

Araştırma Makalesi

Dijital Dönüşüm Ekseninde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Endüstri 4.0 Olgunluk Modelinin Değerlendirilmesi

Melike Selen Dermenci^{1,*}, Aysun Sağbaş²

^{1,2} Endüstri Mühendisliği, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye, 59860

¹selendermenci@gmail.com, ²asagbas@nku.edu.tr

Geliş: 13.11.2023

Kabul: 06.12.2023

DOI: 10.55581/ejeas.1390175

Öz: Teknolojik gelişme ve rekabetin hızla arttığı günümüzde, verimlilik ve üretkenliği artırarak sürdürülebilir üretim gerçekleştirme hedefinde olan işletmeler için; dijitalleşme sürecine uyum sağlamak, mutlak bir gereklilik olarak gözükmektedir. Bu çerçevede, rekabet avantajı sağlamak isteyen işletmelerin bu değişimler karşısında aksiyon alabilmeleri için, dijital dönüşüm yol haritasının oluşturulması büyük önem arz etmektedir. Yapılan çalışmada; beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede; endüstri 4.0 teknolojik olgunluk seviyesinin ölçülebilmesi için, endüstri 4.0'ın yeni nesil teknolojilerini kapsayan bir dijital olgunluk modeli ortaya konulmuştur. Bu amaçla, çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) ve TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemleri uygulanmıştır. Geliştirilen olgunluk modelinde yer alan ana ve alt kriter ağırlıklarının belirlenmesi amacı ile Analitik Hiyerarşi Prosesi yöntemi kullanılmış olup, çalışmanın yapıldığı işletmede çalışan ve konu üzerinde uzman kişilerin değerlendirmeleri alınmıştır. İncelenen olgunluk modelinde ana kriter olarak seçilen, fabrika 4.0, lojistik 4.0, yönetim 4.0 ve operatör 4.0 ana boyutları için teknolojik olgunluk seviyesinin derecelendirilmesi TOPSIS yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Sonuçta; endüstri 4.0 ekseninde ve belirlenen kriterler çerçevesinde işletmenin teknolojik olgunluk düzeyi belirlenmiş ve geliştirilen olgunluk modelinin farklı sektörlerde faaliyet gösteren işletmelere, dijital dönüşüm konusunda yol gösterici olması hedeflenmiştir.

Anahtar kelimeler: AHP, Dijital dönüşüm, Endüstri 4.0, Olgunluk modeli, TOPSIS

Evaluation of Industry 4.0 Maturity Model with Multi-criteria Decision Making Methods on the Axis of Digital Transformation

Abstract: In today's world where technological developments and competition are increasing rapidly, adapting to the digitalization process seems an absolute necessity for businesses that aim to achieve sustainable production by increasing efficiency and productivity. In this context, it is of great importance to create a digital transformation road map so that businesses that want to gain a competitive advantage can take action against these changes. In the study in a business operating in the white goods sector; In order to measure the technological maturity level of Industry 4.0, a digital maturity model covering the new generation technologies of Industry 4.0 has been introduced. For this purpose, AHP (Analytical Hierarchy Process) and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) methods, which are multi-criteria decision-making methods, were applied. Analytical Hierarchy Process method was used to determine the weights of the main and sub-criteria in the developed maturity model, and the evaluations of people working in the enterprise where the study was conducted and experts on the subject were received. Grading of the technological maturity level for the main dimensions of factory 4.0, logistics 4.0, management 4.0 and operator 4.0, which were selected as the main criteria in the maturity model examined, was carried out with the TOPSIS method. After all; in the Industry 4.0 axis, the technological maturity level of the enterprise was determined within the framework of the determined criteria, and the maturity model developed was aimed to guide businesses operating in different sectors on digital transformation.

Keywords: AHP, Digital transformation, Industry 4.0, Maturity model, TOPSIS.

*Sorumlu yazar

E-mail adresi: selendermenci@gmail.com (M. S. Dermenci)

1. Giriş

Buhar makinasının icat edilmesi ile başlayan sanayi devrimleri, elektrik enerjisinin kullanılması ile seri üretime geçilmesine katkı sağlamış ve sonrasında dijital devrim olarak adlandırılan 3. sanayi devrimi ile birlikte, üretimde dijitalleşmenin başlamasına yol açmıştır. Günümüzde endüstri 4.0 (sanayi 4.0) kavramı; üretim ve hizmet alanında faaliyet gösteren işletmeler için, farklı iş süreçlerinde uygulanabilecek çeşitli teknolojiler sunmaktadır. Sanayi 4.0 çerçevesinde; endüstriyel alanlara dahil olmaya başlayan yeni nesil teknolojiler ile, tüketici davranışları karşısında daha esnek, piyasa koşulları karşısında daha dayanıklı konumlanan üretim ve yönetim sistemlerinin oluşturulması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, farklı iş süreçlerine entegre edilen yeni nesil teknolojiler ile daha düşük maliyet, daha hızlı üretim ve daha az kaynak tüketimi konuları önem kazanmış ve endüstri 4.0'ın yanı sıra sürdürülebilirlik kavramı da işletmelerin öncelikli hedefleri arasında yer almaya başlamıştır. Hızlı ve radikal gelişmelerin meydana geldiği bu süreçte işletmeler, çeşitli zorluklar ile karşı karşıya kalmaktadırlar. Her gün gelişen ve değişen müşteri isteklerini karşılamak ve pazarda güçlü bir konuma sahip olmak, bu zorluklar içerisinde ilk sırada yer almaktadır [1]. Bu kapsamda hem günümüz şartlarına uyum sağlamak hem de verimlilik ve üretkenliği artırarak sürdürülebilir bir üretim anlayışını sahip olabilmek için işletmelerin endüstri 4.0 teknolojilerini kullanarak dijitalleşme çağına ayak uydurmaları mutlak bir gereklilik olarak görülmektedir.

Birinci sanayi devriminden günümüze kadar geçen sürede meydana gelen teknolojik gelişmeler hem günlük yaşamımızda hem de üretim süreçlerimizde köklü değişimler yaratmıştır. Günümüzün rekabet dünyasında, işletmeler bu köklü değişimlere ayak uydurmak durumunda kalmıştır. Yapılan çalışmada; işletmelere bu değişimler karşısında aksiyon alabilmeleri için gerekli olan yol haritasının hazırlanması ve işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerinde olgunluk seviyelerinin belirlenmesi amacıyla, bir endüstri 4.0 dijital olgunluk modelinin ortaya konulması hedeflenmiştir. Dijital olgunluk modeli oluşturulurken, işletmelere rekabet avantajı sağlayacak tüm yeni nesil teknolojiler göz önüne alınmış olup; fabrika 4.0, lojistik 4.0, yönetim 4.0 ve operatör 4.0 olmak üzere 4 farklı teknoloji değerlendirilmiştir. Modelin uygulanması ile işletmenin mevcut endüstri 4.0 olgunluk seviyesinin belirlenmesi ve dört ana boyutun kendi aralarında değerlendirilebilir bir yapıya getirilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede gelişime daha fazla ihtiyaç duyulan alanlar belirlenmiş ve öncelikli alanların tanımlanması sağlanmıştır. Çalışma beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede gerçekleştirilmiş olup, yapılan çalışmada kullanılan kriterler, literatür ve işletme dinamikleri birlikte değerlendirilerek seçilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar çerçevesinde; işletmenin ilgili bölümlerinde çalışan yöneticiler ve mühendislerin değerlendirmesi ile, işletme bazında kullanımı en yaygın olan endüstri 4.0 teknolojileri seçilmiştir. Literatürdeki endüstri 4.0 olgunluk modelleri ile ilgili çalışmalar incelediğinde; beyaz eşya sektörü özelinde yapılmış kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca işletme dinamikleri göz önüne alınarak seçilen kriterler değerlendirildiğinde; sektör özelinde spesifik olarak her bir

endüstri 4.0 teknolojisinin ayrı ayrı irdelenmiş olması önemlidir. Bu özellikler, çalışmanın özgün yönünü oluşturmada ve bu yönü ile literatüre farklı bir bakış açısı kazandırılması amaçlanmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde daha çok kuramsal temeller üzerine kurulmuş olan olgunluk değerlendirme modellerine rastlanmıştır. Yapılan çalışmada ise; hem üretime entegre edilen yeni nesil teknolojileri içine alan, hem de yönetsel kavramları kapsayan bir olgunluk modelinin geliştirilmesi, çalışmanın önemli diğer bir özgün değeri olarak belirtilebilir. Bu çerçevede de, literature katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Uygulama ve işletmeler açısından bakıldığında; oluşturulan olgunluk modelinin beyaz eşya sektöründe uygulanmasına rağmen, farklı sektörlerde de uygulanması ile işletmeler için dijital dönüşüm yolculuğunda uzun vadeli bir rehber niteliğinde olması hedeflenmiştir.

