Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

İmalat İşletmelerinde Talep Yanıtı Uygunluğunun CRITIC–MARCOS Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi

Ayça ZENGİNOĞLU [1,a]

[1]*Aksaray Üniversitesi, Teknoloji Transfer Ofisi Koordinatörlüğü, Aksaray, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0002-7216-5707*

Makale Bilgileri
Geliş : 30.07.2026
Kabul : 29.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.2006762

Sorumlu Yazar
Ayça ZENGİNOĞLU
ayca.zenginoglu@aksaray.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Talep yanıtı
Talep tarafı katılımı
İmalat işletmeleri
Çok kriterli karar verme
CRITIC-MARCOS

***Atıf şekli:** ZENGİNOĞLU, A., (2026). İmalat İşletmelerinde Talep Yanıtı Uygunluğunun CRITIC–MARCOS Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 761-778.*

ÖZ

Elektrik sistemlerinde esneklik ihtiyacının artması, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunun sistematik biçimde değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Yüksek elektrik tüketimi tek başına yeterli olmadığından, veri kalitesi, yük profili ve fiili yanıt performansı birlikte ele alınmalıdır. Bu çalışmada, açık erişimli gerçek bir endüstriyel elektrik tüketimi ve talep yanıtı veri seti kullanılarak CRITIC–MARCOS tabanlı çok kriterli bir karar destek yaklaşımı önerilmiştir. 10 imalat işletmesi, tüketim büyüklüğü, yük profili, veri güvenilirliği ve talep yanıtı performansını temsil eden 7 kriterle değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıkları CRITIC yöntemiyle belirlenmiş, uygunluk sıralaması MARCOS yöntemiyle elde edilmiştir. En yüksek ağırlık C5 eksik veri oranında (0,1656) hesaplanmıştır. Çelik-2, 0,9124 skoruyla en uygun; Dövme-2 ise 0,3385 skoruyla en düşük uygunluğa sahip alternatif olmuştur. CBL ve kapasite karşılama oranına ilişkin duyarlılık analizinde ana model ile tüm senaryolar arasındaki Spearman sıra korelasyonu 0,988 bulunmuştur. Bulgular, veri güvenilirliği ve fiili yanıt performansının uygunluk değerlendirmesinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Evaluation of Demand Response Suitability of Manufacturing Facilities Using the CRITIC–MARCOS Approach

Article Info
Received : 30.07.2026
Accepted : 29.09.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.2006762

Corresponding Author
Ayça ZENGİNOĞLU
ayca.zenginoglu@aksaray.edu.tr

Keywords
Demand response
Demand side participation
Manufacturing facilities
Multi-criteria decision making
CRITIC-MARCOS

***How to cite:** ZENGİNOĞLU, A., (2026). Evaluation of Demand Response Suitability of Manufacturing Facilities Using the CRITIC–MARCOS Approach. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 761-778.*

ABSTRACT

The growing need for flexibility in electric power systems necessitates a systematic evaluation of manufacturing facilities' eligibility to participate in demand response programs. Since high electricity consumption alone is not sufficient, data quality, load profile, and actual response performance must be considered together. This study proposes a CRITIC–MARCOS-based multi-criteria decision support approach using a real-world, open-access dataset of industrial electricity consumption and demand response data. 10 manufacturing facilities were evaluated using 7 criteria representing consumption magnitude, load profile, data reliability, and demand response performance. Criterion weights were determined using the CRITIC method, and the suitability ranking was obtained using the MARCOS method. The highest weight was calculated for C5, the missing data rate (0.1656). Steel-2 was the most suitable alternative with a score of 0.9124, while Forging-2 had the lowest suitability with a score of 0.3385. In the sensitivity analysis of CBL and the capacity fulfillment rate, the Spearman rank correlation between the base model and all scenarios was 0.988. The findings indicate that data reliability and actual response performance are decisive factors in the suitability assessment.

1. GİRİŞ

Elektrik sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının artan payı, elektrifikasyon eğilimleri ve tüketim tarafındaki değişkenlik, sistem esnekliği ihtiyacını daha belirgin hale getirmektedir [1,2]. Geleneksel elektrik sistemlerinde dengeleme ihtiyacı çoğunlukla arz tarafı kaynakları üzerinden karşılanırken, son yıllarda talep tarafının da aktif bir esneklik kaynağı olarak değerlendirilmesi önem kazanmıştır. Talep yanıtı, tüketicilerin elektrik tüketimlerini sistem koşullarına, fiyat sinyallerine veya program çağrılarına göre değiştirmesine dayanan bir uygulama alanıdır. Siano [1], talep yanıtının akıllı şebekelerde sistem güvenilirliğinin artırılması, tepe yükünün azaltılması, yatırım gereksinimlerinin ertelenmesi ve şebeke işletiminin desteklenmesi açısından önemli faydalar sunduğunu belirtmektedir. Gils [2] ise Avrupa ölçeğinde talep yanıtı potansiyelini inceleyerek talep tarafı esnekliğinin farklı tüketici grupları ve zaman dilimleri için ölçülebilir bir kaynak olduğunu ortaya koymuştur.

İmalat sanayi, yüksek elektrik tüketimi ve belirli süreçlerde yönetilebilir yük yapısı nedeniyle talep yanıtı programları açısından önemli bir uygulama alanı sunmaktadır [3]. Bununla birlikte, bir işletmenin yüksek tüketim düzeyine sahip olması tek başına talep yanıtı için uygun bir katılımcı olduğu anlamına gelmemektedir. Talep yanıtı uygunluğu; tüketim büyüklüğünün yanı sıra tüketim profilinin kararlılığı, ölçüm verilerinin güvenilirliği, çağrı anında gerçekleşen yük azaltımı ve taahhüt edilen kapasitenin karşılanma düzeyi gibi farklı göstergelerin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir [4,5]. Bu nedenle sanayi işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunun belirlenmesi, yalnızca tüketim düzeyine dayalı teknik bir analiz değil, çok kriterli bir karar problemi olarak ele alınmalıdır.

Son yıllarda endüstriyel elektrik tüketim verileri çoğunlukla tüketim tahmini, kısa dönem yük tahmini, anomali tespiti ve talep tarafı esnekliğinin modellenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Lee ve arkadaşları [6], talep yanıtı piyasasına katılan imalat işletmelerine ait elektrik tüketim verilerini ve talep yanıtı katılım bilgilerini içeren açık erişimli bir veri seti yayımlamıştır. Veri seti, işletmelerin elektrik tüketim değerlerinin yanı sıra üretim türleri, talep yanıtı katılım tarihleri, zorunlu azaltım kapasiteleri ve gerçekleşen yanıt kapasiteleri gibi bilgileri de içermektedir. Moon ve arkadaşları [7], endüstriyel tesislerde güç tüketiminin tahmin edilmesi ve enerji tüketimindeki anomalilerin tespit edilmesi amacıyla XGBoost ve LSTM-AE tabanlı bir çerçeve geliştirmiştir. Yang ve arkadaşları [8] ise kısa dönem endüstriyel enerji tüketimi tahmini için adaptif ayrıştırma ve paralel sinir ağı yapısını birleştiren AUDPNet yaklaşımını önermiştir. Bu çalışmalar, endüstriyel tüketim davranışının modellenmesi ve öngörülmesi açısından önemli katkılar sunmakla birlikte, ağırlıklı olarak tahminleme ve anomali tespiti ekseninde konumlanmaktadır.

Endüstriyel enerji yönetimi ve talep yanıtı alanında karar destek boyutunu ele alan çalışmalar son yıllarda artmıştır. Enerji yönetimi problemlerinde çok kriterli karar verme yöntemlerinin farklı teknik, ekonomik ve çevresel kriterleri birlikte değerlendirmeye imkân sağladığı belirtilmektedir [9]. Bu kapsamda Kshanh ve Tanaka [10], enerji verimliliği projelerinin değerlendirilmesinde çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımlarını karşılaştırmalı olarak incelemiş; Fatras ve arkadaşları [4] imalat süreçlerinin elektrik piyasası katılım seçenekleriyle eşleştirilmesine yönelik çok kriterli bir değerlendirme çerçevesi önermiştir. Rusche ve arkadaşları [5] endüstriyel talep tarafı yönetiminde enerji esnekliğini gelir ve risk boyutlarıyla değerlendiren bir esneklik skoru geliştirirken, Alcázar-Ortega ve arkadaşları [11] endüstriyel düzeyde talep yanıtı potansiyelinin uygulamalı olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir. Ayrıca dos Santos ve arkadaşları [12] endüstriyel senaryolarda talep yanıtı uygulamalarını sistematik olarak haritalamış, Ranaboldo ve arkadaşları [13] ise endüstriyel talep yanıtının mevcut durumunu, potansiyelini, motivasyonlarını ve uygulama güçlüklerini kapsamlı biçimde değerlendirmiştir. Bu çalışmalar, endüstriyel enerji yönetimi ve talep tarafı katılımında karar destek yaklaşımlarının işletme düzeyinde uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Benzer şekilde, ÇKKV yöntemleri farklı sektörlerde gerçek veya uygulama temelli karar problemlerinin yapılandırılması ve alternatiflerin önceliklendirilmesi amacıyla da yaygın biçimde kullanılmaktadır. Zenginoğlu ve Yüksel [14], İstanbul Havalimanı için yenilenebilir enerji teknolojilerini yaşam döngüsü değerlendirmesi ve ÇKKV yöntemlerini bütünleştiren vaka temelli bir çerçeveyle incelemiştir. Erik ve arkadaşları [15], imalat bağlamında meyve nektarı ürün karması problemini AHP ve matematiksel programlamayı bütünleştirerek ele almıştır. Hamidy ve arkadaşları [16] ise deprem hazırlığı kapsamında

acil toplanma alanlarının belirlenmesi ve önceliklendirilmesinde birden fazla ÇKKV yöntemini bütünleşik biçimde kullanmıştır. Eşiyok ve arkadaşları [17], Entropy ve Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) ağırlıklandırma yöntemleri ile Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS) yöntemini bütünleştirerek G7 ülkeleri ve Türkiye'nin çevresel performansını değerlendirmiş ve kriter ağırlıklarının sıralamalar üzerindeki etkisini duyarlılık analiziyle incelemiştir. Bu örnekler, ÇKKV yaklaşımlarının farklı uygulama alanlarında gerçek karar problemlerinin sistematik biçimde değerlendirilmesine olanak sağladığını göstermektedir.

