

Üretim İşletmelerinin Endüstri 4.0 Entegrasyonunun Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi

Adem ERİK¹, Yusuf KUVVETLİ*¹

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 25.04.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

Öz

İnternetin, sistemlerin fiziksel ve siber entegrasyonu ile dönüşümü dördüncü sanayi devrimi olarak anılan Endüstri 4.0 (I4.0) kavramını ortaya çıkarmıştır. Birçok teknolojinin bir araya gelmesi bulut teknolojisi, dijitalleşme, büyük veri ve nesnelerin interneti gibi kavramlar ile yeni bir üretim modeli oluşmaktadır. I4.0 tabanlı bir üretim modeline geçmek isteyen bir işletme için önemli bir süreç ve teknoloji hazırlığı ve altyapı ihtiyacı oluşmaktadır. Bu nedenle, işletmeler dönüşüm için öncelikle bu modeli içeren yönetim şekli, süreç ve teknolojilerine olan uyumu sağlamak zorundadır. Bu çalışmada, farklı üretim firmalarında gerçekleştirilen yüz yüze görüşmeler sonucunda elde edilen verilerle işletmelerin I4.0 entegrasyon yeteneği analiz edilmiştir. Veriler, veri zarflama analizi ile değerlendirilmiş ve işletmelerin I4.0 uyum yeteneği göreceli olarak saptanmıştır. İşletmeler değerlendirilirken bilgi teknolojileri, araştırma-geliştirme faaliyetleri, müşteri ilişkileri, finansman, kalite yönetimi, planlama, maliyet yönetimi vb. birçok farklı başlık altında analiz edilerek detaylı bir değerlendirme yapılması sağlanmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda incelenen 24 imalat işletmesinin 13'ü dönüşüm için etkin olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, Endüstri 4.0 Entegrasyonu, Veri zarflama analizi, Üretim yönetimi

Evaluation of Industry 4.0 Integration of Manufacturing Enterprises with Data Envelopment Analysis

Abstract

The internet and the transformation of physical and cyber systems' integration have created Industry 4.0 (I4.0), referred to as the fourth industrial revolution. Combining many technologies forms a new production model with concepts such as cloud technology, digitalization, big data, and the internet of things. A necessary process and technology preparation, and infrastructure need arise for an enterprise that wants to switch to an I4.0-based production model. For this reason, businesses must first ensure compliance with the management style, processes, and technologies that include this model for transformation. In this study, the I4.0 integration capability of the enterprises was analyzed with the data obtained from face-to-face interviews conducted in different manufacturing companies. The data were evaluated with the Data Envelopment Analysis technique, and the I4.0 compliance capability of the enterprises was determined relatively. A detailed evaluation has been achieved by analyzing various

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Yusuf KUVVETLİ, ykuvvetli@cu.edu.tr

aspects such as information technologies, R&D activities, customer relations, financing, quality management, planning, and cost management. As a result of the evaluation, it was concluded that 13 of the 24 manufacturing enterprises examined were effective for transformation.

Keywords: Industry 4.0, Industry 4.0 Integration, Data envelopment analysis, Production management

1. GİRİŞ

Ürün ve hizmet ortaya koyan işletmeler arasında var olan rekabet dijitalleşme, siber fiziksel sistemler, büyük veri, nesnelerin interneti vb. I4.0 kavramlarının etkisini göstermesi ile farklı bir eksene taşınmaya hazırlanmaktadır. İlk olarak Almanya'da açıklanan I4.0, akıllı fabrikalar kurmak için siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti (IoT), bulut bilişim gibi üretim teknolojilerin geliştirilmesi ve dönüştürülmesi olarak tanımlanmaktadır [1]. Artan rekabet özellikle üretim işletmelerini üretim alışkanlıklarını ve teknolojisini değiştirmeye zorlamaktadır. I4.0 teknolojileri ile işletmelere dijital çözümler sunarken şirketlerin sunulan çözümleri nasıl kullandığı ile ilgili bir anlayış mevcut değildir [2].

I4.0 üretim sistem teknolojilerini akıllı üretim süreçleri ile birleştirerek iş modelleri ve üretim değer zincirleri için yeni bir teknolojik çağ olarak görülmektedir. Bu çağ ile tedarik zincirleri bütünleşik olarak birden çok sektörde küçük, orta ve büyük ölçekli şirketlerdeki fiziksel süreçlerin ve bilgi akışların gerektiği yerde ve zamanda kullanılması sağlanmaktadır [3]. Tüm bu sistem ile sağlanan akıllı üretim, cihazların veya makinelerin geçmiş deneyimlere ve öğrenme kapasitelerine dayalı olarak farklı durumlara ve gereksinimlere göre davranışlarını değiştirmesini sağlamak için belirli temel teknolojiler gerektirir [4].

Akıllı üretimi gerçekleştirmek için gereken teknolojiler, üretim sistemlerine entegre edilerek doğrudan iletişim sağlayan ve zamanında problemlerin çözülmesi ve uyarlanabilir kararların alınmasına olanak tanır. Bazı teknolojiler buna ek olarak gerçek zamanlı, akıllı ve her yerde bulunan endüstriyel uygulamaları hayata geçirmek için deneyimlerden yararlanan yapay zekaya (YZ)

sahiptir [5]. Tüm bu nedenlerden dolayı I4.0 çözümleri yapı bakımından güçlü teknolojik altyapı gerektirmektedir. Bu anlamda, I4.0 entegrasyonunu sağlamak isteyen işletmelerin bilişim ve üretim teknolojilerini geliştirmeleri gerekmektedir.

