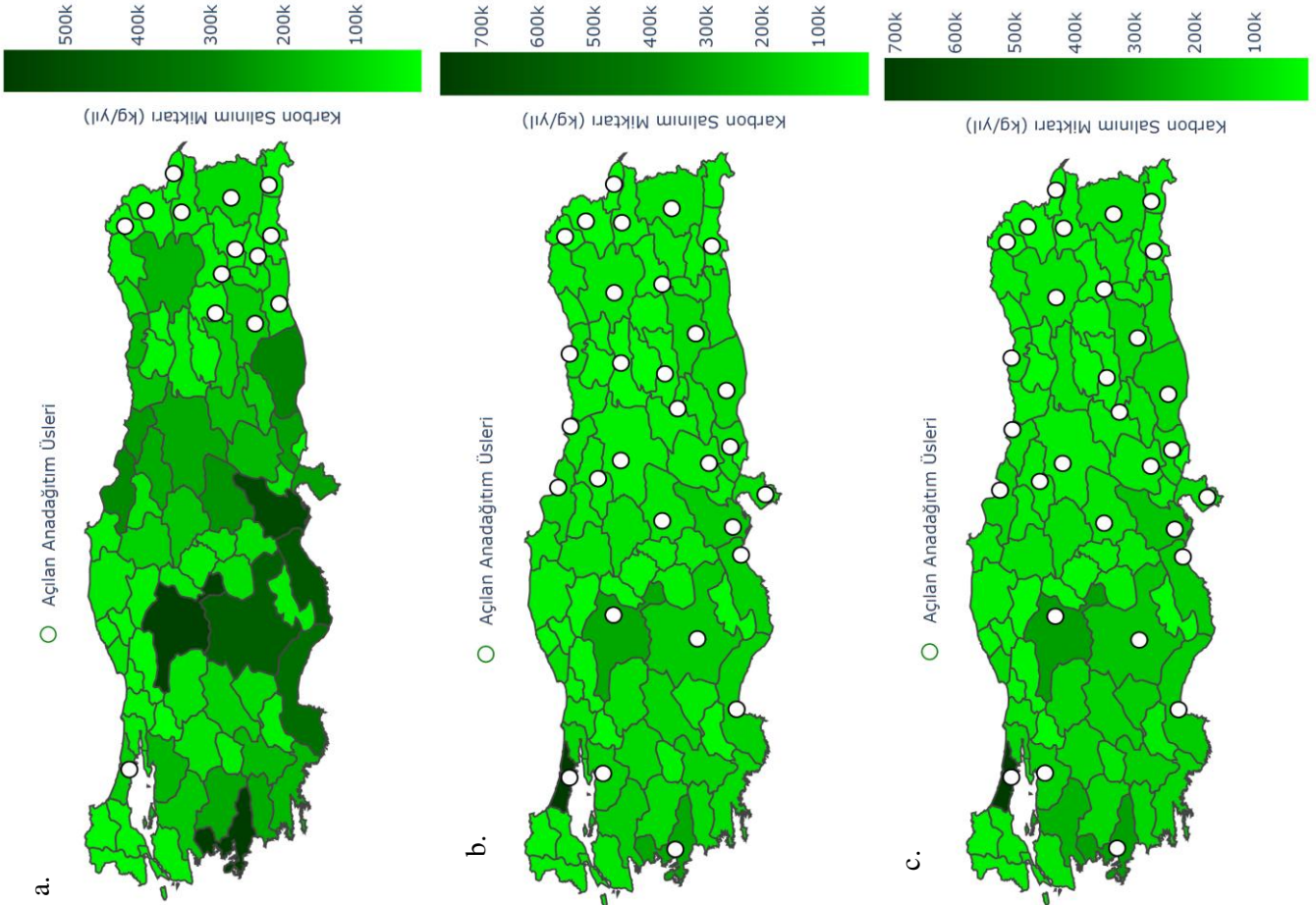


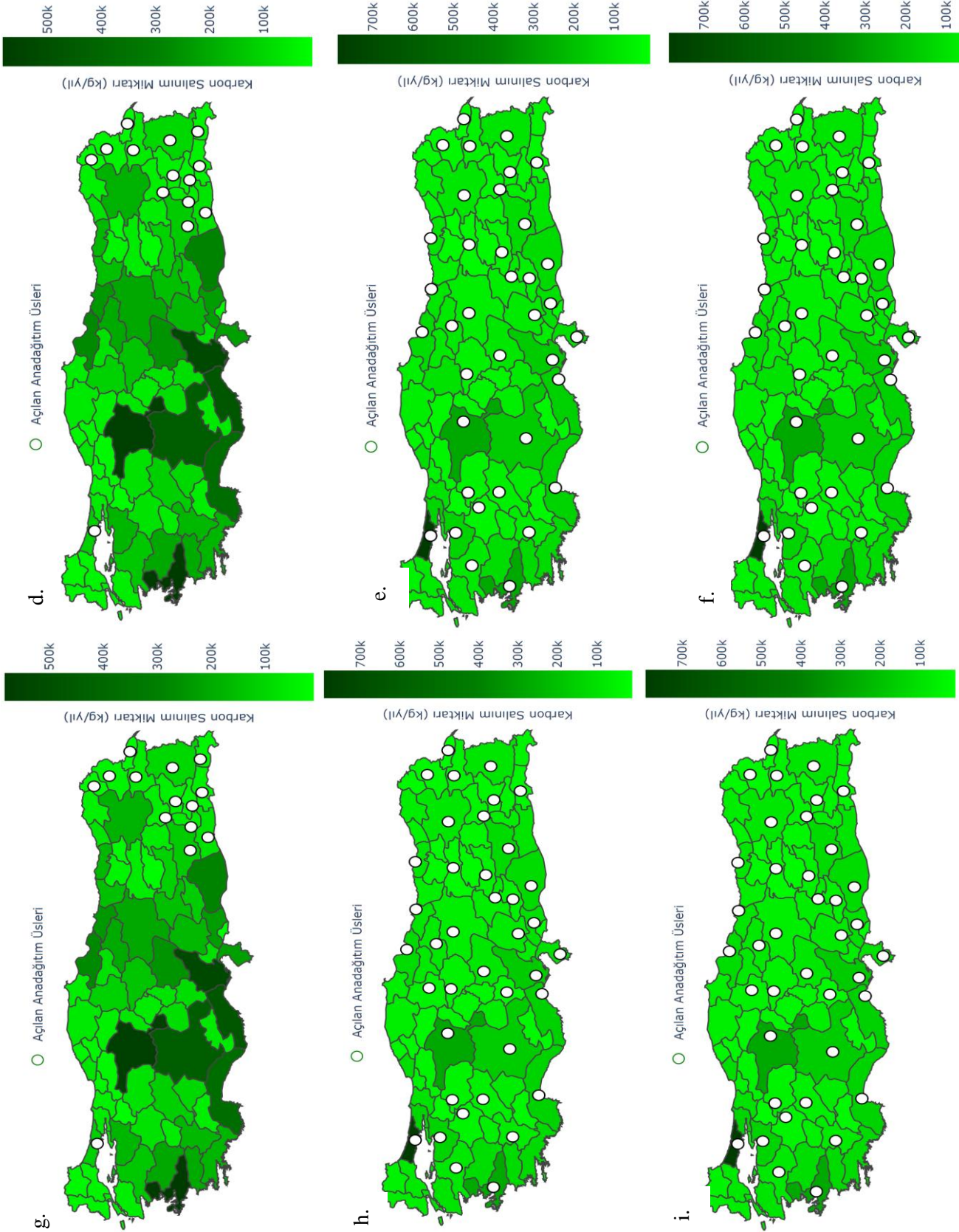


Şekil 2. KTAYAÜKAP Modeli İçin Açılan Anadağıtım Üsleri ve Dğümlerin Karbon Salınım Miktarları (CAB Veri Kümesi, $f_k = 20.000; \alpha = 0,5; \Delta = 0.7$) **a.** $\rho = 8,26; k_i^D = 0,1 * T$ **b.** $\rho = 8,26; k_i^D = 0,2 * T$ **c.** $\rho = 8,26; k_i^D = 0,3 * T$ **d.** $\rho = 16,89; k_i^D = 0,1 * T$ **e.** $\rho = 16,89; k_i^D = 0,2 * T$ **f.** $\rho = 16,89; k_i^D = 0,3 * T$ **g.** $\rho = 104,65; k_i^D = 0,1 * T$ **h.** $\rho = 104,65; k_i^D = 0,2 * T$ **i.** $\rho = 104,65; k_i^D = 0,3 * T$



Şekil 3. TAYAÜKAP Modeli İçin Açılan Anadağıtım Üsleri ve Dügümlerin Karbon Salınım Miktarları (TR Veri Kümesi; $\alpha = 0,6$; $\Delta = 0,65$) a. $\rho = 4,07$ b. $\rho = 10,64$ c. $\rho = 11,24$