Türkiye bağlamında ise talep tarafı katılımı, talep yanıtı ve enerji yönetimiyle ilişkili karar destek konuları; elektrik piyasası yapısı, talep birleştiriciler, yük kaydırma, akıllı şebeke uygulamaları, fiyatlandırma ve sürdürülebilirlik performansı gibi farklı boyutlarda ele alınmaktadır. Tör ve arkadaşları [18], talep birleştiricilerin rol aldığı elektrik piyasa mekanizmalarını inceleyerek uluslararası uygulamaları, koordinasyon ihtiyacını ve Türkiye'deki durumu değerlendirmiştir. Çakmak ve Altaş [19], Türkiye'deki müşterilerin akıllı şebekelerde yük kaydırmaya dayalı talep tarafı yönetimine yönelik tepkilerini ve tutumlarını incelemiştir. Sancar ve arkadaşları [20], akıllı ev düzeyinde talep yanıtı programı kapsamında enerji yönetimini dinamik fiyatlandırma ve kullanıcı konforu çerçevesinde ele almıştır. Yalçın ve Karakaş [21] ise enerji sektöründeki bir firmanın kurumsal sürdürülebilirlik performansını değerlendirmek amacıyla CRITIC ve EDAS yöntemlerini bütünleştiren bir yaklaşım önermiştir. Abdulvahitoğlu ve arkadaşları [22] ise Türkiye'de elektrikli araç şarj istasyonu yer seçimi problemini birden fazla ÇKKV yöntemiyle ele alarak alternatif sıralamalarını karşılaştırmalı biçimde değerlendirmiştir. Bu çalışmalar, konunun piyasa tasarımı, tüketici davranışı, akıllı şebeke, fiyatlandırma, enerji yönetimi ve ÇKKV temelli sürdürülebilirlik değerlendirmesi boyutlarıyla incelendiğini göstermektedir. Buna karşılık, imalat işletmesi düzeyinde gerçek tüketim ve talep yanıtı katılım verilerinden türetilen göstergelerle talep yanıtı uygunluğunun çok kriterli olarak önceliklendirilmesine yönelik çalışmalar sınırlıdır.

Mevcut literatür incelendiğinde, çalışmaların önemli bir bölümünün endüstriyel elektrik tüketiminin tahmin edilmesi, anomali tespiti, yük profili modellemesi ve talep yanıtı potansiyelinin genel düzeyde değerlendirilmesi gibi konulara odaklandığı görülmektedir [6-8,12,13]. Uluslararası çalışmalar daha çok tahminleme, teknik analiz, potansiyel değerlendirmesi ve piyasa katılımı uygunluğu ekseninde gelişirken, Türkiye bağlamındaki çalışmaların piyasa mekanizmaları, talep birleştiriciler, yük kaydırma, fiyatlandırma yaklaşımları ve düzenleyici çerçeve üzerinde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır [4,5,18-20]. Buna karşılık, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu gerçek tüketim ve talep yanıtı performans verilerinden türetilen ölçülebilir kriterlerle değerlendiren ve işletmeleri uygunluk düzeylerine göre çok kriterli olarak önceliklendiren çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Oysa talep yanıtı uygunluğu yalnızca tüketim hacmine göre değerlendirilemez; veri güvenilirliği, yük profilinin kararlılığı, Customer Baseline Load (CBL; müşteri referans yükü) temelinde hesaplanan gerçekleşen azaltım oranı ve kapasite karşılama performansı gibi unsurların birlikte ele alınması gerekir [4,5,23].

Bu çalışma, söz konusu boşluktan hareketle imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu değerlendirmek için CRITIC ve Measurement Alternatives and Ranking according to Compromise Solution (MARCOS) yöntemlerini bütünleştiren çok kriterli bir karar destek yaklaşımı önermektedir. Uygulamada, Lee ve arkadaşları [6] tarafından yayımlanan açık erişimli endüstriyel elektrik tüketimi ve talep yanıtı veri setinde yer alan 10 imalat işletmesi karar alternatifi olarak ele alınmıştır. Elektrik tüketim verilerinden ortalama tüketim, pik tüketim, değişkenlik katsayısı, yük faktörü ve eksik veri oranı; talep yanıtı katılım kayıtlarından ise CBL'ye göre azaltım oranı ve kapasite karşılama oranı türetilmiştir. Kriter ağırlıkları CRITIC yöntemiyle nesnel olarak hesaplanmış, işletmelerin uygunluk sıralaması MARCOS yöntemiyle elde edilmiştir. Ayrıca CBL hesaplama yaklaşımı ve kapasite karşılama oranının ele alınış biçimine göre duyarlılık analizleri yapılmıştır.

Çalışmanın temel katkısı, açık erişimli gerçek dünya verilerinden elde edilen ölçülebilir göstergeleri nesnel ağırlıklandırma ve çok kriterli sıralama yöntemleriyle bütünleştirerek talep yanıtı uygunluğunu işletme düzeyinde değerlendirmesidir. Böylece aynı veri seti, tahminleme problemi yerine karar destek ve önceliklendirme problemi kapsamında ele alınmaktadır. Bulgular Türkiye'deki sanayi işletmelerine doğrudan genellenemese de önerilen karar destek çerçevesi ülkemizde gelişmekte olan talep tarafı katılımı ve toplayıcılık uygulamaları için uyarlanabilir bir ön değerlendirme aracı sunmaktadır. Elektrik Piyasasında

Toplayıcılık Faaliyeti Yönetmeliği'nin yayımlanması ve TEİAŞ'ın talep tarafı katılımı, tedarik süreçlerine yönelik duyurularla sanayi tesislerinin esneklik potansiyelinin veri temelli yöntemlerle değerlendirilmesi ihtiyacını daha görünür hale getirmektedir.

Makalenin izleyen bölümlerinde sırasıyla kullanılan veri seti ve yöntemsel çerçeve tanıtılmakta, ardından CRITIC–MARCOS modelinden elde edilen bulgular ve duyarlılık analizi sonuçları sunulmaktadır. Son bölümde ise çalışmanın temel sonuçları, sınırlılıkları ve gelecek çalışmalara yönelik öneriler ele alınmaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Bu çalışmada, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu değerlendirmek amacıyla açık erişimli endüstriyel elektrik tüketimi veri seti kullanılmıştır. Lee ve arkadaşları [6] tarafından yayımlanan veri seti, talep yanıtı programına katılan 10 imalat işletmesine ait bir dakikalık elektrik tüketim ölçümlerini, işletme türlerini, talep yanıtı katılım tarihlerini, zorunlu azaltım kapasitelerini ve gerçekleşen yanıt kapasitelerini içermektedir. Özgün veri seti belirli bir ülke ve dönem bağlamında derlenmiş olmakla birlikte, bu çalışmada veri seti imalat işletmelerinin talep yanıtı katılım uygunluğunu çok kriterli bir karar problemi olarak değerlendirmek amacıyla ele alınmıştır.

Veri setinde yer alan elektrik tüketimi ölçümleri 1 dakikalık zaman çözünürlüğüne sahiptir ve 01.03.2019–30.09.2019 dönemini kapsamaktadır. Bu yönüyle veri seti, yalnızca toplam tüketim seviyelerini değil, tüketim profillerindeki dalgalanmaları, pik yük davranışını ve talep yanıtı olayları sırasındaki değişimleri incelemek için de uygun bir yapı sunmaktadır. Ayrıca veri setinde talep yanıtı olaylarına ilişkin zorunlu azaltım kapasitesi ve gerçekleşen yanıt kapasitesi bilgileri de yer almaktadır. Bu bilgiler, işletmelerin yalnızca enerji tüketim büyüklüğüne göre değil, aynı zamanda talep yanıtı çağrısı altındaki fiili performansına göre de değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Çalışmada karar alternatifleri olarak veri setinde yer alan 10 imalat işletmesi kullanılmıştır. Bu işletmeler farklı üretim alanlarını temsil etmekte olup, çimento, dövme, metal, kâğıt ve çelik sektörlerinden oluşmaktadır. Karar alternatifleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Karar alternatifleri

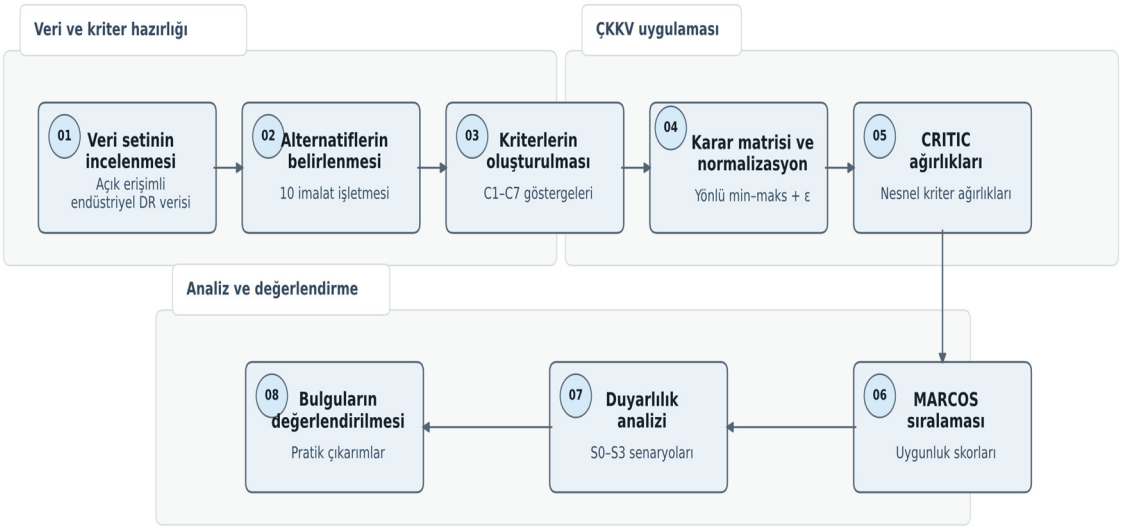
Alternatif kodu	İşletme
A1	Çimento-1
A2	Çimento-2
A3	Dövme-1
A4	Dövme-2
A5	Metal-1
A6	Metal-2
A7	Metal-3
A8	Kâğıt
A9	Çelik-1
A10	Çelik-2

Veri setinin bu çalışma açısından temel avantajı, endüstriyel elektrik tüketim verilerinin talep yanıtı katılım bilgilerinin yanı sıra birlikte sunulmasıdır. Yakın dönem çalışmalarda aynı veri setinin elektrik tüketimi tahmini, kısa dönem endüstriyel enerji tüketimi tahmini ve anomali tespiti gibi amaçlarla kullanıldığı görülmektedir. Örneğin Moon ve arkadaşları [7], veri setini LSTM-AE ve XGBoost tabanlı bir fabrika enerji yönetimi çerçevesinde tüketim tahmini ve anomali tespiti için kullanırken; Yang ve arkadaşları [8], kısa dönem endüstriyel enerji tüketimi tahmini amacıyla AUDPNet modelini geliştirmiştir. Bu çalışmada ise veri seti tahminleme problemi için değil, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu değerlendiren çok kriterli bir karar problemi için kullanılmıştır. Böylece tüketim büyüklüğü, tüketim profili, veri güvenilirliği ve talep yanıtı performansı birlikte ele alınmıştır.

