



Endüstri 4.0'ın Uygulanmasında Kritik Başarı Faktörlerinin Belirlenmesi ve Aralık Tip-2 Bulanık TOPSIS Yöntemi ile Yatırım Teşviği Alan Firmaların Durum Değerlendirilmesi

Damla Çevik Aka^{1*}

^{1*} Kırklareli Üniversitesi, İşletme Bölümü, Üretim Yönetimi ve Pazarlama Bilim Dalı, Kırklareli, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-9622-273X), damlacevik@sakarya.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 2 Temmuz 2021 ve Kabul Tarihi 11 Şubat 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.961437)

ATIF/REFERENCE: Çevik Aka, D. (2022). Endüstri 4.0'ın Uygulanmasında Kritik Başarı Faktörlerinin Belirlenmesi ve Aralık Tip-2 Bulanık TOPSIS Yöntemi ile Yatırım Teşviği Alan Firmaların Durum Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (41), 36-47.

Öz

Endüstri 4.0'ın kritik başarı faktörlerini somutlaştırmasındaki literatür ve ampirik çalışmalardaki eksiklik, bu alandaki çalışmalara olan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Çalışmanın birincil amacı, bugünün ve geleceğin üretim alanlarında etkili olan endüstri 4.0 için gereken anahtar başarı faktörlerini belirleyebilmek ve önceliklendirmektir. Ardından belirlenen kriterlerle Endüstri 4.0 kapsamında yatırım teşviği alan farklı sektörlerdeki işletmeler için teşvik sonrası durum değerlendirilmesi yapılmaktadır. Araştırmaya konu olan işletmeler, Kocaeli'nde otomotiv, plastik ve alüminyum sektöründe faaliyet gösteren küçük ölçekli firmalardır. Çalışmada birden fazla karar vericinin, birkaç alternatifin ve çok kriterin yer alması ve sezgisel değerlendirmelerin de hesaba katılması sebebiyle Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden Aralık Tip-2 Bulanık TOPSIS kullanılmıştır. Literatürden şekillenen sekiz kriter ve teşvik almış üç firma, yatırım desteği sunan kurumun üç uzman mühendisi tarafından değerlendirilmiştir. Çalışma, bulanık TOPSIS yönteminin işletmelerin mevcut durum değerlendirilmelerinde etkin bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Kritik Başarı Faktörleri, Aralık tip-2 Bulanık TOPSIS, Endüstri 4.0, Bulanık TOPSIS, Durum Analizi.

Determination of Critical Success Factors in the Implementation of Industry 4.0 and Evaluation of the Situation of Firms Receiving Investment Incentives with the Interval Type-2 Fuzzy TOPSIS Method

Abstract

The lack of literature and empirical studies in concretizing the critical success factors of Industry 4.0 reveals the need for studies in this field. The primary purpose of the study is to identify and prioritize the key success factors required for industry 4.0, which is effective in the production areas of today and the future. Then, a post-incentive situation assessment is made for businesses in different sectors that receive investment incentives within the scope of Industry 4.0 with the determined criterias. The businesses in the research are small-scale firms operating in the automotive, plastic and aluminum sectors in Kocaeli. In the study, Interval Type-2 Fuzzy TOPSIS, one of the Multi-Criteria Decision Making Methods, was used due to the presence of more than one decision maker, several alternatives and multiple criteria, and intuitive evaluations. Eight criterias shaped from the literature and three firms that received incentives were evaluated by three expert engineers of the institution providing investment support. The study has shown that the fuzzy TOPSIS method can be used as an effective method for evaluating the current situation of the firms.

Keywords: Critical Success Factors, Interval Type 2 Fuzzy TOPSIS, Industry 4.0, Fuzzy TOPSIS, Situation Analysis.

* Sorumlu Yazar: damlacevik@sakarya.edu.tr

1. Giriş

2011 yılı sonrasında dijital teknolojilerin ve internetin üretim sistemleri içinde kullanım ihtiyacının artması ile beraber küresel düzeyde Endüstri 4.0 olarak adlandırılan bir dönem başlamıştır. Firmaların gelişmek, çağın gerisinde kalmamak ve dönüşümün faydalarından yararlanmak gibi sebeplerinden dolayı yeni endüstriyel süreç için kritik adımları doğru uygulaması bir gereklilik haline gelmiştir. Üretimde karmaşıklığın ortadan kaldırılarak daha sade iş akışlarının gerekliliği, çalışanların üretim süreçlerine yüksek derecede hakim olma isteği, bütün bunlarla beraber işletmelerin karlılığını artırma arzusu (Hofmann ve Rüşch, 2017) ve kentsel çevrenin özellikle sürdürülebilir bir yapıya dönüşme gayreti yeni endüstriyel dönüşümü etkilemiştir.

Teknolojinin gelecekteki yönelimleri belirsiz olduğundan, firmaların Endüstri 4.0 gibi bugünün endüstrisini takip ederek uygun stratejiler belirlemeleri gerekmektedir (Ivanov vd., 2016). Hem stratejik hem de teknolojik perspektiften Endüstri 4.0'a geçiş, üretim tesislerinde tamamen dijital bir dönüşüme giden ve her adımı görselleştiren kapsamlı bir stratejik yol haritasına duyulan önemi arttırmıştır (Sarvari vd., 2018). Büyük dijital dönüşüm sürecinin başarılı ve uzun vadede süreklilik sağlaması için kritik olan stratejik adımların doğru belirlenmesidir. Endüstri 4.0'ın gerektirdiği bu süreç, şirketlerin yenilik yapma kapasitesini zorlarken, diğer taraftan yeni stratejiler ve organizasyon modelleri ile fiziksel altyapı, üretim operasyonları ve teknolojileri, insan kaynakları ve uygulamaları yönetiminde büyük değişiklikler gerektirmektedir (Gilchrist, 2016) ve bütün bu süreçler için firmaların büyük yatırımlar yapması önem kazanmaktadır.

Endüstri 4.0'a dair uygulama eksikliğinin mevcut olmasının yanı sıra, akademik açıdan da durum benzerdir. Herman vd. (2016)'nin çalışmasında, Endüstri 4.0 ile ilgili akademik çalışmaların mevcut dönem içerisinde yetersiz olduğu vurgulanmıştır. Literatürde Endüstri 4.0'ın uygulanmasındaki potansiyel kritik başarı ölçütlerine dair çalışmaya da az rastlanmaktadır (Hoyer vd., 2020; Pozzi vd., 2020). Mevcut literatür incelendiğinde araştırmacılar farklı boyutlar üzerinden konuyu tartışmıştır.

2015 yılında Endüstri 4.0 Platformu bu yeni dönüşümün 4 şekilde oluşabileceğini ifade etmiştir. Bunlar (Industrie 4.0 Platform, 2015): *dikey bütünleştirme (entegrasyon), yatay bütünleştirme, akıllı ürünler* ve değer katan *insan faktörüdür*. Lichtblau (2015), Endüstri 4.0'ın tüm potansiyelinden faydalanmak üzere, dijital dönüşüm sürecinde işletmelerin başarılı olabilmesi özellikle rekabet edebilmesi için Readiness Modelini geliştirmiştir. Model, Almanya'nın makine mühendisliği endüstrisindeki önemli işletmelerin, Endüstri 4.0 sürecindeki hazırlık derecesini ölçmek üzere tasarlanmıştır (Lichtblau, 2015). Modeldeki boyutlar Endüstri 4.0 Platformu tarafından önerilen dört boyutun geliştirilmiş şeklidir: *strateji ve organizasyon, akıllı fabrikalar, akıllı süreçler, akıllı ürünler, veri odaklı hizmetler ve çalışanlardır*.

Bu çalışmanın amacı, Endüstri 4.0 sürecinin başarısında etkili olan kritik başarı kriterlerini belirleyebilmek ve bu kriterleri uygulama sonrası önceliklendirerek ağırlandırabilmektir. Diğer taraftan, Endüstri 4.0 dönüşümü için yatırım teşviği alan farklı sektörlerdeki (otomotiv, plastik ve alüminyum) üç firma üzerinden ilgili kriterler doğrultusunda potansiyel durumlarının tespitinin yapılması da amaçlanmaktadır. Ayrıca bu dönüşüm ve değişim sürecinde olan işletmelerin de gerçek durumlarının

analizi açısından çalışma önemli görülmektedir. Çalışmada ilgili başarı kriterlerinin uzmanların sezgisel değerlendirmeleri sonucunda sıralanmasının literatüre katkı sağlaması beklenirken, uygulayıcılar açısından da endüstri 4.0 dönüşümüne hazırlanan veya hazırlanacak işletmelerin potansiyel başarısı için gerekli kriterleri tespit ederek, kendi eylem planlarını oluşturmaları açısından destekleyici olması beklenmektedir. Uygulamada birden fazla kriterin olması ve sezgisel değerlendirmeleri hesaba katması açısından çok kriterli karar verme yöntemlerinden Bulanık TOPSIS yöntemi tercih edilmiştir. Uygulama sonucunda, Endüstri 4.0 kapsamında yeni bilgi sistemleri ve gelişmiş teknolojilerin işletmelere başarılı uygulanması ile işletmelerin bu dönüşüme daha kolay ve başarılı şekilde adapte olacağı belirlenirken, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren işletmenin diğer firmalara nazaran süreci daha başarılı yönettiği şeklinde de sonuca ulaşılmıştır.