İşletmelerin endüstri 4.0 dijital olgunluk seviyelerinin belirlenmesi konusunda literatürde yapılan çalışmalar incelenmiş ve aşağıda özetlenmiştir. Schumacher, Erol ve Sih [2] dördüncü sanayi devrimi teknolojilerinin işletmelere entegre edilmesini desteklemek amacıyla, firmalar tarafından kolay uygulanabilir ve gelecekteki uygulamalara yol gösteren bir model önermişlerdir. Çalışma ile ortaya çıkarılan model 9 boyut ve 62 alt kriterden oluşmakta ve işletmelerin olgunluk seviyesi ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılarak elde edilmektedir. Model havacılık ve uzay sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede anket yöntemi kullanılarak uygulanmış ve anket likert ölçeği kullanılarak değerlendirilmiştir. Commuzzi ve Patel [3] çalışmalarında daha çok büyük veri odaklı bir teknolojik olgunluk modeli üzerinde durmuşlardır. Likert ölçeği kullanılarak çalıştırılan model, uygulandığı üç firma içinde eleştirel bir bakış açısıyla gelecekte atılacak adımlara yol gösterici olmuştur. Häberer, Lau ve Behrendt [4] ortak çalışmalarında, KOBİ'lerin endüstri 4.0 olgunluk derecelerini belirlemek için sunulan modellerin eksikliklerine odaklanmışlardır. Farklı iki modelin analiz edilmesi ve avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesi ile küçük ve orta ölçekli işletmelerin değerlendirilmesini baz alan yeni bir model ortaya konulmuştur. Keskin ve ark. [5] tarafından oluşturulan üç aşamalı modelde; organizasyonların endüstri 4.0 hazırlık seviyelerinin tespit edilmesi amaçlanmış olup, modelin çözümlenmesinde çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve TOPSIS tercih edilmiştir. Akdil, Üstündağ ve Çevikcan [6] yaptıkları çalışmada, literatürde yer alan dört farklı endüstri 4.0 olgunluk ve hazırlık modelini incelemiş ve bu modellerin karşılaştırmasını yapmışlardır. Yapılan analizler ile üç boyut ve on üç alt kriterden oluşan yeni bir model ortaya konulmuştur. Geliştirilen model Türkiye'de perakende sektöründe faaliyet gösteren bir işletmeye uygulanmış ve belirlenen kriterlerin olgunluk dereceleri hesaplanmıştır. Bibby ve Dehe [7] endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanabilirlik seviyelerini belirlemek amacıyla üç boyuttan oluşan teknolojik olgunluk modeli oluşturmuşlardır. Geleceğin fabrikası, insan-kültür ve strateji olmak üzere üç ana ve 13 alt kriterden oluşan modelde, dijital olgunluğun ölçülmesi için IMPULS ve "dijital operasyonlar öz değerlendirme modeli" kullanılmıştır. Elde edilen modelin değerlendirme işlemi karar vericilerin değerlendirmesi ve kriterlerin ağırlıklı ortalamalarının hesaplanması üzerine

kurulmuştur. Çalışma, savunma sanayi alanında faaliyet gösteren 12 büyük ölçekli firma için uygulanmıştır. Kiraz ve ark. [8] tarafından yapılan çalışmada, işletmelerin hem mevcut hem de gelecekteki endüstri 4.0 seviyelerinin belirlenmesi için bir model önerilmiştir. Modelde, IMPULS kriterleri baz alınmış ve kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesi amacıyla DEMATEL (The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) ve literatürde daha önce kullanılmamış BBH (Bulanık Bilişsel Haritalama) yöntemlerinden yararlanılmıştır. Çalışmanın sonucunda üç farklı senaryo ayrı ayrı değerlendirilmiş ve endüstri 4.0 olgunluk seviyesini en çok etkileyen kavramlar belirlenmiştir. Santos ve Martinho [9] tarafından önerilen endüstri 4.0 olgunluk modeli; literatürde yer alan üç farklı olgunluk modelinin analiz edilmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Analiz sonucunda sunulan beş boyutlu model, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren iki farklı işletmede uygulanmıştır. Modelin uygulama aşamasında anket yönteminden yararlanılmış ve olgunluk seviyeleri tam olarak açıklanmıştır. Koyuncu [10] yaptığı çalışmada; literatürde yer alan sanayi 4.0 rehberi, bağlantılı kurumsal olgunluk modeli, ACATECH, dijital operasyonlar öz değerlendirme modeli ve IMPULS olmak üzere farklı endüstri 4.0 olgunluk değerlendirme modellerinin Bulanık TOPSIS yöntemi ile karşılaştırılmasını gerçekleştirmiştir. Üç uzman karar verici ile yapılan değerlendirme sonucunda IMPULS modeli en iyi model olarak seçilmiş ve uygulama yapılan firmada IMPULS modelinin uygulanması ile gelecek için bir yol haritası oluşturulmuştur. Etkeser [11] tarafından yapılan çalışmada KOBİ'lerin endüstri 4.0 hazırlık seviyelerini saptamak amacı ile bir olgunluk modeli üzerinde çalışmıştır. Dokuz boyut üzerine kurulmuş olan olgunluk modelinin değerlendirme aşamasında AHP yöntemi kullanılmıştır. Tekstil ve kimya sektöründe faaliyet gösteren iki farklı firmada uygulanan modelin güvenilirliği de ispatlanmıştır. Pacchini ve ark. [12] tarafından oluşturulan olgunluk modeli; nesnelere interneti, büyük veri, bulut bilişim, siber-fiziksel sistemler, işbirlikçi robotlar, eklemeli imalat, artırılmış gerçeklik ve yapay zekâ olmak üzere sekiz farklı yeni nesil teknolojinin değerlendirilmesini gerçekleştirmektedir. Otomotiv sektöründe uygulanan model, değerlendirilen işletmenin çalışma içerisinde belirlenen altı farklı seviyeden hangisinde yer aldığına gösterilmesine katkı sağlamıştır. Çiray [13] tarafından gerçekleştirilen çalışmada; küçük ve orta ölçekli imalat firmalarının endüstri 4.0 olgunluk düzeylerinin belirlenmesi için bir olgunluk modeli geliştirilmiştir. Oluşturulan model beş boyuttan (Strateji ve Politika, İnsan ve Kültür, Organizasyon ve Süreçler, Bilişim Teknolojileri ve Ürünler) oluşmakta olup, beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren 23 işletmede uygulanmıştır. Modelin uygulanması ile işletmelerin dijital dönüşüm süreçleri için gerekli olan faaliyetleri planlayabilecek çıktılara sahip olmaları hedeflenmiştir. Wagire ve ark. [14] Hindistan'da bulunan imalat işletmelerinin teknolojik olgunluk düzeyini belirlemek amacı ile, 7 boyut ve 38 alt kriterden oluşan ampirik temelli bir olgunluk modeli önermişlerdir. Çok sayıda değerlendiricinin bulunduğu çalışmada daha doğru bir karar verme süreci yürütülebilmesi ve kriterlerin önem seviyelerinin karar vericiler özelinde değerlendirilmesi için bulanık AHP çok kriterli karar verme yönteminden yararlanılmıştır. Rafael ve ark. [15] IMPULS kriterlerini baz alarak gerçekleştirdikleri

çalışmada, işletmeler için dijitalleşme konusunda yol gösterici olabilecek bir model ortaya koymuşlardır. Oluşturulan modelin standart bir model haline gelebilmesi için farklı sektörlerde ve farklı bilimsel yöntemler kullanılarak uygulanması gerektiği belirtilmiştir. Sarı [16] yaptığı çalışmada; kriterleri arasında eklemeli imalat ve büyük veri gibi teknolojilerin yer aldığı bir endüstri 4.0 olgunluk modeli oluşturmuştur. Gıda ve içecek sektöründe uygulaması gerçekleştirilen modelin değerlendirme aşamasında AHP çok kriterli karar verme yöntemi kullanılmıştır. Ataman [17] ortaya koyduğu çalışmada; savunma sanayinin endüstri 4.0 olgunluk düzeyini belirlemek amacı ile bulanık AHP tekniğini kullanmıştır. 3 uzman görüşü alınarak değerlendirilen modelin sonucunda 5 kriter içinden en yüksek değeri sahip kriter strateji olarak ortaya çıkmıştır. Rauch ve ark. [18] yaptıkları çalışmada 42 farklı endüstri 4.0 konseptine yer vermiş ve oluşturulan olgunluk modelinin değerlendirme aşamasında; kriterlerin mevcut ve hedef değerlerine ek olarak kriter ağırlıklarını da sürece dahil edilmiştir. Model, 17 farklı sanayi şirketinde gerçekleştirilmiştir. Baki ve Serdar [19] lojistik sektöründe faaliyet gösteren firmaların sanayi 4.0 olgunluk seviyelerini belirlemek amacı ile bir olgunluk modeli önermişlerdir. Önerilen modelde IMPULS olgunluk modeline ait kriterler kullanılmış olup, modelin değerlendirilmesi için iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmiştir. AHP-TOPSIS ve AHP-VIKOR bütünlük yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada her iki yöntem sonucunda da kriter için aynı sıralama elde edilmiştir. Modelin kısıtı olarak, IMPULS modelinde yer alan kriterlerin lojistik sektörünü tam olarak yansıtmadığı üzerinde durulmuştur. Tiryaki [20] tarafından yapılan çalışmada, teknoloji geliştirme programları için bir etki değerlendirme modeli oluşturulmuştur. Model, üç modül üzerine kurulmuş olup her bir modül altında 3 adet teknolojik gösterge bulunmaktadır. Göstergelerin değerlendirilmesi ise uzmanlar tarafından anket yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve teknolojik olgunluk seviyesini analiz etmek amacı ile çok kriterli karar verme yöntemlerinden yararlanılmıştır. Gökalp, Şener ve Eren [21] literatürde yer alan yedi farklı olgunluk modelini incelemiş ve bu modelleri uzmanlar tarafından belirlenen yedi kriter çerçevesinde değerlendirmişlerdir. Yapılan değerlendirme sonucunda hiçbir modelin istenilen tüm kriterleri karşılayamadığı görülmüştür. Analiz edilen modellere dilsel değişkenler eklenerek yeni bir olgunluk modeli ortaya konulmuştur. Yeni oluşturulan modelin işletmelere daha fazla esneklik, daha fazla kalite ve sürekli gelişim alanlarında fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Çınar, Zeeshan ve Korhan [22] işletmelerin endüstri 4.0 adaptasyon süreçlerini değerlendirmek amacı ile; dört boyut ve beş seviyeden oluşan bir olgunluk modeli ortaya koymuşlardır. Üretim sistemlerindeki teknolojik entegrasyon skorunu yöneticilere sunmaya olanak sağlayan bu model, aynı zamanda işletmeler için bir yol haritası oluşturarak işletmenin endüstri 4.0 teknolojilerine adaptasyon sürecindeki önemli noktaların belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Çalışma sonucunda sunulan model anket çalışmasından elde edilen verilerin ağırlıklı ortalama yöntemi ile analiz edilmesine dayanmaktadır. Oktay [23] gerçekleştirdiği çalışmada savunma sanayi özelinde bir olgunluk modeli geliştirmiştir. Elde edilen model teknolojinin kullanımı, ürün geliştirme, insan ve ARGE kültürü ile strateji ve yönetim olmak üzere dört