Bu kapsamda her bir işletme için elektrik tüketim verilerinden ortalama tüketim, pik tüketim, değişkenlik katsayısı, yük faktörü ve eksik veri oranı hesaplanmıştır. Talep yanıtı bilgileri kullanılarak CBL değerine göre net talep azaltım oranı ve kapasite karşılama oranı belirlenmiştir. Lee ve arkadaşları [6], CBL'yi talep yanıtı piyasalarında kullanılan genel bir referans yük standardı olarak ele almakta ve ilgili veri setinde CBL değerini, talep yanıtı olayının gerçekleştiği zaman aralığı için geçmiş beş günün dördündeki ortalama tüketim üzerinden tanımlamaktadır. Böylece her bir işletme, talep yanıtı uygunluğunu temsil eden yedi kriter üzerinden değerlendirilmiştir. Kriterlerin belirlenmesi ve karar matrisinin oluşturulmasına ilişkin ayrıntılar bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

2.2. Metot

Bu çalışmada izlenen yöntemsel akış Şekil 1'de sunulmuştur. İlk aşamada açık erişimli endüstriyel elektrik tüketimi ve talep yanıtı veri seti incelenmiş, ardından karar alternatifleri ve değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Daha sonra karar matrisi oluşturularak kriterler yönlü min–maks normalizasyonu ve ε düzeltmesi ile karşılaştırılabilir hâle getirilmiştir. Kriter ağırlıkları CRITIC yöntemiyle hesaplanmış, imalat işletmelerinin talep yanıtı katılım uygunluk sıralaması MARCOS yöntemiyle elde edilmiştir. Son aşamada CBL hesaplama yaklaşımı ve C7 kapasite karşılama oranına ilişkin duyarlılık senaryoları uygulanmıştır.



Şekil 1. Çalışmanın yöntemsel akış şeması

2.2.1. Kriterlerin Belirlenmesi ve Karar Matrisinin Oluşturulması

Bu çalışmada karar problemi, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunun değerlendirilmesi olarak tanımlanmıştır. Karar alternatifleri veri setinde yer alan 10 imalat işletmesinden oluşmaktadır. Kriterler belirlenirken yalnızca elektrik tüketim büyüklüğü değil, işletmelerin tüketim profili, veri güvenilirliği ve talep yanıtı olayları sırasındaki fiili yanıt performansı da dikkate alınmıştır.

Veri setinde, elektrik tüketimi ölçümleriyle birlikte talep yanıtı katılım tarihleri, zorunlu azaltım kapasiteleri ve gerçekleşen yanıt kapasiteleri de sunulmaktadır. Bu yapı, işletmelerin yalnızca tüketim düzeyi bakımından değil, aynı zamanda talep yanıtı yükümlülüğüne karşı gösterdikleri performans bakımından da karşılaştırılmasına imkân vermektedir.

Başlangıçta ortalama tüketim, pik tüketim, değişkenlik katsayısı, pik/ortalama oranı, yük faktörü, eksik veri oranı, CBL değerine göre talep yanıtı azaltım oranı ve kapasite karşılama oranı olmak üzere 8 gösterge değerlendirilmiştir. Ancak ön inceleme aşamasında pik/ortalama oranı ile yük faktörü arasında yüksek düzeyde ters yönlü bir ilişki bulunduğu görülmüştür. Bu nedenle, bilgi tekrarını azaltmak amacıyla pik/ortalama oranı karar matrisinden çıkarılmış ve nihai model 7 kriter üzerinden oluşturulmuştur. Nihai karar kriterleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Karar kriterleri ve yönleri

Kriter kodu	Kriter	Açıklama	Yön
C1	Ortalama tüketim	İncelenen dönemde işletmenin ortalama elektrik tüketimi	Fayda
C2	Pik tüketim	İncelenen dönemde gözlenen en yüksek elektrik tüketimi	Fayda
C3	Değişkenlik katsayısı	Tüketim profilindeki göreli değişkenlik düzeyi	Maliyet
C4	Yük faktörü	Ortalama tüketimin pik tüketime oranı	Fayda
C5	Eksik veri oranı	Veri setindeki eksik gözlem oranı	Maliyet
C6	CBL'ye göre talep yanıtı azaltım oranı	Talep yanıtı olayı sırasında müşteri referans yüküne göre gerçekleşen net azaltım oranı	Fayda
C7	Kapasite karşılama oranı	Gerçekleşen yanıt kapasitesinin zorunlu azaltım kapasitesine oranı	Fayda

C1 ve C2 kriterleri, işletmenin talep yanıtı açısından sahip olduğu teknik ölçeği temsil etmektedir. Ortalama tüketim, işletmenin genel enerji kullanım düzeyini gösterirken; pik tüketim, kısa süreli yüksek yük davranışını yansıtmaktadır. Bu iki kriterin yüksek olması, işletmenin talep yanıtı programlarında daha büyük bir yük esnekliği potansiyeli sunabileceği anlamına gelmektedir [3,4].

C3 değişkenlik katsayısı, tüketim profilindeki göreli dalgalanmayı göstermektedir. Talep yanıtı uygulamalarında öngörülebilir ve yönetilebilir tüketim profilleri daha avantajlı olduğundan, yüksek değişkenlik olumsuz bir özellik olarak değerlendirilmiştir [4,5]. Bu nedenle C3 maliyet yönlü bir kriter olarak ele alınmıştır. C4 yük faktörü ise ortalama tüketimin pik tüketime oranını göstermekte ve tüketim profilinin dengesini temsil etmektedir. Yük faktörünün yüksek olması, daha kararlı bir tüketim yapısına işaret ettiği için fayda yönlü olarak kabul edilmiştir.

C5 eksik veri oranı, karar matrisine veri güvenilirliğini temsil eden bir kriter olarak dahil edilmiştir. Eksik veri oranının yüksek olması, işletmeye ilişkin tüketim profili ve talep yanıtı davranışının daha düşük güvenilirlikle değerlendirilmesine yol açabileceğinden, bu kriter maliyet yönlü olarak tanımlanmıştır.

Talep yanıtı performansının değerlendirilebilmesi için olay anında gerçekleşen tüketimin, talep yanıtı olayı gerçekleşmemiş olsaydı beklenen tüketim düzeyini temsil eden bir referans yük ile karşılaştırılması gerekmektedir. Bu referans değer literatürde Customer Baseline Load (CBL; müşteri referans yükü) olarak tanımlanmakta ve talep yanıtı etkisinin ölçülmesinde temel karşılaştırma değeri olarak kullanılmaktadır. CBL hesaplama yaklaşımının seçimi, yük azaltımı ve performans değerlendirmesi sonuçlarını etkileyebildiğinden, talep yanıtı değerlendirmelerinde önemli bir metodolojik karar noktasıdır [23]. Lee ve arkadaşları [6] tarafından sunulan veri setinde CBL, talep yanıtı olayının gerçekleştiği zaman dilimleri için geçmiş tüketim değerleri esas alınarak hesaplanmaktadır. Bu doğrultuda bu çalışmada C6 kriteri, CBL'ye göre talep yanıtı azaltım oranı olarak tanımlanmıştır. C6 kriteri, talep yanıtı olayı sırasında müşteri referans yükü ile gerçekleşen tüketim arasındaki farkın müşteri referans yüküne oranını ifade etmektedir. Pozitif değerler, talep yanıtı kapsamında yük azaltımı sağlandığını; negatif değerler ise olay sırasında tüketimin referans yükün üzerinde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu kriter, işletmenin yalnızca büyük tüketici olup olmadığını değil, talep yanıtı çağrısı altında fiilen yük azaltma davranışı gösterip göstermediğini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca CBL yaklaşımının sonuçlar üzerindeki etkisini incelemek için duyarlılık analizi yapılmıştır.

C7 kapasite karşılama oranı, gerçekleşen yanıt kapasitesinin zorunlu azaltım kapasitesine oranını ifade etmektedir. Bu kriter, işletmenin talep yanıtı programında üstlendiği azaltım yükümlülüğünü ne ölçüde karşıladığını göstermektedir. Ana modelde C7 değeri %100 ile sınırlandırılmıştır. Bu tercih, kapasite karşılama oranının temel olarak işletmenin zorunlu azaltım yükümlülüğünü yerine getirip getirmediğini temsil etmesine dayanmaktadır. %100 değeri, zorunlu azaltım kapasitesinin tamamen karşılandığını ifade ederken, %100'ün üzerindeki değerler işletmenin yükümlülüğünün üzerinde yanıt verdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, aşırı yüksek gerçekleşmelerin modele doğrusal biçimde aktarılması, C7 kriterinin diğer kriterler üzerindeki etkisini orantısız biçimde artırabilir. Bu nedenle ana modelde C7 değeri %100 ile sınırlandırılmış; zorunlu kapasitenin üzerindeki yanıtlar ek üstünlük olarak modele yansıtılmamıştır. Bu veri işleme kararının sıralama üzerindeki etkisi, ham C7 değerlerinin kullanıldığı duyarlılık senaryolarında ayrıca incelenmiştir.

Kriterlerin hesaplanmasında kullanılan temel ifadeler aşağıda verilmiştir. x_{it}, i. işletmenin t. zamandaki elektrik tüketimini; μ_i, ortalama tüketimi; σ_i, standart sapmayı; $x_{i,\max}$ pik tüketimi göstermektedir. Eşitlik (1) ortalama tüketimi, Eşitlik (2) pik tüketimi, Eşitlik (3) değişkenlik katsayısını, Eşitlik (4) yük faktörünü ve Eşitlik (5) eksik veri oranını ifade etmektedir. Bu göstergeler, her bir işletmenin tüketim ölçeğini, tüketim profilindeki değişkenliği ve veri güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

$$C1_i = \frac{1}{T_i}\sum_{t=1}^{T_i} x_{it} \tag{1}$$

$$C2_i = \max_t(x_{it}) \tag{2}$$

$$C3_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} \tag{3}$$

$$C4_i = \frac{\mu_i}{x_{i,\max}} \tag{4}$$

$$C5_i = \frac{\text{Eksik gözlem sayısı}_i}{\text{Toplam gözlem sayısı}_i} \times 100 \tag{5}$$

Talep yanıtı performansına ilişkin C6 kriteri, talep yanıtı olay zamanları dikkate alınarak Eşitlik (6)'daki şekilde hesaplanmıştır:

$$C6_i = \frac{\sum_{t\in E_i}(CBL_{it} - x_{it})}{\sum_{t\in E_i} CBL_{it}} \times 100 \tag{6}$$

Burada E_i, i. işletmeye ait talep yanıtı olay zamanlarını; CBL_{it}, ilgili zaman dilimindeki müşteri referans yükünü; x_{it}ise gerçekleşen tüketimi göstermektedir. Pozitif değerler, CBL'ye göre yük azaltımı gerçekleştiğini; negatif değerler ise talep yanıtı olayı sırasında tüketimin referans yükün üzerinde kaldığını göstermektedir.

