



## Examination of the criteria affecting Industry 4.0 with structural equation model and a pilot study

Alper Kiraz\*<sup>ID</sup>, Onur Canpolat<sup>ID</sup>, Cem Özkurt<sup>ID</sup>, Harun Taşkın<sup>ID</sup>, Esra Sarp<sup>ID</sup>  
Industrial Engineering Department, Sakarya University, Sakarya, 54187, Turkey

### Highlights:

- Investigation of Industry 4.0 level of businesses with Structural Equation Model
- Determining the weights of the criteria affecting the Industry 4.0 level
- A model to guide businesses in identifying digital transformation roadmaps

### Keywords:

- Industry 4.0
- Structural equation model
- Confirmatory factor analysis
- Maturity level
- Digital transformation roadmap

### Article Info:

Research Article  
Received:29.04.2019  
Accepted: 26.05.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.558947

### Correspondence:

Author: Alper Kiraz  
e-mail: kiraz@sakarya.edu.tr  
phone: +90 264 295 5685

### Graphical/Tabular Abstract

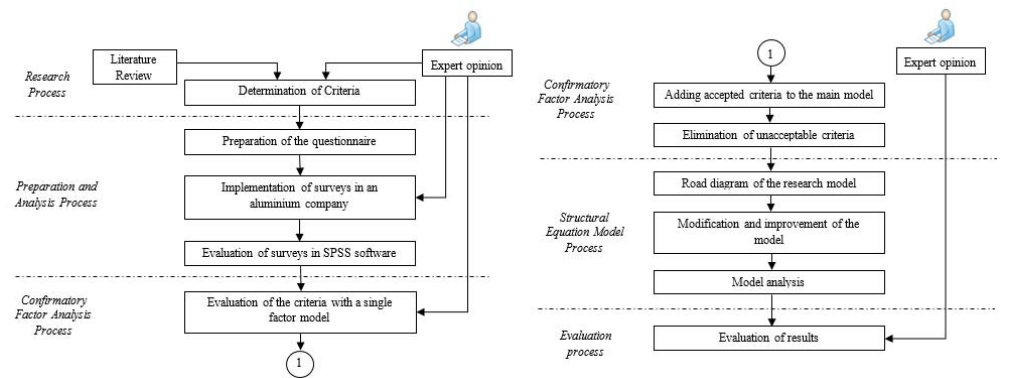


Figure A. Flow chart of the study

**Purpose:** To determine the criteria that affect the concept of Industry 4.0 and to guide the measurement models of Industry 4.0 to be developed based on these criteria. The aim of the study is to help enterprises to catch up with the 4th industrial revolution by using calculated weights and to support them to prepare appropriate digital transformation road maps.

### Theory and Methods:

The following 8 criteria were used in the model: technology, strategy, customers, leadership, government policy, culture, processes and employees. In the model prepared within the scope of the study, the Structural Equality Model (YEM) was used to examine the effects of the criteria on each other and on the model. YEM is a statistical model used to determine direct or indirect relationships between observed or unobserved variables. Confirmatory Factor Analysis (DFA) was used in the study to determine whether the criteria affecting the Industry 4.0 were compatible with the model. DFA helps to eliminate incompatible criteria by testing whether the generated models are validated on the dataset.

### Results:

The criterion, which has the highest factor load, is the strategy (1.00). Then there are processes with 0.97 culture and 0.90 factor load. The 4th criterion is employees with a factor load of 0.84. When we examine the model, technology (0.77), state policy (0.66) and leadership (0.57) come from these criteria.

### Conclusion:

The first thing that should be done by companies that want to make a successful transition to Industry 4.0 is to analyze their current situation well, to determine their strengths and weaknesses and then to create a suitable digital transformation roadmap. When the literature is examined, it is seen that the number of studies that determine the relations between criteria or the criteria affecting the Industry 4.0 concept is very small. In this study, a model has been established to determine the criteria of Industry 4.0 and the degree of impact of the criteria affecting the Industry 4.0 level is measured. As a result of the study, companies can identify the missing sides and focus on the aspects that need to be developed. It is intended that the study be used as a reference for creating a digital transformation roadmap before making large investment decisions.



## Endüstri 4.0'ı etkileyen kriterlerin yapısal eşitlik modeli ile incelenmesi ve bir pilot çalışma

Alper Kiraz\*<sup>ID</sup>, Onur Canpolat<sup>ID</sup>, Cem Özkurt<sup>ID</sup>, Harun Taşkın<sup>ID</sup>, Esra Sarp<sup>ID</sup>

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 54187, Serdivan, Sakarya, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- İşletmelerin Endüstri 4.0 seviyelerinin Yapısal Eşitlik Modeli ile Araştırılması
- Endüstri 4.0 seviyesini etkileyen kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi
- Dijital dönüşüm yol haritalarının belirlenmesinde işletmeleri yönlendirecek bir model oluşturulması

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 29.04.2019

Kabul: 26.05.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.558947

### Anahtar Kelimeler:

Endüstri 4.0,  
yapısal eşitlik modeli,  
doğrulayıcı faktör analizi,  
olgunluk seviyesi,  
dijital dönüşüm yol haritası

### ÖZET

Günümüzde teknoloji ve üretim ortamı sürekli gelişmektedir. İşletmeler bu rekabet ortamında ayakta kalabilmek için yenilikleri takip etmek zorundadır. Endüstri 4.0 ya da diğer bir adıyla dördüncü sanayi devriminin temel amacı bilişim teknolojileri ve endüstriyi bir araya getirmektir. Endüstri 4.0, birbirleri ile haberleşebilen, veri alışverişini yapabilen sistemler arası bütünleşmeyi içeren, ileri otomasyon seviyesi ile veri analizini yaparak, üretimdeki makine ve teçhizatı ait tüm verilerin, üretimin eş zamanlı yapılabilmesi için bir bulut sisteminde depolanması olarak özetlenebilir. Endüstri 4.0, üretimde esnekliğin artırılmasına ve daha yüksek verimliliğin sağlanmasına olanak sağlar. Bu çalışmada, işletmelerin Endüstri 4.0 seviyesini etkileyen kriterler belirlenmiş ve kriter etkilerinin Endüstri 4.0 seviyesine etkisinin analizi için yapısal eşitlik modeli (YEM) kullanılmıştır. Modelde teknoloji, strateji, müşteriler, liderlik, devlet politikası, kültür, süreçler ve çalışanlar olmak üzere 8 kriter kullanılmıştır. Gerçekleştirilen uygulama ile Endüstri 4.0 seviyesine etki eden en önemli üç kriterin sırasıyla 1,00 faktör yükü ile strateji, 0,97 faktör yükü ile kültür ve 0,90 faktör yükü ile süreçler olduğu görülmektedir. Çalışmada elde edilen bulguların işletmelerin Endüstri 4.0 hedefine ulaşmaları konusundaki eksik ve geliştirilebilir yönlerini görmeleri konusunda yardımcı olması hedeflenmektedir.

## Examination of the criteria affecting Industry 4.0 with structural equation model and a pilot study

### H I G H L I G H T S

- Investigation of Industry 4.0 level of businesses with Structural Equation Model
- Determining the weights of the criteria affecting the Industry 4.0 level
- A model to guide businesses in identifying digital transformation roadmaps

### Article Info

Research Article

Received:29.04.2019

Accepted: 26.05.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.558947

### Keywords:

Industry 4.0,  
structural equation model,  
confirmatory factor analysis,  
maturity level,  
digital transformation  
roadmap

### ABSTRACT

Nowadays, technology and production environment is constantly developing. Companies have to follow innovations in order to survive in this competitive environment. The main purpose of Industry 4.0 or the fourth industrial revolution is to bring information technology and industry together. Industry 4.0 can be summarized as the storage of all data related to the machinery and equipment in production in a cloud system so that the production can be performed simultaneously by analyzing the data with the advanced automation level, which can communicate with each other and can exchange these data. Industry 4.0 enables increased flexibility in production and in productivity. In this study, the criteria affecting the Industry 4.0 level were determined and the structural equation model (SEM) was used to analyze the impact of the criterion effects on the Industry 4.0 level. 8 criteria were used in the model: technology, strategy, customers, leadership, government policy, culture, processes and employees. The most important three factors affecting the Industry 4.0 level are strategy with 1.00 factor load, culture with 0.97 factor load and processes with 0.90 factor load. It is aimed that the findings obtained in the study will help the companies to see their deficiencies and improvements in reaching the goal of Industry 4.0.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: \*kiraz@sakarya.edu.tr, onurcanpolat@sakarya.edu.tr, cem.ozkurt2@ogr.sakarya.edu.tr, taskin@sakarya.edu.tr, esra.sarp@ogr.sakarya.edu.tr / Tel: +90 264 295 5685

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sanayi devrimi 18. yüzyılda İngiltere’de buhar makinesinin icadı ile başlayıp tüm dünyaya yayılmıştır. Sanayi kavramı, imalat ya da teknik olarak üretim yapabilen kuruluşların belirli bir alan, ülke, bölge ya da ekonomi içerisinde bütünleşik ya da bunların herhangi birinde hukuki olarak oluşturulabilmesi olarak adlandırılabilir [1]. Endüstrinin modern gelişimi yıllarca sürmüş ve günümüzde Endüstri 4.0 çağına gelinmiştir. Birinci sanayi devrimi su ve buhar gücünün ilk kez dokuma tezgâhlarında kullanılmasıyla başlarken, ikinci sanayi devrimini Ford otomotiv kuruluşunun oluşturduğu montaj hattına benzer işgücü dağılımı mantığı oluşturmaktadır. Üçüncü sanayi devrimi, elektronik, bilgi ve iletişim teknolojilerinin gelişerek imalatın otomasyonuna katkı sağlaması ile ortaya çıkmıştır. Endüstri 4.0 ise, “zeki fabrika” olarak da adlandırılabilen, imalat teknolojileri içerisinde özellikle otomasyon ve büyük veri değişimini, siber-fiziksel yapıları, nesnelerin interneti kavramını ve bulut bilişim sistemlerini kullanarak günümüz şartlarına uygun üretim sistemlerinin kullanılması kavramıdır [2].