Bu makalede, Adana çevresinde faaliyet gösteren üretim firmalarından görüşmeler sonucu elde edilen verilerle işletmelerin I4.0'ı uygulayabilme ve entegrasyon yeteneği için değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Toplanan veriler; bilgi teknolojileri, araştırma-geliştirme faaliyetleri, müşteri ilişkileri, finansman, kalite yönetimi, planlama, maliyet yönetimi vb. birçok farklı başlık altında analiz edilmiş ve Veri Zarflama Analizi (VZA) kullanılarak detaylı değerlendirmeler yapılması sağlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

I4.0 tanıtıldığı 2011 yılından bugüne özellikle üretim işletmelerinde yoğun ilgi görmüş ve çeşitli şekillerde işletmelerin bünyelerine kazandırılmaya çalışılmıştır. Özellikle farklı teknolojik altyapısı ve entegrasyon zorlukları barındıran I4.0 teknolojileri için literatürde farklı çerçeveler çizilmiş ve karşılaşılan problemler tartışılmıştır. I4.0'ın yapı taşlarını oluşturan büyük veri ve analizi, otonom robotlar, simülasyon, yatay ve dikey sistem entegrasyonu, endüstriyel IoT, siber güvenlik, bulut teknolojisi, katmanlı üretim ve artırılmış gerçeklik üzerinde durularak işletmelerin I4.0'a geçmeleri için gerekli önerilerde bulunulmuştur [6]. Buna göre işletmeler önceliklerini belirlemeli ve nitelikli işgücünü yükseltmeli, tedarikçiler teknolojilerden yararlanmalı ve son olarak altyapı ve eğitim uyarlanmalıdır [6]. Üretim işletmelerinde kullanılan I4.0 teknolojileri (IoT, siber fiziksel sistemler, bulut tabanlı imalat vb.) ile ilgili yaşanan zorluklar için alternatif bir model önermiş,

yazarlar dokuz farklı boyutta (ürünler, müşteriler, işlemler, teknoloji, strateji, liderlik, yönetim, kültür, insanlar) I4.0 olgunluğu değerlendirmiştir [7]. Geliştirilen model pratik bir araca dönüştürülerek birkaç şirkette test edilmiş ve bir vaka sunulmuştur. Alınan ilk sonuçlar modelin şeffaf, kullanımının kolay ve gerçek üretim ortamlarında uygulanabilirliğini kanıtlamıştır [7]. Farklı bir çalışmada, ürün yaşam döngüsünün kısalması ve işletmelerde bulunan teknolojinin gereken üretim verimi için yeterli olmadığından yola çıkılarak yeni iş modelleri, şirketlerin rekabeti ve inovasyon boşluğu gibi konular tartışılmıştır [8]. Yazarlar zayıf veri yönetiminin maliyetlerini göz önüne aldığı I4.0'ın sunduğu çözümlerin kapsamlı ve uygulanabilir olduğunu ancak teknolojilere geçişin kapsamlı bir strateji gerektirdiği ve veri entegrasyonu, veri güvenliği, geçiş sırasında olabilecek süreç aksaklıkları, malzeme kayıpları gibi konuların dikkate alınması gerekliliğini vurgulamaktadırlar [8]. Son olarak I4.0'ın vaat ettiği bulut bilişim, katmanlı üretim vb. çözümlerin kullanımı için adım adım geçişin uygun olacağı öngörülmüştür [8]. I4.0'ın uygulanabilmesi için üretim operasyonları ve bilgi teknolojisi gibi öncelikli birkaç alan stratejiktir [9]. Bu konuda birkaç kavram ve strateji üzerinde durulmuş ve kapsanmayan alanlar için literatürden seçilen farklı kavram ve stratejiler karşılaştırılmıştır [9]. Elde edilen bulgularda I4.0 ile sektörde sürdürülebilirlik, nitelikli işgücü ve endüstrinin tüm segmentlerinde optimizasyonun sağlanabileceği öngörülmüştür [9]. Norveç'te faaliyet gösteren 4 şirkete yapılan anketler ile I4.0 teknolojilerinin nasıl uygulanabileceği belirlenmeye çalışılmıştır [10]. Elde edilen bulgular I4.0'ın üretim lojistiğinde uygulanabilirliğinin üretim ortamına bağlı olduğunu ve üretim tekrarı az olan şirketlerde malzeme akışının karmaşık olduğu üretim lojistiğinde I4.0 teknolojilerini uygulamada daha az potansiyele sahip olduğunu göstermektedir [10].

Şirket teknoloji seviyeleri I4.0'a geçiş aşamasında önemli bir faktördür [11]. Malezya şirketlerinin teknoloji kullanımları konusunda değerlendirmeler yapmak için borsadaki finansal oranları kullanan

yazarlar aynı zamanda şirketlerin verimliliğini maksimize etmek için şirket girdi ve çıktı ağırlıklarının optimum kontrolünü belirlemeye çalışmışlardır [11]. Lingo paket programında VZA modeli ile çözülen modelde incelenen şirketlerin %44'ünün teknoloji yönünden etkin olduğu görülmüştür [11]. Bir başka çalışmada değişen teknoloji ve iş modellerine karşı işletmelerin adaptasyonu için yazılım sistemleri entegrasyonun öncelikli hale geldiği belirtilmiştir [12]. İşletmelere uygulanan yazılım sistemlerinin entegrasyonlarının iş değerinin tahmini için VZA yöntemi kullanılmış ve işletme entegrasyonunda marjinal faydaların belirlenmesinde VZA yönteminin kullanımı anlatılmaktadır [12]. I4.0'nin son teknoloji incelemesinde, temel tasarım ilkeleri, mimari tasarım tanımlaması, teknoloji eğilimleri ve üreticiler için stratejik bir yol haritası sunulmuştur [13]. Yazar I4.0'ı 12 tasarım ilkesi ve 14 teknoloji trendinden oluşan bütüncül bir değer yaratma sistemi olarak tanımlamıştır [13]. I4.0'a geçişin ilk adımı olarak imalat şirketinin atması gereken her adım, zaman çizelgesi ve her adımla ilişkili maliyet ve faydaları tanımlayan ve planlayan kapsamlı bir stratejik yol haritasının geliştirilmesi olarak belirlenmiştir [13]. Dijitalleşme için çalışan 2 küçük şirket, bir orta ölçekli ve 4 büyük ölçekli şirket için öz denetime dayalı bir değerlendirme yöntemi ile dijitalleşmeye hazır olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır [14]. Ayrıca bir vaka çalışması ile dijitalleşmeye engel olan nedenler, zorluklar ve dijitalleşmeyi kolaylaştırıcıların belirlenmesi amaçlanmıştır [14]. Büyük şirketleri entegrasyon, ortak bir strateji oluşturma, daha yüksek karmaşıklık seviyesi ve farklı hedefler zorlarken veriye dayalı süreçler, tüm şirket türleri için bir boşluk olarak görülmüştür [14]. İmalat sektöründe I4.0 benimsenmesini ölçmek için AB ülkeleri genelinde I4.0'ı temsil eden faktörlerin varlığı analiz edilmiştir [15]. Analizde AB düzeyinde ülkeler arasında büyük farklılıklar gösteren 5 homojen ülke grubu bulunmuştur. Ayrıca analiz, büyük verilerle başa çıkmak için analitik yeteneklerle birleştirilmiş dijital bir altyapının varlığının, her ülkede I4.0'a hazırlığı gösteren iki boyut olarak ortaya çıktığını kanıtlamıştır [15]. I4.0'ın benimsenmesinin teknoloji sağlayıcılar