C7 kapasite karşılama oranı ise Eşitlik (7)'deki gibi hesaplanmıştır:

$$C7_i = \frac{\sum_{e\in D_i} RC_{ie}}{\sum_{e\in D_i} MRC_{ie}} \times 100 \tag{7}$$

Burada RC_{ie}, i. işletmenin e. talep yanıtı olayındaki gerçekleşen yanıt kapasitesini; MRC_{ie}, zorunlu azaltım kapasitesini; D_i ise ilgili işletmeye ait talep yanıtı olaylarını göstermektedir. Ana modelde kullanılan değer Eşitlik (8)'deki şekilde sınırlandırılmıştır:

$$C7_i^* = \min(C7_i, 100) \tag{8}$$

Bu işlemin amacı, kapasite yükümlülüğünü karşılayan işletmeler arasında aşırı yüksek yanıt değerlerinden kaynaklanabilecek baskınlığı azaltmaktır. Bu kapsamda oluşturulan ham karar matrisi Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Ham karar matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
A1 (Çimento-1)	1094,593	2844,80	0,268	0,385	0,396	65,290	100,000
A2 (Çimento-2)	529,896	7481,60	0,188	0,071	0,222	52,146	100,000
A3 (Dövme-1)	56,903	188,16	0,838	0,302	0,488	94,127	74,000
A4 (Dövme-2)	54,252	119,04	0,652	0,456	0,043	-158,621	0,225
A5 (Metal-1)	123,824	259,20	0,591	0,478	0,002	73,959	100,000
A6 (Metal-2)	369,327	786,23	0,607	0,470	10,132	81,709	100,000
A7 (Metal-3)	111,304	293,76	0,722	0,379	0,193	70,755	100,000
A8 (Kâğıt)	479,977	856,80	0,184	0,560	0,001	28,067	50,040
A9 (Çelik-1)	47,116	131,04	0,762	0,360	1,512	49,913	98,125
A10 (Çelik-2)	7375,163	14966,25	0,367	0,493	0,000	53,274	100,000

Çizelge 3, işletmeler arasında belirgin bir heterojenlik olduğunu göstermektedir. Çelik-2, ortalama tüketim ve pik tüketim açısından en yüksek değerlere sahip olup büyük ölçekli bir talep yanıtı potansiyeline işaret etmektedir. Dövme-2 ise CBL'ye göre negatif talep yanıtı azaltım oranı ve oldukça düşük kapasite karşılama oranına sahiptir. Bu durum, söz konusu işletmenin talep yanıtı programına kayıtlı olmasına rağmen olay anında beklenen yük azaltımını sağlayamadığını göstermektedir. Metal-2, talep yanıtı azaltım oranı bakımından güçlü görünmekle birlikte, yüksek eksik veri oranı nedeniyle veri güvenilirliği açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken bir alternatiftir.

Oluşturulan karar matrisi, izleyen aşamada kriter ağırlıklarının CRITIC yöntemiyle belirlenmesi ve imalat işletmelerinin talep yanıtı katılım uygunluğunun MARCOS yöntemiyle sıralanması için kullanılmıştır.

2.2.2. Normalizasyon ve CRITIC Yöntemiyle Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Çok kriterli karar verme problemlerinde kriterlerin farklı ölçü birimlerine ve değer aralıklarına sahip olması, karar matrisinin karşılaştırılabilir hâle getirilmesini gerektirmektedir. Normalizasyon aşaması, karar sonuçlarını etkileyebilen temel adımlardan biridir. Aytekin [24], normalizasyon tekniklerinin veri yapısına bağlı olarak farklı avantajlar ve sınırlılıklar taşıdığını belirtmektedir. Bu çalışmada karar matrisinde negatif değer içeren C6 kriteri ve sıfır değer alabilen C5 kriteri bulunduğundan, tüm kriterler fayda/maliyet yönleri dikkate alınarak yönlü min–maks normalizasyonu uygulanarak pozitif performans skorlarına dönüştürülmüştür. MARCOS uygulamalarında normalizasyon seçiminin karar sonuçlarını etkileyebildiği Trung [25] tarafından da vurgulandığından, bu çalışmada karar matrisinin veri yapısına uygun bir normalizasyon yaklaşımı tercih edilmiştir.

Fayda yönlü kriterler için normalizasyon Eşitlik (9), maliyet yönlü kriterler için ise Eşitlik (10) ile yapılmıştır.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \tag{9}$$

$$r_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \tag{10}$$

Burada x_{ij}, i. alternatifin j. kritere ait ham değerini; r_{ij} ise normalize edilmiş performans değerini göstermektedir. Normalizasyon sonrasında sıfır değerlerin çarpımsal işlemler ve ideal/anti-ideal çözüm hesapları üzerinde sorun oluşturmaması için küçük bir ε düzeltmesi uygulanmıştır:

$$r'_{ij} = \varepsilon + (1 - \varepsilon) r_{ij} \tag{11}$$

Normalizasyon tekniklerinin veri yapısına bağlı sınırlılıkları bulunduğundan, özellikle sıfır ve negatif değerlerin yer aldığı karar matrislerinde hesaplama kararlılığı ayrıca dikkate alınmalıdır [24]. Bu çalışmada karar matrisinde negatif değer içeren C6 kriteri ve sıfır değer alabilen C5 kriteri bulunduğundan, yönlü min–maks normalizasyonu sonrasında tüm performans değerleri küçük bir pozitif düzeltme katsayısı ile pozitif aralığa taşınmıştır. Bu amaçla $\varepsilon = 0{,}001$ alınmış ve $r'_{ij} = \varepsilon + (1 - \varepsilon) r_{ij}$ dönüşümü uygulanmıştır. Böylece normalize karar matrisi MARCOS yöntemindeki ideal/anti-ideal çözüm hesapları için tutarlı bir performans matrisine dönüştürülmüştür.

Normalizasyon ve ε düzeltmesi sonucunda elde edilen pozitif performans matrisi, kriter ağırlıklarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Bu aşamada kriter ağırlıkları, karar verici yargısına ihtiyaç duymadan karar matrisinin içerdiği bilgi yapısından yararlanan CRITIC yöntemiyle belirlenmiştir. CRITIC yöntemi, Diakoulaki ve arkadaşları [26] tarafından önerilmiş olup, kriterlerin hem değişkenlik düzeyini hem de diğer kriterlerle olan korelasyon ilişkisini dikkate alan nesnel bir ağırlıklandırma yaklaşımıdır.

CRITIC yönteminde öncelikle her kriter için standart sapma değeri σ_j hesaplanır. Daha sonra kriterler arası korelasyon katsayıları kullanılarak her kriterin taşıdığı bilgi miktarı Eşitlik (12) ile belirlenir:

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^{n} (1 - \rho_{jk}) \tag{12}$$

Burada C_j, j. kriterin bilgi miktarını; σ_j, ilgili kriterin standart sapmasını; ρ_{jk}ise j. ve k. kriterler arasındaki korelasyon katsayısını ve n, toplam kriter sayısını göstermektedir. Son aşamada kriter ağırlıkları Eşitlik (13) ile hesaplanmıştır:

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^{n} C_k} \tag{13}$$

Eşitlik (12) ve Eşitlik (13) kullanılarak her bir kriter için CRITIC ağırlıkları hesaplanmış; elde edilen ağırlık değerleri Bulgular ve Tartışma bölümünde sunulmuştur.

2.2.3. MARCOS Yöntemiyle Ana Sıralamanın Elde Edilmesi

Bu çalışmada imalat işletmelerinin talep yanıtı katılım uygunluk sıralaması MARCOS yöntemi ile elde edilmiştir. MARCOS, alternatifleri ideal ve anti-ideal referans çözümlerle ilişkili olarak değerlendiren çok kriterli bir karar verme yöntemidir. Yöntem, alternatiflerin hem ideal çözüme yakınlığını hem de anti-ideal çözüme uzaklığını dikkate alarak nihai fayda değerlerini hesaplamaktadır. Stević ve arkadaşları [27] tarafından geliştirilen MARCOS yöntemi, farklı kriter ve alternatif sayısına sahip karar problemlerinde uygulanabilen referans temelli bir sıralama yaklaşımıdır.

Bu çalışmada MARCOS yöntemi, Eşitlik (9) – (11) ile elde edilen yönlü min–maks normalize edilmiş ve ε düzeltmesi uygulanmış pozitif performans matrisi üzerinden yürütülmüştür. Böylece negatif değer içeren C6 kriteri ve sıfır değer alabilen C5 kriterinin MARCOS hesaplama adımlarında oluşturabileceği sayısal uyumsuzluklar önlenmiştir. MARCOS uygulamalarında normalizasyon seçiminin karar sonuçlarını etkileyebildiği Trung [25] tarafından da vurgulandığından, bu çalışmada karar matrisinin veri yapısına uygun bir normalizasyon yaklaşımı tercih edilmiştir.

MARCOS uygulamasında öncelikle normalize performans matrisi için ideal ve anti-ideal referans değerler Eşitlik (14) ile belirlenmiştir:

$$A_j^+ = max_i r'_{ij} \ , \ A_j^- = min_i r'_{ij} \tag{14}$$

Burada A_j^+, j. kriter için ideal değeri; A_j^-, anti-ideal değeri; r'_{ij} ise ε düzeltmesi uygulanmış normalize performans değerini göstermektedir.