Endüstri 4.0 ile daha yenilikçi, daha güvenilir ve daha hızlı bir anlayış oluşmakta ve bu kapsamda teknolojik ihtiyaçların karşılanması için bütünleşik bir yapı ortaya konulması gerekmektedir. Bu bütünleşik yapı, tüm elemanlarının birbirleriyle iletişim halinde olduğu ve diğer elemanlardan gelen büyük verileri neden sonuç ilişkisi çerçevesinde analiz ederek akıllıca kullandığı verimli bir sistem olmalıdır [3]. Bu nedenle insan gücü yerini makine gücü kullanımına, geleneksel fabrikalar ise yerini otomasyona dayalı ve müşteri beklentilerine göre esnekliğin çok üst boyutlara ulaştığı akıllı fabrikalara bırakmaktadır. Standart kitlesele üretim yerini ürün farklılaştırmasına, bir ürüne hizmet eden üretim makineleri yerini farklı donanımlara sahip esnek kullanım imkânı sunan geliştirilebilir akıllı makinalara, kısıtlı ve katı kontrol yerini otomasyona dayalı sürekli izlenebilir esnek kontrol mekanizmalarına ve kısıtlı bilgiye dayalı üretim kararları yerini büyük veri setlerine dayanan simülasyonlar ve modelleme ile desteklenmiş geniş kapsamlı stratejilere bırakmaktadır. Bu büyük değişime ve dönüşüme ayak uyduramayan firmalar, endüstriler ve hatta ülkeler hâlihazırda buldukları avantajlı konumları kaybetme tehlikesiyle karşı karşıya kalmaktadırlar. Endüstri 4.0’ın çevresinde oluşan gelişmelere ayak uyduramayan ülkelerin katma değeri düşük bir üretim, artan işsizlik, önemli bir pazar kaybı ve elbette rekabette geriye düşme gibi olumsuz sonuçlarla karşılaşmaları kaçınılmazdır.

Endüstri 4.0 ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, çalışma sayılarının hızla arttığı fakat konun anlaşılabilirliğinin yeterli seviyelerde olmadığı görülmektedir. Endüstri 4.0 çalışmalarında genellikle nesnelerin interneti, siber-fiziksel sistemler, büyük veri ve artırılmış gerçeklik gibi kavramların kullanıldığına ve bu kavramlara çok sayıda çalışmada yer verildiğine rastlanmaktadır. Ayrıca, ülkemizde Endüstri 4.0 konusunda

çok az sayıda çalışmanın yapılmış olduğu da göze çarpmaktadır. Endüstri 4.0 olgunluk seviyesini ölçmek üzere hazırlanan modellerin başında Impuls Industrie 4.0 Readiness [4] modeli gelmektedir. Bu modelde işletmelerin Endüstri 4.0’a hazır olma durumu altı boyutta incelenmiştir. Belirlenen altı boyut şu şekildedir: strateji ve organizasyon, akıllı fabrika, akıllı işlemler, akıllı ürünler, veriye dayalı hizmetler, çalışanlar. Geissbauer vd. [5] yaptıkları araştırma sonucunda, Industry 4.0/Digital Operations Self Assessment raporunda Sanayi 4.0 geçiş süreçlerinde dijital bir yol haritasını açıklamıştır. Schumacher vd. [6]’e göre bir endüstri kuruluşunun olgunluğu ile kast edilen içsel ve dışsal koşullar, Endüstri 4.0’ın temel konseptlerini destekleyecek aşamada olmalıdır. Bunlara örnek olarak imalat sistemlerinin ve kuruluşların dikey ve yatay entegrasyonu ile bütün değer zinciri boyunca mühendisliğin dijital entegrasyonu gösterilebilir. Bu olgunluk seviyesini belirlemek amacıyla söz konusu model strateji, liderlik, müşteriler, ürünler, operasyonlar, kültür, yönetmelikler, çalışanlar ve teknoloji olmak üzere 9 boyuttan oluşmaktadır. Oluşturulan bu modele 123 şirketten 23 tanesi katılım göstermiş ve model doğrultusunda Endüstri 4.0 olgunlukları ölçülmüştür. Zeller vd. [7], Endüstri 4.0 seviyesi belirlemek ve bu seviye üzerinden iyileştirmeler yapabilmek amacıyla bilgisayarlaşma, bağlantırlık, dijital görünürlük, şeffaflık, öngörme yeteneği ve uyum yeteneği kriterleri çerçevesinde yaklaşık 600 sorudan oluşan bir anket ile kaynaklar, bilgi sistemleri, kültür ve organizasyonel yapı ana hatları çerçevesinde ACATECH isimli bir uygulama gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan kriterlerin hem Schumacher vd. [6] hem de Zeller vd. [7] çalışmalarındaki kriterleri karşıladığı ve o kriterlerle uyumlu olduğu görülebilmektedir. İlgili çalışmalardan farklı olarak, bazı kriterler eklenmiş ve kriterlerin farklı etki derecelerinin olduğu hesaba katılmıştır. Kiraz vd. [8], firmaların Endüstri 4.0 seviyesi belirleyebilmek amacıyla bulanık bilişsel haritalar yönteminden yararlanmışlardır. Hazırlanan çalışmada, Impuls [4] modeline ait kriterler ele alınmakta ve yalnızca ana kriterlerden hareketle Endüstri 4.0 seviyesi belirlenmektedir. Bu çalışmada, sadece ana kriterlerin Endüstri 4.0 ile ilişkileri değil, ana kriterleri etkileyen değişkenlerin de hem kendi kriterleri ile hem de Endüstri 4.0 ile ilişkileri ve etkileri de dikkate alınmaktadır. Bu sayede daha derinlemesine bir analiz elde edilmekte ve kriterlerin farklı önem derecelerine sahip olduğuna dikkat çekilerek işletmelerin dijital dönüşüm yol haritaları için ayrıntılı bir öngöründe bulunabilmeleri hedeflenmektedir.

Bu çalışma kapsamında hazırlanan modelde kriterler arasındaki etkileşimin ve kriterlerin modele olan etkilerinin analiz edilmesinde söz konusu avantajları nedeniyle YEM’den yararlanılmıştır. Avantajları açısından ele alındığında YEM; sosyal bilimler, davranış bilimleri, ekonomi, pazarlama ve sağlık bilimleri başta olmak üzere birçok bilim dalında kullanılan bir modeldir [9]. Belirli bir teoriye dayalı olarak gözlenebilen ve gözlenemeyen değişkenlerin nedensel ve ilişkisel bir model içinde tanımlanmasına dayanan çok değişkenli bir istatistiksel

yöntemdir [10]. YEM, karmaşık problemlerin çözümü için sistematik yapısı, problemi tüm hatlarıyla incelemesi ve basit süreçler halinde modellenebilmesi gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Farklı diğer yöntemlere nazaran YEM, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin amaçla veya birbirleriyle olan ilişkilerini tek bir model üzerinde ve başarılı bir şekilde inceleme fırsatı sunmaktadır. Bu nedenle de özellikle karmaşık problemlerde başarılı çıktılar elde etmekte ve farklı analiz imkanları sağlaması sebebiyle de pek çok alanda tercih edilmektedir. Mevcut problemler ele alınabildiği gibi yeni modellerin de geliştirilmesine imkân sağlamaktadır [11]. Literatürde YEM ve Endüstri 4.0'ın bir arada kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanılamamakla birlikte, son yıllarda YEM ve Endüstri 4.0 ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları Tablo 1'de gösterilmektedir.

Endüstri 4.0 kavramı, işletmelerin bilgi işlem alt yapılarının oluşturulmasında ve akıllı üretim/yönetim aşamasına geçişte merkezi bir rol oynamasının yanı sıra ürün ve hizmet çeşitlerinde devrim yaratacak ve iş modellerinin uyarlanmasına yol açabilecek potansiyele sahiptir. İşletmelerin rekabet ortamında geride kalmamak için teknolojiyi takip etmeleri ve üretim teknolojileri alanında devam eden hızlı değişim ve gelişmeleri kendilerine

uyarlamaları gerekmektedir. Yaptıkları işin anlamını kavrayabilen ve eksik yönlerini analiz edebilen işletmeler bu değişimlere ayak uydurabileceklerdir. Bu yüzden işletmelerin Endüstri 4.0 seviyelerini doğru tespit etmeleri ve mevcut durumlarına göre, ihtiyaçlarını ve eksik yönlerini bilerek geliştirmeleri gereken alanları doğru belirleyebilmeleri son derece önem arz etmektedir. Ancak, bu durum kolaylıkla çözülebilecek bir konu olarak görülmemelidir. Çünkü bunu başarabilmek için öncelikli olarak teknolojinin gelişmesiyle birlikte, yönetsel ve stratejik faaliyetleri de içeren Endüstri 4.0 kavramının doğru anlaşılması gerekmektedir. Bu kapsamda hazırlanan çalışmanın amacı; Endüstri 4.0 kavramını etkileyen kriterlerin etkilerinin doğrulayıcı faktör analizi ile incelenmesiyle işletmelerin 4. sanayi devrimini yakalamalarına yardım edebilecek ve kendilerine uygun dijital dönüşüm yol haritalarını hazırlamalarına destek olabilecek bir model geliştirilmesidir. Çalışmanın ikinci bölümünde YEM konusunun detayları ve bu konuda yapılan çalışmalar, üçüncü bölümde ise geliştirilen model hakkında detaylı bilgiler ve model kriterlerinin uyumluluk testleri yer almaktadır. Son olarak dördüncü bölümde ise çalışmaya ait sonuçlara ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