ana kriter üzerine kurulmuş olup 17 alt kriter içermektedir. Çalışan yorumlarına dayanan değerlendirme aşamasında ise kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi için MACBETH yöntemi tercih edilirken, uygunluk seviyesinin hesaplanması için TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Elibal ve Özceylan [24] tarafından gerçekleştirilen çalışmada literatürde yer alan mevcut uygunluk modellerinin karşılaştırılması için çok kriterli karar verme yöntemlerinden DEMATEL ve TOPSIS yaklaşımlarından faydalanılmış olup, 7 ana ve 33 alt kriter kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda en yüksek skora sahip uygunluk modeli Schumacher ve ark. [2]'nin literatüre kazandırdığı uygunluk modeli olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen literatür araştırmasında uygulamalı ve teorik olmak üzere çok sayıda endüstri 4.0 uygunluk modeli incelenmiştir. İncelenen modeller genel olarak endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanım ve uygunluk seviyesinin belirlenmesine yönelik olsa da farklı endüstrilere, özel üretim süreçlerine veya spesifik teknolojilere odaklanan modeller de bulunmaktadır.

2. Endüstri 4.0 Uygunluk Modelleri

Uygunluk modelleri; kuruluşların hedefleri çerçevesinde ilerlemenin denetlenmesini sağlayan, güçlüklerin, zayıflıkların ve fırsatların anlaşılması konusunda yol gösterici özelliğe sahip, süreçleri veya organizasyonları farklı açılardan değerlendirmek için kullanılacak önemli bir tekniktir [25]. Uygunluk modelleri oluşturulurken farklı ana ve alt kriterler tanımlanmaktadır. Bu kriterler tanımlanırken, modelin uygulanacağı sektörün baz alınması da modelin verimliliği için kritiktir. Belirlenen kriterler çerçevesinde farklı dijital uygunluk modellerinin geliştirilmesi; işletmenin mevcut uygunluk veya hazırlık durumunun değerlendirilmesinde büyük önem arz etmektedir. Elde edilen sonuçlar, her bir işletmenin gelecekteki uygulamaları için bir alt yapı oluşturmaktadır. Zayıf alanların belirlenmesi ve hedef seviye ile mevcut seviye arasındaki farkın görülmesi, gelecek için işletmelere bir yol haritası hazırlama imkânı sunmaktadır. Aynı zamanda uygunluk modelleri yardımı ile işletmelerin birbiri ile kıyaslanması, günümüzdeki rekabet koşulları göz önüne alındığında; stratejik planlamalar için büyük bir avantaj sağlamaktadır [2]. İşletmelerin sektörel ve teknolojik düzey farklılıkları, mevcut durumları vb. gibi farklılıklar nedeniyle, literatürde birçok Endüstri 4.0 hazırlık ve uygunluk modeli bulunmaktadır. Lichtblau ve ark. [26] tarafından 2015 yılında yapılmış olan IMPULS-Endüstri 4.0 Hazırlık Modeli çalışması; işletmelerin endüstri 4.0 sürecinde istedikleri konuma ulaşmaları için yapılacakları belirlemelerine yardımcı olmayı amaçlamışlardır. Strateji ve organizasyon, çalışanlar, veri odaklı hizmetler, akıllı ürünler, akıllı fabrika ve akıllı operasyon olmak üzere altı boyut üzerine kurulan uygunluk modeli, sekiz kriter içermektedir. İşletmelerin endüstri 4.0 konusundaki bilgileri, hazırlıklarını ve mevcut uygulamaları üretime entegre etmekteki başarılarını ölçmeyi amaçlayan model, firmaların kendi kendilerini değerlendirmelerini temel almaktadır. Model uygulanırken 24 sorudan oluşan bir anket çalışması yapılmakta ve değerlendiricilerden işletmelerini değerlendirmeleri istenmektedir. Değerlendirme için Likert ölçeği kullanılmakta, sorulan sorular yöneticiler ile yapılan çalıştaylar sonucunda belirlenmektedir. Modelin uygulanması sonucunda işletmelerin hangi seviyeye dâhil olduklarını

görebilmek adına 0 ile 5 arasında 6 farklı seviye tanımlanmıştır. Schumacher ve ark. [2]'nin işletmelerin endüstri 4.0'a olan hazırlık seviyelerini belirlemek amacı ile oluşturdukları model; daha çok soyut kavramlara dayanmaktadır. Modelde uygunluk seviyesinin belirlenmesi amacı ile, dokuz boyut tanımlanmıştır. Liderlik, strateji, ürünler, müşteriler, kültür, operasyon, teknoloji, yönetim ve insan olmak üzere belirlenen bu dokuz boyut altında, 63 farklı kriter sıralanmıştır. Modelin değerlendirilmesi anket yardımı ile gerçekleştirilmiş ve likert ölçeği kullanılmıştır. Bu doğrultuda yapılan değerlendirme sonucunda işletmenin uygunluk seviyesi belirlenmiştir. 2014 yılında Rockwell Otomasyon şirketinin geliştirdiği modelde, Endüstri 4.0 'a geçiş ilgili organizasyonun bilgi teknolojileri bilgi altyapısı, veri besleyen ve alan cihazlar, tüm bu bilgileri taşıyan ağlar ve güvenlik politikaları olmak üzere 4 boyutta değerlendirilmiştir. Bu aşamadan sonra yeni bir bilgi teknolojileri organizasyonu inşa edilmiştir. Geçmiş dönemde kullanılan yapılar değerlendirilerek uzun vadeli aksiyonlara başlanmış ve toplanan verilerin nasıl işleneceği değerlendirilerek, yeni iş akışlarının ve sorumlulukların belirlenmesine odaklanılmıştır. Son aşamada ise; veri paylaşımı yardımı ile işletme ve çevre arasında iş birliği sağlanması amaçlanmıştır (Bağlı Kurumsal Uygunluk Modeli). Leyh ve ark. [27] tarafından ortaya konulan modelde; 5 farklı uygunluk seviyesi bulunmaktadır. Bu seviyeler; basit dijitalleşme, departmanlar arası dijitalleşme, dikey ve yatay dijitalleşme, tamamen dijitalleşme ve optimizasyon olarak belirlenmiştir. Modelde bulunan dört ana boyut bu 5 seviye göz önünde bulundurularak değerlendirilme yapılmıştır (SMMI Uygunluk Modeli). Dijital uygunluk modeli TUBİTAK- BİLGEM Yazılım Teknolojileri Araştırma Enstitüsü tarafından 2017 yılında getirilmiştir. Bu modelin amacı; kamu kurumlarının dijital dönüşüm yetkinliğinin belirlenmesidir. Daha önce kullanılan uygunluk modelleri incelenmiş ve bu modeller göz önüne alınarak dijital uygunluk modeli ortaya konulmuştur. Modelin değerlendirilmesi 5 seviyeden oluşan likert ölçeği ile gerçekleştirilmiştir. Çınar ve ark. [22]'nin çalışmalarında ortaya koydukları model ise; diğer uygunluk modellerinin aksine işletme içerisinde yer alan dört farklı alanın uygunluğunu ayrı ayrı ölçmeye odaklanmıştır. Fabrika 4.0, Lojistik 4.0, Yönetim 4.0 ve Operatör 4.0 olmak üzere 4 farklı boyut üzerine kurulan model, her bir boyut için farklı değerlendirme kriterleri içermektedir. Uygunluk modelini oluşturan kriter arasında büyük veri analizi, makine öğrenmesi, akıllı ürün, siber güvenlik, bulut bilişim, liderlik ve organizasyon, inovasyon stratejileri ve dijital ikiz gibi günümüzde işletmelerin uyguladığında fark yaratabilecek teknolojiler yer almaktadır. Model; 4 boyut, 5 seviye, 60 ikincil boyut ve 246 alt kriterden oluşmaktadır.