2. Literatür İncelemesi

Endüstri 4.0'ın kritik başarı faktörlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar özellikle 2016 yılından sonra, hem literatüre katkı sağlayacak hem de uygulayıcılara yön gösterecek şekilde artmıştır. Schumacher vd. (2016), yeni sanayi dönemi için kritik başarı faktörlerini; *strateji, liderlik, müşteri, ürünler, operasyonlar, kültür, insanlar, hükümet ve teknoloji* olarak tanımlamıştır. Roblek vd. (2016) Endüstri 4.0 sürecindeki kritik faktörleri; *akıllı ürünler, akıllı fabrika, dikey entegrasyon, ürün kişiselleştirme, nesnelerin interneti ve hizmetlerin interneti* olmak üzere 6 boyut üzerinden incelemiştir. Gunasekaran, vd., (2016), *modülerlik, kişiselleştirme ve nesnelerin interneti* olmak üzere 3 temel kritere odaklanmıştır. Aynı yıl Schumacher vd., Endüstri 4.0'ı destekleyen ve olgunlaşma sürecinde etkili olan boyutları *strateji, liderlik, müşteriler, ürünler, operasyonlar, kültür, insanlar, hükümet ve teknoloji* olarak tanımlamıştır.

Koçak ve Diyadin (2018) ise çalışmalarında, *stratejik vizyon, örgütsel yapı, değer zincirinde yatay bütünleştirme, dikey bütünleştirme, teknolojik alt yapı, akıllı fabrikalar, nitelikli iş gücü yapısı, büyük veri yönetimi ve güvenlik* olmak üzere 9 temel kritere odaklanmıştır. Akdil vd. (2018), Endüstri 4.0 perspektifinde başarı kriterlerini *gerçek zamanlı veri yönetimi, çeviklik, hizmet baskınlık, entegre işletme süreçleri, birlikte çalışılabilirlik, sanallaştırma ve toplanan verilerin analizi* olarak açıklamıştır. Son yıllardaki çalışmalara bakıldığında ise Moeuf vd. (2020)'nin kritik başarı faktörlerini belirlemek istedikleri çalışmada, aynı zamanda sürecin riskleri ve fırsatlarına da değinmiş ve kapsamlı bir çalışma ortaya koymuşlardır. Ayrıca yazarlar sektörel bir daraltma yaparak KOBİ'ler üzerinde çalışmış ve üç kritik başarı faktörünü *eğitim, strateji ve veri kullanımı* olarak belirlemiştir. Nwaiwu vd. (2020) de Moeuf vd.'nin yaptığı çalışmaya benzer şekilde uygulama alanını KOBİ olarak sınırlandırmış ve *strateji, insan kaynakları, dijital teknolojilerin uygunluğu ve uyumlu organizasyon yapısını* kritik faktörler olarak vurgulamıştır. Hoyer vd. (2020), Endüstri 4.0'ı uyarılma ve uygulanmasına ilişkin yaptıkları sistematik literatür incelemesi sonrasında belirledikleri faktörler; *bulunan sektör ve şirket büyüklüğü, siyasi destek, BT standardizasyonu ve güvenliği, kurumsal işbirliği, mevcut finansman durumu, bilgi ve eğitim, uyum sağlama, algılanan faydalar, strateji, BT altyapısı, şirket içi bilgi ve beceri geliştirme, yalın üretim deneyimi, iş sağlığı ve güvenliğidir*. Calabrese vd. (2020), Endüstri 4.0'ın teknolojik olanaklarını, hedeflerini ve zorluklarını araştırdıkları çalışmada kritik faktörleri; *üretim hatları teknolojileri, akıllı işçi teknolojileri, akıllı ekipmanlar, bilgi işlem teknolojileri, paylaşım teknolojileri,*

akıllı ürünler, veri analitiği, ağ teknolojileri ve siber güvenlik teknolojileri olarak tanımlamıştır.

Bahsi geçen çalışmaların modelleri ve diğer literatür incelemeleri temel alınarak bu çalışmanın odağını oluşturan başarı faktör kriterleri aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır. Belirlenen faktörler, çalışmalarda en çok tanımlanan ve önerilen kriterlerden oluşturulmuştur.

Strateji ve organizasyon (değişime ve dönüşüme olan durum): İşletmelerin yeni bir endüstriyel dönüşüme hazır olması için ilk olarak temel bir strateji benimsemeleri ve bu doğrultuda iş modelleri oluşturmaları gereklidir. Endüstri 4.0'ın birçok işletme için büyük bir değişim süreci gerektirmesi kısa dönemli, orta dönemli ve uzun dönemli planlarını ayrı ayrı oluşturma ihtiyacını da doğurmaktadır. Her işletme, belirlediği amaçlara ulaşabilmek için içerisinde birçok stratejinin barındığı yol haritalarına sahiptir. Bu yol haritaları o amaçların nasıl gerçekleşeceğinin cevaplarını verir.

Belirlenen stratejilerin ve modellerin şirketin genel organizasyon yapısıyla uyumu çok önemlidir. Yeni yapılanmanın sistemin bütününe etkileyecek özellikte olması, işletmenin organizasyon yapısı içindeki birimlerin ve genel işletme kültürünün bu değişime hazır olmasını gerektirmektedir. İşletmeler kültür olarak yeniliklere açık, değişimi kabul edilebilir, bilgi paylaşımına açık, yüksek iş birliğine dayanan ve bu doğrultuda çalışanları destekleyen bir anlayışı benimsemelidirler.

Esneklik: Günümüzde ürünlerin yaşam ömürlerindeki kısalma ve tüketici ihtiyaç ve isteklerinin farklılaşmasının sonucu olarak işletmelerin farklı ürün tasarımları oluşturma, inovatif ürünler geliştirme ve üretim yöntemlerinde yenilikler yapma ihtiyacı doğmuştur. Esneklik, Endüstri 4.0 sürecinde işletmelerin başarısı için bir tercih değil gereklilik olarak görülmelidir. Alman Bilim ve Mühendislik Ulusal Akademisi'nin Endüstri 4.0 için yayınlamış olduğu raporda, tüketicilerin özel isteklerini ve ihtiyaçlarını karşılayabilmek için esnek üretim sistemlerine olan ihtiyaçtan bahsedilmiştir (Kagermann Wahlster ve Helbig, 2013).

Akıllı ürünler: İçerisinde çeşitli sensörleri ve işlemcileri barındıran akıllı ürünler, üretim tesisleri içinde bilgi taşımakta, süreç hakkında veri toplamakta ve sonraki etapta sisteme geri bildirim sağlamaktadır (Thames ve Schaefer, 2016). Akıllı fabrikalardaki ürünlerin de 'zeki' yapıda olması sistemi daha kontrol edilebilir, takip edilebilir ve gerektiğinde zaman kaybetmeden önlem alınabilir kılmaktadır. Akıllı fabrikalar içinde yer alan akıllı ürünlerin de sistemle tam entegre şekilde çalışması gerektiği unutulmamalıdır.

Derin birleşme: Yüksek düzeyde bütünleşme gerektiren bu kavram, dördüncü endüstri döneminin fabrikalarında bölümler arası entegrasyonun sağlanarak sistemin bütün olarak çalıştırılması gerektiğini ifade etmektedir. Bu fabrikalarda nesnelere interneti, bilgi teknolojileri ve kablosuz ağlar birbirleri ile bütünleşik bir yapıda çalışmaktadır. Endüstri 4.0 her ne kadar yeni teknolojileri, yazılımları gerektirse de önemli olan mevcut sistemlere bu yeni yapılanmanın düzgün şekilde entegre edilebilmesidir.

Endüstri 4.0 dönüşümünde dikey, yatay ve uçtan uca olmak üzere 3 şekilde gerçekleşen bütünleşme söz konusudur (Wang, Wan, Li ve Zhang, 2016). Yatay bütünleştirme değer zincirindeki tüm şirketler arasındaki iş birliğini sağlamak üzere değer ağlarının bütünleştirilmesi (Foidl ve Felderer, 2015); dikey entegrasyon fabrikada esnek ve yeniden yapılandırılabilir bir

üretim sistemini oluşturmak için hiyerarşik alt sistemlerin entegrasyonudur (Sony, 2018). Böylesine bir yapılanmadaki amaç yüksek esnekliğin ve dönüşümün organizasyondaki diğer birimlerle olan koordinasyonu sonucunda yeni bir sistem oluşturabilmektir. Uçtan uca entegrasyon ise değer zinciri boyunca kişiselleştirilmiş ürün ve hizmetlerin oluşumunu sağlamaktadır (Stock ve Selinger, 2016). Literatürde bütünleştirme kavramı ifade edildiği gibi üçe ayrılrsa da çalışma içerisinde *derin birleşme* olarak bütünleşik ve genel haliyle yer alacaktır.

Bilgi sistemleri ve yeni teknolojik yapılanma: Endüstri 4.0'ın temel yapılanmasında sanayi ve bilişim teknolojilerinin bir araya getirilmesi, birbirine entegre edilmesi ve verimlilik ile çalışması yer almaktadır. Yeni nesil yazılım ve donanım olarak ifade edilen sistemler daha etkin çalışma esasına dayanan, gerçek ve güvenilir süreçlere sahiptir. Nesnelere interneti, bulut teknolojisi, artırılmış gerçeklik ve simülasyon teknolojileri gibi değer katabilecek birçok modern gelişmiş teknolojinin işletmelerde kullanılabilmesi için gerekli alt yapının oluşturulması en önemli ihtiyaçlardan biridir. Üretim tesisindeki insanlar, makineler, ürünler ve bilgi sistemleri, gelişmiş ağ yapıları ile birbirine bağlanmakta ve etkileşim kurmaktadır (Wang vd., 2016).

