

ENDÜSTRİ 4.0 İLE KATMANLI ÜRETİMİN BÜTÜNLEŞMESİNİ KOLAYLAŞTIRAN FAKTÖRLERİN YORUMLAYICI YAPISAL MODELLEME İLE ANALİZİ

Yeşim CAN SAĞLAM¹

Öz

Hızlı prototipleme veya üç boyutlu (3B) baskı isimleriyle de anılan katmanlı üretim, geleneksel bilgisayar destekli üretimin aksine malzemelerin birleştirilerek üst üste eklenmesi felsefesine dayanan ve karmaşık geometri nesnelerin üretilmesini mümkün kılan bir üretim yöntemidir. Bilişim teknolojilerinin endüstriyi bir araya getirmesiyle ortaya atılan endüstri 4.0 ise, nesnelerin ortak bir iletişim ağıyla birbirleriyle haberleşmesini mümkün kılan 4. Sanayi devrimi olarak nitelendirilmektedir. Endüstri 4.0'ın temel amacı, insan gücüne bağımlılığı azaltmak, daha az maliyetle üretim çözümleri oluşturarak daha etkili, hızlı ve esnek yapı inşa etmektir. Mevcut literatür her ne kadar katmanlı üretimin endüstri 4.0 ile bütünleşmesinin ortaya çıkaracağı avantajlardan bahsetse de, endüstri 4.0 ve katmanlı üretimin bütünleşmesini mümkün kılan faktörlerin taşıdığı önemi derecelendirme bağlamında oldukça az sayıda çalışma vardır. Bu çalışmanın amacı, endüstri 4.0 ile katmanlı üretimin bütünleşmesini kolaylaştıran faktörleri literatür incelemeleri ile elde etmek ve uzman görüşleri yardımıyla bu faktörler arasındaki ilişkiyi Yorumlayıcı Yapısal Modelleme ile analiz etmektir. Yorumlayıcı Yapısal Modelleme yöntemiyle faktörler arasındaki ilişkiler tespit edilmiş ve MICMAC analiziyle ise belirlenen faktörlerin endüstri 4.0 ile katmanlı üretimin bütünleşmesini kolaylaştırması açısından önemi bağımlılık ve etkilene seviyelerine göre ortaya konulmuştur. Analizler sonucunda ortaya çıkan hiyerarşik ilişkiler modeline göre, endüstri 4.0 ile katmanlı üretimin bütünleşme sürecini kolaylaştıran en önemli faktör olarak nesnelerin interneti bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Katmanlı üretim, Yorumlayıcı yapısal modelleme, Endüstri 4.0, MICMAC analizi

Jel Sınıflaması: M10, M11, L60

ANALYSIS OF FACTORS FACILITATING THE INTEGRATION OF ADDITIVE MANUFACTURING AND INDUSTRY 4.0 WITH INTERPRETIVE STRUCTURAL MODELING

ABSTRACT

Additive manufacturing, also called rapid prototyping or three-dimensional (3D) printing, is a production method based on combining materials and adding them on top of each other and making it possible to produce objects with complex geometries, unlike traditional computer-aided production. Industry 4.0, which was introduced by the combination of information technologies and industry, is described as the 4th Industrial Revolution, which makes it possible for objects to communicate with each other through a common communication network. The core purpose of Industry 4.0 is to reduce the dependence on manpower and to build a more effective, fast and flexible structure by creating a production schedule with less cost. Although the extant literature mentions the advantages of the integration of additive manufacturing with industry 4.0, there are very few studies in the aspect of rating the factors that enable the integration of industry 4.0 and additive manufacturing. The purpose of this research is to obtain the factors facilitating the integration of Industry 4.0 and Additive Manufacturing through literature reviews and to analyze the relationship between these factors with Interpretive Structural Modeling with the assist of expert opinions. The relationships between the factors were determined by the Interpretive Structural Modeling method, and the importance of the factors determined by MICMAC analysis in facilitating the integration of industry 4.0 with additive manufacturing was revealed according to their dependency and influence levels. According to the hierarchical relations model that arise as a result of the analyzes, the internet of things was found to be the most significant factor facilitating the integration process of industry 4.0 as well as additive manufacturing.