**Tablo 1.** YEM ve Endüstri 4.0 konusunda son yıllarda yapılan çalışmalar  
(Studies on structural equation modeling and Industry 4.0 in recent years)

Yıl	Yazar	Çalışma Adı
2011	Anıl D., Özer Y. [12]	Öğrencilerin Fen ve Matematik Başarılarını Etkileyen Faktörlerin Yapısal Eşitlik Modeli ile İncelenmesi
2012	Yemenici K. N. [13]	Altı Sigma Metodolojisinde Yapısal Eşitlik Modelinin Araç Olarak Kullanılması
2012	Bozkurt B., Baldemir E. [14]	Konaklama Tesislerinin Performanslarını Etkileyen Faktörlerin Yapısal Eşitlik Modeli ile İncelenmesi
2014	Uygurtürk H. [15]	Marka Değerini Oluşturan Faktörlerin Yapısal Eşitlik Modeli ile Analizi: Seyahat Acentaları Üzerine Bir Araştırma
2014	Çapık C. [16]	Geçerlik ve Güvenilirlik Çalışmalarında Doğrulayıcı Faktör Analizinin Kullanımı
2016	Özkurt, C. [17]	Endüstri 4.0 perspektifinden Türkiye'de imalat sanayinin durumu: Sakarya imalat sanayi üzerine bir anket çalışması
2016	Pricewater-housecoopers [18]	Endüstri 4.0/Dijital operasyonlar için öz değerlendirme
2016	Schumacher, A. vd. [6]	İmalat işletmelerinin Endüstri 4.0'a hazırlık ve yeterlilik seviyelerinin belirlenmesi için bir olgunluk modeli
2017	Basl, J., Kopp, J. [19]	Çek şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazır olma çalışması
2018	Diyadin, A., Koçak, A. [20]	Sanayi 4.0 Geçiş Süreçlerinde Kritik Başarı Faktörlerinin DEMATEL Yöntemi ile Değerlendirilmesi
2019	Kiraz, A. vd. [21]	IMPULS Kriterleri ile Endüstri 4.0 Eğiliminin Değerlendirilmesi: Bir Bulanık Bilişsel Harita Uygulaması

## 2. YAPISAL EŞİTLİK MODELİ (STRUCTURAL EQUATION MODELING)

Yapısal eşitlik modeli analizinin temelleri, 1920'li yıllarda Amerikalı genetikçi Sewall Wright'ın üzerinde çalıştığı yol analizi ile ortaya çıkmıştır. Gözlenen korelasyonları eşitlik sistemine ekleyerek, matematiksel bir yol ile nedensel ilişkilere ait hipotezini açıklamaya çalışmıştır. Değişkenler arası ilişkileri bir yol diyagramı ile sunmuş ve yol analizi olarak adlandırmıştır [22]. Yol analizi, gözlemlenen değişkenler arasında, eş zamanlı birçok regresyon eşitliğinin çözümlenmesidir. YEM ise gözlenen ve gizli değişkenleri aynı anda içermesiyle doğrulayıcı faktör analizi ve yol analizinin birleşmiş halidir. Doğrulayıcı faktör analizi (DFA), oluşturulan modellerin veri kümesi üzerinde doğrulanıp doğrulanmadığını test eder. YEM, gizli değişkenler arasındaki direkt veya dolaylı ilişkileri gösteren yapısal bir modeldir [23].

YEM konusunda ilk çalışmalardan bir kaçını Karl Jöreskog [24], James Keesling [25] ve David Wiley [26] ortaya koymuştur. Özellikle son yıllardaki çalışmalar incelendiğinde ise YEM'in kullanım alanının oldukça geniş olduğundan ve sıklıkla kullanıldığından söz etmek mümkündür. Yudatama vd. [27], bilişim mimarisi üzerine YEM kullanarak istatistiksel analizler gerçekleştirirken, Nicolas vd. [28] ise akıllı şehirlerin performanslarının incelenmesinde YEM'den faydalanmışlardır. Kurşunoğlu ve Önder [29], kömür ve gaz patlamalarının incelenmesinde, Jabeen vd. [30] yenilenebilir enerji alanında, Viloria ve Pineda Lezama [31], Latin Amerika'da üniversite öğrencilerinin okuldan ayrılmalarının sebeplerinin incelenmesinde ve Ding vd. [32] ise araç takibinde gerçek zamanlı çarpışma risklerinin incelenmesinde YEM'i kullanmışlardır.

YEM kavramının iki önemli özelliği, çalışılan süreç bir seri yapısal eşitlik (regresyon eşitlikleri) içermesi ve bu yapısal eşitliklerin hipotezin daha kolay anlaşılabilmesi için görsel olarak çizilebilmesidir. YEM'in analizi, tüm değişkenlerin birlikte test edilmesi ile sonucun verilerle ne derece uyumlu olduğunun ortaya konulmasıdır. Modelin test edilmesiyle elde edilen uyum indeksleri model ile veri arasında uyum olduğunu gösteriyorsa, yapısal olarak oluşturulan hipotezler kabul edilmekte; uyum indeksleri böyle bir uyumun var olmadığını ortaya koyuyorsa hipotezler reddedilmektedir. YEM diğer istatistiksel yöntemlerden farklı olarak, keşfedici bir yaklaşım yerine, doğrulayıcı bir yaklaşım

benimsemektedir. Kuramsal olarak varlığı kurulmuş olan ilişkilerin veri ile uyumunu doğrulamaktadır [33]. Hata hesaplamalarında net sonuçlar ortaya koyup tüm çözümlenelerde ölçüm hatalarını hesaba katmaktadır. YEM, aynı model içerisinde gözlenebilen ve gözlenemeyen değişkenleri birlikte test edebilir.

YEM model analizlerinde, toplanan verilerin uygun olduğuna dair farklı uyum iyiliği indeksleri bulunmaktadır. Bir modelin veri ile uyumlu olup olmadığına uyum indeksleri değerlendirilerek karar verilmektedir [34]. İndeks değerlerinden en çok kullanılanlar [35-37]'den yararlanılarak düzenlenmiş ve Tablo 2'de gösterilmiştir. sd ifadesi serbestlik derecesini temsil etmektedir.

YEM kullanılırken örneklem büyüklüğü ile ilgili çeşitli varsayımlar mevcuttur. Örneklem büyüklüğü doğrulayıcı faktör analizinde kestirim yönteminin doğru sonuçlar vermesi için önemli bir etkidir, fakat örneklem büyüklüğünün kaç olması gerektiği hakkında kesin bir görüş birliği yoktur [38]. Kline [39]; örneklem sayısının 200'ü aşmamak kaydıyla madde sayısının 10 katı kadar olması gerektiğini ifade ederken, Harrington [40] ise birden fazla değişken kullanılarak gerçekleştirilen analizler için örneklem sayısının 100'den az olmasını küçük örneklem durumu, 200'den fazla olmasını ise büyük örneklem durumu olarak tanımlamıştır. Bu çalışmada Harrington [40]'ın görüşünden hareketle bir alüminyum firmasında çalışan 60 beyaz yaka personeline anket uygulanmıştır. Anket formu toplam 72 sorudan oluşmaktadır. Anketin birinci bölümde demografik bilgilere ait 3 soru yer almaktadır (çalıştığı birim, görevi ve hizmet yılı). İkinci bölümde ise 68 adet likert ifadeden oluşan Endüstri 4.0 ölçeği bulunmaktadır. Anket katılımcıları hakkındaki bazı bilgiler Tablo 3 ve Tablo 4'te gösterilmiştir. Anket içerisinde bir örnek soru ise Tablo 5'te sunulmuştur.

**Tablo 3.** Anket katılımcılarının çalışma süreleri  
(Working time of the respondents)

Hizmet Yılı	Kişi Sayısı	Yüzde
1-4	18	30,00
5-9	19	31,67
10-14	12	20,00
15-19	8	13,33
20-24	3	5,00

**Tablo 2.** Yapısal eşitlik modelinin uyumuna ilişkin istatistiksel değerler  
(Statistical values for the harmonization of structural equation model)

Ölçüm (Uyum İstatistiği)	İyi Uyum	Kabul Edilebilir Uyum
$\chi^2$ (ki-kare) uyum testi	Anlamlı olmaması	
$\chi^2/sd$	$\leq 3$	$\leq 5$
Normlaştırılmış Uyum İndeksi - NFI	$\geq 0,95$	$0,90 \leq NFI \leq 0,95$
Karşılaştırmalı Uyum İndeksi - CFI	$\geq 0,97$	$0,95 \leq CFI \leq 0,97$
İyilik Uyum İndeksi - GFI	$\geq 0,95$	$0,90 \leq GFI \leq 0,95$
Düzeltilmiş İyilik Uyum İndeksi - AGFI	$\geq 0,90$	$0,85 \leq AGFI \leq 0,90$
Yaklaşık Hataların Ortalama Karekökü - RMSEA	$\leq 0,05$	$0,05 \leq RMSEA \leq 0,08$

**Tablo 4.** Anket katılımcılarının görevleri  
(Titles of the respondents)

Görevi	Kişi Sayısı	Yüzde
Müdür	4	6,67
Uzman	14	23,33
Mühendis	19	31,67
Şef	11	18,33
Sorumlu	12	20,00

**Tablo 5.** Ankete ait örnek bir soru  
(A sample question of the survey)

Örnek Soru	1	2	3	4	5
Kurumsal dijital yatırımlarınızdan elde ettiğiniz sonuçları ne düzeyde ölçüyorsunuz?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