Etkin veri kullanımı: Bilgisayar destekli teknolojilerin çok büyük hacimlerde veriyi üretmesi ile bu verilerin işlenmesi ve analiz edilmesi kilit bir öneme sahiptir. Çünkü işlenmiş veriler işletmenin genel stratejilerini oluşturmaya, başarılı rekabete, ürünlerini ve hizmetlerini geliştirmesine ve süreçlerini iyileştirmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca büyük miktardaki verileri doğru algoritmalarla birleştirmek; yüksek kaliteli ürünlerin üretilmesinde, işletmedeki bilgi paylaşımlarını daha hızlı yürütmeye, süreçlerin düzenli işlenmesinde ve geleceğe yönelik keşifsel analizlerin yapılmasında etkili olacaktır (Atzori, 2015).

Kalifiye iş gücü: İçinde bulunulan endüstriyel dönem, ileri imalat teknolojilere olan bağılılığı artırırken daha az fiziksel iş gücüne ihtiyaç duyulmasını da sağlamaktadır. Çünkü bu teknolojik alt yapının kurulmasının bir sonucu olarak insanın yapacağı işler daha kısa sürede, daha az hatayla ve yüksek verimlilik ile makineler tarafından gerçekleştirilecektir. Üretim tesislerinde emek gücünün yerine akıllı makinelerin veya robotların kullanılması, süreçlerde nispeten daha az iş gücünü ve daha yoğun sermayenin kullanılmasına yol açmaktadır (Brynjolfsson ve McAfee, 2015). Bu süreçte emek gücünün yerini akıl ve beceri almıştır.

Fabrikalarda gereksinim duyulan iş gücünün niteliği; verileri işleyebilmesinden, analiz edebilmesinden, yorumlayabilmesinden ve bu doğrultuda stratejik ve organizasyonel kararları verebilmesinden kaynaklanmaktadır. Potansiyel iş gücü için çalışanlar, yeni teknolojileri kullanan, bir problemle karşılaştıklarında çözüm odaklı yaklaşan, süreci aksatmayan, sistemi bilgisayarlar üzerinden kontrol edebilecek yetkinlikte olan ve gerektiği durumlarda karar mekanizmasını kendi elinde tutan kişiler olmaktadır.

Güvenlik: Endüstri 4.0'da derin ve kapsamlı bağlantıyı sağlayacak ağlar aracılığıyla makinelerin, insanların ve ürünlerin birbiriyle sürekli iletişim halinde bulunmaları aynı zamanda işletmelerin bilişim yönündeki büyük güvenlik önlemlerini alma ihtiyacını da doğurmaktadır. Örneğin; Endüstri 4.0'ın kritik ayaklarından olan IOT'un işletmeler tarafından süreçlerin her aşamada kullanılabilmesi güvenlik ve veri gizliliği sorunlarını da

beraberinde getirmektedir ve güvenlik gereksinimini açığa çıkarmıştır (Abidin vd., 2019). Oysaki stratejik kararların tamamı, veriler üzerinden alınmaktadır. Bu sebeple ihtiyaç duyulan dönüşüm ve gelişim sürecinde verilerin toplanma, takip etme, işleme, analiz etme ve sonucunda yorumlama aşamalarının her birinde sıkı güvenlik önlemlerinin alınması mecburidir.

3. Metodoloji

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) sürecinde değerlendirilen çalışmalarda çoğu zaman bir veya daha çok karar verici bulunmakta ve birçok kriter yer almaktadır. Karar vericiler kendi kararlarını etkileyecek önemli kriterleri ele alarak, seçimleri için bir sıralama yapmak zorunda kalabilirler. Karar vericilerin birden çok kriteri ve genellikle birbiriyle çelişebilen ifadeleri değerlendirme gerekliliği karar verme sürecini zorlaştırabilmektedir. Aynı zamanda ÇKKV'nin kullanılabilirliği için ilgilenilen kriter ağırlıklarının belirlenmiş (kesin) olduğu kabul edilse de, her zaman kesin değerlerle çalışabilmek çok da mümkün olmamaktadır (Kaya vd., 2019). İnsan yargılarının çoğu zaman net olmaması ve kesin değerler ile ifade edilememesinin sonucunda doğru modellemelerin ve doğru seçimlerin yapılabilmesi zorlaşmaktadır (Nädäban vd., 2016). Böyle durumlarla karşılaşıldığı için bulanık mantık önerilmiştir.

Bulanık TOPSIS

ÇKKV yöntemlerinden olan TOPSIS, ilk olarak Hwang ve Yoon tarafından alternatif kararlar arasındaki mesafeleri ölçen bir teknik olarak önerilmiştir (Çalık, 2019). TOPSIS yönteminde alternatiflerin pozitif çözümlere olan yakınlığı, negatif çözümlere olan uzaklığı hesaplanmakta ve ideal alternatif kararına bu şekilde ulaşılmaktadır. En yaygın kullanılan ÇKKV tekniklerinden biri olan TOPSIS Yöntemi, tedarikçi seçim kararları, pazarlama uygulamaları, finansal değerlendirmeleri, enerji yönetim durumları, üretim sistem problemleri (Özdemir, 2018) gibi birçok farklı amaç için tercih edilmektedir.

TOPSIS yöntemi ile bulanık mantık yaklaşımlarının bir araya getirilmesinin sonucunda Bulanık TOPSIS yöntemi ortaya çıkmıştır. Yöntem, çeşitli alternatiflerin önceliklendirilmesi için mevcut en uygun yöntemlerden biri olan bir Çok Kriterli Karar Verme tekniğidir (Khambhati vd., 2021). Yöntem ile özellikle sözel belirsizliğin olduğu ve karar vericilerin farklı kararlara sahip olabileceği durumlarda sözel yargıları modele yansıtarak kriterlerin doğru değerlendirilmesi sağlanabilmektedir. Bulanık TOPSIS yöntemi karar verilecek alternatiflerin değerlendirilmesi ile ortaya çıkan subjektifliğin çoklu karar verme durumlarında olası problemleri yok etmekte ve kararları kolaylaştırmaktadır (Ecer, 2007).

Bulanık TOPSIS yöntemi diğer birçok ÇKKV yöntemine göre daha avantajlıdır. Karşılaştırma ve sıralama problemlerinde Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi, Analitik Ağ Prosesi (ANP), Bulanık Analitik Ağ Prosesi kullanılmasına rağmen belirsizlik altında ikili karşılaştırma durumlarında Bulanık TOPSIS daha yararlı bir yöntem olarak ifade edilebilir. Çünkü yeni alternatiflerin modele dahil edilmesi veya mevcut alternatiflerin çıkarılması ihtiyacına yöntem daha kolay yanıt vermektedir (Junior vd., 2014).

Literatürde yöntem, makine teçhizat seçimi, performans değerlendirmesi, kuruluş yeri seçimi, tedarikçi seçimi, grup kararlarının verilmesi veya etkinlik analizi gibi birçok farklı amaç için kullanılmaktadır ve Tablo 1'de farklı uygulama alanlarına yer

verilmiştir. Bulanık TOPSIS yönteminin kullanıldığı birkaç çalışma aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Tablo özellikle Bulanık TOPSIS'in farklı çalışma konularında yer aldığı gösterilmesi için oluşturulmuştur. Bir diğer nokta ise daha güncel çalışmalara yer verilme amacıyla 2014 yılı sonraki araştırmalar ifade edilmiştir.

Tablo 1. Bulanık TOPSIS Yönteminin Farklı Amaçlarda Kullanıldığı Çalışmalar

Table 1. Studies Using the Fuzzy TOPSIS Method for Different Purposes

Yazarlar	Yıl	Konu
Wang	2014	Lojistik şirketlerin finansal performanslarını değerlendirmek
Ghazanfari vd.	2014	Liman topluluk sitelerinin iş zekası yeterliliklerini değerlendirmek
Majd vd.	2014	Petrol projelerinin risk analizini çıkarmak
Wanke vd.	2015	Havayolu işletmelerinin firma performanslarını değerlendirmek,
Sağır ve Doğanalp	2016	Türkiye için başarılı enerji kaynaklarını seçmek
Yacan	2016	Eğitim kalitesini belirlemek
Esmer ve Bağcı	2017	Banka performanslarının değerlendirilmek
Orçun ve Eren	2017	BIST'de yer alan teknoloji firmalarının finansal performansını değerlendirmek
Chauhan vd.	2017	Hava jetlerini kullanan kanalın enerji performansını önceliklendirmek
Akbas ve Bilgen	2017	Atık su arıtma tesisi için ideal gaz yakıtını seçmek
Denizhan vd.	2017	Yeşil tedarikçi ile geleneksel tedarikçiler arasındaki farklılığı belirlemek
Maghsoodi ve Khalilzadeh,	2017	İnşaat projelerinin kritik başarı faktörlerini belirleyebilmek
Jain vd.	2018	Otomotiv sektöründe tedarikçi seçmek
Khoshi vd.	2018	Tıp bilimlerinde öğretmenlerin etkili niteliklerine karar vermek
Heiadari vd.	2018	Tedarikçi zinciri risklerini değerlendirmek
Yıldız vd.	2018	Ürün seçim kararını vermek (RFID Etiket okuyucu)
Han ve Trimi	2018	Sosyal ticaret platformlarında ters lojistik performanslarını değerlendirmek
Miç ve Antmen	2019	Tesis yer seçimine karar vermek
Memari vd.	2019	Güvenlik tedarikçi seçmek,
Yurdakul ve Ic	2018	Performans ölçüm modeli geliştirilmek
Kiraz vd.	2018	Proje değerlendirmek
Zubayer vd.	2019	Tedarik zinciri risklerini önceliklendirmek
Reddy vd.	2019	Malzeme seçim kararını vermek (sürdürülebilir bir yapı malzemesi)
Rajak ve Shaw	2019	Mobil sağlık (mHealth) uygulamalarını değerlendirilmek
Solangi vd.	2019	Sürdürülebilir enerji planlaması için stratejileri değerlendirilmek
Mohsin vd.	2019	Rüzgar enerjisi potansiyelini ekonomik açıdan değerlendirilmek
Park vd.	2021	Çalışan sürekliliğini sağlamak için kriterleri önceliklendirmek
Kekilli vd.	2021	Firma için en uygun danışmanı seçmek

Bulanık TOPSIS Yöntemi Adımları

Bulanık TOPSIS yönteminde öncelikle seçim yapılması amaçlanan alternatiflerin, değerlendirme yapılmasını sağlayacak karar kriterlerin ve seçimi yapacak karar verici(ler)nin belirlenmesi gereklidir. Bulanık TOPSIS yönteminde birden fazla alternatifin ve birçok kriterin ağırlıklandırılmasında dilsel ifadeler yer almaktadır. Bulanık TOPSIS, değerlendirilen alternatiflerin ideal çözüme daha yakın olabilmelerini ve ideal olmayan çözüme de daha uzak olmasını sağlamaktadır. Yönteme göre, pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüme en uzak mesafeye sahip olan alternatif seçilmektedir (Khambhati vd., 2021).