Şekil 4. KTAYAÜKAP Modeli İçin Açılan Anadağıtım Üsleri ve Düğümlerin Karbon Salınım Miktarları (TR Veri Kümesi; $\alpha = 0,6$; $\Delta = 0,65$) **a.** $\rho = 4,07$; $k_i^D = 0,1 * T$ **b.** $\rho = 4,07$; $k_i^D = 0,2 * T$ **c.** $\rho = 4,07$; $k_i^D = 0,3 * T$ **d.** $\rho = 10,64$; $k_i^D = 0,1 * T$ **e.** $\rho = 10,64$; $k_i^D = 0,2 * T$ **f.** $\rho = 10,64$; $k_i^D = 0,3 * T$ **g.** $\rho = 11,24$; $k_i^D = 0,1 * T$ **h.** $\rho = 11,24$; $k_i^D = 0,2 * T$ **i.** $\rho = 11,24$; $k_i^D = 0,3 * T$

Tüm bu sonuçları göz önüne alarak bazı çıkarsamalar yapılırsa;

- The World Bank (2021)'a göre Türkiye karbon salınım maliyetlendirmesi uygulamasına geçmeyi planlamaktadır. Amerika'da ise eyaletler bazında farklı uygulamalar mevcuttur. Bu çalışmada eğer karbon salınım maliyeti uygulanırsa bunun modelde dikkate alınmasının maliyet ve salınım miktarlarına etkisinin anlamlı olacağı sonucuna varılmıştır.
- Diğer bir sonuç fazla sayıda anadağıtım üssü açmak karbon salınımı üzerinde etkiye sahip değildir.
- Salınım üzerinde en fazla kapasite miktarının etkisi olduğu açıktır.

SONUÇLAR

Bu çalışma, karbon salınımını, anadağıtım üssü yer seçimini, akış maliyetlerini, kapsama kısıtları ve anadağıtım üssünün kapasite kısıtları gibi faktörleri dikkate alarak bir kalkış-varış ağı için en verimli yapıyı belirlemeyi amaçlamaktadır. İki düğüm arasındaki talebin en az bir merkez düğümü üzerinden yönlendirilmesi gerekmektedir. Çalışma, bir merkez düğümün, ona uzaklığın belirlenmiş bir değerden daha az olduğu bir merkez olmayan bir düğümü kapsayabileceğini varsayarken, merkezler arasında mesafe sınırlamasının olmadığını öngörür.