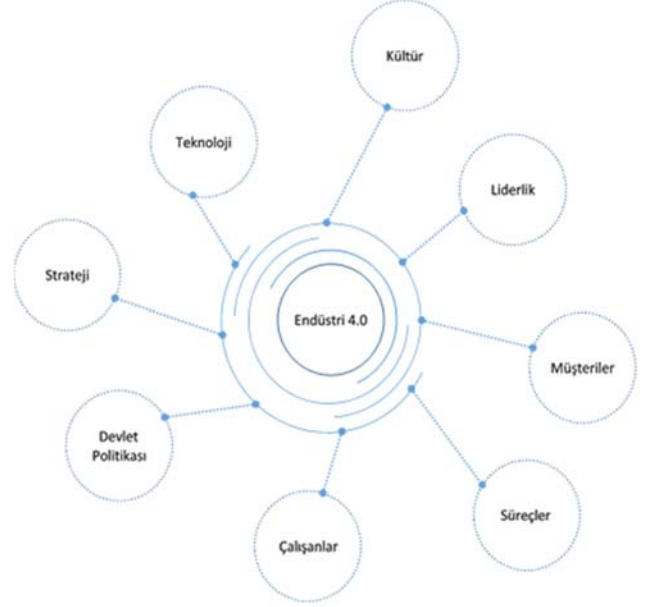
### 3. MODELİN TANIMLANMASI (DESCRIPTION OF THE MODEL)

Çalışmada kullanılan kriterler Schumacher vd. [6] çalışmasından yararlanılarak belirlenmiştir. Bu kriterler Endüstri 4.0 kavramı çerçevesinde değerlendirilmektedir. Burada Endüstri 4.0 kavramı, söz konusu 8 kriterin etkilediği (etkilenen) kriterdir. Çıkış kriteri herhangi bir kriteri etkilememekte, diğer tüm kriterlerden etkilenmektedir. Giriş kriterleri ise etkilenmeye ve etkilemeye açık olan kriterlerdir. Çalışmada, Endüstri 4.0 üzerinde etkili olabilecek kriterler tanımlanmış ve model çerçevesinde varsayılan ilişkilerin geçerliliğini test etmeye yönelik olarak gerekli hipotezler oluşturulmuştur. Model bir dizi yapısal eşitlikten oluşmaktadır. Bu sebeple oluşturulan bu yapısal eşitlikler, hipotezlerin daha kolay anlaşılabilmesi için görsel olarak Şekil 1’de gösterilmiştir. Şekilde de görüleceği üzere, çalışmada kullanılan kriterler; müşteriler, teknoloji, çalışanlar, süreçler, strateji, kültür, liderlik ve devlet politikası olarak belirlenmiştir. Çalışmada AMOS 24 programından faydalanılmıştır.

Şekil 1’de çalışma kapsamında ele alınan Endüstri 4.0’ı etkileyen sekiz kriter yer almaktadır. Bu kriterler ve arasındaki ilişkiler aynı zamanda araştırmanın temel hipotezlerini oluşturmaktadır. Bu kapsamda hipotezler, her bir kriterin Endüstri 4.0 üzerinde pozitif yönlü ve anlamlı olarak etkili olduğuna dayanarak belirlenmiştir [23]. Dolayısıyla, 8 kriter için 8 farklı hipotez ortaya atılmaktadır.

Genel modeli daha anlamlı kılmak adına kullanılan kriterler tek faktörlü modelde incelenmiş ve uyum değerlerine bakılmıştır. Kabul edilebilir olanlar modele direkt dâhil edilmiştir. Kabul edilebilir değerlere sahip olmayan kriterlerin değişkenlerinden bazıları çıkarılmış ve modelde iyileştirmeler yapılmıştır. İyileştirmeler gerçekleştirilirken, standart regresyon katsayıları 0,3’ten çok düşük olanlar elenmiş ve yeterli uyumu sağlamak için hatalar arasında kovaryansı en büyük olandan başlanarak, hatalar arasında kovaryans oluşturulup model uyum değerleri kabul edilebilir düzeye getirilmiştir. Bazı kriterlerde iyileştirme yapılırken ise, standart regresyon katsayılarına bakılmış ve regresyon

katsayısı negatif olan değişkenler elenmiştir. Buna göre kabul edilebilir uyum değerlerine sahip olan kriterler; müşteri, liderlik ve devlet politikası iken, kabul edilemeyen uyum değerlerine sahip olan kriterler; teknoloji, çalışanlar, süreçler, strateji ve kültürdür. Çalışma boyunca yapılanları ve çalışmanın ilerleyişini gösteren akış diyagramı Şekil 2’de gösterilmiştir.

**Şekil 1.** Endüstri 4.0’ı etkileyen kriterlerin doğrulayıcı faktör analizi yapısı

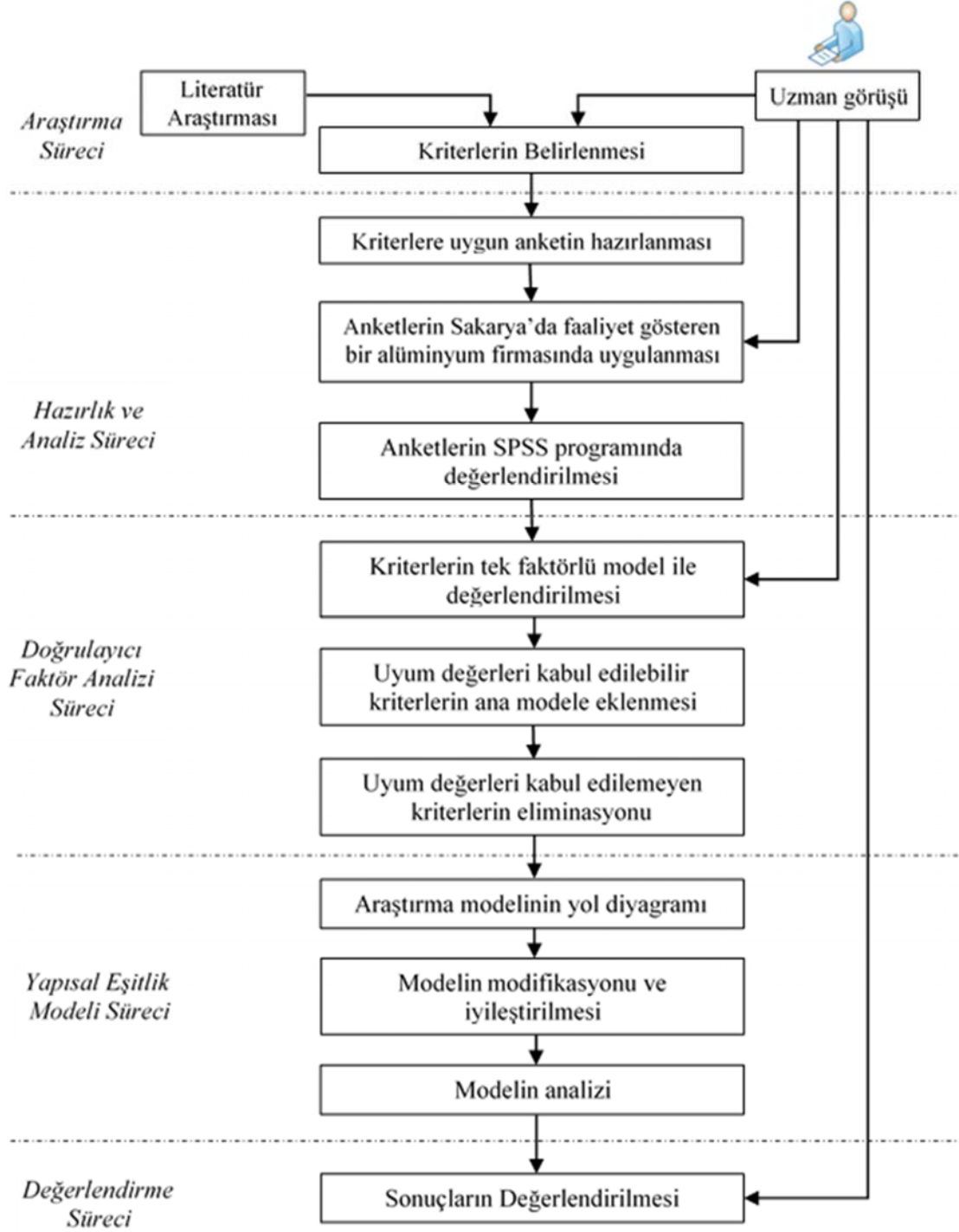
(Confirmatory factor analysis structure of the criteria affecting Industry 4.0)

Modelin şematik çizimi yol diyagramı olarak adlandırılır çünkü modeller, üzerinde çalışılan konunun görsel olarak simgelenmesidir [41]. Çalışmanın devamında gösterilecek olan yol diyagramlarında kareler "gözlenebilen değişkenleri", daireler "hata ve/veya artıkları", ovaler "örtük (ölçülemeyen) değişkenleri", oklar ise "ilişkileri" temsil etmektedirler.

#### 3.1. Çalışmada Kullanılan Kriterlerin Testi (Test of Criteria Used in the Study)

Literatür araştırması sonucunda belirlenen kriterlerin model ile uyum sağlayıp sağlamadığı testine geçmeden önce, araştırma modelinde kullanılan değişkenlere ait doğrulayıcı faktör analizi gerçekleştirilmiştir. Endüstri 4.0’ı oluşturan kriterlerden (örneğin, teknoloji kriterinin) geçerliliğini test etmek amacıyla doğrulayıcı faktör analizi yapılmıştır. Doğrulayıcı faktör analizi sonucunda kriterleri temsil eden değişkenler tek tek incelenerek, uyum değerleri kabul edilebilir düzeyde olanlar modele dâhil edilmiş, kabul edilebilir düzeyde olmayanlar modelden çıkarılmıştır.