açısından sentezlemiş ve Portekiz’de teknoloji kümesinde bulunan 10 şirkette olay araştırılması yapılmıştır [16]. I4.0 teknolojilerinin (siber fiziksel sistemler, bulut bilişim, IoT, vb.) benimsenme konusundaki temel zorlukların üretilen verilerin analizi, yeni teknolojilerin mevcut ekipman ve işgücü ile entegrasyonu ve hesaplama sınırlamaları olduğunu belirlenmiştir [16]. Çalışmada iç kaynakların, ortaklarının ve diğer kümelenme şirketlerinin tamamlayıcı faaliyetleri ve bütünlük çalışmaları ile şirketin iş modelinde değişiklikler öngörülmüştür [16].

I4.0 teknolojilerinin uygulanması için öngörülen çerçeveler yapılan birçok çalışmada farklı olmaktadır. I4.0 içerisinde tanımlanan ön ve uç teknolojiler için kavramsal bir çerçeve önerilmiş, akıllı üretim, akıllı ürünler, akıllı tedarik zinciri ve akıllı çalışma için IoT, bulut hizmetleri, büyük veri ve analitik temel teknolojileri dikkate alınmıştır [2]. Ele alınan teknolojilerin uygulanması için 92 imalat işletmesinde anket gerçekleştirilmiştir. İncelenen örnekte büyük veri ve analitiğinin kullanımının hala düşük olduğu için I4.0 teknolojilerinin şirketlere uygulanmasının zor olduğu ortaya konmuştur [2]. Doğrudan yabancı yatırım barındıran fabrikaların yan kuruluşlarında gelişmiş üretim teknolojilerinin (GÜT) etkisi araştırılmıştır [17]. Macaristan’da bu konu ile ilgili bilgi toplayan yazar, üretim kapasitesinin tüm bileşenlerinin olağanüstü bir şekilde geliştirildiğini tespit etmiş ve GÜT’ün belirli Ar-Ge faaliyetlerini destekleyerek yan kuruluş düzeyindeki Ar-Ge yeteneklerinin yükseltilmesini teşvik ettiği belirlenmiştir [17].

I4.0 teknolojilerinin uygulanma stratejileri farklı üretim teknikleri ile kesişmektedir. Bu durum uygulanabilirliği etkilemekte ve üretim teknikleri arasındaki uyumun sağlanmasını gerektirmektedir. Yalın üretim ile I4.0’ın çok farklı stratejiler kullanmasına karşılık bazı ortak noktaların varlığı vurgulanmıştır [18]. Çalışmada yalın üretim prensipleri baz alınarak I4.0 teknolojileri ile ilişkisi ortaya konmuştur. Buna göre tam zamanlı üretim ve Jikoda tekniğinin I4.0 teknolojileri tarafından güçlü bir şekilde desteklendiğini ancak israf ve işgücü

kazancı ve ekip çalışması konusunda I4.0 teknolojileri çok az veya hiç destek sağlayamamıştır [18]. Bu nedenle I4.0 teknolojileri tüm yalın tekniklerini destekleyememekte ve yalın tekniklerin bazılarının hala uygulanması gerekliliği doğmaktadır [18]. İmalat şirketlerinin iş süreçlerinde teknolojileri etkinleştiren I4.0 uygulamalarının neler olduğu üzerine detaylı bir literatür araştırması içermektedir. Yazarlar 186 makaleyi analiz ederek üretim çizelgeleme ve kontrolün en sık araştırılan süreç olduğunu görmüşlerdir [19]. Aynı zamanda hizmet sağlama ve döngüsel tedarik zinciri yönetiminde de artan bir eğilim olduğu, uygulamaların geniş bir süreç yelpazesini kapsayan IoT, büyük veri analitiği ve bulut bilişimin kapsamlı birleşik kullanımını, blok zincir teknolojisinin ise çok fazla tartışılmadığı belirlenmiştir [19].

Bir çalışmada, 2008-2018 yılları arasında yayınlanan 35 makale incelenerek sürdürülebilir üretim kavramlarının ve yeni teknolojilerin kullanılmasının I4.0’ın tüm sürdürülebilirlik boyutları üzerinde entegre bir şekilde olumlu etkilere sahip olabileceği belirlenmiştir [20]. I4.0 gündemindeki sürdürülebilir hedeflere ulaşılmasını sağlamak için sürdürülebilir iş modelleri geliştirmek, sürdürülebilir ve döngüsel üretim sistemleri; sürdürülebilir tedarik zincirleri sürdürülebilir ürün tasarımı gibi konularda politika geliştirilmesini öngörmüştür [20]. Akademi ve uygulama alanından 76 uzmanı içeren Delphi tabanlı bir senaryo analizi yapan yazarlar, ortaya çıkan iş modelleri, büyüklük, giriş engelleri, dikey entegrasyon, kira dağılımı ve faaliyetlerin coğrafi konumu açısından en yaygın beklentilerin yanı sıra tartışmalı konuları vurgulamaktadır [21]. Çalışma sonunda talep özellikleri, değer zinciri katılımcıları arasında verilerin şeffaflığı, katmanlı üretimin ve gelişmiş robotiğin olgunluğu ve akıllı ürünlerin yayılması en yaygın beklentiler olarak belirlenmiştir [21].