Bulanık TOPSIS yöntemi için aşağıda belirli notasyonlar ve onların ifade ettiği tanımlar yer almaktadır. Çalışmanın yöntem kısmı Chen (2000)'in çalışmasından yararlanılarak oluşturulmuştur.

Adım 1-2: Karar vericilerin, kriterlerin ve alternatiflerin belirlenmesi ve karar vericiler tarafından kriterlerin ve alternatiflerin değerlendirilmesi

i: alternatifler; j: kriterler; k: karar vericiler (k=1,2,...,k)

\tilde{W}_j^k : k. karar verici tarafından değerlendirilen j. kriterin önem ağırlığı

\tilde{X}_{ij}^k : k. karar verici tarafından j. kriterine göre i. alternatifin bulanık karşılığını gösteren kritik değeri (bulanık sözel değişkenler)

$$\tilde{W}_j = 1/k [\tilde{W}_j^1 (+)\tilde{W}_j^2 (+)\dots (+)\tilde{W}_j^k] \quad (1)$$

$$\tilde{X}_{ij} = (1/k [\tilde{X}_{ij}^1 (+)\tilde{X}_{ij}^2 (+)\dots (+)\tilde{X}_{ij}^k] \quad (2)$$

Her bir kriter, farklı karar vericiler tarafından ağırlıklandırılmakta ve alternatiflerin her biri ilgili kriterlerce değerlendirilmektedir. Karar vericiler tarafından ağırlıklandırılma işleminde dilsel değişkenler kullanılmakta, fakat çalışmalarda dilsel değişkenler pozitif üçgen bulanık sayılarla ifade edilmektedir. Aşağıdaki tablo bu durumu göstermektedir.

Tablo 2. Dilsel Değişkenler ve Bulanık Sayı Karşılıkları (Chen,2000)

Table 2. Linguistic Variables and Equivalents for Fuzzy Numbers (Chen, 2000)

Karar Kriterlerinin Değerlendirilmesinde Referans Alınan İfadeler		Alternatiflerin Değerlendirilmesinde Referans Alınan İfadeler	
Dilsel Değişkenler	Aralık Tip-2 Bulanık Kümeler	Dilsel Değişkenler	Aralık Tip-2 Bulanık Kümeler
Çok Düşük (ÇD)	(0,0,0,0,0.1)	Çok Kötü (ÇK)	(0,0,1)
Düşük (D)	(0,0,0,1,0.3)	Kötü (K)	(0,1,3)
Biraz Düşük (BD)	(0,1,0,3,0.5)	Orta Kötü (OK)	(1,3,5)
Orta (O)	(0,3,0,5,0.7)	Orta (O)	(3,5,7)
Biraz Yüksek (BY)	(0,5,0,7,0.9)	Orta İyi (OI)	(5,7,9)
Yüksek (Y)	(0,7,0,9,1.0)	İyi (İ)	(7,9,10)
Çok Yüksek (ÇY)	(0,9,1,0,1.0)	Çok İyi (Çİ)	(9,10,10)

Adım 3: Bulanık karar matrisinin oluşturulması

Bütün kriterlerin ve alternatiflerin tek bir değer elde edilmesi sonucunda elde edilen matris:

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{X}_{11} & \tilde{X}_{11} & \dots & \tilde{X}_{11} \\ \tilde{X}_{21} & \tilde{X}_{22} & \dots & \tilde{X}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{X}_{m1} & \tilde{X}_{m2} & \dots & \tilde{X}_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

\tilde{X}_{ij} ve \tilde{W}_j dilsel ifadelerin bulanık sayılarla tanımlanma ihtiyacından kaynaklı $\tilde{W}_j = (\tilde{W}_1, \tilde{W}_2, \tilde{W}_3)$ ve $\tilde{X}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ olarak gösterilmektedir.

Adım 4: Normalize Edilmiş Karar Matrisinin Oluşturulması (R)

Bulanık karar matrislerinin oluşturulmasından sonraki adımda matrisin normalize edilmesi gerekmektedir. Normalize edilmiş karar matrisi;

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}] \quad m * n \quad (4)$$

Eşitlik (4)'deki gibi ifade edilir. Çalışmada yararlanılacak fayda kriteri:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_{j*}}, \frac{b_{ij}}{c_{j*}}, \frac{c_{ij}}{c_{j*}} \right), j \in B \quad (5)$$

$$c_{j*} = \max c_{ij} \quad (6)$$

Adım 5: Ağırlıklı Normalize edilmiş Bulanık Karar Matrisinin Oluşturulması (V)

Normalize karar matrisi üzerinden, her kriterin farklı ağırlığa sahip olduğu gerçeğiyle (Adım 1-2'de hesaplanmış olmalı) ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi aşağıdaki eşitlikler neticesinde elde edilmelidir.

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}] \quad m * n, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} * \tilde{W}_j \quad (8)$$

Adım 6: Pozitif ve Negatif İdeal Çözümlerin Tanımlanması

\tilde{V} matrisine göre her i, j için \tilde{v}_{ij} elemanları normalize edilmiş pozitif üçgen bulanık sayılardır. \tilde{V}_{ij} değerlerinin her biri [0,1] aralığında yer alan normalize edilmiş üçgen bulanık sayılardır. Bulanık pozitif ve negatif ideal çözümleri için;

$$A^* = \tilde{V}_1^*, \tilde{V}_2^*, \dots, \tilde{V}_n^*; V_j^* = \max_i (V_{ij}) \quad (9)$$

$$A^- = \tilde{V}_1^-, \tilde{V}_2^-, \dots, \tilde{V}_n^-; V_j^- = \min_i (V_{ij}) \quad (10)$$

hesabı yapılmaktadır.

Adım 7: Pozitif ve negatif ideal çözümden uzaklıklarının hesaplanması

Her bir alternatif için ayrı ayrı pozitif (di*) ve negatif (di-) uzaklıklar Eşitlik (11) ve (12)'ye göre ölçülmektedir.

$$d_i^* = \sum d(\tilde{V}_j, \tilde{V}_j^*), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$d_i^- = \sum d(\tilde{V}_j, \tilde{V}_j^-), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

Adım 8: İki Bulanık Sayı Arasındaki Uzaklığın Ölçülmesi (dv(a,b))

Bu hesap için vertex metodu kullanılmaktadır. Yapılacak hesaplama;

$$d(a,b)=\sqrt{\frac{1}{3}((la-lb)^2+(ma-mb)^2+(ua-ub)^2)} \quad d(a,b) \in R^+$$

Adım 9: Yakınlık Kat Sayılarının Elde Edilmesi ve En Uygun Alternatifin Seçilmesi

Pozitif ve ideal çözüme olan mesafelerin hesaplanmasından sonra alternatiflerin seçimindeki sıralamanın belirlenmesi için yakınlık katsayıları hesaplanır. Yakınlık katsayısının 1'e olan yakınlığı, o alternatifin seçilme durumunu daha yükseltmektedir (Ecer, 2006).

$$cc_i = d_i^- / (d_i^* + d_i^-), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

4. Uygulama

Çalışmada ilk olarak işletmelerin yeni sanayi döneminin gerektirdiği yeniliklere adapte olmalarını sağlayacak en temel kritik başarı faktörlerinin öncelikli olarak sıralanması amaçlanmıştır. Ardından farklı sektörlerde üretim yapan yatırım destek teşviği alarak endüstriyel dönüşüm süreci içerisinde bulunan üç firmanın, teşvik sonrası durum değerlendirmesinin yapılması istenmektedir. Araştırma sonucunda, kriterlerin önem sırasının listelenmesinin literatüre bir katkısı olmasının yanı sıra, ayrıca uygulayıcılar açısından sürecin aşama aşama anlatılması ve matematiksel eşitliklerle sonuçlanması çalışmayı daha somut ve uygulanabilir bir hale getirecektir.

Uygulamada yer alan işletmeler Kocaeli'nde farklı sektörlerde faaliyet gösteren benzer özelliklere sahip (küçük ölçek büyüklüğündeki (çalışan sayıları 40-49, yıllık ciroları ortalama 7-8milyon Euro)) ve Endüstri 4.0 yeni dönemi için benzer yatırım teşviği almış olanlardır. İşletmelerin yatırım teşviğine dair proje dönemleri 2018-2020 yılları arasında yer alırken, ilgili projeler Nisan'ın sonunda (2020) tamamlanmıştır.

Bu firmaların proje teşviği neticesinde başarı durumları, kritik faktörler doğrultusunda değerlendirilecek ve çalışma sonrasında hangi sektördeki firmanın daha önemli katkılar yaptığı tespit edilecektir. Üç firmadan ilki (İ₁) otomotiv yan sanayi, ikincisi (İ₂) plastik ve üçüncüsü (İ₃) alüminyum sektöründe faaliyet yürütmektedir.