Keywords: Additive manufacturing, Interpretive structural modeling, Industry 4.0, MICMAC analysis

Jel Classification: M10, M11, L60

¹ Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, KOCAELİ
e-posta: yesimcan @gtu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0528-6135

1. Giriş

Son yıllardaki üretim sistemleri, müşteriye özel ve çok yönlü üretim sağlayan aynı zamanda geleneksel üretime bir alternatif sunan katmanlı üretimi giderek daha fazla benimsemektedir. Endüstri 4.0 ise geleneksel makine imalatını dijital imalata dönüştürme yaklaşımını ortaya çıkarmıştır. Siber-fiziksel sistemler, dijitalleşme, büyük veri yönetimi, nesnelerin interneti ve bulut bilişim gibi endüstri 4.0 teknolojilerinin hızlı gelişimi, üretim sistemlerinde önemli bir devrime yol açarak onları daha otonom, özelleştirilmiş ve verimli hale getirmiştir (Wankhede ve Vinodh, 2021: 1591). Yazılım, sensor ve benzeri bilgisayar teknolojileri ile donatılmış cihazlar birbirleriyle haberleşerek veri aktarımı ve gerçek zamanlı izleme sağlamaktadır (Ashima vd., 2021: 5081). Endüstri 4.0 katmanlı üretim ile entegre edildiğinde ise, tedarik zincirlerine hızlı teslimat ve özelleştirilmiş üretim yapma imkanı sağlamaktadır (Wankhede ve Vinodh, 2021: 1591). Çeşitli üretim tekniklerini ve teknolojilerini kapsayan katmanlı üretim, firmalar üzerinde özellikle üretim operasyonları ve tedarik zinciri açısından önemli bir etkiye sahiptir (Turkcan vd., 2022: 1). Endüstri 4.0 ile katmanlı üretimin bütünleşmesi, yalnızca müşterinin özelleştirilmiş ürünler elde etmesine yardımcı olmakla kalmayıp, aynı zamanda üreticinin daha verimli üretim akışı sağlamasına da yardımcı olmaktadır. Nesnelerin interneti gibi endüstri 4.0 teknolojileri gelişmiş özelliklere sahip karmaşık nesnelere üretme yeteneği nedeniyle, katmanlı üretimin benzersiz ürünler üretmesine yardımcı olmaktadır (Wankhede ve Vinodh, 2021: 1591).

Günümüzün rekabetçi ortamında firmaların operasyonlarını sürdürebilmesi için katmanlı üretime geçmelerinin gerekliliği literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır (Turkcan vd., 2022: 1). Çünkü katmanlı üretim firmaların ürün geliştirme döngüsünü kısaltmakta, enerji tüketimini azaltmakta, daha iyi takım çalışmasını mümkün kılmakta ve dolayısıyla uygun maliyetli ürünler üretmeyi kolaylaştırmaktadır (Elhazmiri vd., 2022: 318). Katmanlı üretim büyük bir potansiyele sahip olsa da, uygulamada bazı sorunlara neden olduğu görülmektedir. Örneğin, ek olarak üretilmiş ürünlerin daha az dayanıklı olması veya düşük kalitede olması gibi dezavantajlara sahiptir. Fakat katmanlı üretimin neden olduğu bu sorunlar, endüstri 4.0'ın sunduğu teknolojiler ile aşılabılır (Hernandez Korner vd., 2020: 2; Wankhede ve Vinodh, 2021: 1592). Bu nedenle katmanlı üretim ve endüstri 4.0 entegrasyonunu mümkün kılacak faktörlerin belirlenerek, detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Endüstri 4.0'ın katmanlı üretimi kolaylaştırmadaki rolünü mevcut araştırmalar sıkça vurgulasa da (Kulkarni vd., 2021: 401) ve kavramsal olarak ele alsa da (Azarian ve Solvang, 2021: 587), bu konuya doğrudan odaklanan ampirik araştırmaların az sayıda olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Örneğin Charles ve