Daha sonra normalize performans matrisi CRITIC yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıklarıyla Eşitlik (15)'te gösterildiği gibi çarpılarak ağırlıklı karar matrisi oluşturulmuştur:

$$v_{ij} = w_j r'_{ij} \tag{15}$$

Her alternatif için toplam ağırlıklı performans değeri Eşitlik (16) ile hesaplanmıştır:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} v_{ij} \tag{16}$$

Aynı işlem ideal ve anti-ideal referans çözümler için de uygulanmıştır. Buna göre ideal çözümün toplam ağırlıklı performans değeri $S_{AI} = \sum_{j=1}^{n} w_j A_j^+$, anti-ideal çözümün toplam ağırlıklı performans değeri ise $S_{AAI} = \sum_{j=1}^{n} w_j A_j^-$olarak hesaplanmıştır. Burada S_{AI} ideal çözümün, S_{AAI} ise anti-ideal çözümün toplam ağırlıklı performans değerini ifade etmektedir. Bu değerler kullanılarak alternatiflerin anti-ideal ve ideal çözüme göre fayda dereceleri Eşitlik (17) ve Eşitlik (18) ile hesaplanmıştır:

$$K_i^- = \frac{S_i}{S_{AAI}} \tag{17}$$

$$K_i^+ = \frac{S_i}{S_{AI}} \tag{18}$$

Eşitlik (17) ve Eşitlik (18) ile elde edilen K_i^-ve K_i^+ değerleri, alternatiflerin anti-ideal ve ideal çözümlerle olan göreli ilişkisini göstermektedir. MARCOS yönteminde nihai fayda fonksiyonunun hesaplanabilmesi

için bu iki fayda derecesi, ideal ve anti-ideal çözüme göre yardımcı fayda fonksiyonlarına dönüştürülmektedir. Bu kapsamda $f(K_i^-)$ ve $f(K_i^+)$ değerleri Eşitlik (19) ve Eşitlik (20)'de gösterildiği şekilde hesaplanmıştır:

$$f(K_i^-) = \frac{K_i^+}{K_i^+ + K_i^-} \tag{19}$$

$$f(K_i^+) = \frac{K_i^-}{K_i^+ + K_i^-} \tag{20}$$

Bu yardımcı fayda fonksiyonları, alternatifin ideal çözüme yakınlığını ve anti-ideal çözümden uzaklığını birlikte dikkate alarak nihai MARCOS skorunun hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Son aşamada alternatiflerin nihai fayda fonksiyonu Eşitlik (21) ile hesaplanmıştır:

$$f(K_i) = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1-f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1-f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \tag{21}$$

MARCOS yönteminde $f(K_i)$ değeri yüksek olan alternatif daha iyi performansa sahip kabul edilmektedir. Bu çalışmada $f(K_i)$, ilgili işletmenin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu temsil eden nihai MARCOS skoru olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen ana sıralama sonuçları bulgular bölümünde sunulmuştur.

2.2.4. Duyarlılık Analizi

Çok kriterli karar verme problemlerinde duyarlılık analizi, elde edilen sıralama sonuçlarının model varsayımlarına ve girdi verilerindeki değişimlere karşı ne ölçüde kararlı olduğunu incelemek amacıyla kullanılmaktadır. Więckowski ve Sałabun [28], çok kriterli karar verme bağlamında duyarlılık analizinin karar sonuçlarının kırılganlığını ve kararlılığını değerlendirmede yaygın biçimde kullanıldığını belirtmektedir.

Bu çalışmada duyarlılık analizi, iki temel veri işleme varsayımı üzerinden yürütülmüştür. Bunlardan ilki, C6 kriterinin hesaplanmasında kullanılan CBL yaklaşımıdır. CBL, talep yanıtı olayı gerçekleşmeseydi müşterinin beklenen tüketim düzeyini temsil eden referans değer olduğundan, bu değerin hesaplanma biçimi talep yanıtı performansının değerlendirilmesinde belirleyici olabilmektedir. CBL'nin doğru tahmin edilmesi, talep yanıtı etkisinin güvenilir biçimde değerlendirilebilmesi açısından kritik görülmektedir; farklı CBL yöntemlerinin doğruluk, karmaşıklık ve uygulama maliyeti bakımından farklı sonuçlar doğurabildiği belirtilmektedir [23]. Lee ve arkadaşları [6] tarafından sunulan veri setinde, imalat işletmelerinin elektrik tüketim değerlerinin yanı sıra talep yanıtı katılım tarihleri, zorunlu azaltım kapasiteleri ve gerçekleşen yanıt kapasiteleri de yer almaktadır. Bu nedenle C6 kriterine ilişkin duyarlılık senaryosu, CBL hesaplama yaklaşımındaki değişimin sıralama sonuçları üzerindeki etkisini incelemek üzere kurgulanmıştır.

Ana modelde C6 kriteri, kaynak veri setinde esas alınan CBL yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Alternatif CBL senaryosunda ise talep yanıtı olayının gerçekleştiği zaman aralığı için geçmiş beş uygun günün aynı zaman dilimindeki tüketim değerleri dikkate alınmış ve bu değerler arasından en yüksek üç günün ortalaması alınmıştır. Bu yaklaşım, kaynak veri setinde esas alınan CBL tanımına göre farklı bir referans yük varsayımı oluşturmakta ve CBL hesaplama tercihinin MARCOS sıralaması üzerindeki etkisini değerlendirmeye imkân vermektedir. Böylece S1 ve S3 senaryolarında, CBL hesaplama varsayımındaki değişimin sıralama sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir.

İkinci duyarlılık unsuru, C7 kapasite karşılama oranının ele alınma biçimidir. Ana modelde C7 değeri, zorunlu azaltım kapasitesinin üzerinde gerçekleşen yanıtların karar matrisinde aşırı baskınlık oluşturmaması amacıyla %100 ile sınırlandırılmıştır. Ham C7 değerlerinde bazı alternatiflerin %100 sınırının üzerinde değerlere sahip olması nedeniyle, S2 ve S3 senaryoları bu aşırı değerlerin sıralama üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Böylece kapasite karşılama oranının sınırlandırılmış ve ham değerlerle ele alınmasının nihai MARCOS sıralaması üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır.

Duyarlılık analizinde CRITIC yöntemiyle ana modelde elde edilen kriter ağırlıkları sabit tutulmuş ve her senaryo için MARCOS sıralaması yeniden hesaplanmıştır. Böylece sıralama değişimlerinin ağırlıklandırma farklılığından değil, CBL hesaplama yaklaşımı ve C7 kapasite karşılama oranının işlenme biçiminden kaynaklanıp kaynaklanmadığı izlenmiştir. Analizde kullanılan senaryolar Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Duyarlılık analizi senaryoları

Senaryo	C6: Talep yanıtı azaltım oranı	C7: Kapasite karşılama oranı	Amaç
S0	Kaynak veri setindeki CBL yaklaşımı	%100'e sınırlandırılmış	Ana model
S1	Alternatif CBL yaklaşımı: geçmiş beş uygun gün içindeki en yüksek üç gün ortalaması	%100'e sınırlandırılmış	CBL seçiminin etkisini incelemek
S2	Kaynak veri setindeki CBL yaklaşımı	Ham C7 değeri	C7 sınırlandırma kararının etkisini incelemek
S3	Alternatif CBL yaklaşımı: geçmiş beş uygun gün içindeki en yüksek üç gün ortalaması	Ham C7 değeri	İki varsayım birlikte değiştiğinde sıralama kararlılığını incelemek

Senaryolar sonucunda elde edilen MARCOS sıralamaları, ana model sıralamasıyla karşılaştırılmıştır. Sıralama kararlılığını değerlendirmek için Spearman sıra korelasyon katsayısı kullanılmıştır. Spearman katsayısının yüksek olması, alternatif sıralamaların senaryolar arasında büyük ölçüde korunduğunu göstermektedir. Duyarlılık analizi sonuçları bulgular bölümünde sunulmuştur.

Buna ek olarak, MARCOS yöntemiyle elde edilen ana sıralamanın kullanılan ÇKKV yöntemine karşı kararlılığını değerlendirmek amacıyla yöntemler arası bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu kapsamda, ana modelde kullanılan normalize karar matrisi ve CRITIC kriter ağırlıkları sabit tutularak Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) [29] ve EDAS [30] yöntemleri uygulanmıştır. Böylece kriter ağırlıkları ve veri işleme varsayımları değiştirilmeden yalnızca sıralama yönteminin alternatiflerin göreli konumları üzerindeki etkisi incelenmiştir. MARCOS ile TOPSIS ve EDAS yöntemlerinden elde edilen sıralamalar arasındaki uyum, Spearman sıra korelasyon katsayısı kullanılarak değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. CRITIC Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Değerlendirilmesi

CRITIC yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları ile ağırlıklandırma sürecine ilişkin standart sapma (σ_j) ve kriter bilgi miktarı (C_j) Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. CRITIC yöntemi ara hesaplama değerleri ve kriter ağırlıkları

Kriter	Açıklama	σ_j	C_j	w_j
C1	Ortalama tüketim	0,3075	1,2540	0,1103
C2	Pik tüketim	0,3263	1,3422	0,1180
C3	Değişkenlik katsayısı	0,3743	1,8515	0,1628
C4	Yük faktörü	0,2793	1,8407	0,1619
C5	Eksik veri oranı	0,3093	1,8829	0,1656
C6	CBL'ye göre talep yanıtı azaltım oranı	0,2869	1,5240	0,1340
C7	Kapasite karşılama oranı	0,3334	1,6774	0,1475

Çizelge 5 incelendiğinde, en yüksek ağırlığın *C5 eksik veri oranı* kriterinde elde edildiği görülmektedir. Bu kriterler sırasıyla *C3 değişkenlik katsayısı*, *C4 yük faktörü* ve *C7 kapasite karşılama oranıdır.* Kriter ağırlıklarının büyükten küçüğe sıralaması aşağıdaki gibidir:

$$C5 > C3 > C4 > C7 > C6 > C2 > C1$$

Bu ağırlık dağılımı, talep yanıtı katılım uygunluğunun yalnızca tüketim büyüklüğü üzerinden açıklanamayacağını ortaya koymaktadır. C5 eksik veri oranının en yüksek ağırlığa sahip olması, veri

güvenilirliğinin karar modelinde belirleyici bir unsur olduğunu göstermektedir. Eksik veri oranı yüksek olan alternatiflerde tüketim profili ve talep yanıtı davranışı daha sınırlı güvenilirlikle değerlendirilebildiğinden, bu kriterin yüksek bilgi katkısı üretmesi beklenen bir sonuçtur.

C3 değişkenlik katsayısının ve C4 yük faktörünün yüksek ağırlık alması, tüketim profilinin yapısal özelliklerinin de karar sürecinde önemli olduğunu göstermektedir. Talep yanıtı programları açısından yüksek tüketim düzeyi tek başına yeterli değildir; tüketimin öngörülebilir, izlenebilir ve yönetilebilir bir profile sahip olması da önem taşımaktadır. Bu nedenle tüketim profilinin kararlılığını ve dalgalanma düzeyini temsil eden kriterlerin yüksek ağırlık alması, karar probleminin yapısıyla uyumludur.

C1 ortalama tüketim ve C2 pik tüketim kriterleri diğer kriterlere göre daha düşük ağırlık almıştır. Bu durum, iki kriterin tüketim ölçeğine ilişkin kısmen benzer bilgi taşımasıyla açıklanabilir. CRITIC yöntemi kriterler arası korelasyon yapısını dikkate aldığından, benzer bilgi içeren kriterlerin ağırlıklarının görece sınırlanması beklenmektedir. Elde edilen ağırlık yapısı, bu açıdan modelin yalnızca büyük tüketicileri öne çıkaran tek boyutlu bir değerlendirme üretmediğini; veri güvenilirliği, tüketim profili ve fiili talep yanıtı performansını birlikte dikkate aldığını göstermektedir.