İkinci olarak uygulamada yer alan kriterler, literatürden sağlanan bilgiler neticesinde "kritik faktörler" olarak belirlenmiştir. Belirlenen 8 kriter (j_i) daha önce de ifade edildiği gibi;

j₁: Strateji ve Organizasyon;

j₂: Esneklik;

j₃: Akıllı Ürünler;

j₄: Derin Birleşme

j₅: Bilgi Sistemleri ve Teknolojik Yapılanma

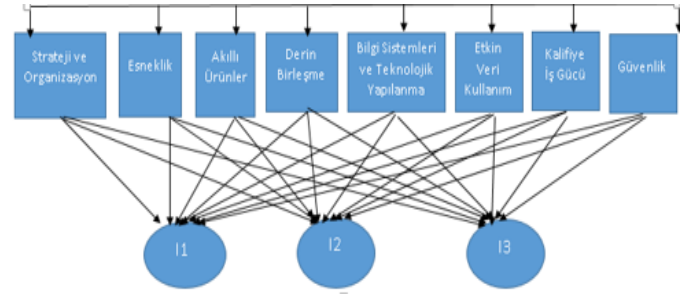
j₆: Etkin Veri Kullanımı

j₇: Kalifiye İş Gücü

j₈: Güvenlik şeklindedir.

Uygulamada üç uzman karar verici bulunmaktadır; karar verici pozisyonundaki kişiler firmalara yatırım teşviği veren kamu kurumlarından birinde çalışan ve 8-10 yıl tecrübeye sahip proje mühendisleridir. Uzmanlar, daha önce benzer projelendirmelerde birçok kez bulunmuşlardır. Çalışmanın uygulaması için ihtiyaç duyulan değerlendirme, karar vericiler ile projelerin tamamlanma süreçlerinin ardından Haziran, 2020 dönemi içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Yöntem olarak Aralık Tip 2 Bulanık TOPSIS uygulanmaktadır. Bu yöntemin kullanılmasındaki en temel sebep, Aralık Tip 2'nin belirsizliğin nispeten çok olduğu ortamlarda daha etkili karar verebilmeyi destekliyor olmasıdır. Böylelikle belirsizlik durumları altında karar vericilerin daha doğru sonuçlara ulaşabilmesi sağlanmaktadır. Çalışmanın adımları Chen C.T. (2000)'in çalışmasında yer verdiği ve kabul edildiği şekliyle uygulanmaktadır.



Şekil 1. Çalışmadaki Kriterler ve Alternatifler Arası İlişki Ağı

Figure 1. Network of Relationship Between Alternatives and Criteria in the Study

Çalışmada belirlenen 8 ana kriterin ardından, tüm kriterlerin her karar verici tarafından değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmuştur.

Tablo 3. Başarı Kriterlerinin Dilsel ve Bulanık Sayılarla Gösterimi

Table 3. Representation of Success Criteria with Linguistic and Fuzzy Numbers

Kriterler	Karar Verici 1 (KV1)	Karar Verici 2 (KV2)	Karar Verici 3 (KV3)	Kriter Ağırlıkları
J ₁	Y (0.7,0.9,1.0)*	O (0.3,0.5,0.7)	Y (0.7,0.9,1.0)	(0.57, 0.77, 0.90)
J ₂	ÇY (0.9,1.0,1.0)	O (0.3,0.5,0.7)	ÇY(0.9,1.0,1.0)	(0.70, 0.83, 0.90)
J ₃	O (0.3,0.5,0.7)	O (0.3,0.5,0.7)	BD(0.1,0.3,0.5)	(0.23, 0.43, 0.63)
J ₄	Y (0.7,0.9,1.0)	Y (0.7,0.9,1.0)	ÇY(0.9,1.0,1.0)	(0.77, 0.93, 1.0)
J ₅	ÇY (0.9,1.0,1.0)	ÇY(0.9,1.0,1.0)	Y(0.7,0.9,1.0)	(0.83, 0.97, 1.0)
J ₆	Y(0.7,0.9,1.0)	ÇY(0.9,1.0,1.0)	Y(0.7,0.9,1.0)	(0.43, 0.93, 1.0)
J ₇	BD(0.1,0.3,0.5)	O(0.3,0.5,0.7)	Y(0.7,0.9,1.0)	(0.37, 0.57, 0.73)
J ₈	O(0.3,0.5,0.7)	ÇY(0.9,1.0,1.0)	Y(0.7,0.9,1.0)	(0.63, 0.8, 0.90)

Uygulamanın ikinci adımında başarı kriterleri ve alternatifler dilsel değişkenler ile değerlendirilmekte ve kritik ağırlıkları hesaplanmaktadır. Bu aşamada Tablo 2'den yararlanılarak dilsel değişkenler, bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Ardından Kriter Ağırlıkların Hesaplanması ile ilgili Eşitlik (1) uygulanmıştır. Yapılan işlemler sonrası sonuçlar yukarıdaki tabloda gösterilmiştir.

*Örneğin, Strateji ve Organizasyon (J1) kriteri, birinci karar verici (KV1) tarafından Yüksek (Y) önem düzeyinde olacak şekilde değerlendirilmiş ve bu dilsel değişkene karşılık gelen bulanık sayı için Tablo 2'den yararlanılarak (0.7,0.9,1.0) olarak belirlenmiştir.

Tablo 4. Karar Vericiler Tarafından İşletmelerin Değerlendirilmesi ve Bulanık Sayılarla Gösterilmesi

Table 4. Evaluation of Businesses by Decision Makers and Representation with Fuzzy Numbers

j_i	İşletmeler	Karar Verici 1	Karar Verici 2	Karar Verici 3
J₁	İşletme 1 (İ ₁)	Çİ (9,10,10)*	İ (7,9,10)	Oİ (5,7,9)
	İşletme 2 (İ ₂)	İ (7,9,10)*	Çİ (9,10,10)	İ (7,9,10)
	İşletme 3 (İ ₃)	OK (1,3,5)*	İ (7,9,10)	O (3,5,7)
J₂	İşletme 1	O (3,5,7)	İ (7,9,10)	OK (1,3,5)
	İşletme 2	OK (1,3,5)	Çİ (9,10,10)	İ (7,9,10)
	İşletme 3	OK (1,3,5)	O (3,5,7)	Oİ (5,7,9)
J₃	İşletme 1	K (0,1,3)	OK (1,3,5)	OK (1,3,5)
	İşletme 2	İ (7,9,10)	Oİ (5,7,9)	Oİ (5,7,9)
	İşletme 3	Oİ (5,7,9)	İ (7,9,10)	İ (7,9,10)
J₄	İşletme 1	Oİ (5,7,9)	Oİ (5,7,9)	İ (7,9,10)
	İşletme 2	OK (1,3,5)	O (3,5,7)	Oİ (5,7,9)
	İşletme 3	İ (7,9,10)	Oİ (5,7,9)	O (3,5,7)
J₅	İşletme 1	İ (7,9,10)	İ (7,9,10)	İ (7,9,10)
	İşletme 2	İ (7,9,10)	Oİ (5,7,9)	Çİ (9,10,10)
	İşletme 3	Oİ (5,7,9)	O (3,5,7)	İ (7,9,10)
J₆	İşletme 1	İ (7,9,10)	Oİ (5,7,9)	İ (7,9,10)
	İşletme 2	Çİ (9,10,10)	İ (7,9,10)	İ (7,9,10)
	İşletme 3	İ (7,9,10)	İ (7,9,10)	Oİ (5,7,9)
J₇	İşletme 1	Çİ (9,10,10)	İ (7,9,10)	İ (7,9,10)
	İşletme 2	Oİ (5,7,9)	O (3,5,7)	İ (7,9,10)
	İşletme 3	İ (7,9,10)	İ (7,9,10)	Oİ (5,7,9)
J₈	İşletme 1	Çİ (9,10,10)	Çİ (9,10,10)	İ (7,9,10)
	İşletme 2	OK (1,3,5)	K (0,1,3)	O (3,5,7)
	İşletme 3	İ (7,9,10)	O (3,5,7)	Oİ (5,7,9)

Üçüncü adımda karar vericiler proje yatırım desteği alan firmaları, ilgili kriterler bağlamında sözsel olarak değerlendirmiş ve bu dilsel ifadeler karşılık gelen değerler yine Tablo 2'den yararlanılarak bulanık sayılara dönüştürülmüştür (Tablo 4).

*Birinci karar verici (KV1) tarafından, Strateji ve Organizasyon (J1) kriteri açısından işletme 1'in yatırım desteği sonrası durumu

Çok İyi (Çİ) seviyede bulunurken, işletme 2'nin durumu İyi (İ) ve son olarak İşletme 3'ün durumu Orta Kötü (OK) olarak değerlendirilmiştir. Bu dilsel değişkenlere karşılık gelen değerler, Tablo 2 referans alınarak sırasıyla (9,10,10), (7,9,10) ve (1,3,5) şeklinde oluşturulmuştur.

Tablo 5. Bulanık Karar Matrisi

Table 5. Fuzzy Decision Matrix

	J ₁	J ₂	J ₃	J ₄	J ₅	J ₆	J ₇	J ₈
İ₁	(7, 8.7, 9.7)*	(3.7, 5.7, 7.3)	(0.7, 2.3, 4.3)	(5.7, 9.7, 9.3)	(7, 9, 10)	(7.3, 8.3, 9.7)	(7.7, 9.3, 10)	(8.3, 9.7, 10)
İ₂	(7.7, 9.3, 10)	(5.7, 7.3, 8.3)	(5.7, 7.7, 9.3)	(3, 5, 7)	(7, 8.7, 9.7)	(7.7, 9.3, 10)	(5, 7, 8.7)	(1.3, 3, 5)
İ₃	(3.7, 5.7, 7.3)	(3, 5, 7)	(6.3, 8.3, 9.7)	(5, 7, 8.7)	(5, 7, 8.7)	(6.3, 8.3, 9.7)	(7.3, 8.3, 9.7)	(5, 7.7, 8.7)

Tablo 3 ve Tablo 4'ün elde edilmesi sonrasında bulanık karar matrisinin oluşturulması gereklidir. Bu aşamada "Bulanık TOPSIS Yöntemi Adımları" bölümü altında Adım 3'de ifade edildiği gibi bütün kriterler ve alternatifler için tek bir değer elde edilmesi amacıyla Eşitlik (2), Tablo 4'ün verileri üzerinde uygulanmış ve Tablo 5 elde edilmiştir.