I4.0 teknolojilerinin imalat sektöründe uygulanmasının önündeki engeller, gelişmiş ve gelişmekte olan ekonomiler bağlamında incelenmiştir [22]. Kaynak kıtlığının yanı sıra

dijital bir stratejinin olmaması en önemli engel olarak belirlenmiş ve gelişmekte olan ülkelerde Sanayi 4.0 ile ilgili koordineli ulusal politikaların eksikliğinden kaynaklanan ve firmaların I4.0 devrimini tam olarak yaşamalarını engelleyebilecek teknolojik yeniliğin yayılmasındaki zorlukları vurgulanmıştır [22]. I4.0'ın benimsenmesinin 10R (Reddet, Yeniden Düşün, Azalt, Yeniden Kullan, Onar, Yenile, Yeniden Üret, Yeniden Kullan, Geri Dönüştür ve Kurtarma) ile gelişmiş üretim yetenekleri üzerinde ne kadar büyük bir etkiye sahip olduğu ve bunun bir I4.0 dağıtım sisteminin düzenleyici etkisi altında sürdürülebilir kalkınma üzerindeki sonucu incelenmiştir [23].

3. YÖNTEM

3.1. Veri Zarflama Analizi

İlk olarak 1957'de bütün ekonomiye tek sektörden uygulanması için bir model ortaya atan Farrell bu modelin herhangi bir etkinliğin ölçümünde etkinliğin kendi arasında ayrılabilmesini öne sürmüştür [24]. VZA ise Charnes, Cooper ve Rhodes tarafından 1978'de aynı çeşit mal ve hizmet üretimi yapan karar vericilerin görelî faaliyetlerinin tespit edilmesi için oluşturulan bir yöntemdir [25]. VZA doğrusal programlamanın özel bir uygulamasıdır ve aynı amaçlara sahip işletmelerin verimliliğini görelî bir şekilde ölçmektedir. Birçok uygulama alanı olan VZA başlıca hastaneler, okullar, bankalar, üretim şirketleri, mahkemeler vb. yerlerde uygulanabilmektedir. Bu yerlerdeki uygulamalarda benzer amaçlı departmanların karşılaştırmaları ile göreceli etkinlik değerleri elde edilmektedir [26].

Veri zarflama analizinin uygulanabilmesi için karar noktalarının seçimi, girdi ve çıktı faktörlerinin seçimi, modelin seçimi, sonuçların yorumlanması adımları gerekmektedir [27]. VZA karşılaştırmalı bir analiz olduğu için doğru karar birimlerin seçilmesi oldukça önemlidir. Bundan dolayı karar noktaları kullandıkları girdiler ve ürettikleri çıktılar yönünden benzer olmalı, tüm karar noktaları için benzer kaynaklar seti olmalı ve tüm karar noktaları benzer çevre koşullarında

çalışıyor olmalıdır [28]. Analizde kullanılan çıktılar birimlerin maddi sonuçlarını gösterdiği için karar birimlerinin amaçları yansıtılmalıdır [29].

Kullanıldığı alana ve varsayımlarına göre farklı VZA yöntemleri uygulanabilmektedir. Seçilecek yöntemin belirlenmesinde girdi ve çıktı üzerindeki denetim durumları göz önüne alınmaktadır. Girdiler üzerinde kontrolün az olması halinde çıktı odaklı modelin kullanılması, çıktılar üzerindeki kontrolün az olması halinde girdi odaklı model oluşturulmalıdır. Toplamsal modeller herhangi bir odak olmaması veya karar vericilerin etkinlikleri önemsememesi durumunda kullanılmalıdır [30]. VZA modellerinin çözümlerinde MaxDEA, DEA Solver, EMS ve DEAP gibi paket programlar sıklıkla kullanılmaktadır [27].

3.2. Charnes-Cooper-Rhodes (CCR) Modeli

Veri zarflama analizinde m adet girdi ve s adet çıktıya sahip olan n adet karar verme biriminin her biri için, i. karar verme biriminin i. girdi miktarı $X_{ij} \geq 0$ ve j'inci karar verme birimi tarafından üretilen r. çıktı miktarı $Y_{rj} > 0$ 'dır.

Girdi yönelimli kesirli VZA modeli [31];

$$\text{Max} \frac{\sum_{r=1}^s a_r \cdot Y_{rk}}{\sum_{i=1}^m b_i \cdot X_{ik}} \quad \begin{array}{l} i=1, \dots, m; \\ r=1, \dots, s; \\ j=1, \dots, n \end{array} \quad (1)$$

$$\frac{\sum_{r=1}^s a_r \cdot Y_{rj}}{\sum_{i=1}^m b_i \cdot X_{ij}} \leq 1 \quad \begin{array}{l} i=1, \dots, m; \\ r=1, \dots, s; \\ j=1, \dots, n \end{array} \quad (2)$$

$$a_r \geq \varepsilon > 0 \quad r=1, \dots, s \quad (3)$$

$$b_i \geq \varepsilon > 0 \quad i=1, \dots, m \quad (4)$$

Modelde;

a_r : k karar birimi tarafından r. çıktıya verilen ağırlık,

b_i : k karar birimi tarafından i. girdiye verilen ağırlık,

Y_{rk} : k karar birimi tarafından üretilen r. çıktı,

X_{ik} : k karar birimi tarafından kullanılan i. girdi,

Y_{rj} : j. KVB tarafından üretilen r. çıktı,

X_{ij} : j. KVB tarafından kullanılan i. girdi,
 ϵ : Pozitif çok küçük bir değer,
Max: En büyükleme olarak ifade edilir.