arkadaşları katmanlı üretim metodolojisini kullanarak simülasyon gerçekleştirmişler, elde edilen çıkarımları endüstri 4.0'ın sunduğu imkanlar kapsamında değerlendirmişlerdir. Malaga ve Vinodh (2022) tüketici istek ve ihtiyaçlarına yönelik ürünler üretmek için endüstri 4.0 teknolojilerini katmanlı üretim sürecinde kullanmayı amaçlamış, bu yönde kullanılan teknolojileri belirleyerek çok kriterli karar verme yöntemleriyle bu teknolojileri sınıflandırmışlardır. Haleem ve Javaid, (2019), endüstri 4.0'ın özelliklerini ve katmanlı üretimle ilişkisini çalışmalarında ele almıştır. Bir başka çalışmada Wankhede ve Vinodh (2021), otomotiv parça imalat sektöründe endüstri 4.0 ve katmanlı üretimin bütünleşmesini kolaylaştıran faktörleri araştırmıştır. Çalışmaları sonucunda gelecek araştırmalara öneri kısmında, katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ın bütünleşmesini etkileyen faktörlerin daha fazla incelenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Özellikle farklı ülkelerde yürütülen araştırmalar bu konudaki az sayıda olan incelemelere zenginlik katacak ve bulguların kıyaslanabilirliğini mümkün kılacaktır. Dolayısıyla Wankhede ve Vinodh'un (2021) araştırma çağrısına cevap verecek şekilde tasarlanarak, bu çalışmanın amaçları şu şekilde belirlenmiştir:

- Katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ın bütünleşmesini etkileyen temel faktörleri saptamak
- Belirlenen faktörler arasındaki bağlamsal ilişkileri araştırarak, bunlar arasındaki hiyerarşik seviyeleri oluşturmak
- Bu dinamiklerin daha iyi anlaşılmasını sağlamak için yorumlayıcı yapısal model geliştirmek
- Faktörleri etkileme ve bağımlılık güçlerine sınıflandırmaktır.

Bu çalışma, Türk imalat sektöründe katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ın bütünleşmesini kolaylaştıran faktörleri inceleyerek, hem literatürdeki az sayıda olan çalışmalara katkı sağlamakta hem de Wankhede ve Vinodh (2021)'un çalışmasının kapsamını farklı ülke bağlamında genişletmektedir. Belirlenen amaçları gerçekleştirmek için detaylı bir literatür incelemesi yapılarak katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ın bütünleşmesini etkileyen faktörler listelenmiş ve sonrasında uzman görüşleri de alınarak araştırmada kullanılacak faktörler belirlenmiştir. Yorumlayıcı yapısal modelleme yöntemi ile faktörler arasındaki hiyerarşik seviyeler oluşturulmuştur. En son aşamada ise MICMAC (Cross Impact Matrix Multiplication Applied to Classification) yöntemi kullanılarak faktörlerin etki ve bağımlılık değerleri saptanmıştır. Türkiye bağlamında endüstri 4.0 ve katmanlı üretime yönelik yapılan çalışmalar bulunmakla birlikte, katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ın bütünleşmesini etkileyen faktörlerin

araştırıldığı çalışmalara rastlanmamış olması bu çalışmanın literatüre katkısını göstermekte ve özgün değerini sunmaktadır.