*İ₁ (İşletme 1)'in J₁ kriteri (Strateji ve Organizasyon) açısından üç karar verici tarafından ayrı olarak yapılan değerlendirilmesi için ilgili değer, 1/3 ([9 + 7 + 5]), [10 + 9 + 7], [10 + 10 + 9]) = (7, 8.7, 9.7) şeklindeki hesaplama ile bulunmuştur. Bütün hücreler için gerekli işlemler yapıldıktan sonra matrisin normalize edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 6. Normalize Edilmiş Bulanık Karar Matrisi

Table 6. Normalized Fuzzy Decision Matrix

	J ₁	J ₂	J ₃	J ₄	J ₅	J ₆	J ₇	J ₈
İ ₁	(0.7,0.87,0.97)*	(0.45,0.69,0.88)	(0.07,0.23,0.43)	(0.58,1, 0.96)	(0.7, 0.9, 1)	(0.73,0.83,0.97)	(0.77, 0.93, 1)	(0.83,0.97,1)
İ ₂	(0.44,0.71,0.9)	(0.69, 0.88, 1)	(0.57,0.77,0.93)	(0.3,0.51,0.72)	(0.7,0.87,0.97)	(0.77, 0.93, 1)	(0.05,0.07,0.87)	(0.13,0.3,0.5)
İ ₃	(0.21,0.44,0.66)	(0.36, 0.6, 0.88)	(0.67,0.83,0.97)	(0.51,0.72,0.9)	(0.5, 0.7,0.87)	(0.63,0.83,0.97)	(0.73,0.83,0.97)	(0.5,0.77,0.87)

Bu aşamada Eşitlik (5)'in uygulanmasıyla normalize edilmiş karar matrisinin gösterildiği Tablo 6'ya ulaşılmıştır.

*İlgili değer, Tablo 5'deki ilgili hücrenin, sütünün maksimum değerine (c_j=10) bölünmesi ile elde edilmiştir. İlgili hücrede yer

alan (7, 8.7, 9.7) değerlerinin her biri J₁ kriterine ait en büyük değer olan 10'a bölünmüş ve (0.7,0.87,0.97) hücre değerine ulaşılmıştır. Bütün hücreler için süreç tamamlandıktan sonra ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulması gerekmektedir.

Tablo 7. Ağırlıklı Normalize Edilmiş Karar Matrisi

Table 7. Weighted Normalized Decision Matrix

	J ₁	J ₂	J ₃	J ₄	J ₅	J ₆	J ₇	J ₈
İ ₁	(0.4,0.67, 0.87)*	(0.32,0.57,0.79)	(0.02, 0.1, 0.27)	(0.45,0.93,0.96)	(0.58, 0.87, 1)	(0.31,0.77,0.97)	(0.28,0.53,0.73)	(0.83,0.97,1)
İ ₂	(0.43, 0.71, 0.9)	(0.48, 0.73, 0.9)	(0.13,0.33,0.59)	(0.23,0.47,0.72)	(0.58,0.84,0.97)	(0.32, 0.86, 1)	(0.02,0.04,0.64)	(0.13,0.3,0.5)
İ ₃	(0.21,0.43,0.65)	(0.25, 0.5, 0.79)	(0.15,0.36,0.61)	(0.39, 0.67, 0.9)	(0.4, 0.68, 0.87)	(0.27,0.77,0.97)	(0.27,0.47,0.71)	(0.5,0.77,0.87)

Bu adımda ise normalize edilmiş karar matrisinden ve Tablo 3'den yararlanılarak Eşitlik (8)'in uygulanmasıyla matrisin ağırlıklandırılması yapılmış ve Tablo 7'ye ulaşılmıştır.

*İlgili değer, Tablo 6'daki ilgili hücrenin Tablo 3'de ulaşılan her kritere ait ağırlık değerleriyle çarpılması sonucunda elde edilmiştir. (0.4, 0.67, 0.87)=(0.7, 0.87, 0.97) * (0.57, 0.77, 0.90)

Ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisinin elde edilmesinin ardından, Bulanık Pozitif (BP) ve Bulanık Negatif (BN) ideal çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 8. BP ve BN İdeal Çözümleri

Table 8. FP and FN Ideal Solutions

j _i	d(i ₁ , I ⁺)	d(i ₂ , I ⁺)	d(i ₃ , I ⁺)	d(I ₁ , I ⁻)	d(I ₂ , I ⁻)	d(I ₃ , I ⁻)
J ₁	0.40*	0.373	0.597	0.674**	0.706	0.466
J ₂	0.480	0.343	0.534	0.592	0.724	0.558
J ₃	0.876	0.676	0.654	0.167	0.354	0.418
J ₄	0.320	0.545	0.404	0.814	0.514	0.685
J ₅	0.253	0.260	0.400	0.835	0.813	0.678
J ₆	0.420	0.400	0.442	0.737	0.784	0.516
J ₇	0.513	0.818	0.547	0.545	0.025	0.516
J ₈	0.312	0.758	0.465	0.747	0.298	0.604

Bu adımda n=8 olmak koşuluyla ilk olarak Eşitlik (9)'u ifade eden A⁺= [(1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1), (1,1,1)] ile BP İdeal Çözümlerin hesaplanması gerekmektedir. Örneğin; J₁ kriteri için işletme 1'in pozitif ideal çözümünün hesaplanmasında Vertex Metodu'na ihtiyaç duyulmuş ve Tablo 7'deki ilgili hücrenin değerlerinden

yararlanılarak; d(i₁, i⁺): $\sqrt{(1/3) [(1-0.4)^2 + (1-0.67)^2 + (1-0.87)^2]}$ = 0.40 (*) sonucuna ulaşılmıştır.

Benzer şekilde n=8 olmak koşuluyla negatif ideal çözümden uzaklığının ölçülmesinde Eşitlik (10)'u ifade eden A⁻ = [(0,0,0), [(0,0,0), [(0,0,0), [(0,0,0), [(0,0,0), [(0,0,0), [(0,0,0), [(0,0,0)]]]]]]]] 'den yararlanılarak Vertex Metodu'nun

kullanılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Örneğin; J_1 kriteri için işletme 1'in negatif ideal çözümden uzaklığının hesaplanmasında Tablo 7'deki ilgili hücrenin değerleri Vertex Metodu'nda kullanılarak $d(i_1, i^-): \sqrt{(1/3) [(0-0.4)^2 + (0-0.67)^2 +$

$(0-0.87)^2] = 0.674 (**)$ sonucuna ulaşılmıştır. Bu adımın ardından son olarak alternatiflerin pozitif ve negatif toplam uzaklıklarının hesaplanması ve yakınlık kat sayısının belirlenmesi gerekmektedir.

Tablo 9. Alternatif İşletmelerin Pozitif ve Negatif Mesafeleri

Table 9. Positive and Negative Distances of Alternative Businesses

	d_i^+	d_i^-	CC_i
İşletme 1 (I_1)	3.574*	5.111**	0.588
İşletme 2 (I_2)	4.178	4.221	0.502
İşletme 3 (I_3)	4.043	4.441	0.523

*İşletme 1'e ait pozitif mesafe değerine, Tablo 8'den yararlanılarak $\sum d(i_1, I^+)$ işlemiyle ulaşılmıştır. $3.574 = (0.40 + 0.480 + 0.876 + 0.320 + 0.253 + 0.420 + 0.513 + 0.312)$.

**İşletme 1'e ait negatif mesafe değerine ise yine Tablo 8'den yararlanılarak $\sum d(i_1, I^-)$ işlemiyle ulaşılmıştır. $5.111 = (0.674 + 0.592 + 0.167 + 0.814 + 0.835 + 0.737 + 0.545 + 0.0747)$.

Yakınlık katsayı değerlerine ise Eşitlik (13)'de yer aldığı şekliyle $d_i^- / (d_i^+ + d_i^-)$ formülasyonunun uygulanması ile ulaşılmıştır. Örneğin İşletme 1'in yakınlık kat sayı değeri $5.111 / (5.111 + 3.574) = 0.588$ olarak belirlenmiştir. Bu değerler

çalışmanın nihai sonucuna götüren ve alternatiflerden arasından karar vermeyi sağlayacak olan değerlerdir.

Yakınlık katsayı değerlerinin gösterdiği üzere, yatırım destek teşviği alan firmalardan potansiyel başarısı en yüksek olan 0.558 katsayı değeriyle İşletme 1 olarak belirlenmiştir. Yani otomotiv endüstrisinde faaliyet gösteren ve teşvik alan bu işletme, belirlenen sekiz kriter doğrultusunda süreci daha başarılı yönetirken, sıralamayı alüminyum sektöründe faaliyet gösteren işletme ve plastik sektöründe faaliyet gösteren işletme takip etmiştir.