VZA'da n adet KVB için n adet model oluşturulur ve KVB'lerin her biri için görece etkinliğin bulunabilmesi için n tane en iyileme modelinin çözülmesi gerekir. Modellerin amaç fonksiyonu Eşitlik 1'de gösterilmiştir. Bu denklemde k tane karar verme birimi için toplam ağırlıklandırılmış sanal çıktıların, toplam ağırlıklandırılmış sanal girdilere oranının maksimize edilmesidir. Problemin çözümü içerisinde, her bir karar birimi kendi toplam faktör verimliliğini maksimum yapacak ağırlıkları belirler. Bu ağırlıklar Eşitlik 2'de gösterilmiş ve girdiler için $b_{1k}^*, b_{2k}^*, \dots, b_{mk}^*$, çıktılar için $a_{1k}^*, a_{2k}^*, \dots, a_{sk}^*$ şeklinde gösterilmiştir. Eşitlik 3 ve 4'te bu ağırlıkların pozitif küçük bir değerden daha büyük olması gerekliliği belirtilmiştir. Daha sonra bu ağırlık değerleri kullanılarak optimum etkinlik değeri olan θ^* elde edilir. Model KVB'lerin her biri için hesaplanan bu θ^* oranının 1 değerinin geçmediğini ve en büyük amaç fonksiyon değerinin 1 olabileceğini göstermektedir.

3.3. Karar Verme Birimlerin Seçimi

VZA, karar verme birimleri arasında aynı girdileri kullanarak benzer çıktılar üreterek etkinlik analizi yapabilmektedir. Ele alınan karar verme birimleri arasında performans farklılıkları vardır. Kullanılan KVB'ler aynı piyasa şartlarında, aynı amaçlarla aynı veya benzer işler yapmalıdır. KVB seçimlerinde ya da kararlarında iki şeye dikkat edilmelidir. Bunlardan birincisi KVB'ler kullandıkları kaynaklarla ürettikleri çıktılardan sorumlu olarak tanımlanmalıdır. Diğeri, kullanılan KVB sayısı etkinlik sonuçlarının anlamlı çıkabilmesi için yeterli sayıda olmalıdır.

KVB sayısı ile ilgili Norman kullanılan girdi ve çıktı sayısının çokluğuna göre en az 20 KVB'nin gerekliliğini belirtmiştir [32]. Bu çalışmada incelenen 24 KVB Adana üretim işletmelerinden

seçilmiş olup işletmeler kâr amacı güden ve benzer çıktılar üreten işletmelerdir.

3.4. Girdi ve Çıktıların Seçimi

Girdi ve çıktıların seçimi VZA'nın uygulanabilirliği açısından çok önemlidir. Yapılan çalışmada üretim işletmelerinin yeni endüstri devrimi teknolojileri veya uygulamaları ile ilgili çalışmalarının ne düzeyde oldukları tek çıktı olarak seçilmiş ve bununla ilgili işletmelerdeki yazılımsal, donanımsal ve süreçsel altyapılar girdi olarak seçilmiştir. Özellikle süreçleri belli olmayan, teknoloji/bilgi altyapısı yetersiz olan ve yeterli düzeyde donanıma sahip olmayan işletmelerin I4.0 çalışmaları yapması oldukça zordur. Çalışmada işletmelerin her biriminden dijitalleşme, kaynak ölçümü, kurum kültürü, teknoloji altyapısı vb. konuları ele alan 39 farklı girdi kullanılmıştır.

Modele çok fazla girdi veya çıktı eklendiğinde VZA'da etkin veya etkin olmayan birimlerin belirlenmesi zorlaşmaktadır. Aynı zamanda çalışma için veri toplamak zorlaşmaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı çalışmada girdi ve çıktı sayıları belirlenirken eşitlik (5) dikkate alınmıştır. Kullanılan bu eşitlik ile girdi ve çıktı sayısının artırılması KVB sayısına bağlanmıştır.

$$N > (m+s)/2 \quad (5)$$

N: KVB sayısı, m: Girdi sayısı, s: Çıktı sayısı

Çizelge 1'de kullanılan 39 farklı girdi ve 1 çıktı gösterilmektedir. Belirlenen girdiler Adana bölgesinde faaliyet gösteren 24 firmadan elde edilmiştir. Bu girdiler, işletmelerin tüm fonksiyonlarından çalışma amacına yönelik verilerden oluşmaktadır. Dijital dönüşüm süreci boyunca işletmelerin I4.0 teknoloji ve uygulamalarına ne kadar uyum sağladıklarının öğrenilmesi amacıyla Kurumsal Kaynak Planlaması (KKP) süreçleri, kalite, teknoloji altyapısı ve insan kaynağı konuları özellikle ele alınmıştır. Bu konuların değerlendirilmesi için Likert ölçeği ile 1 ile 5 arasındaki puanlarla değerlendirme yapılmıştır. Seçilen bu girdilerin sonucunda tek bir çıktı olan vizyonel I4.0 çalışma düzeyleri belirlenmeye çalışmıştır.

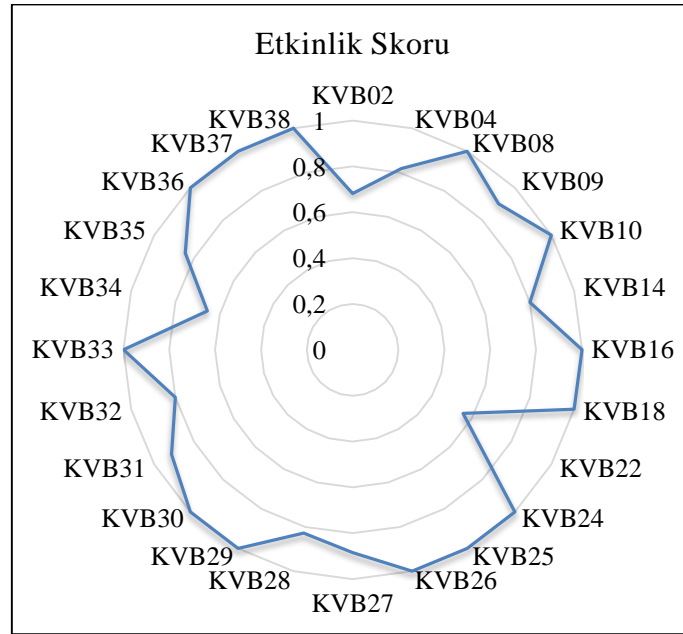
Çizelge 1. Çalışmada kullanılan girdi ve çıktılar