2. Literatür

2.1. Katmanlı üretim

Üretim nezdinde bir parçanın görevini gerçekleştirebilmesi, geometri ve malzeme olmak üzere iki temel özelliğine bağlıdır. Geometri ve malzemenin belirli süreçlerden geçirilerek işlenmesi üretim yöntemleri ile mümkündür. Temel olarak, şekil verme, aşındırma ve katmanlı üretim olmak üzere 3 üretim yönteminin olduğu söylenebilir. Malzeme üzerinde güç uygulanması veya erimiş malzemenin kalıba dökülmesi “şekil verme üretim yöntemi” olarak adlandırılmaktadır. Maddeden kesme, delme, taşlama gibi talaşlı imalat prosedürleriyle parçalar ayrıştırılarak malzeme üretilmesine aşındırma yöntemleri denir (Güngör, 2020: 37). Katmanlı üretim ise, biçimlendirici üretim metodolojisinin aksine, 3B model verilerinden parçalar yapmak için malzemelerin katman katman birleştirme süreci olarak tanımlanmaktadır (Hernandez Korner vd., 2020: 2; Jayawardane vd., 2023: 3). 3B baskı veya hızlı prototipleme olarak da nitelenen katmanlı üretim, birçok üretim tekniğini kapsamaktadır (Turkcan vd., 2022: 2). Katmanlı üretim plastik, metal ve organik malzemeler kullanılarak nesnelerin üç boyutlu (3B) geometrik bilgilerine göre oluşturulan katmanlarının üst üste (katman şeklinde) birleştirilmesi felsefesi temeline dayanan, uygulamada kolay olan bir imalat metodudur (Sürmen, 2019: 373). Geleneksel üretim yöntemlerinin aksine, katmanların üst üste eklenmesi anlayışına dayandığı için daha az israfa neden olduğu söylenebilir (Elhazmiri vd., 2022: 318).

Katmanlı üretimin ortaya çıkışı ve üretimde kullanılması 1980'lere kadar uzanmaktadır. Charles Hull tarafından icat edilen ilk katmanlı üretim teknolojisi stereolitografidir (Sürmen, 2019: 373) ve birçok yeni teknoloji için motive edici teknoloji olmuştur (Mitchell vd., 2018: 606). Günümüzde, füzyonlu biriktirme modelleme, seçici lazer sinterleme ve katmanlı üretimde kullanan 3B baskı gibi birçok üretim teknolojisi vardır (Turkcan vd., 2022: 2). Zaman içerisinde katmanlı üretimde gerçekleşen büyük gelişimler, 4B baskı teknolojisini gündeme getirdi. Bu teknoloji, çevre ile etkileşim halinde olan cismin dış bir uyarana şekil değiştirebilmesi için akıllı malzemeler kullanılmaktadır. Aynı zamanda 4B baskı, teknolojinin kendi dışındaki bir uyarana tepki olarak önceden programlanmış bir şekilde dönüşebilen 'akıllı malzemelerin' kullanılmasını sağlamaktadır (Mitchell vd., 2018: 606). Bu gelişmelerle birlikte katmanlı üretim günümüzde havacılık, tıp ve otomotiv gibi birçok endüstride kullanılmaktadır (Dilberoglu vd., 2017: 546). Örneğin havacılık firması olan Boeing, uçaklar için katmanlı

üretim ile binlerce parça üretmiştir. Aynı şekilde, tıp sektörü de birçok katmanlı üretim teknolojisinin sıkça kullanıldığı bir sektördür (Turkcan vd., 2022: 2).

Katmanlı üretim başlangıçta bir prototip oluşturma aracı olarak tanıtılsa da, teknolojiye hızlı ilerlemeler, onu endüstri 4.0'daki modern üretim sistemlerinin önemli bir parçasına haline dönüştürdü (Azarian ve Solvang, 2021: 589). Avrupa Komisyonu Raporuna göre katmanlı üretim, endüstri üzerinde önemli bir etkiye sahip olan dijital çağın teknolojilerinden biridir. Tedarik zincirlerinin karmaşıklığını/boyutunu azaltır. Aynı zamanda, yeni ürün geliştirme, tasarım ve test için zaman ve maliyetlerin azaltılması yoluyla üretim değer zincirlerinin verimliliğini artırır. Katmanlı üretim teknolojisi ile endüstri 4.0'ın bütünleşmesi, üretim yönetiminde, stok kontrolü ve lojistik yönetiminde üretim parametrelerinin kontrolüyle daha fazla verimlilik elde ederek büyük faydalar sağlayabilir (Godina vd., 2020: 2). Sadece ürün geliştirme maliyetlerinde azalma sağlamakla kalmayıp, ürün geliştirme süreçlerini de hızlandırabilmektedir. Böylelikle üretimde esnekliği arttırmaktadır (Delic vd., 2019: 605). Ayrıca üretimde israfları önleyerek döngüsel ekonominin gelişmesine katkıda bulunur (Jayawardane vd., 2023: 2).