5. Sonuç ve Değerlendirme

Çalışmada ilk olarak "Endüstri 4.0 teknolojilerinin imalat şirketlerinde uygulanması için kritik başarı faktörleri nelerdir?" sorusuna cevap bulunmuştur. Üç uzman karar verici tarafından, literatürden oluşturulan kriterler neticesinde Tablo 3'de görüldüğü şekliyle en önemli kriter, daha etkin ve verimli üretim ağını kurabilmelerine yardımcı olan teknolojilerin ve nihayetinde bu teknolojilerin temelini oluşturacak bilgi sistemlerinin kurulması olarak belirlemiştir. Böylelikle karar vericilerin değerlendirmeleri sonucunda işletmenin teknolojik ve bilişim alt yapısının, yeni teknolojilerin ve sistemin birbirine bütünleştirmenin, genel işletme yapısından ve organizasyon yapısından daha önemli görüldüğü tespit edilmiştir.

Diğer önemli ve ikinci yüksek düzeydeki başarı kriteri, derin birleşme olarak belirlenmiştir. Sürecin doğru yürütülmesi ve işletmelerin yeni endüstriyel dönemde başarılı olması için aynı amaca hizmet edecek şekilde tüm birimlerin birbiriyle bütünleşmesi (entegrasyonu) uzmanlarca çok önemli görülmüştür. Çünkü birimlerin birbirlerini destekleyecek paralel davranışlarda bulunması sürecin başarısı için gerekli bir unsurdur. Üçüncü başarı kriteri olarak belirlenen esneklik, organizasyonların değişime olan yaklaşımlarını ve bu doğrultudaki adaptasyonlarını gösteren itici bir güçtür. Esnek yapıdaki işletmelerin alacakları kararlara ve olası yenilenme ihtiyacına cevap verme noktasında doğru adımlar dışında daha hızlı davranarak başarılı olma potansiyelinin yüksek olduğu söylenebilir. Araştırmada önem sırasına göre diğer 5 başarı kriteri; etkin veri kullanımı, siber güvenlik, strateji ve organizasyon, kalifiye iş gücü ve akıllı ürünler olarak değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda bilgi teknolojilerinin kullanımının da artması ile işletmeye dair binlerce belki de milyonlarca verinin üretilmesi, bu verilerin de alınacak kararlar için etkin kullanımın sağlanması ve

güvenlik önlemlerinin de alınma ihtiyacı karar vericiler tarafından önemli görülmüştür. Özetle, yapılan işlemler sonucunda ortaya çıkan kritik başarı sıralaması, işletmelerdeki yeni teknolojik yapılanmanın başarılı uygulanması ile şirketin kendi organizasyon yapısını daha kolay değiştirebileceği ve stratejilerini belirli yönde kurabileceği fikri hakim olmuştur. Sonuç olarak karar vericiler tarafından öncelik, teknoloji ve bilgi sistemleri alt yapısına verilmiştir.

Bir diğer açıdan firmaların endüstri 4.0 süreç yapılanmasına olan girişimleri ve bu konuda alacakları teşvikler büyük önem kazanmaktadır. Endüstri 4.0'ın verimlilik, çeşitlik, proaktiflik ve yüksek rekabet edilebilirlik gibi çeşitli yenilikler getirebilmesi sebebiyle işletmeler için böyle bir değişim ve dönüşüm ihtiyaç haline gelmiştir. Yeni sanayileşme döneminde ifade edildiği gibi yüksek teknolojiye olan gereksinim, firmaları yapacakları yatırımlar noktasında zorlayabilmektedir. Bu sebeple alacakları teşviklerle oluşturacakları yol haritaları büyük öneme sahiptir. Buradan hareketle çalışmada aynı ölçekli üç firmanın proje sürecini tamamlamasıyla teşvik sonrası durumları değerlendirilmek istenmiştir. Çalışmada böyle bir projelendirmenin işletmelerin süreçlerine ne yönde olumlu etkide bulunduğu ve hangi işletmede daha fazla yol alındığı belirlenmiştir. Çalışma sonucunda otomotiv yan sanayi sektöründe faaliyet gösteren işletme (I_1)'nin daha yüksek yakınlık katsayı değerine (0.588) sahip olması sebebiyle aldığı teşviği belirlenen kriterler çerçevesinde daha başarılı kullandığı ve mevcut durumunun Endüstri 4.0 süreci için daha iyi seviyede olduğu belirlenmiştir. Çalışmadaki diğer iki işletme içinde de alüminyum sektöründe yer alan işletmenin (I_3), plastik sektöründe yer alana göre (I_2), aldığı teşvik sonrası Endüstri 4.0 sürecinde daha başarılı olduğu görülmüştür. Uzmanlar tarafından yapılan değerlendirmelerle ulaşılan bu yakınlık katsayı değerlerinin

Chen- Tung vd. (2006)'nin çalışmasında yer aldığı şekliyle 0.4-0.59 aralığında olması nedeniyle tüm işletmelerin başarılı olduğu ifade edilebilir; ancak kat sayı değerlerinin 0.6 üzerinde olması işletmelerin bu süreçte daha başarılı olacağına bir göstergesidir. Aynı zamanda sonuçlar, işletmelerin bugünkü mevcut durumlarını gösteriyor olsa da üç işletmenin araştırmada yer alan sekiz başarı kriteri doğrultusunda daha çok gelişmeye imkan verecek şekilde hareket etmesi ile sürecin daha yüksek seviyedeki başarısı da kaçınılmaz olacaktır. Özellikle bu çalışmada yüksek ağırlıklı başarı kriterlerinden olan bilgi sistemleri ve teknolojik yapılanma, derin birleşme, esneklik ve bilgi güvenliğine olan yaklaşımların daha çok geliştirilmesinin sonucunda işletmelerin endüstri 4.0 sürecini daha iyi yönettiklerini gösteren yakınlık katsayı değerleri de artacaktır.

Ayrıca araştırmada kullanılan Aralık Tipi 2 Bulanık TOPSIS yöntemi sonucundaki verilerin benzer çalışmalarda temel alınan kritik faktörlere ve karar vericilerin sayısındaki artışa bağlı olarak değişebilme ihtimali söz konusudur. Bu sebeple çalışmanın benzer projelerde yer almış olan daha fazla sayıdaki karar vericiye uygulanmasının ve olası sonuçların karşılaştırılmasının çalışmayı zenginleştirebileceği düşünülmektedir. Diğer açıdan çalışmada yer alan otomotiv yan parça, alüminyum ve plastik sektörlerindeki işletmelerin yanında, aynı işletme ölçeğindeki benzer teşvikleri alan farklı üretim sektörlerindeki işletmelerde de uygulamanın yapılmasının ve yer alan sektörlerin endüstri 4.0 sürecindeki mevcut durumlarının karşılaştırılmasının bu alandaki literatüre katkı sağlayacağı beklenmektedir.

Kaynakça

- Abidin, Z. Z., Selamat, S.R., & Anawar, S. (2019). Multi- Layered based Digital Forensic Investigation for Internet-of-Things: Systematic Literature Review. *International Journal of Computer and Science and Network Security*, 19(9), 156-175.
- Akdil, K. Y., Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy. In *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*, 61-94, Springer, Cham.
- Akbas, H., & Bilgen, B. (2017). An integrated fuzzy QFD and TOPSIS methodology for choosing the ideal gas fuel at WWTPs, *Energy*, (125), 484-49.
- Al Zubayer, A., Ali, S.M., & Kabir, G. (2019). Analysis of supply chain risk in the ceramic industry using the TOPSIS method under a fuzzy environment. *J. Model. Manag.*, (14), 792-815.
- Alçın, S. (2016). Üretim için yeni bir izlek: Endüstri 4.0. *Journal of Life Economics*, (8), 19-30.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The internet of things: a survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787-2805. doi:10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). *The Second Machine Age*. İstanbul: Türk Havayolları Yayınları.
- Calabrese, A., Dora, M., Levaldi Ghiron, N., & Tiburzi, L. (2020). Industry's 4.0 Transformation Process: How to Start, Where to Aim, What to Be Aware of. *Production Planning & Control*, (32), 1-21.
- Chauhan, R., Singh, T., Tiwari, A., Patnaik, A., & Thakur, N. S. (2017). Hybrid Entropy-TOPSIS Approach for Energy Performance Prioritization in A Rectangular Channel Employing Impinging Air Jets, *Energy*, (134), 360-368.
- Chen, C. T. (2000). Extensions of The TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, (114), 1-9.
- Chen- T. C., Lin, C.T., & Huang, S. (2006). A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 102(2), 289-301.
- Cheng, C-Y. (2018). A novel approach of information visualization for machine operations states in industrial 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, (125), 563-573.
- Conti, M., Dehghantaha, A., Franke, K., & Watson S. (2017). Internet of things security and foren-sics: challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*, (78), 1-3.
- Çalık, A. (2019). Yüklenici Değerlendirme sürecinde aralıklı tip-2 bulanık TOPSIS yöntemi uygulaması: küçük ve orta ölçekli işletmelerde (KOBİ'ler) bir örnek olay çalışması. *Iğdır Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (18), 481-501.
- Denizhan, B., Yalçiner A., & Berber, Ş. (2017). Analitik Hiyerarşi Proses ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Proses Yöntemleri Kullanılarak Yeşil Tedarikçi Seçimi Uygulaması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 63-68.
- Hofmann, E., & Rüşch, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, (89), 23-34.
- Ecer, F. (2006). Bulanık ortamlarda grup kararı vermeye yardımcı bir yöntem: fuzzy TOPSIS ve bir uygulama. *İşletme Fakültesi Dergisi*, 7(2), 77 -96.
- Esmer, Y., ve Bağcı, H. (2017). Katılım bankalarında finansal performans analizi: Türkiye örneği, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 8(15), 17-30.
- Fırat S. U., & Fırat, O. Z. (2017a). Sanayi 4.0 devrimi üzerine karşılaştırmalı bir inceleme: kavramlar, küresel gelişmeler ve Türkiye. *Toprak İşveren Dergisi*, 114.
- Fırat, O. Z., & Fırat, S. U. (2017b). Endüstri 4.0 yolculuğunda trendler ve robotlar. *Istanbul University Journal of the School of Business*, 46(2), 211-223. doi: 10.5152/iujbsb.2017.005.
- Foidl, H., & Felderer, M. (2015). Research challenges of Industry 4.0 for quality management. *International Conference on Enterprise Resource Planning Systems*, Hagenberg, Austria: Springer, C. LNBIP 245, 121-137.
- Ghanzafari, M., Rouhani, S., Jafari, M. (2014). A fuzzy TOPSIS model to evaluate the business intelligence competencies of Port Community Systems. *Polish Maritime Research*, 21(2), 279-285.
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*, Springer, Heidelberg.
- Han, H., & Trimi, S. (2018). A fuzzy TOPSIS method for performance evaluation of reverse logistics in social commerce platforms, *Expert Systems With Applications*, (103), 133-145.
- Heidari, S. S., Khanbabaei, M., & Sabzehparvar, M. (2018). A model for supply chain risk management in the automotive industry using fuzzy analytic hierarchy process and fuzzy TOPSIS. *Benchmarking-An International Journal*, 25(9), 3831-3857.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. *49th Hawaii International Conference on System Science*, Koloa, USA. doi: 10.1109/HICSS.2016.488.