INPT1	Ar-Ge kaynağı
INPT2	Ar-Ge çalışan sayısı
INPT3	İnovasyon becerisi
INPT4	Teknolojik altyapı
INPT5	Finansal araçlarla iletişim
INPT6	Envanterin İzlenebilirliği
INPT7	KKP raporlama
INPT8	Bilgi güvenliği
INPT9	Müşteri İlişkileri Yönetimi (MİY) kullanımı
INPT10	Bilgi Teknolojileri (BT) güncelliği
INPT11	KKP finansal modüllerini kullanabilme
INPT12	KKP muhasebe modüllerini kullanabilme
INPT13	KKP satış ve satın alma modüllerini kullanabilme
INPT14	KKP üretim planlama modülü kullanabilme
INPT15	KKP operasyonlar yönetimi modüllerini kullanabilme
INPT16	İnternet altyapısı
INPT17	Tedarik zinciri yönetimi yazılımı kullanımı
INPT18	Barkod sistemi kullanımı
INPT19	Sipariş sistem verimliliği
INPT20	Kurum web sayfası kullanımı
INPT21	Sürekli eğitim
INPT22	Süreç iyileştirme
INPT23	KKP malzeme yönetim modüllerini kullanabilme
INPT24	Malzeme ihtiyaç planlaması çalışmaları
INPT25	Dijital belge yönetim sistemleri
INPT26	Donanım altyapısı yeterliliği
INPT27	Tedarik zinciri yönetimi
INPT28	Yalın üretim düzeyi

INPT29	Satın alma ve üretim iletişimi
INPT30	Kariyer yönetim sistemi
INPT31	Tedarik zinciri optimizasyonu çalışmaları
INPT32	Verimlilik izleme
INPT33	Makine verimliliği ölçülebilirlik düzeyi
INPT34	Teknolojiye yapılan yatırım düzeyi
INPT35	İş süreçlerinin analiz çalışmaları
INPT36	Eğitim planlaması
INPT37	Kurum teknoloji gelişiminin takip edilmesi
INPT38	Kariyer yönetim sistemi
INPT39	Performans yönetim sistemi
OUTPT1	Vizyonel Endüstri 4.0 çalışma düzeyi

4. BULGULAR

Çalışmada incelenen işletmelerin birbirine göre göreceli etkinlikleri VZA yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. VZA yöntemi bir paket programı olan MaxDEA 8 programı yardımıyla uygulanmıştır. Kullanılan girdi ve çıktılar tüm işletmelerde elde edilebilen, ölçülebilen ve karşılaştırılabilen verilerden oluşmuştur. Yapılan analizlerin sonucu Şekil 1'de gösterilmiş ve yapılan incelemeler sonucu KVB22 0.556 ile etkinlik değeri en düşük olan işletme olurken birden fazla işletme için etkinlik değerinin üst sınırı olan 1 değeri elde edilmiştir.

**Şekil 1.** KVB'lere ait etkinlik skorları

Çizelge 2’de KVB’lere ait performanslar ve sıralamalar verilmiştir. Buna göre 24 işletmenin 13 tanesi görece etkin değerlere sahipken 11 işletme ise görece etkin olmadığı görülmüştür.

Çizelge 2. KVB’lerin performans ve sıraları

Karar verme birimi	Performans	Sıra
KVB02	Etkin değil	22
KVB04	Etkin değil	19
KVB08	Etkin	1
KVB09	Etkin değil	15
KVB10	Etkin	1
KVB14	Etkin değil	20
KVB16	Etkin	1
KVB18	Etkin	1
KVB22	Etkin değil	24
KVB24	Etkin	1
KVB25	Etkin	1
KVB26	Etkin	1
KVB27	Etkin değil	16
KVB28	Etkin değil	18
KVB29	Etkin	1
KVB30	Etkin	1
KVB31	Etkin değil	14
KVB32	Etkin değil	21
KVB33	Etkin	1
KVB34	Etkin değil	23
KVB35	Etkin değil	17
KVB36	Etkin	1
KVB37	Etkin	1
KVB38	Etkin	1

İşletmelerin birbirine göre göreceli olarak elde edilen etkinlik değerleri incelendiğinde etkin olarak elde edilen 13 işletmenin girdi ve çıktı değerlerinin ortalaması işletmeler arasındaki kıyaslama için fikir oluşturmaktadır. Bu ortalama değerlerinin büyük bir çoğunluğuna göre üstünlük sağlayan işletmeler analiz sonucunda etkin olarak bulunmuştur. Çizelge 3’te görülen ortalamalar etkin olan işletmelere ait girdi ve çıktı ortalamalarını göstermektedir. Buna göre bir işletmenin etkin olabilmesi için envanter izlenebilirliği, dijital belge yönetim sistemleri ve vizyonel I4.0 çalışmaya düzeylerinin yaklaşık puanı 4’ten fazla olmalıdır. Ancak bu ortalamaların yalnız birine veya birkaçına bakarak işletmelerin etkinliklerini değerlendirmek her zaman doğru sonuçları vermeyecektir. Genel bir çerçevede bir işletme etkinlik değerini artırmak için bu puanları

baz alarak geliştirmesi gereken noktaları saptayabilir.