Müşteri kriterinin geçerliliğini test etmek amacıyla kriteri oluşturan 5 değişkeninin doğrulayıcı faktör analizi gerçekleştirilmiştir. Müşteri kriterine ait yol diyagramı Şekil 3’te gösterilmektedir.

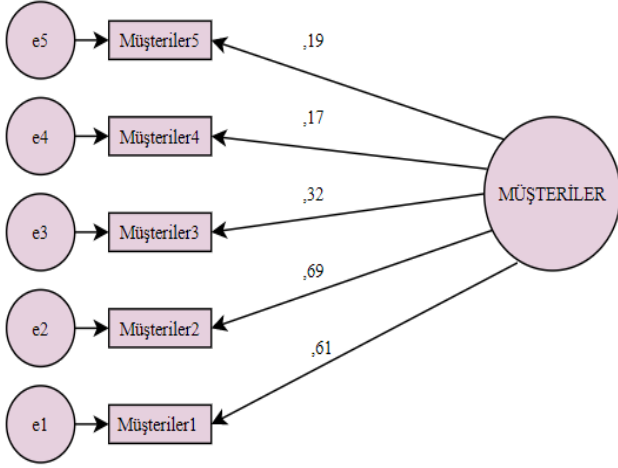


Şekil 2. Modelin akış şeması (Flow chart of the model)

Şekil 3'te "Müşteriler" gizli değişkeninden gözlenen değişkenlere doğru çizilen oklar, birer yol olarak dikkate alınmaktadır. Bu okların üzerinde gösterilen değerler, her bir maddenin faktör yükünü (açıklama gücünü) ifade etmektedir. Model incelendiğinde tüm değişkenlerin uyum değerlerinin kabul edilebilir düzeyde oldukları Tablo 6'dan anlaşılabilir. Bu sebeple müşteri kriteri için

iyileştirmeye gerek duyulmamıştır. Teknoloji kriterinin geçerliliğini test etmek amacıyla 16 değişkeninin doğrulayıcı faktör analizi gerçekleştirilmiştir. Doğrulayıcı faktör analizi sonucunda teknoloji kriterini temsil eden 16 değişkene ait model uyum değerlerinin kabul edilebilir düzeyde olmadıkları tespit edilmiştir. Bu nedenle ölçüm modelinde iyileştirmeler yapılmış ve modelde kabul edilebilir değerler

elde edilmiştir. İyileştirme sonucunda 7 değişken elenmiş ve 9 değişken kalmıştır. İyileştirme öncesi ve sonrası uyum değerleri Tablo 7’de gösterilmektedir.



Şekil 3. Müşteri kriterine ait yol diyagramı (Patch diagram of customer criterion)

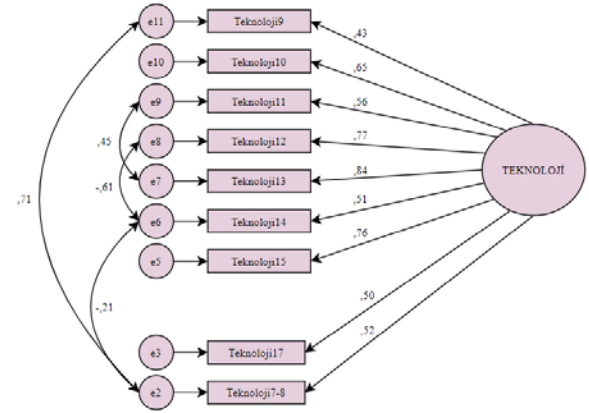
Tablo 7. Teknoloji kriterinin doğrulayıcı faktör analizi uyum değerleri (Confirmatory factor analysis results of technology criterion)

Uyum İndeksi	İyileştirme Öncesi	İyileştirme Sonrası	Kabul Edilebilir Uyum Değer
$\chi^2/sd$	2,911	1,076	$0 \leq \chi^2/sd \leq 5$
CFI	0,481	0,992	$0,95 \leq CFI \leq 1,00$
AGFI	0,569	0,851	$0,85 \leq AGFI \leq 1,00$
NFI	0,398	0,907	$0,90 \leq NFI \leq 1,00$
GFI	0,671	0,924	$0,90 \leq GFI \leq 1,00$
RMSEA	0,180	0,036	$0 \leq RMSEA \leq 0,08$

Teknoloji kriterine ait tüm değişkenler AMOS programında çalıştırılmış, ardından uyum değerleri kabul edilmeyen değişkenler çıkarılmıştır. İyileştirmeler yapıldıktan sonra teknoloji kriterine ait ölçüm modeli Şekil 4’te gösterildiği gibidir.

Çalışanlar kriterinin geçerliliğini test etmek amacıyla 8 değişkenin doğrulayıcı faktör analizi gerçekleştirilmiştir. Doğrulayıcı faktör analizi sonucunda çalışanlar kriterinde bulunan 8 değişkene ait model uyum değerlerinin kabul edilebilir düzeyde olmadıkları tespit edilmiştir. Bu nedenle ölçüm modelinde iyileştirmeler yapılmış ve modelde kabul edilebilir değerler kullanılmıştır. Bu iyileştirmeler, daha önce teknoloji kriterinde açıklandığı gibi gerçekleştirilmiştir. İyileştirme sonucunda 1 değişken elenmiş ve 7 değişken

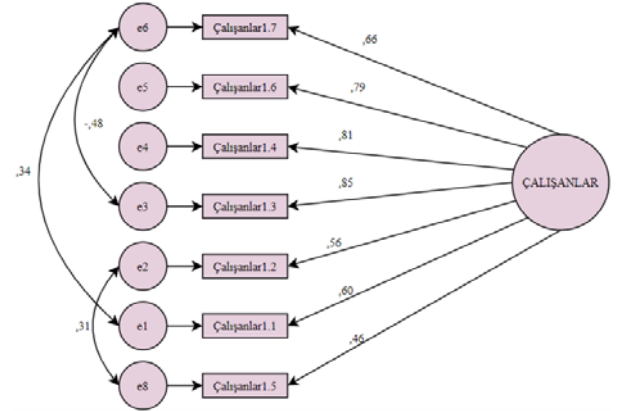
kalmıştır. İyileştirme öncesi ve sonrası uyum değerleri Tablo 8’de, ölçüm modeli ise Şekil 5’te gösterilmektedir.



Şekil 4. Teknoloji kriterine ilişkin iyileştirme sonrası ölçüm modeli (Post-improvement measurement model for technology criterion)

Tablo 8. Çalışanlar kriterinin doğrulayıcı faktör analizi uyum değerleri (Confirmatory factor analysis results of personnel criterion)

Uyum İndeksi	İyileştirme Öncesi	İyileştirme Sonrası	Kabul Edilebilir Uyum Değer
$\chi^2/sd$	2,036	1,519	$0 \leq \chi^2/sd \leq 5$
CFI	0,881	0,968	$0,95 \leq CFI \leq 1,00$
AGFI	0,771	0,840	$0,85 \leq AGFI \leq 1,00$
NFI	0,799	0,916	$0,90 \leq NFI \leq 1,00$
GFI	0,873	0,937	$0,90 \leq GFI \leq 1,00$
RMSEA	0,132	0,094	$0 \leq RMSEA \leq 0,08$



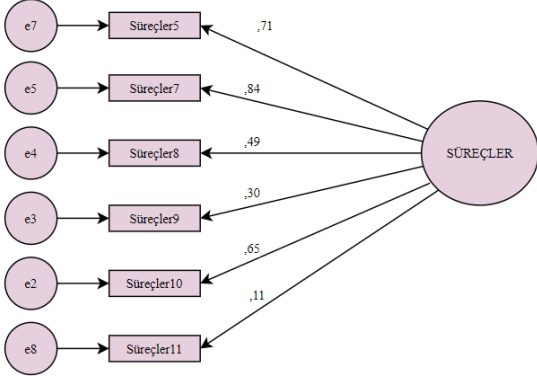
Şekil 5. Çalışanlar kriterine ilişkin iyileştirme sonrası ölçüm modeli (Post-improvement measurement model for personnel criterion)

Tablo 6. Müşteri kriterinin doğrulayıcı faktör analizi sonuçları (Confirmatory factor analysis results of customer criterion)

$\chi^2/sd$	Karşılaştırmalı Uyum İndeksi CFI	Düzeltilmiş İyilik Uyum İndeksi AGFI	Normlaştırılmış Uyum İndeksi NFI	İyilik Uyum İndeksi GFI	Yaklaşık Hataların Ortalama Karekökü RMSEA
0,500	1,000	0,948	0,875	0,983	0,000



Süreçler kriterinin geçerliliğini test etmek amacıyla 11 değişkenin doğrulayıcı faktör analizi gerçekleştirilmiştir. Doğrulayıcı faktör analizi sonucunda süreçler kriterini temsil eden 11 değişkene ait model uyum değerlerinin kabul edilebilir düzeyde olmadıkları tespit edilmiştir. Bu nedenle ölçüm modelinde iyileştirmeler yapılmış ve 5 değişken elenerek 6 değişken kalmıştır. İyileştirmeler sonucunda ortaya çıkan ölçüm modeli Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu durum Tablo 9'da gösterilmiştir.