- Hoyer, C., Gunawan, I., & Reaiche, C.H. (2020). The Implementation of Industry 4.0—a Systematic Literature Review of the Key Factors. *Systems Research and Behavioral Science*, 37 (4), 557–578. doi:10.1002/sres.2701
- Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., Werner, F., & Ivanova, M. (2016). A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 54(2), 386-402.
- Jain, V., Sangaiah, A. K., Sakhuja, S., Thoduka, N., & Aggarwal, R. (2018). Supplier selection using fuzzy AHP and TOPSIS: a case study in the Indian automotive industry. *Neural Computing and Applications*, 29(7), 555-564.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (April, 2013). Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0. *Acatech National Academy of Sciences and Engineering Report*.
- Kaya, İ., Çolak, M., & Terzi, F. (2019). A comprehensive review of fuzzy multi criteria decision making methodologies for energy policy making. *Energy Strategy Reviews*, 24, 207-228.
- Kekilli, E., Cebeci, U. & Silay, L. (2021). Selection of VFQ Consultant by Using Integrated Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS. *European Journal of Science and Technology*, (24), 262-267.
- Khoshi, A., Gooshki, H. S., & Mahmoudi, N. (2018). The data on the effective qualifications of teachers in medical sciences: An application of combined fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods. *DATA IN BRIEF*, (21), 2689-2693.
- Kiraz, A., Canpolat, O., Erkan, E. F., & Albayrak, F. (2018). Evaluating R&D projects using two phases fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods, *European Journal of Science and Technology*, (14), 49-53.
- Koçak, A., & Diyadin, A. (2017). Sanayi 4.0 geçiş süreçlerinde kritik başarı faktörlerinin DEMATEL yöntemi ile değerlendirilmesi. *Ege Akademik Bakış*, 18(1), 107-120.
- Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., Schmitt, K., Schmitz, E., & Schröter, M. (October, 2015). *Industrie 4.0 Readiness*. VDMA's IMPULS-Stiftung Report.
- Liu, C., & Xu, X. (2017). Cyber-physical machine tool – the era of machine tool 4.0. *The 50th Crp Conference on Manufacturing Systems - Procedia CIRP*, (63), 70–75.
- Majd, M. M., Ftemi, A., & Soltanpanah, H. (2014). The risk analysis of oil projects using fuzzy TOPSIS technique (Case Study:18-inch pipeline repair Project from Chesme Khosh to Ahwaz, *Int. J. Basic Sci. Appl. Res.*, 5(3), 281-285.
- Maghsoodi, A. I., & Khalilzadeh, M. (2017). Identification and Evaluation of Construction Projects' Critical Success Factors Employing Fuzzy-TOPSIS Approach. *KSCE J. Civ. Eng.*, (22), 1593–1605.
- Memari, A., Dargi, A., Jokar, M. R. A., Ahmad, R., & Rahim, A. R. A. (2019). Sustainable supplier selection: A multi-criteria intuitionistic fuzzy TOPSIS method. *J. Manuf. Syst.*, (50), 9–24.
- Miç, P., & Antmen, Z. F. (2019). A healthcare facility location selection problem with Fuzzy TOPSIS method for a regional hospital, *European Journal of Science and Technology*, (16), 750-757.
- Mohsin, M., Zhang, J.; Saidur, R., Sun, H., & Sait, S.M. (2019). Economic assessment and ranking of wind power potential using fuzzy-TOPSIS approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(22), 22494-22511.
- Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo-Giraldo, S., Tobon-Valencia, E., & Eburdy, R. (2020). Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs. *International J. of Prod. Research*, 58,(5), 1384–1400. doi:10.1080/00207543.2019.1636323.
- Nädäban, S., Dzitac, S., & Dzitac, I. (2016). Fuzzy TOPSIS: A general view. *Procedia Computer Science*, 91, 823-31.
- Nwaiwu, F., Duduci, M., Chromjakova, F., & Otekhile, C.A.F. (2020). Industry 4.0 Concepts within the Czech SME Manufacturing Sector: An Empirical Assessment of Critical Success Factors. *Business: Theory and Practice*, 21(1), 58–70.
- Özdemir, M. (2018). *TOPSIS; Operasyonel, Yönetmel ve Stratejik Problemlerin Çözümünde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri*, Edt. Yıldırım, B. F., & Önder, E, Dora Yayıncılık, Bursa.
- Park, C-J., Kim, S-Y., & Nguyen, M.V. (2021). Fuzzy TOPSIS application to rank determinants of employee retention in construction companies: South Korean case, *Sustainability*, 13, 5787.
- Platform Industrie 4.0. (2014). Umsetzungsstrategie Industrie 4.0. Erişim <https://www.plattform-i40.de/umsetzungsstrategie-industryie-40-0> (Erişim Tarihi: 22.05.2019).
- Pozzi, R., Rossi, T., & Secchi, R. (2020). Industry 4.0 technologies: critical success factors for implementation and improvements in manufacturing companies, *Production Planning&Control*. <https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1891481>.
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenora, R. (2016). A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond changeable, agile. Reconfigurable & Virtual Production. *Procedia CIRP*, 52, 173–178.
- Reddy, A. S; Kumar, P. R; & Raj, P. A. (2019). Entropy-based fuzzy TOPSIS framework for selection of a sustainable building material. *International Journal of Construction Management*, doi.org/10.1080/15623599.2019.1683695.
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A complex view of Industry 4.0, *SAGE Open*, 6(2), 1-11.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*. Boston Consulting Group Report, 1-14.
- Sağır, H., & Doğanalp. B. (2016). Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Perspektifinden Türkiye İçin Enerji Kaynakları Değerlendirmesi. *Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11(1), 243-254.
- Sarvari, P. A., Ustundag, A., Cevikcan, E., Kaya, I., & Cebi, S. (2018). Technology roadmap for Industry 4.0, in Ustundag, A. and Cevikcan, E. (Eds), *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*. Springer, Heidelberg, 95-103.
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 Readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, (52), 161-166.
- Solangi, Y. A., Tan, Q., & Mirjat, N.H.; et al. (2019). Evaluating the strategies for sustainable energy planning in Pakistan: An integrated SWOT-AHP and Fuzzy-TOPSIS approach. *Journal of Cleaner Production*, 236. Article Number: UNSP 117655.
- Sony, M. (2018). Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions. *Production & Manufacturing Research*, 6(1), 416-432.

- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, (40), 536–541.
- Thames, L., & Schaefer, D. (2016). Softwaredefined cloud manufacturing for industry 4.0. *Procedia CIRP*, (52), 12-17.
- TÜBİTAK. (2016). Yeni endüstri devrimi: akıllı üretim sistemleri teknoloji yol haritası. Erişim: <http://www.tubitak.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 17.05.2019).
- Yacan, İ. (2016). *Eğitim Kalitesinin Belirlenmesinde Etkili Olan Faktörlerin Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS Yöntemi ile Değerlendirilmesi*. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, 90s.
- Yao, X., Zhou, J., Zhang, J., & Boër, C. R. (2017). From intelligent manufacturing to smart manufacturing for industry 4.0 driven by next generation artificial intelligence and further. *2017 5th International Conference on Enterprise Systems*, 22–24, IEEE, Beijing, China.
- Yıldız, A., Karakoyun, F., & Parlak, I.E. (2018). The most suitable mobile RFID reader selection by using Interval Type-2 Fuzzy TOPSIS Method. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(3), 717-729 .
- Yurdakul, M., & İç, Y. S. (2018). Development of a multi-level performance measurement model for manufacturing companies using a modified version of the fuzzy TOPSIS approach. *Soft Computing*, 22 (22), 7491-7503.
- Wanke, P., Barros, C. P., & Chen, Z. (2015). An analysis of Asian airlines efficiency with two-stage TOPSIS and MCMC generalized linear mixed models. *International Journal of Production Economics*, (169), 110-126.
- Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing smart factory of Industrie 4.0: an outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 1-10.
- Wang, G., Gunasekaran, A., Ngai, E. W., & Papadopoulos, T. (2016). Big data analytics in logistics and supply chain management: certain investigations for research and application. *International Journal of Production Economics*, 176(1), 98-110.
- Wood, D. A. (2016). Supplier selection for development of petroleum industry facilities, applying multi-criteria decision making techniques including fuzzy and intuitionistic fuzzy TOPSIS with flexible entropy weighting. *Journal of Natural Gas Science and Eng.* (28), 594-612.