2.2. Endüstri 4.0

Endüstri 4.0'ı incelemeden önce, tarihte endüstri 4.0 öncesinde gerçekleşen diğer devrimlere kısaca bakmak gerekir. Şekil 1'de dört büyük endüstri devrimlerinin tarihte hangi aralıkta meydana geldiği ve özet olarak neyi ifade ettiği gösterilmektedir. Esas olarak endüstri devriminin ilk çıkış noktası İngiltere'dir. Daha sonra Batı Avrupa ülkeleri ve Amerika'ya hızlı bir şekilde yayılmıştır. Endüstri devrimleri, üretim anlayışında birçok değişikliği kendisiyle birlikte beraber getirmiş, tüm dünyada gelişmişlik seviyesi ülkelerdeki sanayi düzeylerine bağlı olarak yorumlanmaya başlanmıştır. Sanayileşme, "insan ihtiyaçlarına paralel doğanın dönüşümü" olarak nitelendirilmektedir (Kamber ve Bolatan, 2019: 837).

Endüstri devrimi 1.0	<ul style="list-style-type: none">• (1800 -1900), işçilik ve buhar motorları yoluyla üretim gören mekanizasyon ifade etmektedir.
Endüstri devrimi 2.0	<ul style="list-style-type: none">• (1900 -1980'ler), elektrik kullanımını, seri üretimi ve vasıflı işgücünün tanımlanmasını içerir.
Endüstri devrimi 3.0	<ul style="list-style-type: none">• (1980'ler-2020), bilgi teknolojileri, ağ ve elektronik sistemlerini içeren üretim sistemlerini küresel olarak otomatikleştirdi.
Endüstri devrimi 4.0	<ul style="list-style-type: none">• (21. Yüzyıl), minimum hata ile hızlı üretim için robotik ve sanal teknolojilerin kullanımını içeren dijital teknolojiyi içerir.

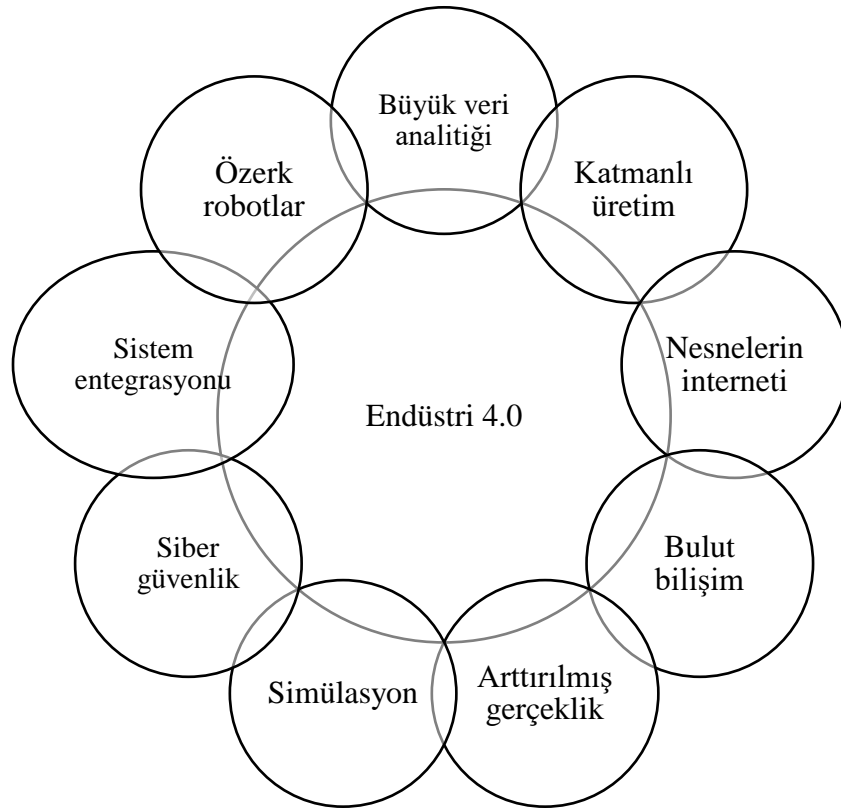
Şekil 1. 1.0'dan 4.0'a kadar sanayi devrimleri (Kaynak: Parvanda ve Kala, 2022: 2)