Çizelge 3. Etkin KVB’lerin girdi ve çıktı ortalamaları

Girdi/Çıktı	Etkin işletmelerin toplam değerlendirme puanları	Etkin işletme sayısı	Ortalama etkinlik değeri
INPT1	30	13	2,308
INPT2	26	13	2,000
INPT3	41	13	3,154
INPT4	45	13	3,462
INPT5	46	13	3,538
INPT6	53	13	4,077
INPT7	32	13	2,462
INPT8	40	13	3,077
INPT9	21	13	1,615
INPT10	40	13	3,077
INPT11	28	13	2,154
INPT12	39	13	3,000
INPT13	29	13	2,231
INPT14	30	13	2,308
INPT15	32	13	2,462
INPT16	45	13	3,462
INPT17	17	13	1,308
INPT18	41	13	3,154
INPT19	50	13	3,846
INPT20	38	13	2,923
INPT21	45	13	3,462
INPT22	43	13	3,308
INPT23	37	13	2,846
INPT24	37	13	2,846
INPT25	55	13	4,231
INPT26	48	13	3,692
INPT27	45	13	3,462
INPT28	37	13	2,846
INPT29	54	13	4,154
INPT30	46	13	3,538
INPT31	45	13	3,462
INPT32	51	13	3,923
INPT33	47	13	3,615
INPT34	46	13	3,538
INPT35	50	13	3,846
INPT36	42	13	3,231
INPT37	29	13	2,231
INPT38	47	13	3,615
INPT39	31	13	2,385
OUTPT1	53	13	4,077

İşletmelerin ortalama etkinlik değerleri incelendiğinde 0,903 gibi 1'e yakın olan bir değer olduğu görülmektedir. İşletmelerin etkinlik değerleri arasında değişim ise 0,13 gibi çok fazla değişken olmayan bir değerdir. Çizelge 4'te görüldüğü gibi etkin olmayan işletmeler kendi aralarında incelendiğinde değişkenliğin yine az olduğu görülebilmektedir. Bu sonuçlar, işletmeler arasında çok fazla bir etkinlik farkı olmadığını ortaya koymaktadır. Ancak KVB22 (0,566), KVB34 (0,656), KVB02 (0,681) gibi işletmelerin değişkenliğin çok olmadığı bu işletmeler arasında etkinlik değerinin oldukça düşük olduğu söylenebilir.

Çizelge 4. KVB'lerin etkinlik istatistikleri

Toplam işletme sayısı	24
Etkin işletme sayısı	13
Ortalama etkinlik skoru	0,903
En düşük etkinlik	0,556
En düşük etkinliğe sahip işletme	KVB22
Tüm işletmelerin std. sapması	0,130
Etkin olmayan işletmelerin etkinlik ortalaması	0,789
Etkin olmayan işletmelerin std. sapması	0,112

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Günümüz işletmeleri ileri teknoloji, hızlı üretim ve teslimat, kaliteli ürün, satış sonrası hizmet imkanları gibi çeşitli niteliklere sahip olmak zorundadır. Yeni endüstri devrimi ile bu niteliklerin yeterli olmayacağı kitlesel ve sipariş dayalı üretimin kişiye özel üretime dönmesi beklenmektedir. Bütün bu beklentiler imalat işletmelerini yeni endüstri devrimine geçişe zorlamaktadır. Ancak yeni endüstri devriminin geçişi ileri teknoloji, dijital süreçler, yeterli donanım ve yazılım alt yapısı vb. birçok ön şartın gerçekleşmesini de zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada bir imalat işletmesinin I4.0 entegrasyonunun değerlendirilmesi için 24 işletmeye 40 sorunun yöneltilmesiyle elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu verilerin değerlendirilmesinde VZA yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan verilerin 39'u girdi değişkeni olarak

seçilmiş ve sonucunda bir tane çıktı değişkeni incelenmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda 24 işletmenin 13 tanesi etkin çıkarken 11 tanesi ise etkin olarak bulunmamıştır. Yapılan analiz sonucunda her girdi ve çıktı için ortalama etkinlik değeri hesaplanmış ve etkin olmayan işletmeler için bir hedef değer oluşturulmuştur. Ortalama etkinlik skoruna bakıldığında 0,903'lük yüksek bir değer elde edilmiş ancak en düşük etkinlik değeri 0,556 olarak bulunmuştur. Ayrıca tüm işletmeler ve etkin olmayan işletmeler ayrı ayrı incelenerek değişkenliği incelenmiştir. Buna göre her iki grubun da değişkenliği çok fazla olmamakla beraber etkin olmayan işletmelerin değişkenliği daha azdır. Bu durum, işletmeler arasındaki etkinlik skor farkının çok fazla olmadığı anlamına gelmektedir. Yapılan çalışmanın, incelenen işletmeler bazında I4.0 geçişi için değerlendirmelerde bulunması ve etkinlik değerleri ile bu işletmelerin odaklanması gereken yerleri işaret etmesi açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Bunun yanında çalışmada I4.0 için gerekli teknolojiler ve işletme içerisinde bu teknolojilere entegrasyonu sağlamak için gerekli olan girdilerin belirlenmesi çalışmayı önemli kılan bir başka noktadır.

Gelecek çalışmalar için farklı değerlendirme kriterlerinin ele alınması mümkündür. Çalışma daha farklı firmalarla yapılabilir ve gelişmelerin izlenmesi için bir Endüstri 4.0 entegrasyonu ölçeği oluşturularak zaman içerisindeki değişimlerin ele alınacağı bir sistem oluşturulabilir. Son olarak farklı karar verme yaklaşımlarının entegrasyonu ve bulanık mantık gibi yaklaşımlar da denenebilir. VZA ile işletmeler arasında bir etkinlik sıralaması kısmen yapılabilmektedir. Etkin olmayan işletmelerin etkinlik skorları kullanılarak bir sıralama yapılabilirken etkin olan işletmelerin tamamının değeri 1 olduğu için sıralanması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle farklı yaklaşımlar ve çok kriterli karar verme yöntemleri işletmeler arasında bir sıra yapılmasına imkan verebilir.

6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu makalede yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması oluşturacak durum gözlenmemiştir. Bundan dolayı çıkar çatışması bölümüne yer verilmemiştir.