3.2. MARCOS Yöntemi ile Ana Sıralama Sonuçları

CRITIC yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak Eşitlik (14) – (21)'de tanımlanan MARCOS hesaplama adımları uygulanmıştır. Bu kapsamda öncelikle normalize performans matrisi üzerinden ideal ve anti-ideal referans değerler belirlenmiş, ardından kriter ağırlıklarıyla çarpılarak ağırlıklı karar matrisi oluşturulmuştur. Her alternatif için toplam ağırlıklı performans değeri (S_i) hesaplanmış; bu değerler ideal ve anti-ideal çözümlerin toplam performans değerleriyle karşılaştırılarak K_i^+ ve K_i^- fayda dereceleri elde edilmiştir. Son aşamada yardımcı fayda fonksiyonları kullanılarak nihai MARCOS fayda skoru $f(K_i)$ hesaplanmıştır. Bu işlem adımları sonucunda elde edilen ana sıralama sonuçları Çizelge 6'da sunulmuştur. MARCOS nihai fayda skoru yüksek olan alternatif, talep yanıtı programlarına katılım uygunluğu bakımından daha iyi alternatif olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 6. MARCOS ana sıralama sonuçları

Sıra	Alternatif	MARCOS skoru
1	Çelik-2	0,9124
2	Çimento-1	0,7101
3	Kâğıt	0,6754
4	Çimento-2	0,6501
5	Metal-1	0,6343
6	Metal-3	0,5647
7	Çelik-1	0,5109
8	Dövme-1	0,4785
9	Metal-2	0,4742
10	Dövme-2	0,3385

Çizelge 6'ya göre Çelik-2, en yüksek MARCOS skoruna sahip alternatif olarak belirlenmiştir. Çelik-2'nin ilk sırada yer alması; yüksek ortalama tüketim, yüksek pik tüketimi, düşük eksik veri oranı ve kapasite karşılama oranında ana modelde tam performans göstermesiyle ilişkilidir. Bu sonuç, tüketim ölçeği yüksek ve veri güvenilirliği güçlü işletmelerin talep yanıtı programları açısından öncelikli adaylar arasında değerlendirilebileceğini göstermektedir.

İkinci sırada Çimento-1, üçüncü sırada ise Kâğıt yer almıştır. Çimento-1, tüketim büyüklüğü ve talep yanıtı performansı açısından dengeli bir profil sunarken; Kâğıt, yük faktörü ve eksik veri oranı bakımından güçlü bir alternatif görünümündedir. Bu sıralama, talep yanıtı uygunluğunda tüketim büyüklüğünün yanı sıra tüketim profilinin kararlılığının ve veri kalitesinin de etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Çimento-2 dördüncü sırada yer almıştır. Bu alternatifin pik tüketim değeri yüksek olmasına karşın yük faktörünün düşük olması, dengeli tüketim profili açısından daha sınırlı bir performansa işaret etmektedir. Buna rağmen kapasite karşılama oranı ve eksik veri oranı bakımından olumlu değerlere sahip olması, Çimento-2'nin üst grupta konumlanmasını sağlamıştır.

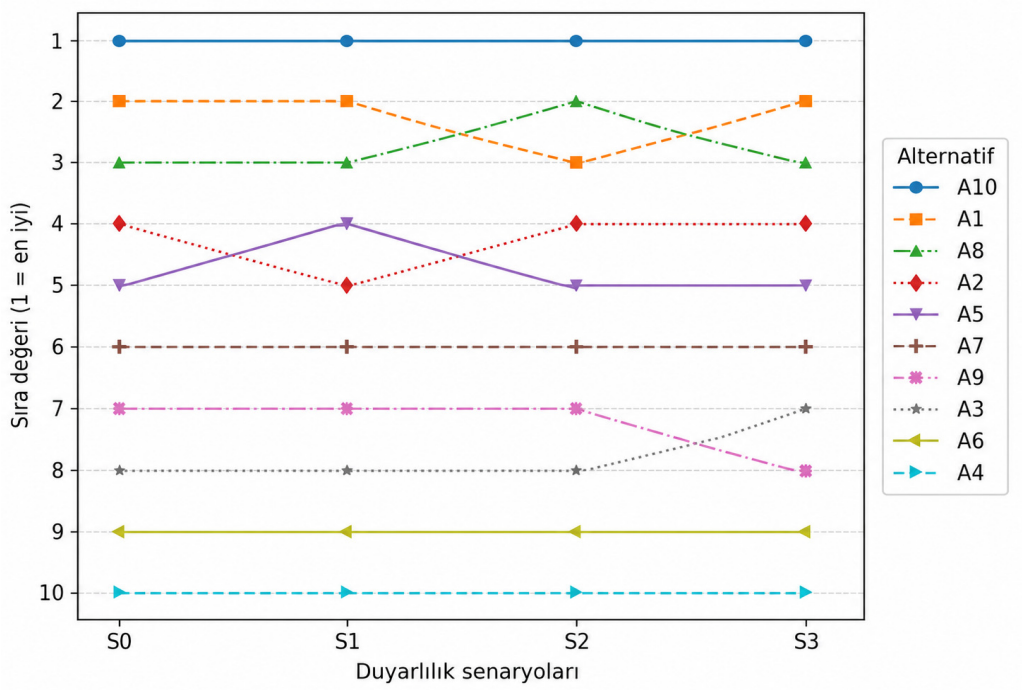
Metal-1 ve Metal-3 orta grupta yer alırken, Çelik-1, Dövme-1 ve Metal-2 alt grupta yer almaktadır. Metal-2'nin CBL'ye göre talep yanıtı azaltım oranı bakımından güçlü görünmesine rağmen dokuzuncu sırada yer alması dikkat çekicidir. Bu durum, büyük ölçüde Metal-2'nin yüksek eksik veri oranıyla ilişkilidir. Dolayısıyla model, yalnızca talep azaltım performansını değil, bu performansın güvenilir bir veri yapısı üzerinden değerlendirilebilir olup olmadığını da dikkate almaktadır.

En düşük MARCOS skoru Dövme-2 alternatifi için hesaplanmıştır. Dövme-2'nin CBL'ye göre talep yanıtı azaltım oranı negatif, kapasite karşılama oranı ise oldukça düşüktür. Bu bulgu, ilgili işletmenin talep yanıtı programına kayıtlı olmasına rağmen olay anında beklenen yük azaltımını sağlayamadığını göstermektedir. Bu nedenle Dövme-2 örneği, uygunluk değerlendirmesinde yalnızca kayıtlı kapasite veya tüketim büyüklüğünün yeterli olmadığını; fiili yanıt performansının ayrıca ölçülmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Genel olarak MARCOS sonuçları, talep yanıtı katılım uygunluğunun çok boyutlu bir karar problemi olduğunu göstermektedir. Yüksek tüketim ölçeği önemli bir avantaj sağlamakla birlikte, veri güvenilirliği, yük profili ve gerçek talep yanıtı performansı sıralama üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

3.3. Duyarlılık Analizi Sonuçları

Ana model sıralamasının CBL hesaplama yaklaşımı ve C7 kapasite karşılama oranının ele alınma biçimine karşı kararlılığını değerlendirmek amacıyla dört senaryo analiz edilmiştir. Alternatiflerin senaryolar arasındaki sıra değişimleri Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Duyarlılık analizi senaryolarına göre alternatif sıralamalarındaki değişim

Şekil 2 incelendiğinde, ana model ile duyarlılık senaryoları arasındaki sıra değişimlerinin sınırlı kaldığı görülmektedir. Çelik-2 tüm senaryolarda birinci sıradaki konumunu korurken, Dövme-2 tüm senaryolarda son sırada yer almıştır. Bu sonuç, önerilen karar destek yapısının en uygun ve en zayıf alternatifleri belirlemede veri işleme varsayımlarına karşı kararlı sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

Alternatif CBL yaklaşımının kullanıldığı S1 senaryosunda genel sıralama büyük ölçüde korunmuş, yalnızca orta grupta yer alan Çimento-2 ve Metal-1 alternatifleri arasında sınırlı bir sıra değişimi gözlenmiştir. Bu durum, C6 talep yanıtı azaltım oranının hesaplanmasında kullanılan CBL yaklaşımındaki değişimin bazı yakın performanslı alternatiflerin göreli konumunu etkileyebildiğini, ancak genel sıralama yapısını belirgin biçimde değiştirmediğini göstermektedir.

C7 kapasite karşılama oranının ham değerlerle kullanıldığı S2 senaryosunda da sınırlı bir sıra değişimi gerçekleşmiştir. Bu senaryoda Kâğıt ikinci sıraya yükselirken, Çimento-1 üçüncü sıraya gerilemiştir. Bu değişim, kapasite karşılama oranındaki yüksek değerlerin normalize performans yapısı üzerinde belirli ölçüde etkili olabildiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, Çelik-2'nin birinci, Dövme-2'nin ise son sıradaki konumu değişmemiştir.

Alternatif CBL yaklaşımı ile ham C7 değerlerinin birlikte kullanıldığı S3 senaryosunda ise ana sıralama yine büyük ölçüde korunmuştur. Bu senaryoda yalnızca alt grupta yer alan Dövme-1 ve Çelik-1 arasında sınırlı bir sıra değişimi gerçekleşmiştir. Buna rağmen üst ve alt uçtaki alternatiflerin konumları değişmemiş; Çelik-2 en uygun, Dövme-2 ise en düşük uygunluğa sahip alternatif olarak kalmıştır.

Senaryo sıralamaları ile ana model sıralaması arasındaki Spearman sıra korelasyon katsayıları Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. Ana model ile duyarlılık senaryoları arasındaki sıra korelasyonları

Karşılaştırma	Spearman sıra korelasyonu
S0 – S1	0,988
S0 – S2	0,988
S0 – S3	0,988

Çizelge 7'ye göre, ana model ile tüm duyarlılık senaryoları arasında yüksek düzeyde sıra uyumu elde edilmiştir. S0–S1 karşılaştırmasında Spearman sıra korelasyon katsayısının 0,988 olması, alternatif CBL yaklaşımının genel sıralama yapısını büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir. S0–S2 ve S0–S3 karşılaştırmalarında da aynı korelasyon değerinin elde edilmesi, C7 kapasite karşılama oranının ham veya sınırlandırılmış biçimde kullanılmasının ve CBL varsayımındaki değişimin ana sıralama üzerinde sınırlı etki yarattığını ortaya koymaktadır.