Dördüncü sanayi devrimi olarak da nitelendirilen endüstri 4.0, Alman ekonomisini geliştirmek amacıyla sunulan bir öneri olarak 2011 yılında endüstri 4.0 olarak Almanya'da doğdu (Hernandez Korner vd., 2020: 3). Endüstri 4.0, temelde farklı bir çalışma ve üretim şekline, yüksek derecede otomasyona, birbirleriyle iletişim kurabilen makinelere ve üretim modüllerine sahip akıllı fabrikaları ifade etmektedir. Aslında endüstri 4.0, tüm değer zincirini dijitalleştirme sürecidir. Bu sanayi devriminde insanlar, nesnelere ve sistemler gerçek zamanlı veri alışverişi yoluyla birbirine bağlanabilir. Üstelik yapay zekâyâ sahip makineler ve cihazlar kendi kendilerine öğrenebilir ve değişikliklere uyum sağlayabilir (Çankaya ve Sezen, 2020: 70). Agrawal ve Vinodh (2021: 25) endüstri 4.0'ı işletme süreçlerini yönetmek ve değer yaratmak için makinelerin, objelerin ve insanların eş zamanlı ve dijital iletişimi olarak tanımlamaktadır. Nitelikli bir endüstri 4.0 üretim sistemi, makine ve insanların birlikte uyumlu bir şekilde çalışmasını gerektirir. Verilerin doğru ve eksiksiz bir şekilde edinilmesi bu uyumun sağlanmasında kritik öneme sahiptir (Qin vd., 2017: 307). Endüstri 4.0 üretim teknolojilerini akıllı üretim süreçleriyle bütünleştirerek, üretim sistemleri modellerine yeni bir çağ açmaktadır (Erik ve Kuvvetli, 2021: 638). Genel olarak endüstri 4.0'ın kritik özellikleri şu şekilde sıralanmaktadır (Çankaya ve Sezen, 2020: 70).

- Birlikte çalışabilirlik: Makineler, cihazlar, sensörler ve insanlar birbirleriyle iletişim kurabilir ve birlikte çalışabilirler.
- Sanallaştırma: Sensör verilerinden alınan bilgilere dayanarak fiziksel dünyanın sanal bir kopyası oluşturulabilir.

- Teknik yardım: Sistemler yalnızca insanları karar verme ve problem çözme süreçlerinde desteklemekle kalmamakta, ayrıca insanlar için çok zor veya tehlikeli olan görevleri üstlenmektedir.
- Merkezi olmayan karar verme: Siber fiziksel sistemler, bireysel olarak basit kararlar alma ve olabildiğince özerk hareket etme becerisine sahiptir.
- Gerçek zamanlı veri toplama: Sistemler, verileri gerçek zamanlı olarak toplama, işleme ve iletme yeteneğine sahiptir. Bu, değişikliklere hızlı bir şekilde adapte olabilmeyi mümkün kılacaktır.

Şekil 2’de endüstri 4.0’ın dokuz temel yapıtaşı sunulmuştur. Bu çalışma endüstri 4.0 ile katmanlı üretim ilişkisine odaklanmaktadır.



Şekil 2. Endüstri 4.0’ın kritik yapıtaşları (Kaynak: Parvanda ve Kala, 2022:3)