3. Materyal ve Yöntem

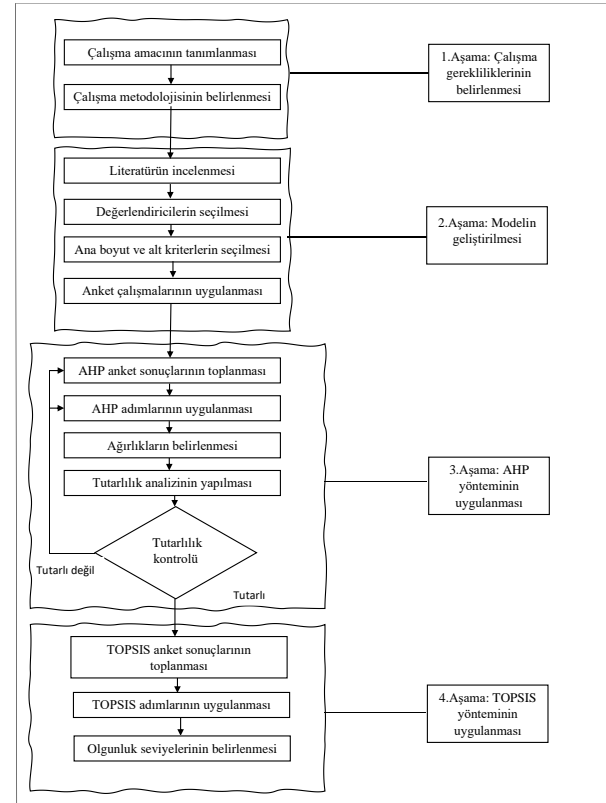
Çalışma, beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede yapılmış olup, buzdolabı, çamaşır makinası, bulaşık makinası ve fırın olmak üzere dört farklı alanda üretim yapan işletmede, üretilen ürünlerin büyük bir kısmını yurt dışına ihraç edilmektedir. Dördüncü sanayi devrimi ile hayatımıza dahil olan birçok yeni nesil teknoloji, işletme içerisindeki proseslerde aktif olarak kullanılmaktadır. Üretilen ürünlerin ilk tedarikçiden alınıp, son kullanıcıya kadar ulaştırılmasına kadar geçen süre içerisinde dahil oldukları tüm işlemlerde

dijitalleşme çalışmaları en üst düzeyde takip edilmektedir. Her bir üretim prosesinde harcanan enerji, yeni nesil teknolojiler ile anlık olarak takip edilmekte ve doğaya en az zarar verecek şekilde üretim süreçleri yenilenmektedir. Çalışma işletme içerisinde yer alan çamaşır makinası fabrikasında gerçekleştirilmiştir. Bu fabrikanın seçilmesinin nedeni; günümüzde büyük bir öneme sahip olan “baştan sona izlenebilirlik” kavramının fabrika içerisinde uygulandığı ilk bölüm olmasıdır. Birçok teknolojinin birleşimi ile ortaya çıkan izlenebilirlik kavramı, aynı zamanda bu konuda uzman insan potansiyeli de gerektirmektedir. Dolayısı ile bu alanın seçilmesi ile; geliştirilen modelde yer alan fabrika 4.0, yönetim 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 ana boyutları için geniş bir değerlendirme imkânı sunulmasına olanak sağlamaktadır.

Literatürde yer çalışmalarda; endüstri 4.0 olgunluk modeli oluşturulması amacı ile çok sayıda farklı ana ve alt farklı kriter tanımlanmış ve bu kriterler çerçevesinde oluşturulan modeller bilimsel yöntemler aracılığıyla analiz edilmiştir. Bu çalışmada kullanılacak olan endüstri 4.0 dijital olgunluk modelinin oluşturulması aşamasında; öncelikle geniş bir literatür araştırması yapılmıştır. Literatür araştırması sonucunda elde edilen tüm olgunluk modelleri analiz edilerek gruplandırılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda uygulamanın gerçekleştirileceği işletmenin dinamiği ve yönetim faaliyetleri göz önünde bulundurularak ana ve alt kriterlerin seçim işlemi işletmede görev yapan yönetici ve uzman pozisyonundaki 24 kişi tarafından gerçekleştirilmiştir. Değerlendirici grubu 8 endüstri mühendisi, 2 kontrol ve otomasyon mühendisi, 8 elektrik ve elektronik mühendisi ve 6 makine mühendisinden oluşmakta olup 2 ile 8 yıl arasında tecrübeye sahiptir. Endüstri 4.0 dijital olgunluk modelinde kullanılacak olan ana ve alt kriterlerin belirlenmesinin ardından işletmenin olgunluk seviyesinin tespit edilmesi için kullanılacak modelin seçimi gerçekleştirilmiştir. Bu adımda iki aşamalı bir değerlendirme yöntemi kullanılması kararlaştırılmış ve AHP ile TOPSIS yöntemleri tercih edilmiştir. Tüm bu adımların takip edilmesi sonucunda modelin genel yapısı ortaya çıkarılmıştır. Modelin geliştirilmesi sürecinde takip edilen tüm adımlar Şekil 1.’de verilmiştir.

Çalışmada kullanılan endüstri 4.0 dijital olgunluk modelinin seçilmesi aşamasında; detaylı bir literatür araştırması yapılmıştır. Araştırma sonucunda farklı sektörlerde farklı kriterler ve değerlendirme yöntemleri kullanılarak yapılan çok sayıda dijital olgunluk modeli incelenmiştir. Bu doğrultuda Lichtblau ve ark. [26] ve Schumacher ve ark. [2]’nin oluşturdukları olgunluk modelleri literatürde en çok kullanılan iki model olarak belirlenmiştir. Belirlenen modellerin içerdikleri kriterler benzerlik göstermekte olup, daha çok teorik kavramlar üzerine odaklanılmıştır. Model yapılarında bulunan çok sayıda boyut ayrıntılı bir değerlendirme ortamı oluşturmakla birlikte anlam karmaşıklığı yaratabilmekte ve değerlendiriciler tarafından uygulama zorluğu teşkil edebilmektedir. Bu nedenle, iki model yapısı da hibrit olarak çalışmaya dahil edilmiştir. İncelenen modellerin içerdiği alt kriterler değerlendirilerek, işletme dinamiğine uygun olanlar çalışmaya dahil edilmiştir. İlk olarak IMPULS modeline bakıldığında; modelde yer alan kriterler çok sayıda çalışmada referans olarak alınmıştır [7,8,15]. Model temel olarak 6 kriter

(strateji ve organizasyon, akıllı fabrika, akıllı işlemler, akıllı ürünler, veriye dayalı hizmetler, çalışanlar) içermektedir. Çalışma kapsamında oluşturulan modelde; endüstri 4.0 stratejisi, organizasyon ve liderlik kriterleri alt kriter olarak ele alınmıştır. Uygulamanın gerçekleştirileceği beyaz eşya fabrikasının üretim ve yönetim süreçlerinde çok sayıda teknoloji kullanılmakta ve bu teknolojilerin birbiri ile ortaklaşa çalışması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Dolayısı ile literatürde en çok tercih edilen kriterlerin aksine, oluşturulacak modelin her bir teknoloji ve sürecinin farklı başlıklar halinde ele alınması gerektiğine karar verilmiştir. Bu sayede endüstri 4.0’ın hangi bileşeninin işletmede hangi seviyede uygulandığı ve gelecekteki hedeflere ulaşabilmek için hangi alana daha fazla yatırım yapılması gerektiğine dair çıkarımlar yapmak mümkün olmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen modelde kullanılacak kriterlerin seçiminde; Çınar ve ark. [22] tarafından yapılan çalışmada ortaya konulan endüstri 4.0 olgunluk modeli ve işletme dinamikleri birlikte değerlendirilmiştir. Model için seçilen dört boyut ve bu boyutlar altında değerlendirilen kriterlerin seçimi Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Teknolojik olgunluk modeli geliştirme aşamaları

Endüstri 4.0 olgunluk modelinde kullanılan ana ve alt kriterlerin belirlenmesinin ardından, modelin değerlendirme aşamasına geçilmiştir. Literatürde yer alan olgunluk modellerinde; kriterlerin değerlendirilmesi amacı ile çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar olduğu görülmüştür [8,10,17,16,23]. Yapılan çalışmada; dijital olgunluk seviyesinin belirlenmesi için çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve TOPSIS yöntemleri birlikte kullanılmış olup, veri toplama yöntemi olarak anket yardımı ile uzman görüşlerine başvurulmuştur. AHP, karar vermede grup veya bireyin önceliklerini dikkate alan, nitel veya nicel

değişkenleri bir arada değerlendirebilen matematiksel bir tekniktir AHP, probleme hem objektif hem de subjektif düşüncelerin karar sürecine dâhil edilmesine imkân vermekte olup, grup kararları için diğer yöntemlere göre daha uygundur. Bu doğrultuda olgunluk modelinin değerlendirilmesinde ilk adım olan kriter ağırlıklarının belirlenmesi için AHP yöntemi tercih edilmiştir. Modeldeki tüm ana ve alt kriterlerin ağırlık değerlerinin elde edilmesinden sonra, dört ana kriterin sıralanması amacı ile TOPSIS yönteminden faydalanılmıştır. TOPSIS yöntemi; her bir alternatifin ideal çözüme göre karşılaştırmasına imkân tanımaktadır.