**Şekil 6.** Süreçler kriterine ilişkin iyileştirme sonrası ölçüm modeli (Post-improvement measurement model for processes criterion)

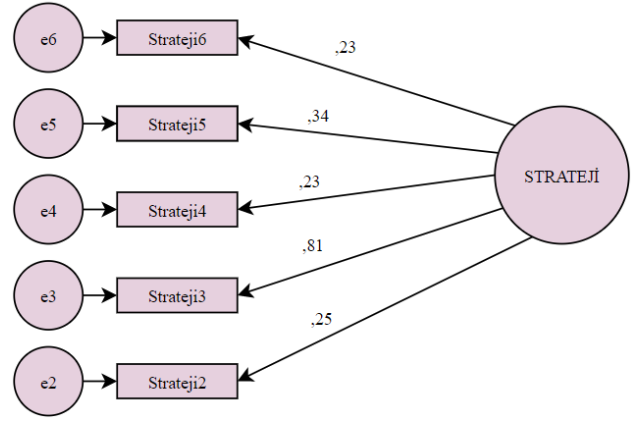
**Tablo 9.** Süreçler kriterinin doğrulayıcı faktör analizi uyum değerleri (Confirmatory factor analysis results of processes criterion)

Uyum İndeksi	İyileştirme Öncesi	İyileştirme Sonrası	Kabul Edilebilir Uyum Değer
$\chi^2/sd$	2,693	1,274	$0 \leq \chi^2/sd \leq 5$
CFI	0,466	0,961	$0,95 \leq CFI \leq 1,00$
AGFI	0,619	0,863	$0,85 \leq AGFI \leq 1,00$
NFI	0,391	0,854	$0,90 \leq NFI \leq 1,00$
GFI	0,746	0,941	$0,90 \leq GFI \leq 1,00$
RMSEA	0,169	0,068	$0 \leq RMSEA \leq 0,08$

Strateji kriterinin geçerliliğini test etmek amacıyla 6 değişkenin doğrulayıcı faktör analizi gerçekleştirilmiştir. Doğrulayıcı faktör analizi sonucunda strateji kriterini temsil eden 6 değişkene ait model uyum değerlerinin kabul edilebilir düzeyde olmadıkları tespit edilmiş ve gerekli iyileştirmeler yapılmıştır. İyileştirme sonucunda 1 değişken elenmiş ve 5 değişken kalmıştır. İyileştirme öncesi ve sonrası uyum değerleri Tablo 10'da ve ölçüm modeli ise Şekil 7'de gösterilmektedir.

**Tablo 10.** Strateji kriterinin doğrulayıcı faktör analizi uyum değerleri (Confirmatory factor analysis results of strategy criterion)

Uyum İndeksi	İyileştirme Öncesi	İyileştirme Sonrası	Kabul Edilebilir Uyum Değer
$\chi^2/sd$	1,513	1,460	$0 \leq \chi^2/sd \leq 5$
CFI	0,555	0,745	$0,95 \leq CFI \leq 1,00$
AGFI	0,846	0,853	$0,85 \leq AGFI \leq 1,00$
NFI	0,463	0,616	$0,90 \leq NFI \leq 1,00$
GFI	0,934	0,951	$0,90 \leq GFI \leq 1,00$
RMSEA	0,093	0,088	$0 \leq RMSEA \leq 0,08$

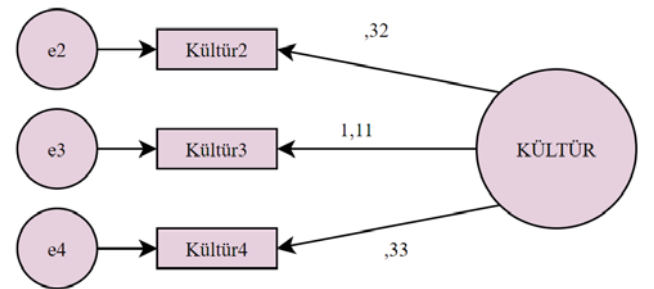


**Şekil 7.** Strateji kriterine ilişkin iyileştirme sonrası ölçüm modeli (Post-improvement measurement model for strategy criterion)

Kültür kriterinin geçerliliğini test etmek amacıyla 4 değişkenin doğrulayıcı faktör analizi gerçekleştirilmiştir. Doğrulayıcı faktör analizi sonucunda kültür kriterini temsil eden 4 değişkene ait model uyum değerlerinin kabul edilebilir düzeyde olmadıkları tespit edilmiştir. Bu nedenle ölçüm modelinde iyileştirmeler yapılmış ve modelde kabul edilebilir değerler elde edilmiştir. İyileştirme sonucunda 1 değişken elenmiş ve 3 değişken kalmıştır. Böylelikle model uyum değerleri kabul edilebilir düzeye getirilmiştir. Bu durum Tablo 11'de gösterilirken, ölçüm modeli Şekil 8'de gösterilmiştir.

**Tablo 11.** Kültür kriterinin doğrulayıcı faktör analizi uyum değerleri (Confirmatory factor analysis results of culture criterion)

Uyum İndeksi	İyileştirme Öncesi	İyileştirme Sonrası	Kabul Edilebilir Uyum Değer
$\chi^2/sd$	1,644	0	$0 \leq \chi^2/sd \leq 5$
CFI	0,910	1	$0,95 \leq CFI \leq 1,00$
NFI	0,838	1	$0,90 \leq NFI \leq 1,00$
GFI	0,974	1	$0,90 \leq GFI \leq 1,00$
RMSEA	0,104	0	$0 \leq RMSEA \leq 0,08$



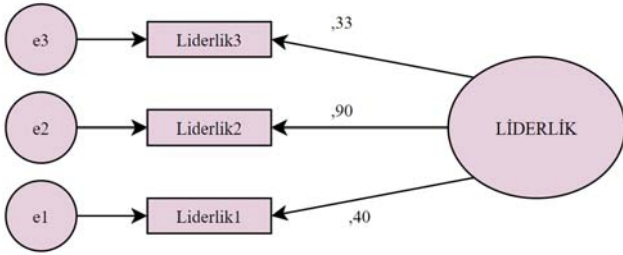
**Şekil 8.** Kültür kriterine ilişkin iyileştirme sonrası ölçüm modeli (Post-improvement measurement model for culture criterion)

Liderlik kriterinin geçerliliğini test etmek amacıyla 3 değişkeninin doğrulayıcı faktör analizi gerçekleştirilmiştir. Model incelendiğinde tüm değişkenlerin uyum değerleri kabul edilebilir düzeyde oldukları için iyileştirmeye gerek duyulmamıştır. Analiz sonuçları Tablo 12'de gösterilmiştir.

Ayrıca, bu kritere ait ölçüm modeli Şekil 9’da gösterilmektedir.

**Tablo 12.** Liderlik kriterinin doğrulayıcı faktör analizi uyum değerleri  
(Confirmatory factor analysis results of leadership criterion)

$\chi^2/sd$	CFI	NFI	GFI	RMSEA
0	1,000	1,000	1,000	-

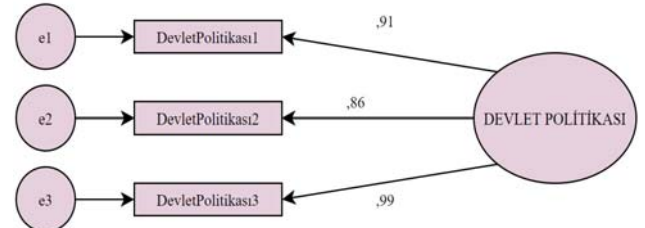


**Şekil 9.** Liderlik kriterine ait ölçüm modeli  
(Measurement model for leadership criterion)

Devlet politikası kriterinin geçerliliğini test etmek amacıyla 3 değişkeninin doğrulayıcı faktör analizi gerçekleştirilmiştir. Model incelendiğinde tüm değişkenlerin uyum değerleri kabul edilebilir düzeyde oldukları için iyileştirmeye gerek duyulmamıştır. Analiz sonuçları Tablo 13’te gösterilmiştir. Ayrıca, bu kritere ait ölçüm modeli Şekil 10’da gösterilmektedir.

**Tablo 13.** Devlet politikası kriterinin doğrulayıcı faktör analizi uyum değerleri  
(Confirmatory factor analysis results of government policy criterion)