7. KAYNAKLAR

1. Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.A., 2015. A Cyber-physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
2. Frank, A.G., Dalenogare, L.S., Ayala, N.F., 2019. Industry 4.0 Technologies: Implementation Patterns in Manufacturing Companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26.
3. Wan, J., Tang, S., Li, D., Wang, S., Liu, C., Abbas, H., Vasilakos, A.V., 2017. A Manufacturing Big Data Solution for Active Preventive Maintenance. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(4), 2039-2047.
4. McFarlane, D., Sarma, S., Chirn, J.L., Wong, C., Ashton, K., 2003. Auto ID Systems and Intelligent Manufacturing Control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(4), 365-376.
5. Zhong, R.Y., Xu, X., Klotz, E., Newman, S.T., 2017. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616-630.
6. 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*, 9(1), 54-89.
7. 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.
8. Khan, A., Turowski, K., 2016. A Survey of Current Challenges in Manufacturing Industry and Preparation for Industry 4.0. In *Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry"* (IITI'16), Springer, Cham, 15-26.
9. Crnjac, M., Veža, I., Banduka, N., 2017. From Concept to the Introduction of Industry 4.0. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(1), 21-30.
10. Strandhagen, J.W., Alfnes, E., Strandhagen, J.O., Vallandingham, L.R., 2017. The Fit of Industry 4.0 Applications in Manufacturing Logistics: A Multiple Case Study. *Advances in Manufacturing*, 5(4), 344-358.
11. Siew, L.W., Fai, L.K., Hoe, L.W., 2018. An Optimal Control on the Efficiency of Technology Companies in Malaysia with Data Envelopment Analysis Model. *Journal of Telecommunication. Electronic and Computer Engineering (JTEC)*, 10(1), 107-111.
12. Fazlollahi, A., Franke, U., 2018. Measuring the Impact of Enterprise Integration on Firm Performance Using Data Envelopment Analysis. *International Journal of Production Economics*, 200, 119-129.
13. Ghobakhloo, M., 2018. The Future of Manufacturing Industry: A Strategic Roadmap Toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
14. Machado, C.G., Winroth, M., Carlsson, D., Almström, P., Centerholt, V., Hallin, M., 2019. Industry 4.0 Readiness in Manufacturing Companies: Challenges and Enablers Towards Increased Digitalization. *Procedia Cirp*, 81, 1113-1118.
15. Castelo-Branco, I., Cruz-Jesus, F., Oliveira, T., 2019. Assessing Industry 4.0 Readiness in Manufacturing: Evidence for the European Union. *Computers in Industry*, 107, 22-32.
16. Dalmarco, G., Ramalho, F.R., Barros, A.C., Soares, A.L., 2019. Providing Industry 4.0 Technologies: The Case of a Production Technology Cluster. *The Journal of High Technology Management Research*, 30(2), 100355.
17. Szalavetz, A., 2019. Industry 4.0 and Capability Development in Manufacturing Subsidiaries. *Technological Forecasting and Social Change*, 145, 384-395.
18. Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., Pellerin, R., 2020. Impacts of Industry 4.0 Technologies on

- Lean Principles. International Journal of Production Research, 58(6), 1644-1661.
19. Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, A., Perona, M., 2020. The Applications of Industry 4.0 Technologies in Manufacturing Context: A Systematic Literature Review. International Journal of Production Research, 1-33.
20. Machado, C.G., Winroth, M.P., Ribeiro da Silva, E.H.D., 2020. Sustainable Manufacturing in Industry 4.0: an Emerging Research Agenda. International Journal of Production Research, 58(5), 1462-1484.
21. Culot, G., Orzes, G., Sartor, M., Nassimbeni, G., 2020. The Future of Manufacturing: a Delphi-based Scenario Analysis on Industry 4.0. Technological Forecasting and Social Change, 157, 120092.
22. Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., de Sousa Jabbour, A.B.L., Rajak, S., 2020. Barriers to the Adoption of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing Sector: An Inter-country Comparative Perspective. International Journal of Production Economics, 224, 107546.
23. Bag, S., Gupta, S., Kumar, S., 2021. Industry 4.0 Adoption and 10R Advance Manufacturing Capabilities for Sustainable Development. International Journal of Production Economics, 231, 107844.
24. Eken, M.H., Kale, S., 2011. Measuring Bank Branch Performance Using Data Envelopment Analysis: The Case of Turkish Bank Branches. African Journal of Business Management, 5(3), 889-901.
25. Banker, R.D., 1992. Estimation of Returns to Scale Using Data Envelopment Analysis. European Journal of Operational Research, Vol. 62.
26. Timor, M., 2001. Yöneylem Araştırması ve İşletmecilik Uygulamaları. İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Yayınları, İstanbul.
27. Dinçer, E., 2008. Veri Zarflama Analizi'nde Malmquist Endeksiyle Toplam Faktör Verimliliği Değişiminin İncelenmesi ve İMKB Üzerine Bir Uygulama. Marmara Üniversitesi İİBF Dergisi, 15(2), 825-846.
28. Kaya, Y., Doğan E., 2005. Dezenflasyon Sürecinde Türk Bankacılık Sektöründe Etkinliğin Gelişimi. BDDK, ARD Çalışma Raporları.
29. Aslankaraoğlu, N., 2006. Veri Zarflama Analizi ve Temel Bileşenler Analizi ile AB Ülkelerinin Sıralaması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 142.
30. Çavmak, Ş., 2017. Sağlık Hizmetlerinde Veri Zarflama Analizi ve Modelleri. Sağlık Yönetimi Dergisi, 1(1), 35-47.
31. Özden, Ü., 2008. Veri Zarflama Analizi (VZA) ile Türkiye'deki Vakıf Üniversitelerinin Etkinliğinin Ölçülmesi. İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 37(2), 167-185.
32. Norman, M., Stoker, B., 1991. Data Envelopment Analysis: The Assessment of Performance, John Wiley & Sons, Inc.