Tablo 1. Olgunluk Modeli Ana ve Alt kriterleri

	Alt Kriterler
FABRİKA 4.0	Otomasyon
	Makine Öğrenmesi
	Arttırılmış Gerçeklik
	Siber Güvenlik
	Büyük Veri Analitiği
	Bulut Bilişim
	Sürdürülebilirlik
	Teknoloji Entegrasyonu
	Dijital İkiz
	Karar Destek Sistemleri
	Akıllı Ürün
	Üretim Yönetim Sistemleri
	Eklemler İmalat
	Arttırılmış Gerçeklik
Bakım Planlama ve Zamanlama	
LOJİSTİK 4.0	Alt Kriterler
	Veri Görselleştirme
	Depo ve Depolama
	Uçtan Uca Görünürlük
	Yalın Lojistik
Büyük Veri Analitiği	
YÖNETİM 4.0	Alt Kriterler
	14.0 Yönetim Modeli
	14.0 Yatırım
	Yalın Üretim Stratejisi
	Strateji 4.0
	İnovasyon Stratejisi
İş Birliği	
Organizasyon ve Liderlik	
OPERATÖR 4.0	Alt Kriterler
	Bilişsel Ergonomi
	Organizasyonel Ergonomi
	Fiziksel Ergonomi
	Operatör Becerileri
14.0 Yatırımı	
İnsan Kaynakları 4.0	

3.1. AHP Yaklaşımı

Oluşturulan olgunluk modelinde yer alan dört boyut ve bu boyutların altında bulunan tüm alt kriterlerin birbirlerine göre önemi AHP yöntemi ile hesaplanmıştır. Modelin değerlendirme verileri; anket yöntemi kullanılarak, uzman görüşlerinin alınması ile elde edilmiştir. Ana ve alt kriterlerin birbiri ile karşılaştırılması amacı ile; çalışmaya katılan 24 uzman tarafından (kendilerine verilmiş olan yönergeye göre) hazırlanan anket formları doldurulmuş ve karşılaştırma matrisleri elde edilmiştir. Ardından tüm katılımcıların doldurduğu matrislerdeki verilerin geometrik ortalaması alınarak, birleştirilmiş karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur.

AHP yönteminin uygulanması aşamasında; ilk olarak standart karar matrisleri (A_{ij}) oluşturulmaktadır. Standart karar matrisi denklem (1)'de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad a_{ii} = 1, a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, a_{ij} \neq 1 \quad (1)$$

Yapılan çalışmada beş adet karşılaştırma matrisi elde edilmiştir. Bunlardan biri; ana boyutların karşılaştırma matrisi iken, diğer dört matris diğer ana boyutlar altında bulunan alt kriterlerin değerlendirme matrisleridir. Elde edilen bu beş karşılaştırma matrisi çok sayıda uzmanın değerlendirme matrislerindeki değerlerin geometrik ortalamaları alınarak oluşturulan birleştirilmiş karşılaştırma matrisleridir. Standart karar matrisleri oluşturulduktan sonra; standart karar matrislerine normalleştirme işlemi yapılarak normalleştirilmiş karar matrisleri (A'_{ij}) elde edilmekte ve her karar alternatifinin ağırlığı hesaplanmaktadır. Denklem (2)'de gösterildiği üzere normalleştirme işlemi yapılmaktadır.

$$A'_{ij} = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} & \dots & a'_{1n} \\ a'_{21} & a'_{22} & \dots & a'_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a'_{n1} & a'_{n2} & \dots & a'_{nn} \end{bmatrix} \quad a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (i = 1,2,3 \dots n) \quad (2)$$

Aynı zamanda normalize edilmiş karar matrisinin her bir satırında yer alan değerlerin ortalamaları bulunarak öz vektörler (w) elde edilmektedir. Özvektör matrisi denklem (3)'te verilmiştir.

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix}, \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (3)$$

Bir önceki adımda elde edilen özvektör matrisi ile standart karar matrisinin çarpılması ile denklem (4)'te görüldüğü üzere Sonraki aşama; ağırlıklandırılmış ve normalize edilmiş karar matrislerinin (A'') oluşturulmasıdır (Eşitlik 4).

$$A'' = A \times w = \begin{bmatrix} w_1 a_{11} & w_1 a_{12} & \dots & w_1 a_{1n} \\ w_2 a_{21} & w_2 a_{22} & \dots & w_2 a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n a_{n1} & w_n a_{n2} & \dots & w_n a_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Sonraki aşamada ise; tutarlılık analizini gerçekleştirmek üzere ağırlıklandırılmış karar matrisinin her bir ögesi özvektör matrisinde buna karşılık gelen ögeye bölünmesi ile elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmış ve λ_{max} hesaplanmış ve tutarlılık indeksi (CR) belirlenmiştir (Eşitlikler 5 ve 6).

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{(A \cdot w)_j}{n \cdot w_j} \right) \quad (5)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}; \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

3.2. TOPSIS Yaklaşımı

AHP metodunun uygulanması sonucunda elde edilen final ağırlıkları kullanılarak, ana kriterlerin sıralanmasının yapılması amacıyla TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. TOPSIS yöntemi, uzmanların öznel yargıları kullanılmadan nesnel sayısal değerler üzerinden işlem yapan, değişkenlere ağırlık atanmasını gerektirebilen birçok kriterli karar verme tekniğidir. TOPSIS yönteminin uygulanması aşamasında problemin amacına bağlı olarak farklı ölçekler kullanılmaktadır. Yapılan

çalışmada; her bir alt kriterin endüstri 4.0 teknolojik olgunluk düzeyinin değerlendirilmesi amacı ile doğrusal bir ölçek (1-5 likert ölçeği) kullanılmıştır. Oluşturulan olgunluk modelinde her alt kriter, bir endüstri 4.0 teknolojisini temsil etmektedir. Anket çalışması için oluşturulan ölçek; tablo 2’de verilmiş olup, endüstri 4.0 teknolojik olgunluk düzeyinin hesaplanabilmesi amacı ile beş farklı seviye tanımlanmıştır.

Tablo 2. TOPSIS Yöntemi Değerlendirme Seviyeleri

Olgunluk Seviyesi	Açıklama
Seviye 1	Endüstri 4.0 teknolojisi konusunda planlama ve çalışma yapılmamaktadır.
Seviye 2	Endüstri 4.0 konusunda projelendirme çalışmaları başlamış, pilot uygulama alanı için değerlendirmeler yapılmaktadır.
Seviye 3	Endüstri 4.0 konusunda pilot çalışmalar uygulanma aşamasındadır.
Seviye 4	Endüstri 4.0 teknolojileri belli bölümlerde uygulanmaktadır.
Seviye 5	Endüstri 4.0 teknolojisi tüm bölümlerde aktif olarak uygulanmaktadır.

Yapılan çalışmanın literatürde yer alan çalışmalardan farkı; çalışmada metinsel anket soruları bulunmamaktadır. Bunun iki nedeni bulunmaktadır. İlki; oluşturulan modelde her bir teknoloji ayrı kriterler olarak ele alınmış, yani literatürdeki çalışmalarda olduğu gibi teknoloji kriteri altında değerlendirilmemiştir. Bir diğer sebep ise; değerlendirmenin tamamen sayılar üzerinden yapılmasıdır. Sayılar üzerinden değerlendirilmesinin nedeni ise, fabrikada yıl sonunda projeler belirlenirken, her projenin hizmet ettiği teknoloji, plan içerisinde belirtilmektedir. Dolayısı ile yıl içerisinde hangi alanda hangi teknolojiye hizmet eden kaç tane proje yapılmış ve hangi aşamada olduğu net olarak görülebilmektedir Buradan yola çıkarak her bir teknolojiye beş seviye için en uygun olanı değerlendiriciler tarafından belirlenmiştir. Dört boyut altında gerçekleştirilen anket çalışmasının ardından TOPSIS yönteminin uygulama aşamalarına geçilmiştir. İlk olarak; dört ana boyut altında bulunan alt kriterlerin değerlendiriciler tarafından 1 ile 5 arasında puanlanması ile elde edilen verilerin, geometrik ortalaması alınarak ağırlıklandırılmış değerlendirici kararları oluşturulmuştur. İkinci adımda; pozitif ideal ve negatif ideal çözümler elde edilmiştir (Eşitlik 7).

$$S^*_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} ; \quad S^-_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (7)$$

r_{ij} = Uzman değerlendirmeleri

v_{ij} = Ağırlıklandırılmış uzman değerlendirmeleri

v_j^* = $r_j^* \times w_j$ Ağırlıklandırılmış pozitif ideal çözüm

v_j^- = $r_j^- \times w_j$ Ağırlıklandırılmış negatif ideal çözüm

Son aşamada olgunluk seviyelerinin belirlenmesi amacı ile yakınlık katsayısı hesaplanmıştır. Her bir karar noktasının ideal çözüme olan göreceli yakınlığının hesaplanmasında, yakınlık katsayısı CC^* kullanılmaktadır. Bu yakınlık katsayısı 0 ile 1 arasında değer almakta ve denklem (9)’da verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$CC^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (8)$$

4. Bulgular ve Tartışma

Beyaz eşya sektörü, günümüzde teknolojik değişimin en hızlı ve en yoğun yaşandığı sektörlerin başında gelmektedir. Dolayısı ile küresel pazarda rekabet gücünü kaybetmemek ve tüketici davranışı odaklı üretim gerçekleştirmek amacı ile; bu sektörde faaliyet gösteren birçok firma güncel teknolojik gelişmeleri anlık olarak takip ederek üretim sistemlerine adapte etmek için çalışmaktadır. İçerisinde bulunduğumuz hızlı gelişim ve değişim dönemine ayak uydurabilmek ve işletmelerin sistematik bir adaptasyon süreci geçirebilmesi için de mevcut durumun ilk adımda net bir şekilde ortaya konulması gerekmektedir. Bu çalışmada ortaya konulan olgunluk modelinin amacı; işletmelere mevcut her bir endüstri 4.0 teknolojisini bazında durumlarını göstererek ulaşmak istedikleri hedef ile mevcut durumlarını kıyaslama imkânı sunmaktır. Fabrika 4.0, yönetim 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 olmak üzere 4 boyut üzerine kurulan olgunluk modelinin değerlendirmesi, işletmede aktif olarak görev yapan uzman kişiler tarafından yapılmıştır. Değerlendirmeyi yapan kişiler dijital dönüşüm faaliyetlerinde görev alan elektrik ve elektronik mühendisi, makine mühendisi, otomasyon mühendisi ve endüstri mühendisi alanlarından mezun kişilerden oluşmaktadır. Modelin değerlendirme aşamasında sırasıyla AHP ve TOPSIS yöntemleri ile veriler analiz edilmiş ve dört ana boyutun olgunluk seviyeleri karşılaştırılmıştır. İşletmenin endüstri 4.0 dijital olgunluk seviyesinin belirlenmesi amacı ile ilk olarak toplam 24 katılımcı tarafından oluşturulan karşılaştırma matrisleri oluşturulmuş ve verilerin geometrik ortalamaları alınarak birleştirilmiş karar matrisleri elde edilmiştir. AHP yönteminin ilk aşamasında modelde bulunan fabrika 4.0 (A1), lojistik 4.0 (A2), yönetim 4.0 (A3) ve operatör 4.0 (A4) boyutlarının yani ana boyutların birleştirilmiş karşılaştırma matrisi oluşturulmuş ve tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Ana Boyutların Birleştirilmiş Karar Matrisi