$\chi^2/sd$	CFI	NFI	GFI	RMSEA
0	1,000	1,000	1,000	-

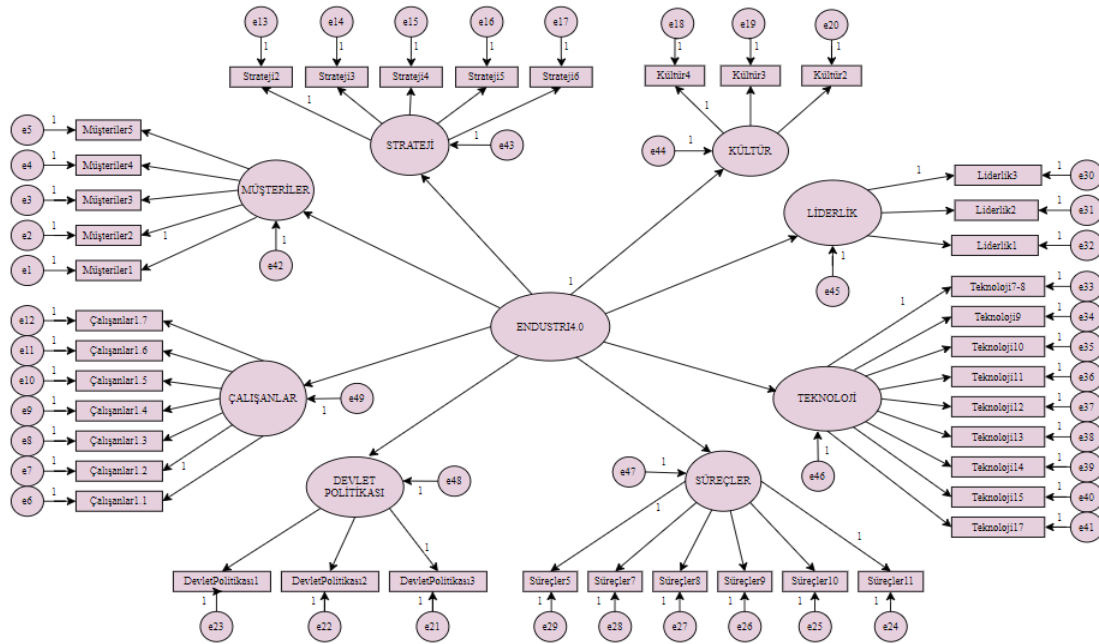


**Şekil 10.** Devlet politikası kriterine ait ölçüm modeli  
(Measurement model for government policy criterion)

### 3.2. İkinci Derece Doğrulayıcı Faktör Analizi (Second Order Confirmatory Factor Analysis)

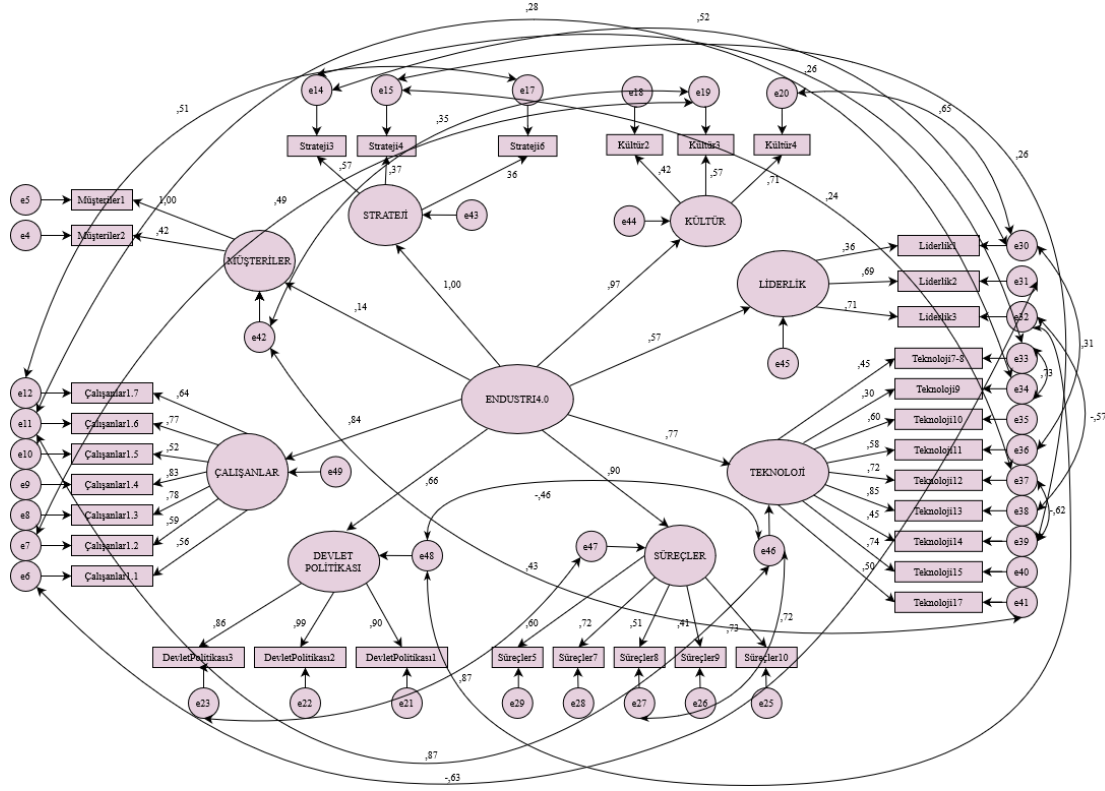
İkinci derece doğrulayıcı faktör analizinde modele kriterlerin açıkladığı bir üst seviye gizli değişken daha eklenmektedir. Araştırma modelinde teknoloji, strateji, çalışanlar, kültür, müşteri, liderlik, devlet politikası ve süreçler kriterleri daha üst düzeyde ve kapsayıcı bir yapı olan Endüstri 4.0 gizli değişkeninin birer bileşeni konumundadırlar. Modele ayrıca bu faktörleri üst seviyede yeni faktöre bağlayan regresyon yolları eklenmektedir. Birinci seviye faktörler artık bağımlı değişken konumunda oldukları ve yeni bir üst seviye faktörü açıkladıkları için bunlara birer artık hata terimi eklenmektedir [37]. Modelin uyumunu düşürecek olan değişkenler programdan tek faktörlü model yardımı ile çıkartılmıştır. Endüstri 4.0’ı etkileyen faktörler ve değişkenleri ifade eden yapı Şekil 11’de gösterilmektedir.

İkinci dereceden DFA modeli incelendiğinde;  $\chi^2$  değeri CMIN, serbestlik derecesi ise *sd* kısaltmasıyla gösterilmektedir. Modelin yeterli kabul edilmesi için  $\chi^2$  değerinin yüksek ve  $p < 0,5$  olması gerekmektedir. AMOS çıktı ekranında serbestlik derecesi 771 için  $\chi^2$  değeri 2750,78 ve *p* değeri 0 olarak elde edilmiştir. Buradan  $\chi^2/sd$



**Şekil 11.** İkinci derece faktör analizi modeli –girdi yol diyagramı (Second order factor analysis model - input patch diagram)





Şekil 13. İkinci model için modifikasyon sonrası yol diyagramı (Patch diagram for the second model after the modification)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Geleceğin teknolojisi olan Endüstri 4.0 hızla gelişmekte ve rekabet ortamında yayılmaya devam etmektedir. Endüstri 4.0 ile geleneksel üretim anlayışı yerini bilişim teknolojileriyle donatılmış bir üretim anlayışına bırakmaktadır. Rekabet ve üretim ortamında geride kalmak istemeyen işletmeler Endüstri 4.0'a uyum sağlamak zorundadır. Endüstri 4.0'ın kazanımları daha az maliyetle, minimum kaynak ve zaman kullanarak, yüksek hızda ve güvenilirlikte çalışma, işgücü yükünü azaltarak eski sistemlere göre daha verimli ve daha kaliteli ürün üretimini sağlamaktadır. Sistemin izlenebilirliğini sağlamakla birlikte üretimde esnekliğin artırılmasını sağlar. Ancak, Endüstri 4.0'a geçiş maliyetli bir süreçtir. Bu sebeple işletmeler ilk olarak kendi yeteneklerini iyi analiz etmeli, güçlü ve eksik yönlerini belirlemeli ve buna göre bir dijital dönüşüm yol haritası oluşturmalıdırlar. Endüstri 4.0'a erişebilmenin en önemli koşulu, bu kavramın iyi bir şekilde anlaşılmasından geçmektedir. Alınan yanlış kararlar, gereksiz yatırımların yapılmasına ve dolayısıyla büyük zararlara yol açabilmektedir. Büyük yatırımlar yapmadan önce ihtiyaçlar detaylıca analiz edilmeli ve ona göre karar alınmalıdır.

Literatür araştırması sonucunda Endüstri 4.0 kriterlerinin önem derecelerinin belirlenmesi konusunda yapılan çalışmaların yetersiz olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, Endüstri 4.0 kriterlerinin etkilerinin belirlenmesi için bir model kurulmuş ve Endüstri 4.0 seviyesini etkileyen kriterlerinin etki dereceleri ölçülmüştür. Çalışmada

işletmeler için Endüstri 4.0 seviyesini etkileyen kriterlerin birbirleriyle ve Endüstri 4.0 ile ilişkilerini açıklamak amaçlanmıştır. Bu amaçla Endüstri 4.0 seviyesini etkileyen kriterler literatürden hareketle tespit edilmiş ve YEM kullanılarak bir model hazırlanmıştır. Modelde 8 adet kriter kullanılmıştır: teknoloji, strateji, müşteriler, liderlik, devlet politikası, kültür, süreçler ve çalışanlar. Kriterler anket sorularıyla ilişkilendirilmiş ve işletmeye konu ile ilgili anket çalışması yapılmıştır. Anketlerden ve oluşturulan modelden yararlanılarak hangi kriterlerin daha etkili olduğu belirlenmiştir. Her kriterin Endüstri 4.0 ilişkisi belirlenmeye çalışılırken, ilk önce faktörler düzeyinde de analiz gerçekleştirilerek Endüstri 4.0'ı oluşturan unsurların etkileri ayrı ayrı tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışma sonucunda işletmeler eksik yanları tespit edebilir ve geliştirilmesi gereken yönlerine odaklanabilir. İşletmelerin büyük yatırım kararları vermeden önce bir dijital dönüşüm yol haritası oluşturmasında referans olarak kullanılması amaçlanmıştır.

Çalışmada, işletmelerin Endüstri 4.0 seviyelerini etkileyen kriterlerin YEM ile önem dereceleri belirlenmiş ve bu kapsamda alüminyum firmasında yapılan anketler çerçevesinde bir pilot çalışma yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, yalnızca Endüstri 4.0'ı etkileyen kriterlerin belirlenerek seviye ölçülmesi yerine, ilgili kriterlerin Endüstri 4.0'ı aynı oranda etkilemeyeceği ve farklı ağırlıklara sahip olabileceğinin de göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır. Modeldeki değişkenlere ilişkin değerlendirmelerin yapılabilmesi için SPSS 20 programı kullanılmıştır. Modeldeki değişkenler

arasında ilişki olup olmadığı hipotezi karmaşık problemlerdeki avantajları nedeniyle YEM'den yararlanılarak incelenmiştir. Endüstri 4.0 ile ilişkilendirilen kriterler pozitif çıkmıştır. Müşteriler kriteri hariç tüm kriterler (strateji, kültür, liderlik, teknoloji, süreçler, devlet politikası ve çalışanlar) anlamlı çıktığı için ( $p < 0,05$ ) hipotezler kabul edilmiştir. Müşteriler kriterinin pozitif olması ama anlamsız olmasından dolayı ( $p > 0,05$ ) hipotez reddedilmiştir. Değerlendirme sonucunda en yüksek faktör yüküne sahip olan kriter stratejidir (1,00). Ardından kültür (0,97) ve süreçler (0,90) yaklaşık olarak birbirine yakın faktör yüküne sahip olarak gelmektedir. 4. kriter 0,84 faktör yükü ile çalışanlardır. Modeli incelediğimizde bu kriterlerden sonra teknoloji (0,77), devlet politikası (0,66) ve liderlik (0,57) gelmektedir.