Genel olarak duyarlılık analizi sonuçları, önerilen CRITIC–MARCOS modelinin CBL ve C7'ye ilişkin veri işleme varsayımlarına karşı kararlı olduğunu göstermektedir. Sıra değişimleri yalnızca birbirine yakın performans gösteren bazı alternatifler arasında gerçekleşmiş; Çelik-2 ve Dövme-2'nin konumları tüm senaryolarda korunmuştur. Bu bulgu, önerilen karar destek yapısının talep yanıtı uygunluk değerlendirmesinde tek bir veri işleme varsayımına bağlı kalmadan tutarlı sonuçlar üretebildiğini göstermektedir.

3.3.1. Yöntemler Arası Karşılaştırma

MARCOS yöntemiyle elde edilen sıralamanın yöntemsel kararlılığını değerlendirmek amacıyla, aynı normalize karar matrisi ve CRITIC kriter ağırlıkları kullanılarak TOPSIS ve EDAS yöntemleriyle karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Böylece sıralama farklılıklarının kriter ağırlıklarından veya veri işleme tercihlerinden değil, yalnızca kullanılan sıralama yönteminden kaynaklanması sağlanmıştır. Karşılaştırma sonuçları Çizelge 8'de verilmiştir

Çizelge 8. MARCOS, TOPSIS ve EDAS yöntemlerine göre alternatif sıralamalarının karşılaştırılması

Alternatif	MARCOS	TOPSIS	EDAS
Çelik-2	1	1	1
Çimento-1	2	2	2
Kâğıt	3	3	4
Çimento-2	4	5	3
Metal-1	5	4	5
Metal-3	6	6	6
Çelik-1	7	7	8
Dövme-1	8	8	9
Metal-2	9	9	7
Dövme-2	10	10	10

Çizelge 8 incelendiğinde, Çelik-2'nin her üç yöntemde de birinci, Çimento-1'in ikinci ve Dövme-2'nin son sırada yer aldığı görülmektedir. Yöntemler arasındaki sıra farklılıkları yalnızca orta grupta ve birbirine yakın performans sergileyen alternatifler arasında gözlenmiştir. MARCOS sıralamasının TOPSIS ile

Spearman sıra korelasyonu 0,988, EDAS ile ise 0,952 olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek uyum, ana sıralamanın kullanılan ÇKKV yöntemine karşı yüksek düzeyde kararlılık gösterdiğine işaret etmektedir.

3.4. Bulguların Tartışılması ve Pratik Çıkarımlar

Bu çalışmanın bulguları, aynı veri setini kullanan yakın dönem çalışmalardan farklı bir araştırma amacına yönelmektedir. Lee ve arkadaşları [6] tarafından sunulan veri seti, talep yanıtı programına katılan imalat işletmelerine ait elektrik tüketim verilerini ve talep yanıtı katılım bilgilerini birlikte içermektedir. Literatürde bu veri yapısının daha çok tüketim tahmini ve anomali tespiti gibi modelleme amaçlarıyla kullanıldığı görülmektedir. Örneğin Moon ve arkadaşları [7], endüstriyel tesislerde güç tüketiminin tahmin edilmesi ve anomali tespiti için XGBoost ve LSTM-AE tabanlı bir çerçeve geliştirmiştir. Yang ve arkadaşları [8] ise kısa dönem endüstriyel enerji tüketimi tahmini için paralel sinir ağı ve adaptif ayrıştırma temelli AUDPNet yaklaşımını önermiştir. Bu çalışmada ise aynı veri yapısı, tahminleme doğruluğunu artırmak amacıyla değil, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu değerlendirmek ve önceliklendirmek amacıyla kullanılmıştır. Bu yönüyle çalışma, veri setinin kullanım alanını tahminleme probleminden karar destek problemine taşımaktadır.

Genel talep yanıtı literatürü açısından değerlendirildiğinde, sanayi işletmelerinin talep yanıtı potansiyelinin belirlenmesi ve uygun katılımcıların seçilmesi çok boyutlu bir karar destek problemi olarak öne çıkmaktadır. Rodríguez-García ve arkadaşları [3], endüstriyel müşteriler için talep yanıtı uygulamalarına yönelik bir maliyet-fayda değerlendirme aracı geliştirerek sanayi tesislerinin talep yanıtı stratejilerine katılımının sistematik biçimde analiz edilebileceğini ortaya koymuştur. Heitkoetter ve arkadaşları [31] ise bölgeselleştirilmiş talep yanıtı potansiyelini açık kaynak veri ve araçlarla değerlendirerek talep tarafı esnekliğinin teknik ve mekânsal göstergeler üzerinden incelenebileceğini göstermiştir. Bu çalışma, söz konusu karar destek çizgisine tüketim büyüklüğü, yük profili, eksik veri oranı, CBL'ye göre gerçekleşen azaltım oranı ve kapasite karşılama oranı gibi doğrudan veri setinden türetilen göstergelerle katkı sağlamaktadır. CRITIC yöntemiyle ağırlıkların nesnel olarak belirlenmesi ve MARCOS yöntemiyle uygunluk sıralamasının elde edilmesi, talep yanıtı değerlendirmesinin yalnızca tüketim düzeyine değil, ölçüm güvenilirliği, yük profili ve fiili yanıt performansına da dayandırılmasına olanak sağlamıştır.

CRITIC sonuçlarında C5 eksik veri oranının en yüksek ağırlığa sahip olması, veri sürekliliğinin talep yanıtı uygunluk değerlendirmesinde yalnızca teknik bir veri kalitesi konusu olmadığını, karar sonuçlarını doğrudan etkileyen bir unsur olduğunu göstermektedir. Talep yanıtı performansının güvenilir biçimde değerlendirilebilmesi için tüketim profillerinin ve olay anındaki yük değişimlerinin yeterli veri bütünlüğüyle izlenebilmesi gerekmektedir. Bu nedenle yüksek eksik veri oranına sahip işletmeler, güçlü talep azaltım performansı gösterseler dahi nihai uygunluk değerlendirmesinde dezavantajlı bir konuma gelebilmektedir. Nitekim Metal-2'nin C6 kriterinde görece güçlü bir performans sergilemesine rağmen yüksek eksik veri oranı nedeniyle alt sıralarda yer alması, veri güvenilirliğinin nihai uygunluk değerlendirmesi üzerindeki etkisini somutlaştırmaktadır. Bu bulgu, özellikle CBL temelli talep yanıtı performansının değerlendirilmesinde referans yükün ve ölçüm verilerinin güvenilirliğinin önemine ilişkin literatürle uyumludur [23]. Ayrıca bu sonuç, talep yanıtı uygunluğunun yalnızca tüketim büyüklüğüyle değil, teknik ve performans temelli göstergelerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulayan çalışmalarla da uyumludur [4,5].

Türkiye bağlamında değerlendirildiğinde, bu çalışmadan elde edilen sıralama sonuçları doğrudan Türkiye sanayi işletmelerine genellenmemelidir; çünkü analiz, Lee ve arkadaşları [6] tarafından yayımlanan açık erişimli veri setinde yer alan 10 imalat işletmesine ait tüketim ve talep yanıtı katılım verilerine dayanmaktadır. Bununla birlikte, önerilen karar destek çerçevesi Türkiye'de gelişmekte olan talep tarafı katılımı ve toplayıcılık uygulamaları açısından uyarlanabilir bir ön değerlendirme yaklaşımı sunmaktadır. Elektrik Piyasasında Toplayıcılık Faaliyeti Yönetmeliği'nin 17 Aralık 2024 tarihli ve 32755 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanmasıyla, toplayıcıların elektrik piyasasında yürütebileceği faaliyetler ve toplayıcılık faaliyeti kapsamında yürütülecek işlemlere ilişkin usul ve esaslar düzenlenmiştir [32]. Ayrıca TEİAŞ tarafından 2025 yılı talep tarafı katılımı hizmeti tedarik süreçlerine ilişkin duyuruların yayımlanması, bu alandaki uygulama zeminini daha somut hâle getirmiştir [33]. Bu gelişmeler dikkate alındığında, sanayi tesislerinin talep yanıtı programlarına katılım potansiyelinin yalnızca kurulu güç veya tüketim büyüklüğüyle değil, veri kalitesi, yük profili ve gerçekleşen yanıt performansıyla birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir [4,5]. Bu nedenle önerilen CRITIC–MARCOS yaklaşımı, Türkiye'de toplayıcı portföylerin

oluşturulması ve sanayi tesislerinin talep tarafı katılımına hazırlık düzeylerinin ön değerlendirilmesi için kullanılabilecek esnek bir karar destek çerçevesi olarak değerlendirilebilir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, imalat işletmelerinin talep yanıtı programlarına katılım uygunluğunu değerlendirmek amacıyla açık erişimli endüstriyel elektrik tüketim ve talep yanıtı katılım verilerine dayalı bir karar destek yaklaşımı önerilmiştir. Lee ve arkadaşları [6] tarafından yayımlanan veri setindeki talep yanıtı programına katılan 10 imalat işletmesi karar alternatifi olarak ele alınmış; alternatifler tüketim büyüklüğü, yük profili, veri güvenilirliği ve fiili talep yanıtı performansını temsil eden yedi kriter üzerinden değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıkları CRITIC yöntemiyle nesnel olarak belirlenmiş, işletmelerin talep yanıtı katılım uygunluk sıralaması ise MARCOS yöntemiyle elde edilmiştir.

CRITIC sonuçlarına göre en yüksek ağırlık C5 eksik veri oranı kriterinde elde edilmiştir. Bu kriteri C3 değişkenlik katsayısı ve C4 yük faktörü izlemiştir. Bu ağırlık yapısı, talep yanıtı uygunluğunun yalnızca tüketim büyüklüğüyle açıklanamayacağını; veri güvenilirliği ve tüketim profilinin kararlılığının da karar sürecinde belirleyici olduğunu göstermektedir. MARCOS ana sıralamasında Çelik-2 en uygun alternatif olarak belirlenmiştir. Çelik-2'nin ilk sırada yer alması, yüksek tüketim ölçeği, düşük eksik veri oranı ve kapasite karşılama performansı ile ilişkilidir. Buna karşılık, Dövme-2 son sırada yer almıştır. Dövme-2'nin CBL'ye göre negatif talep azaltım oranına ve oldukça düşük kapasite karşılama oranına sahip olması, talep yanıtı programına kayıtlı olmanın tek başına yeterli olmadığını; fiili yanıt performansının ayrıca değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Duyarlılık analizi, elde edilen sıralama sonuçlarının CBL hesaplama yaklaşımı ve kapasite karşılama oranının ele alınma biçimi karşısında genel olarak kararlı olduğunu göstermiştir. Alternatif CBL yaklaşımı kullanıldığında genel sıralama büyük ölçüde korunmuş ve yalnızca yakın performanslı alternatifler arasında sınırlı bir sıra değişimi gözlenmiştir. Kapasite karşılama oranının ham değerlerle kullanıldığı senaryolarda ise yalnızca sınırlı sıra değişimleri gözlenmiştir. Tüm senaryolarda Çelik-2 en uygun, Dövme-2 ise en zayıf alternatif olarak kalmıştır. Bu sonuç, önerilen karar destek yapısının özellikle en güçlü ve en zayıf alternatifleri belirlemede tutarlı sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

Yöntemsel kararlılığı değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizde, aynı normalize karar matrisi ve CRITIC ağırlıkları kullanılarak TOPSIS ve EDAS yöntemleri uygulanmıştır. Çelik-2 her üç yöntemde de birinci, Çimento-1 ikinci ve Dövme-2 ise son sırada yer almıştır. MARCOS sıralamasının TOPSIS ile Spearman sıra korelasyonu 0,988, EDAS ile ise 0,952 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, MARCOS ile elde edilen ana sıralamanın farklı ÇKKV yöntemleri altında da büyük ölçüde korunduğunu göstermektedir.

Çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Öncelikle analizler, Lee ve arkadaşları [6] tarafından yayımlanan veri setinde yer alan 10 imalat işletmesi ve belirli bir gözlem dönemiyle sınırlıdır. Bu nedenle, elde edilen kriter ağırlıkları ve alternatif sıralamaları farklı ülkeler, piyasa yapıları, sektörler veya dönemler için doğrudan genellenebilir sonuçlar olarak değerlendirilmemelidir. Buna karşılık, önerilen CRITIC–MARCOS tabanlı karar destek çerçevesi; yerel elektrik piyasası yapısı, talep yanıtı kuralları, CBL hesaplama yaklaşımı, sektörün operasyonel özellikleri ve mevcut veri yapısı dikkate alınarak kriterlerin yeniden hesaplanması ve gerekli uyarlamaların yapılması koşuluyla farklı coğrafya ve sanayi bağlamlarında uygulanabilir. İkinci olarak, modelde kullanılan kriterler veri setinden türetilen nicel göstergelerle sınırlandırılmıştır; elektrik fiyatları, üretim planları, süreç esnekliği, operasyonel kısıtlar ve talep yanıtı maliyetleri modele dahil edilmemiştir.

Gelecek çalışmalarda önerilen karar destek yapısı farklı sektörlerden ve ülkelerden elde edilecek endüstriyel tüketim verileriyle test edilebilir. Ayrıca mevcut CRITIC–MARCOS çerçevesi hiyerarşik bir ÇKKV yapısına genişletilebilir. Bu kapsamda değerlendirme kriterleri; teknik uygunluk, veri güvenilirliği, ekonomik uygunluk ve operasyonel esneklik gibi ana boyutlar altında gruplandırılabilir. Elektrik fiyatları, talep yanıtı teşvikleri ve katılım maliyetleri ekonomik uygunluk boyutunda; üretim çizelgeleri, süreç kesintiye uğrama riski, esnek yük türleri ve yük kaydırma kapasitesi ise operasyonel esneklik boyutunda modele dahil edilebilir. Böylece işletmelerin talep yanıtı uygunluğu yalnızca tüketim ve gerçekleşen yanıt performansı açısından değil, ekonomik motivasyonları ve üretim süreçlerinin esnekliği de dikkate alınarak daha kapsamlı biçimde değerlendirilebilir.

5. KAYNAKLAR

1. Siano, P. (2014). Demand response and smart grids-A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30*, 461-478.
2. Gils, H.C. (2014). Assessment of the theoretical demand response potential in Europe. *Energy, 67*, 1-18.
3. Rodríguez-García, J., Álvarez-Bel, C., Carbonell-Carretero, J.F., Alcázar-Ortega, M. & Peñalvo-López, E. (2016). A novel tool for the evaluation and assessment of demand response activities in the industrial sector. *Energy, 113*, 1136-1146.
4. Fatras, N., Ma, Z. & Jørgensen, B.N. (2022). Process-to-market matrix mapping: A multi-criteria evaluation framework for industrial processes' electricity market participation feasibility. *Applied Energy, 313*, 118829.
5. Rusche, S., Weissflog, J., Wenninger, S. & Häckel, B. (2023). How flexible are energy flexibilities? Developing a flexibility score for revenue and risk analysis in industrial demand-side management. *Applied Energy, 345*, 121351.
6. Lee, E., Baek, K. & Kim, J. (2022). Datasets on South Korean manufacturing factories' electricity consumption and demand response participation. *Scientific Data, 9*, 227.
7. Moon, Y., Lee, Y., Hwang, Y. & Jeong, J. (2024). Long short-term memory autoencoder and extreme gradient boosting-based factory energy management framework for power consumption forecasting. *Energies, 17*(15), 3666.
8. Yang, F., Ge, S., Liu, J., Yan, K., Gao, A., Dong, Y., ... & Zhang, W. (2025). High-precision short-term industrial energy consumption forecasting via parallel-NN with adaptive universal decomposition. *Expert Systems with Applications*, *289*, 128366.
9. Mardani, A., Zavadskas, E.K., Khalifah, Z., Zakuan, N., Jusoh, A., Nor, K.M. & Khoshnoudi, M. (2017). A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 71*, 216-256.
10. Kshanh, I. & Tanaka, M. (2024). Comparative analysis of MCDM for energy efficiency projects evaluation towards sustainable industrial energy management: Case study of a petrochemical complex. *Expert Systems with Applications, 255*, 124692.
11. Alcázar-Ortega, M., Álvarez-Bel, C., Escrivá-Escrivá, G. & Domijan, A. (2012). Evaluation and assessment of demand response potential applied to the meat industry. *Applied Energy, 92*, 84-91.
12. dos Santos, S.A.B., Soares, J.M., Barroso, G.C. & de Athayde Prata, B. (2023). Demand response application in industrial scenarios: A systematic mapping of practical implementation. *Expert Systems with Applications, 215*, 119393.
13. Ranaboldo, M., Aragüés-Peñalba, M., Arica, E., Bade, A., Bullich-Massagué, E., Burgio, A., Caccamo, C., Caprara, A., Cimmino, D., Domenech, B., Donoso, I., Fragapane, G., González-Font-de-Rubinat, P., Jahnke, E., Juanpera, M., Manafi, E., Rövekamp, J. & Tani, R. (2024). A comprehensive overview of industrial demand response status in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 203*, 114797.
14. Zenginoğlu, A. & Yüksel, F.Ş. (2026). Integrated life cycle assessment and multicriteria decision making framework for evaluating renewable energy technologies at Istanbul Airport. *Sci Rep., 16*, 9822.
15. Erik, A., Dündar, B. & Acer, D.C. (2022). Product mix optimization of fruit nectar with ıntegration of the analytic hierarchy process and mathematical programming. *Endüstri Mühendisliği, 33*(1), 96-114
16. Hamidy, S.M., Kuvvetli, B.İ. ve Erik, A. (2025). Deprem hazırlık kapsamında toplanma alanı alternatiflerinin belirlenmesi ve en uygun olan alternatiflerin seçilmesi: Adana Seyhan örneği. *Afet ve Risk Dergisi, 8*(3), 1440-1459.
17. Eşiyok, S., Ariş, E. & Antmen, F. (2023). Ranking and evaluation of G7 countries and Turkey by GGGI indicators using ENTROPY, CRITIC and EDAS methods. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *38*(3), 647-660.
18. Tör, O.B., Oğuz, H., Kısakürek, M., Kurşuncu, E.N. ve Köksal, A.O. (2021). Talep birleştiricilerin rol aldığı elektrik piyasa mekanizmaları ve Türkiye'deki mevcut durum analizi. *Sosyoekonomi, 29*(49), 307-322.
19. Çakmak, R. ve Altaş, İ. (2020). Türkiye'deki müşterilerin akıllı şebekelerde yük kaydırmaya dayalı talep tarafı yönetimine tepkileri. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 10*(2), 395-416.
20. Sancar, S., Erenoğlu, A. K., Şengör, İ. ve Erdinç, O. (2020). Güneş kollektörlü ve elektrikli şofbenli bir akıllı evin talep cevabı programı kapsamında enerji yönetimi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 19*, 92-104.

21. Yalçın, N. ve Karakaş, E. (2019). Kurumsal sürdürülebilirlik performans analizinde CRITIC-EDAS yaklaşımı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34*(4), 147-162.
22. Abdulvahitoğlu, A., Abdulvahitoğlu, A. ve Arslan, Z. (2025). Sürdürülebilir elektrikli ulaşım için stratejik planlama: Bursa ilinde elektrikli araç şarj istasyonu yer seçimi analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40*(4), 959-976.
23. Valentini, O., Andreadou, N., Bertoldi, P., Lucas, A., Saviuc, I. & Kotsakis, E. (2022). Demand response impact evaluation: A review of methods for estimating the customer baseline load. *Energies, 15*(14), 5259.
24. Aytekin, A. (2021). Comparative analysis of normalization techniques in the context of MCDM problems. *Decision Making: Applications in Management and Engineering, 4*(2), 1-25.
25. Trung, D.D. (2022). Development of data normalization methods for multi-criteria decision making: Applying for MARCOS method. *Manufacturing Review, 9*, 22.
26. Diakoulaki, D., Mavrotas, G. & Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method. *Computers & Operations Research, 22*(7), 763-770.
27. Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A. & Chatterjee, P. (2020). Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement alternatives and ranking according to compromise solution (MARCOS). *Computers & Industrial Engineering, 140*, 106231.
28. Więckowski, J. & Sałabun, W. (2023). Sensitivity analysis approaches in multi-criteria decision analysis: A systematic review. *Applied Soft Computing, 148*, 110915.
29. Pandey, V., Komal, K. & Dincer, H. (2023). A review on TOPSIS method and its extensions for different applications with recent development. *Soft Comput., 27*, 18011-18039.
30. Keshavarz Ghorabaee, M., Zavadskas, E.K., Olfat, L. & Turskis, Z. (2015). Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS). *Informatica, 26*(3), 435-451.
31. Heitkoetter, W., Schyska, B. U., Schmidt, D., Medjroubi, W., Vogt, T. & Agert, C. (2021). Assessment of the regionalised demand response potential in Germany using an open source tool and dataset. *Advances in Applied Energy, 1*, 100001
32. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (2024). *Elektrik piyasasında toplayıcılık faaliyeti yönetmeliği.* Resmî Gazete, 17.12.2024, Sayı: 32755, https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2024/12/20241217-27.htm, Erişim tarihi: 08.07.2026.
33. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) (2025). *2025 yılı talep tarafı katılımı hizmeti tedarik süreçlerine ilişkin duyuru.* https://www.teias.gov.tr/duyurular/2025-yili-talep-tarafi-katilimi-hizmeti-tedarik-sureclerine-iliskin-duyuru, Erişim tarihi: 08.07.2026.