	A1	A2	A3	A4
A1	1	1,42	0,49	2,14
A2	0,71	1	0,32	2,19
A3	2,1	3,13	1	4,69
A4	0,47	0,46	0,21	1
Toplam	4,27	6	2,03	10,01

Standart karar matrisinin oluşturulmasının ardından denklem (2) uygulanmış ve normalleştirilmiş karar matrisi elde edilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Ana Boyutların Normalize Karar Matrisi

	A1	A2	A3	A4	Özvektör (w)
A1	0,23	0,24	0,24	0,21	0,23
A2	0,17	0,17	0,16	0,22	0,18
A3	0,49	0,52	0,49	0,47	0,49
A4	0,11	0,08	0,11	0,10	0,10

Normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulmasının ardından denklem (5)'in uygulanması ile tutarlılık analizi yapılmış ve CR değeri (0,01) olarak hesaplanmış olup, 0,1'in altında bulunduğu için tutarlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Dört ana boyutun karşılaştırılması için takip edilen tüm adımlar her bir boyut özelinde alt kriterler dikkate alınarak tekrar edilmiş ve elde edilen tutarlılık sonuçları tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Alt boyutlara ait AHP tutarlılık sonuçları

Boyut	n	λ_{max}	CI	RI	CR
A1 Fabrika 4.0	15	15,68	0,05	1,59	0,03 $\leq 0,1$
A2 Lojistik 4.0	5	5,19	0,05	1,12	0,04 $\leq 0,1$
A3 Yönetim 4.0	7	7,25	0,04	1,32	0,03 $\leq 0,1$
A4 Operatör 4.0	6	6,21	0,04	1,24	0,03 $\leq 0,1$

AHP yönteminin uygulanması sonucunda; elde edilen küresel kriter ağırlıkları hem dört ana boyut hem de ana boyutlar altında bulunan alt kriterlerin önem seviyeleri hakkında bilgi vermektedir. İlk olarak dört ana boyutun ağırlıklarını incelendiğinde; önem seviyeleri sırası ile yönetim 4.0, fabrika 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 olmak üzere büyükten küçüğe sıralanmıştır. İşletme içerisinde yapılan değerlendirmelerde dijital dönüşümün planlı bir şekilde başlaması ve istikrarlı bir şekilde yürütülebilmesi için en önemli boyutun yönetimin desteği olduğu belirtilmiş ve sonuçlarda yönetim 4.0'ın en yüksek ağırlığa sahip olduğu belirlenmiştir. Operatör 4.0 boyutu ise en az ağırlığa sahip olan boyut olarak görülmektedir. Sistem bir bütün olarak değerlendirildiğinde, yönetim tarafından dijitalleşme adımlarının atılması ile, fabrika ve lojistik bölümlerinde dijital dönüşüm faaliyetleri başlamaktadır. Bu faaliyetlerin hız kazanması ve yaygınlaştırılması için son bileşen operatörler olmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, operatör 4.0 kavramının dijital dönüşümün hızlandırıcı faktörü olduğu görülmektedir. Fabrika 4.0 boyutu altındaki kriterlere bakıldığında; en yüksek ağırlığa sahip olan kriterler sırasıyla; üretim-yönetim sistemleri, teknoloji entegrasyonu, otomasyon, bakım planlama ve makine öğrenmesi olarak görülmektedir. Bu kriterlerin ortak noktası ise, hepsinin çok sayıda teknolojiyi aynı anda bünyelerinde barındırmalarıdır. Sürdürülebilirlik ise bu teknolojilerin aktif olarak uygulanması ile gerçekleştirilebilecek bir kriterdir. Bu kriterleri büyük veri ve makineden-makineye kriterleri takip

etmektedir. Bu kriterler de sürdürülebilirlikte olduğu gibi otomasyon ve teknoloji entegrasyonu gibi kriterlerin uygulanması ile devreye alınabilecektir. Akıllı ürün, siber güvenlik ve karar destek sistemleri aynı ağırlık seviyesine sahip olarak bulunmuştur. Bu kriterler ile ilgili projelendirmeler, az sayıda olduğundan değerlendiriciler tarafından önem seviyesi de düşük olarak verilmiştir. En az ağırlığa sahip olan kriterler ise; bulut bilişim, dijital ikiz, eklemeli imalat ve artırılmış gerçeklik olarak bulunmuştur. Bunun sebebi ise; diğer kriterlere oranla işletme içerisinde çok daha az uygulama alanına sahip olmaları ve işletmenin gelecek planlamaları içerisinde yüksek önem düzeyine sahip olmamalarıdır. Lojistik 4.0 boyutu içerisinde en yüksek ağırlıkların, yalnız lojistik ve büyük veri kriterlerine ait olduğu görülmektedir. Dijital dönüşüme başlamadan önce lojistik içerisinde gerçekleşen faaliyetlerin yalnızlaştırılması gerektiğinden, en yüksek değer yalnız lojistiğin olmuştur. Bununla birlikte çok sayıda veri barındıran iç ve dış lojistik faaliyetleri için büyük veri teknolojisi de süreçlerin iyileştirilmesi ve takibi için sıklıkla kullanılmaktadır. Büyük veri teknolojisinin aktif olarak kullanılması ile devreye alınabilecek bir diğer teknoloji ise; uçtan uca görünürlük olup büyük veriden sonra en yüksek ağırlığa sahip olan kriterdir. Depo ve depolama ile veri görselleştirme alt kriterleri ise; ağırlık olarak bu üç kriterden sonra gelmektedir. Genel olarak lojistik 4.0 boyutunda; yalnızlaştırma ve veri toplama faaliyetlerine öncelik verilmiştir. Yönetim 4.0 boyutu için en yüksek ağırlığa sahip olan kriterler; I4.0 yatırım, strateji 4.0 ve I4.0 yönetim modeli olarak belirlenmiştir. Yalnız üretim sistemi ise dijitalleşme faaliyetleri öncesinde yürütülmesi gereken bir süreç olduğundan lojistik 4.0 boyutunda olduğu gibi burada da önemli bir alt kriter olarak görülmektedir. En az ağırlığa sahip olan alt kriterler ise; inovasyon, organizasyon ve liderlik ve iş birliği olarak görülmektedir. Bu alt kriterlerin diğer yönetim 4.0 alt kriterlerine oranla daha az ağırlığa sahip olmasının nedeni, uygulanması zaman alan uygulamalar olmasıdır. Operatör 4.0 ana boyutunda da en yüksek ağırlığa sahip olan alt kriter I4.0 yatırım olarak görülmektedir. Yatırım planlaması üretim ve yönetim süreçlerinin başlangıcını temsil ettiğinden dolayı, yüksek önem düzeyine sahiptir. Daha sonra sırası ile operatör becerileri, fiziksel ergonomi ve insan kaynakları 4.0 alt kriterleri gelmektedir. Bu üç kriterin ortak noktası ise çalışan konforu ve yetenek yönetimi üzerine yoğunlaşmasıdır. Son olarak bilişsel ergonomi ve organizasyonel ergonomi alt kriterlerinin küresel ağırlıklarının daha az çıkması, işletmenin bu konularda daha yavaş aksiyon almasından kaynaklanmaktadır. Operatör 4.0 boyutu değerlendirilirken çalışanların yetenek gelişimine ve güvenliğine daha fazla ağırlık verilmiştir.

TOPSIS metodunun ilk aşamasında TOPSIS değerlendirme anketi ile elde edilmiş olan sonuçlar analiz edilmiştir. Bu aşamada modelde yer alan dört ana boyut içerisinde yer alan endüstri 4.0 teknolojilerinin teknolojik olgunluk seviyelerinin değerlendirilmesi amacı ile 1-5 arasında puanlamaya sahip anket çalışması yapılmıştır. Dört ana boyutun anket çalışmasına farklı sayıda kişiler katılmış olup bu anketlerdeki değerlerin geometrik ortalaması alınmıştır. Fabrika 4.0 (A1) boyutuna ait anket çalışmasına yedi kişi, lojistik 4.0 (A2)

boyutuna ait anket çalışmasına 6 kişi, yönetim 4.0 (A3) boyutuna ait anket çalışmasına beş kişi ve son olarak operatör 4.0 (A4) boyutuna ait anket çalışmasına 6 kişi katılmıştır. Katılımcıların ankette kullandıkları puanların geometrik ortalamalarının alınması ile dört ana boyut için tablo 6, 7, 8 ve 9'da alt kriterlere ilişkin uzman görüşleri verilmiştir.