Elde edilen sonuçlara göre karbon salınımı miktarı ve maliyeti üzerindeki en büyük etkinin anadağıtım üsleri üzerindeki kapasite miktarları olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra karbon salınım ve anadağıtım üssü açma maliyeti arttıkça genellikle daha az anadağıtım üssü açıldığı gözlemlenmiştir. Bu anadağıtım üslerinin konumları talebin yüksek olduğu ve bununla beraber anadağıtım üssünün kapsamı dışında düğüm kalmayacak şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmadan çıkarılacak en önemli sonuçlardan biri de karbon salınım maliyeti eklemek TAYAÜKAP ve KTAYAÜKAP modellerinin TAAÜKAP ve KTAAÜKAP modellerinden %39,5 daha az karbon salınımına neden olacağıdır. Diğer bir ifadeyle önerilen modeller daha çevre dostu bir ağ tasarımı sağlamaktadır.

İleride bu çalışma çeşitli şekillerde genişletilebilir. Bu genişletmelere örnek olarak, çözüm sürelerinin uzunluğu dikkate alındığında daha büyük veri kümelerini çözmek için sezgisel çözüm yöntemleri geliştirilebilir. Bunun yanı sıra, sadece karbon salınımı değil sülfür salınımı vb. diğer çevreyi kirleten faktörler de modellemeye dahil edilebilir.

KAYNAKLAR

- Alumur Alev, S., & Yetis Kara, B. (2009). A Hub Covering Network Design Problem for Cargo Applications in Turkey. *The Journal of the Operational Research Society*, 60(10), 1349-1359.
- Beasley, J. E. (1990). OR-Library.
- Calik, H., Alumur Alev, S., Yetis Kara, B., & Karasan, O. E. (2009). A Tabu-Search based Heuristic for the Hub Covering Problem over Incomplete Hub Networks . *Computers & Operations Research* , 36(12), 3088-3096.
- Campbell, J. F. (1994). Integer Programming Formulations of Discrete Hub Location Problems. *European Journal of Operational Research*, 72(2), 387-405.
- Correia, I., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2014). Multi-Product Capacitated Single-Allocation Hub Location Problems: Formulations and Inequalities. *Networks and Spatial Economics*, 14(1), 1-25.
- Dukkanci, O., Peker, M., & Kara, B. Y. (2019). Green hub location problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 125, 116-139.
- Karimia, H., Bashiri, M., & Nickel, S. (2016). Capacitated Single Allocation P-Hub Covering Problem in Multi-modal Network Using Tabu Search. *International Journal of Engineering*, 29(6), 797-808.
- Lowe, T. J., & Sim, T. (2013). The hub covering flow problem. *The Journal of the Operational Research Society*, 64(7), 973-981.
- Mohammadi, M., Torabi, S. A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). Sustainable hub location under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 62, 89-115.
- Niknamfar, A. H., & Niaki, S. T. A. (2016). Fair profit contract for a carrier collaboration framework in a green hub network under soft time-windows: Dual lexicographic max–min approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 91, 129-151.

Parsa, M., Nookabadi, A. S., Flapper, S. D., & Atan, Z. (2019). Green hub-and-spoke network design for aviation industry. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1377-1396.

Sener, N. (2020). New Optimization Models for the Hub Covering Location Problem. Graduate School of Science and Engineering, Galatasaray University.

Sener, N., & Feyzioğlu, O. (2021). Capacitated Multiple Allocation Hub Covering Flow Problem. *MANAS Journal of Engineering*, 9, 72-84.

Smart Freight Centre. (2021). Global Logistics Emissions Council Framework for Logistics Emissions.

Tan, P. Z., & Yetis Kara, B. (2007). A Hub Covering Model for Cargo Delivery Systems. *Networks*, 49(1), 28-39.

The World Bank. (2021). Carbon Pricing Dashboard. Geliş tarihi gönderen https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data

Wagner, B. (2008). Model Formulations for Hub Covering Problems. *The Journal of the Operational Research Society*, 59(7), 932-938.

Yetis Kara, B. (2017). Turkish Hub Data Set.

Yetis Kara, B., & Tansel, B. (2003). The Single-Assignment Hub Covering Problem: Models and Linearizations. *The Journal of the Operational Research Society*, 54(1), 59-64.