Yapılan bu çalışmanın işletmelerin dijital dönüşüm yol haritalarını belirlemede yardımcı olması hedeflenmektedir. İşletmeler, ulaşmak istedikleri Endüstri 4.0 kavramının hangi kriterlerden ne derecede etkilendiğini bilerek yola çıktıklarında, bu yola bir adım önde başlayacak ve zayıf yönlerini önceden bilerek ona göre geliştirmeler ve iyileştirmeler yapabileceklerdir. Bu sayede hem zaman ve hız kazanacak hem de olası yanlış hamlelerin getireceği olumsuzlukların önüne geçmiş olacaklardır. Gelecek çalışmalarda, Endüstri 4.0'ı etkileyebilecek farklı kriterlerin de ele alınması ile birlikte çok kriterli karar verme teknikleriyle modeller geliştirilebilir ve geliştirilen modeller arasındaki elde edilen kriter ağırlıkları karşılaştırılabilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Walsh G., Möhring M., Koot C., Schaarschmidt M., Preventive Product Returns Management Systems - A Review and Model, Proceedings of the European Conference on Information Systems, 13, 9-11 June, 2014.
- Kagermann H., Wahlster W. ve Helbig J., Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0, 2013.
- Türker A. K., Göleç A., Aktepe A., Ersöz S., İpek M., Çağil G., A real-time system design using data mining for estimation of delayed orders and application, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 709–724, 2019.
- Lichtblau K., Stich V., Bertenrath R., Blum M., Bleider M., Millack A., Schmitt K., Schmitz E. ve Schröter M., Industrie 4.0 Readiness, 1–78, 2015.
- Geissbauer R., Vedso J. ve Schrauf S., Industry 4.0: Building the Digital Enterprise, Pricewaterhouse Coopers, 36, 2016.
- Schumacher A., Erol S., Sihn W., A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises, Procedia CIRP, 52, 161–166, 2016.
- Zeller V., Hocken C., Stich V., Acatech Industrie 4.0 Maturity Index – A Multidimensional Maturity Model, In Advances in Production Management Systems, Smart Manufacturing for Industry 4.0, IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer International Publishing: Cham, 105–113, 2018.
- Kiraz A., Uygun Ö., Erkan E., Canpolat O., Fuzzy Cognitive Mapping Approach for Assessing Industry 4.0 Tendency, Sci. Iran., 2019. <https://doi.org/10.24200/sci.2019.51200.2057>.
- Raykov T. ve Marcoulides G. A., A first course in structural equation modeling, 2nd edition, Lawrence Erlbaum Associates Publishers: Mahwah, NJ, US, 2006.
- Byrne B. M., Structural Equation Modeling With AMOS: Basic Concepts, Applications, and Programming, 2nd edition, Routledge: New York, 2009.
- Dursun Y., Kocagöz E., Yapısal Eşitlik Modellemesi ve Regresyon: Karşılaştırmalı Bir Analiz, Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg., 35, 1–17, 2010.
- Özer Y., Anil D., Öğrencilerin Fen ve Matematik Başarılarını Etkileyen Faktörlerin Yapısal Eşitlik Modeli ile İncelenmesi, HU J. Educ., 41, 313–324, 2011.
- Koyuncu Yemenici N., Altı Sigma Metodolojisinde Yapısal Eşitlik Modelinin Araç Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2012.
- Baldemir E., Bozkurt B., Konaklama Tesislerinin Performanslarını Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi: Marmaris Örneği, Muğ Sıtkı Koçman Üniversitesi Sos. Bilim. Enstitüsü Derg., 29, 27–43, 2012.
- Uygurtürk H., Marka Değerini Oluşturan Faktörlerin Yapısal Eşitlik Modeli ile Analizi: Seyahat Acentaları Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Zonguldak, 2014.
- Çapık C., Geçerlik ve Güvenirlik Çalışmalarında Doğrulayıcı Faktör Analizinin Kullanımı, Anadolu Hemşire ve Sağlık Bilim. Derg., 17 (3), 196–205, 2014.
- Özkurt C., Endüstri 4.0 Perspektifinden Türkiye'de İmalat Sanayinin Durumu: Sakarya İmalat Sanayi Üzerine Bir Anket Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2016.
- PricewaterhouseCoopers., The Industry 4.0: Digital Operations Self Assessment, 2016.
- Basl J., Kopp J., Study of the Readiness of Czech Companies to the Industry 4.0, J. Syst. Integr., 8 (3), 40–45, 2017.
- Dişyadin A., Koçak A., Sanayi 4.0 Geçiş Süreçlerinde Kritik Başarı Faktörlerinin DEMATEL Yöntemi ile Değerlendirilmesi, Ege Akad. Bakis Ege Acad. Rev., 18 (1), 107–120, 2018.
- Kiraz A., Canpolat O., Erkan E. F., Uygun Ö., İmpuls Kriterleri ile Endüstri 4.0 Eğiliminin Değerlendirilmesi: Bir Bulanık Bilişsel Harita Uygulaması, Acad. Platf. J. Eng. Sci., 7 (1), 23–14, 2019.
- Iriondo J. M., Albert M. J., Escudero A., Structural Equation Modelling: An Alternative for Assessing Causal Relationships in Threatened Plant Populations, Biol. Conserv., 113 (3), 367–377, 2003.

23. Hoyle R., *Structural Equation Modeling: Concepts, Issues, and Applications*, 1st edition, SAGE Publications, Inc: Thousand Oaks, 1995.
24. Jöreskog K. G., *A General Method for Estimating a Linear Structural Equation System*, ETS Res. Bull. Ser., 2, 1–41, 1970.
25. Keesling J., *Maximum Likelihood Approaches to Causal Flow Analysis*, PhD Thesis, University of Chicago, Chicago, 1972.
26. Wiley D., *The Identification Problem for Structural Equation Models with Unmeasured Variables*, Struct. Equ. Models Soc. Sci., 69–83, 1973.
27. Yudatama U., Hidayanto A. N., Nazief B. A. A., Phusavat K., *Data to Model the Effect of Awareness on the Success of IT Governance Implementation: A Partial Least Squares Structural Equation Modeling Approach (PLS-SEM)*, Data Brief, 25, 104333, 2019.
28. Nicolas C., Kim J., Chi S., *Quantifying the Dynamic Effects of Smart City Development Enablers Using Structural Equation Modeling*, Sustain. Cities Soc., 53, 101916, 2020.
29. Kursunoglu N., Onder M., *Application of Structural Equation Modeling to Evaluate Coal and Gas Outbursts*, Tunn. Undergr. Space Technol., 88, 63–72, 2019.
30. Jabeen G., Yan Q., Ahmad M., Fatima N., Qamar S., *Consumers' Intention-Based Influence Factors of Renewable Power Generation Technology Utilization: A Structural Equation Modeling Approach*, J. Clean. Prod., 237, 117737, 2019.
31. Vilorio A., Pineda Lezama O. B., *Mixture Structural Equation Models for Classifying University Student Dropout in Latin America*, Procedia Comput. Sci., 160, 629–634, 2019.
32. Ding N., Jiao N., Zhu S., Liu B., *Structural Equations Modeling of Real-Time Crash Risk Variation in Car-Following Incorporating Visual Perceptual, Vehicular, and Roadway Factors*, Accid. Anal. Prev., 133, 105298, 2019.
33. Kaplan D., *Statistical Power in Structural Equation Modeling: Concepts, issues, and applications*, Sage Publications, Inc: Thousand Oaks, CA, US, 100–117, 1995.
34. Kline R. B., *Principles and Practice of Structural Equation Modeling*, 3rd edition, The Guilford Press: New York, 2010.
35. Büyüköztürk Y. Ş., Bökeoğlu Ö. Ç. ve Şekercioğlu G., *Sosyal Bilimler İçin Çok Değişkenli İstatistik SPSS ve LISREL Uygulamaları*, 2nd edition, Pegem Akademi Yayıncılık, 2012.
36. Schumacker R. E. ve Lomax R. G., *A Beginner's Guide to Structural Equation Modeling*, 4th edition, Routledge: New York, NY, 2015.
37. Şimşek Ö. F., *Yapısal Eşitlik Modellemesine Giriş - Temel İlkeler ve LISREL Uygulamaları*, Ekinoks Eğitim Danışmanlık Hiz., 2007.
38. Waltz C. F., Strickland O. L. ve Lenz E. R., *Measurement in Nursing and Health Research*, 5th edition, Springer Publishing Company: New York, 2016.
39. Kline R. B., *Principles and Practice of Structural Equation Modeling*, 2nd edition, Guilford Publications, 2005.
40. Harrington D., *Confirmatory Factor Analysis*, Oxford University Press, USA, 2009.
41. Şeşen H., Meydan C.H., *Yapısal Eşitlik Modellemesi-AMOS Uygulamaları*, 2nd edition, Detay Yayıncılık, 2011.