Tablo 6. Uzman Görüşleri (A1 Boyutu Alt Kriterleri)

Alt Kriterler	Değerlendirme Puanları
A1.1 Otomasyon	3,54
A1.2 Büyük Veri Analitiği	3,50
A1.3 Bulut Bilişim	4,54
A1.4 Bakım Planlama ve Zamanlama	4,26
A1.5 Karar Destek Sistemleri	3,13
A1.6 Makine Öğrenmesi	3,54
A1.7 Siber Güvenlik	4,13
A1.8 Dijital İkiz	2,12
A1.9 Sürdürülebilirlik	3,54
A1.10 Eklemeli İmalat	2,00
A1.11 Teknoloji Entegrasyonu	3,54
A1.12 Arttırılmış Gerçeklik	2,25
A1.13 Akıllı Ürün	3,39
A1.14 Üretim Yönetim Sistemi	3,39
A1.15 Makineden Makineye	2,38

Tablo 7. Uzman Görüşleri (A2 Boyutu Alt Kriterleri)

Alt Kriterler	Değerlendirme Puanları
A2.1 Veri Görselleştirme	3,81
A2.2 Uçtan Uca Görünürlük	3,46
A2.3 Büyük Veri Analitiği	3,30
A2.4 Yalın Lojistik	3,63
A2.5 Depo ve Depolama	3,30

Tablo 8. Uzman Görüşleri (A3 Boyutu Alt Kriterleri)

Alt Kriterler	Değerlendirme Puanları
A3.1 I4.0 Yönetim Modeli	4,18
A3.2 İş birliği	3,57
A3.3 I4.0 Yatırım	5,00
A3.4 İnovasyon Stratejisi	4,57
A3.5 Organizasyon ve Liderlik	4,18
A3.6 Strateji 4.0	4,37
A3.7 Yalın Üretim Sistemi	3,37

Tablo 9. Uzman Görüşleri (A4 Boyutu Alt Kriterleri)

Alt Kriterler	Değerlendirme Puanları
A4.1 Bilişsel Ergonomi	2,45
A4.2 I4.0 Yatırımı	4,15
A4.3 Operatör Becerileri	3,15
A4.4 Organizasyonel Ergonomi	2,62
A4.5 Fiziksel Ergonomi	3,30
A4.6 İnsan Kaynakları 4.0	3,46

Ağırlıklı uzman görüşlerinin belirlenmesinin ardından, ideal çözüme göre yakınlık katsayılarını hesaplayabilmek için öncelikle pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklıkların hesaplanması gerekmektedir. Üçüncü aşamada alt kriterlerin ağırlıklandırılmış pozitif ideal ve negatif ideal puanlarını belirlemek için pozitif ideal (5) ve negatif ideal (1) puanlar kullanılmıştır. Alt kriterlerin pozitif ideal ve negatif ideal puanlarının belirlenmesinin ardından her bir kriterin pozitif ve negatif ideal puanları ile küresel ağırlıkları çarpılarak, ağırlıklandırılmış pozitif ve negatif ideal puanları hesaplanmıştır. Dört ana boyutun olgunluk seviyesi belirlenmek amacıyla; pozitif ideal çözüme uzaklık (S*) ve negatif ideal çözüme uzaklık (S-) hesaplanmıştır (Tablo 10).

Tablo 10. Alt Kriterlerin Pozitif İdeal ve Negatif İdeal Çözümlere Uzaklığı

Ana Kriterler	Pozitif İdeal Çözüme Uzaklık	Negatif İdeal Çözüme Uzaklık
A1 Fabrika 4.0	0,106	0,176
A2 Lojistik 4.0	0,674	0,761
A3 Yönetim 4.0	0,151	0,705
A4 Operatör 4.0	0,0748	0,123

Pozitif ve negatif çözümlere olan uzaklıkların ölçülmesinden sonra, dört ana boyut için hesaplanan yakınlık katsayıları, yani endüstri 4.0 teknolojik olgunluk seviyeleri hesaplanmış ve Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Endüstri 4.0 Teknolojik Olgunluk Seviyeleri

Ana Kriterler	Endüstri 4.0 Teknolojik Olgunluk Seviyesi
A1 Fabrika 4.0	0,624
A2 Lojistik 4.0	0,530
A3 Yönetim 4.0	0,824
A4 Operatör 4.0	0,622

AHP ve TOPSIS metotlarının uygulanması ile elde edilen sonuçlara bakıldığında; dört boyutun olgunluk seviyeleri büyükten küçüğe; yönetim 4.0, fabrika 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 olarak belirlenmiştir. Modelde en yüksek olgunluk seviyesine sahip olan boyutun yönetim 4.0 olduğu

görülmektedir. Yönetim 4.0 aynı zamanda AHP yönteminin uygulanması ile en yüksek ağırlığa sahip olan boyut olarak bulunmuştur. Aynı zamanda yönetim 4.0'ın ilk sırada yer alması işletmedeki dijitalleşme sürecinin gelişimi açısından önemlidir. Yönetimin hem üretime hem de çalışanlara yatırım yapma konusundaki istekliliği ve yol haritasındaki planlı ilerlemesi, endüstri 4.0 sürecinde emin adımlarla ilerlediğini göstermektedir. Fabrika 4.0 boyutu ise; içerisinde çok fazla alt kriter bulundurmaya rağmen bu kriterlerde yer alan teknolojilerin planlı ve istikrarlı bir şekilde uygulanmasına bağlı olarak ikinci sırada yer almaktadır. Lojistik 4.0'ın kapsadığı alt kriterlerin uygulamaya alınabilmesi için fabrika 4.0 teknolojilerinin büyük ölçüde uygulanabiliyor olması gerekmektedir. Dolayısı ile lojistik 4.0 boyutu sıralamada üçüncü sırada yer almakta ve alt kriterlerinde yer alan teknolojilerin uygulanmaya alınması daha fazla zaman gerektirmektedir. Son sırada ise operatör 4.0 boyutu yer almaktadır. Bunun temel sebebinin hızla gelişen teknolojiye çalışanların adaptasyon ve eğitim süreçlerinin daha uzun sürmesi olduğu düşünülmektedir. Dolayısı ile bu açıdan bakıldığında operatör 4.0 geliştirilmeye en fazla ihtiyaç duyulan bölümü oluşturmaktadır.

5. Sonuç ve Öneriler

Çıkan sonuç doğrultusunda dijital dönüşüm için bir yol haritası oluşturulması amacı ile gerçekleştirilmiştir. Modelde kullanılan dört boyut Çınar vd. (2021)'in çalışması ve işletme dinamikleri birlikte değerlendirilerek belirlenmiş olup, fabrika 4.0, lojistik 4.0, yönetim 4.0 ve operatör 4.0 olarak seçilmiştir. Kriterlerin seçim aşamasından önce literatürde yer alan olgunluk modeli çalışmalarında kullanılan ana ve alt kriterler tüm değerlendiriciler tarafından incelenmiş ve modelde yer alacak kriterler işletmenin dinamiklerine ve yönetim süreçlerine uygun olarak seçilmiştir. Modelin değerlendirme yöntemi olarak iki aşamalı bir süreç belirlenmiştir. Literatürde de sıklıkla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve TOPSIS yaklaşımlarının bütünlük kullanımı tercih edilmiştir. Değerlendirme aşamasında kullanılan verilerin toplanması, iki ayrı anket yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle AHP metodu ile ana boyutların ve alt kriterlerin küresel ağırlıkları belirlenmiş, ardından TOPSIS metodu ile dört ana boyutun (fabrika 4.0, lojistik 4.0, yönetim 4.0 ve operatör 4.0) olgunluk seviyeleri hesaplanmıştır. Modelin sonuçları incelendiğinde; en yüksek olgunluk seviyesine sahip boyutlar sırasıyla; yönetim 4.0, fabrika 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 olarak belirlenmiştir. Yönetim 4.0 boyutunun en yüksek olgunluğa sahip olması dijital dönüşüm sürecinde üst yönetimin ve yönetici konumunda çalışan kişilerin süreci sahiplendiğini ve bunun diğer çalışanlar tarafından kavrandığını ifade etmektedir. Sıralamada ikinci olarak yer alan fabrika 4.0 boyutu ise birçok teknolojiyi bünyesinde barındırmakta olup, dijitalleşme faaliyetlerinin en yoğun olarak gerçekleştirildiği alanı temsil etmektedir. İçerdiği alt kriterlerin genel ortalamasına bakıldığında ise endüstri 4.0 teknolojilerinin genellikle pilot çalışma ve üstü seviyede konumlandığı görülmektedir. Olgunluk sıralamasında üçüncü sırada yer alan lojistik 4.0 boyutu ise dijital dönüşüm faaliyetlerinin lojistik departmanında hangi seviyede yürütüldüğünü ifade etmektedir. Lojistik 4.0'ın fabrika 4.0'ın alt sırasında yer almasının sebebi ise lojistik bölümü içerisinde

gerçekleştirilecek olan çalışmaların fabrika içerisindeki çalışmalar ile bağlantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Son olarak operatör 4.0'a bakıldığında olgunluk sıralamasında son sırada yer almaktadır. Bunun sebebi ise önceliğin teknoloji entegrasyonunu sağlamak amacı ile fabrika ve lojistik bölümlerine verilmesidir. Modelin çıktıları, mevcut durumun analizi için iyi bir gösterge oluşturmaktadır. Yapılan çalışmanın; içerdiği dört farklı boyut ve altında yer alan kriterler ile daha sonraki çalışmalara yol gösterici olması amaçlanmaktadır. Hem endüstri 4.0 teknolojilerinin hem de teorik kriterlerin birleşimi ile oluşturulmuş model literatürde bu kapsamda farklılık yaratmaktadır.

Oluşturulan modelin farklı sektörlerde kullanılmasında kısıtlayıcı etkenler bulunmamaktadır. Modelde bulunan dört ana boyut ve altında bulunan alt kriterler uygulamanın yapılacağı işletmenin dinamiklerine ve dijitalleşme seviyesine göre revize edilebilmektedir. Sonuç olarak geliştirilen modelin farklı işletme dinamikleri özelinde tekrar dizayn edilip uygulanması ile; şirketlere mevcut dijital dönüşüm süreçlerini analiz etme ve gelecekte sahip olmak istedikleri konum ile kıyaslama imkânı sunulmaktadır.

Yazar Katkısı

Bu çalışmada Melike Selen DERMENCİ, bilimsel yazın araştırması, veri toplama ve analiz etme, çalışmanın uygulanması ve makalenin oluşturulması; Aysun SAĞBAŞ, araştırma tasarımı ve uygulanması, makalenin incelenmesi ve oluşturulması konularında katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve yayınlaması ile ilgili herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemiştir.

Teşekkür

Yüksek lisans tez danışmanlığımı üstlenerek tez çalışmamda katkı sağlayan ve tüm süreç boyunca desteğini ve tecrübesini hiç esirgemeyen değerli hocam sayın Prof. Dr. Aysun SAĞBAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Kaynaklar

- [1] Ganzarain, J. & Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in sme's toward industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9 (5), 1119-1128.
- [2] 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.
- [3] Commuzzi, M., & Patel, A. (2016). How organisations leverage big data: A maturity model. *Industrial Management & Data Systems*, 116(8), 1468-1492.
- [4] Häberer, S., Lau L.K., & Behrendt, F. (2017) October 11-13). Development of an industrie 4.0 maturity index for small and medium-sized enterprises. Paper presented at the Seventh International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, Saarbrücken, Germany. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/320415942_Development_of_an_Industrie_40_Maturity_Index_for_Small_and_Medium-Sized_Enterprises
- [5] Keskin, F.D., İ. Kabasakal, İ., Kaymaz, Y., & Soyuer, H.

(2019, August 28-30). An assessment model for organizational adoption of industry 4.0 based on multi-criteria decision techniques. Paper presented at the International Symposium for Production Research, Vienna, Austria. Erişim adresi: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-92267-6_7

[6] Akdil, K.Y., Üstündağ, A., & Çevikcan, E., Maturity and readiness model for industry 4.0 strategy. *industry 4.0: managing the digital transformation*, Switzerland: Springer International Publishing, Switzerland, 61-94, 2018.

[7] Bibby, L. & Dehe, B. (2018). The management of operations defining and assessing industry 4.0 maturity levels-case of the defence sector. *Production Planning and Control*, 29(12), 1030-1043.

[8] Kiraz, A., Canpolat, O., Erkan, F.E., & Uygun, Ö. (2019). Impuls kriterleri ile endüstri 4.0 eğiliminin değerlendirilmesi: bir bulanık bilişsel harita uygulaması. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1), 14-23.

[9] Santos, R.C., & Martinho, J.L. (2019). An industry 4.0 maturity model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 1023-1043.

[10] Koyuncu, C., Endüstri 4.0 mevcut durum analizi ve benzetim uygulamalı geçiş metodolojisi, (2019). Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

[11] Etkeser, S., Endüstri 4.0'a geçişte olgunluk modeli oluşturulması ve yol haritasının belirlenmesi: türkiye'de kobi'ler üzerine bir çalışma, (2019). Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

[12] Pacchini, A. P. T., Lucato, W. C., Facchini, F., & Mummolo, G. (2019). The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. *Computers in Industry*, 113, 103125.

[13] Çiray, Ü., Küçük ve orta ölçek imalat firmalarında olgunluk modeli: beyaz eşya sektöründe bir uygulama, (2019). Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[14] Wagire, A.A., Joshi, R., Rathore, A.P.S., & Jain, R. (2020). Development of maturity model for assessing the implementation of industry 4.0: learning from theory and practice. *Production Planning & Control*, 32(8), 1-20.

[15] Rafael, L. D., Jaione, G. E., Cristina, L., & Ibon, S. L. (2020). An industry 4.0 maturity model for machine tool companies. *Technological Forecasting and Social Change*, 1-18.

[16] Sarı, T. (2020). Endüstri 4.0 teknolojik olgunluk düzeyinin analitik hiyerarşi prosesi ile modellenmesi: gıda ve içecek imalat sektörü örneği. *BMIJ*, 8(3), 3526-3549.

[17] Ataman, A., Savunma sanayinde endüstri 4.0 olgunluk parametrelerinin tereddütlü bulanık AHP yöntemi ile önceliklendirilmesi, (2018), Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[18] Rauch, E., Unterhofer, M., Rojas, R.A., Gualtieri, L., Woschank, M., & Matt, D.T. (2020). A maturity level-based

assessment tool to enhance the implementation of industry 4.0 in small and medium-sized enterprises. *Sustainability*, 12(9), 3559.

[19] Baki, B. & Serdar, D. (2020). Sanayi 4.0 olgunluk modeli uygulamaları üzerine literatür incelemesi. *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11(22), 766-787.

[20] Tiryaki, E., An impact assessment model for technology development programs, (2020), Doktora Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.

[21] Gökalp, E., Şener, U., & Eren, P.E. (2017, October 4-5). Development of an assessment model for industry 4.0: industry 4.0-mm. Paper presented at the Seventeenth International Conference on Software Process Improvement and Capability Determination, Palma de Mallorca, Spain. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2017.03.004>

[22] Çınar, M.Z., Zeeshan, Q., & Korhan, O. (2021). A Framework for industry 4.0 readiness and maturity of smart manufacturing enterprises: a case study. *Sustainability*, 13(12), 1-32.

[23] Oktay, U., Türk savunma sanayisi için endüstri 4.0 olgunluk modeli geliştirilmesi, (2021). Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Sakarya.

[24] Elibal, K., & Özceylan, E. (2022). Comparing industry 4.0 maturity models in the perspective of TQM principles using Fuzzy MCDM methods. *Technological Forecasting & Social Change*, 175, 1-16.

[25] Proença, D., & Borbinha, J. (2016). Maturity Models for Information Systems- A State of the Art. *Procedia Computer Science*, 100(6),1042-1049.

[26] Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., Schmitt, K., Schmitz, E., & Schröter, M. (2015). IMPULS- Industrie 4.0- Readiness. 20 Ocak 2022, Erişim adresi: <https://www.industrie40-readiness.de/?lang=en>

[27] Leyh, C., Bley, K., Schäffer, T., & Forstenhäusler, S. (2016). SIMMI 4.0-a maturity model for classifying the enterprise-wide it and software landscape focusing on Industry 4.0. *Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, 2016 Federated Conference. 1297-1302.

[28] Akben, İ., & Avşar, İ.İ. (2018). Endüstri 4.0 ve karanlık üretim: genel bir bakış. *Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 26-37.

[29] Aracıoğlu, B. (2010). Üretim / işlemler yönetimi alanında yaşanan paradigmatik değişimler kapsamında sürdürülebilir üretim. *Ege Akademik Bakış*, 10(1), 141-156.

[30] Hu, J., & Gao, S. (2019). Research and application of capability maturity model for chinese intelligent manufacturing. *Procedia CIRP*, 83, 794-799.

[31] Kolla, S., Minoufekar, M., & Plapper, P. (2019). Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs. *Procedia CIRP*, 81, 753-758.

[32] Yalpa, Ö., Endüstri 4.0 ve endüstri 4.0 teknolojilerinin işletme fonksiyonları üzerine olası etkileri, (2020). Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Sosyal

Bilimler Enstitüsü, Osmaniye.

[33] Mittal, S., Khan, M.A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & industry 4.0 maturity models: implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 194-214.

[34] Arkan, Ö., Endüstri 4.0 kavramı ve endüstri 4.0 dönüşümünün üretim maliyetlerine etkisi üzerine bir vaka çalışması: bebek bezi üretimi, (2018), Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Arel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

[35] Asdecker, B., & Felch, V. (2018). Development of an industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains. *Journal of Modelling in Management*, 13 (4), 840- 883.

[36] Bağcı, E. (2018). Endüstri 4.0: Yeni üretim tarzını anlamak. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi*, 9(24), 122-146.

[37] Carvalho, N., Chaim, O., Cazarini, E., & Gerolamo, M. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in sustainable manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 21, 671-678.

[38] Pricewaterhouse Coopers. (2016). The Industry 4.0/Digital Operations Self-Assessment. Erişim adresi: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries->

[4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf](https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf)

[39] Pessl, E., Sorko, S.R., & Mayer, B. (2017). Roadmap industry 4.0 – implementation guideline for enterprises. *International Journal of Science, Technology and Society*, 5(6), 193-202.

[40] Durgut, A., Plastik parça imalat sanayinde endüstri 4.0 uygulamaları, (2019), Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli

[41] Pirola, F., Cimmini, C., & Pinto, R. (2019). Digital readiness assessment of Italian SMEs: A case-study research. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 1045-1083.

[42] Rockwell Automation. (2014). The Connected Enterprise Maturity Model. 15 Haziran 2022, Erişim adresi <http://www.rockwellautomation.com>

[43] Sjödin, D., Vinit, P., Leksell, M., & Petrovic, A. (2018). Smart factory implementation and process innovation. *Research Technology Management*, 61(5), 22-30.

[44] Yüce, G., Dijital dönüşüm ve endüstri 4.0 olgunluk modeli: Türkiye çimento sektörü üzerine bir uygulama, (2020), Doktora Tezi, Mersin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Mersin.