2.3. Katmanlı üretimin endüstri 4.0 ile bütünleşmesini etkileyen faktörler

Katmanlı üretimin endüstri 4.0 teknikleriyle bütünleşmesi süreç verimliliğinin artırılması, tüketici taleplerine göre gelişmiş düzeyde hizmet sunulması gibi birçok avantaj sağlamaktadır (Agrawal ve Vinodh, 2021: 25). Literatürde katmanlı üretim ve endüstri 4.0 konularını birlikte alan birçok çalışma vardır. Kavramsal çalışmalar kapsamında, Hernandez Korner ve arkadaşları (2020) katmanlı üretim ile endüstri 4.0 bütünleşmesini sistematik literatür

yöntemi kullanarak incelemiştir. Dilberoglu ve arkadaşları (2017) katmanlı üretimin sunduğu teknolojik imkânların ve fırsatların önemini vurgulayarak, endüstri 4.0 ortamında katmanlı üretimin rolüne kavramsal bir çalışmayla dikkatleri çekmiştir. Bir başka çalışmada, Kumar (2018), geleneksel üretimden dijital üretime geçiş için gerekli olan nesnelerin interneti, katmanlı üretim ve endüstri 4.0 gibi konuları tartışmıştır. Bordron ve arkadaşları (2019) katmanlı üretimle ilgili zorlukların üstesinden gelmek için endüstri 4.0 tabanlı çözümleri incelemiştir. Çalışmalarında, katmanlı üretimde üretilen ürünün yüzey kalitesinde yaşanan sorunu işletmeler açısından en önemli endişe olarak raporlamışlardır. Bu kalite sorununu çözmek için, endüstri 4.0 teknolojisini kullanarak son işlemde önce ürünün boyutlarının uygun şekilde ölçülmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Chong ve arkadaşları (2018) çalışmasında katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ın bütünleşmesinin avantajlarını mühendislik lisans programcılarında belirlemeyi amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda; öğrencilerin yeni beceri kazanmasını, değişime hazır olmasını ve yeni fikirler edinmeyi teşvik etmesini bu çalışmanın sağladığı avantajlar olarak raporlamışlardır. Lemu (2018) ise çalışmasında endüstri 4.0'da katmanlı üretimin sağladığı avantajları ve kısıtları sunmuştur. Yazar, geometrik doğruluk, yüzey kalitesi ve mekanik davranış gibi mevcut ürün geliştirme süreci parametrelerinde endüstri 4.0 teknolojisini benimseyerek çözülebilecek konuları incelemiştir. Elhazmiri ve arkadaşları (2022) endüstri 4.0'da katmanlı imalatın rolünü farklı iş modelleri üzerinden tartışmıştır. Son olarak Parvanda ve Kala (2022) literatürdeki katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ı entegre etme konusundaki eğilimleri, bu entegrasyonun doğuracağı fırsatları ve zorlukları irdlemiştir.

Literatür detaylı olarak incelendiğinde üretim endüstrisinde katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ın bütünleşmesini kolaylaştıran faktörler konusunda en ortak görüşün *merkezi olmayan üretim süreci* ile ilişkili olduğu görülmektedir. Mevcut teknoloji kullanılarak geleneksel imalat yöntemi ile uzun dönemde seri üretim yapmak uygunken, katmanlı üretimin siparişe göre üretime ya da kısa part halinde üretimlere daha uyumlu olduğu görülmektedir (Güngör, 2020: 42). Bir diğer faktör ise *hammadde tüketiminin en aza indirgenmesidir*. Katmanlı üretim anlayışında malzemeler tasarruflu bir şekilde yalnızca ürün için kullanılmaktadır. Üretimi destekleyici yapılara (döküm kalıbı gibi) gereksinim duyulmamaktadır. Geleneksel üretim sürecinde olduğu gibi kesilip atılan madde olmadığı için atık madde oluşumu da söz konusu değildir. Dolayısıyla lojistik ve depo giderleri önemli derecede azalmaktadır (Güngör, 2020: 42). Aynı şekilde endüstri 4.0 akıllı cihazlar ve üretim sistemleri ile fazla üretimi, malzeme israfını ve enerji tüketimini azaltmaktadır (Çankaya ve Sezen, 2020: 68). Endüstri 4.0'ın

katmanlı üretim ile bütünleşmesi, ürün esnekliğini artıracak ve geleneksel üretim sistemleriyle ilgili zorlukların üstesinden gelinmesine yardımcı olacaktır. Bu entegrasyon, işletmelere müşterilerin isteklerine göre özelleştirilmiş ürünler üretebilme imkanı sunarak *değişen müşteri ihtiyaçlarına hızlı cevap verebilmeyi* mümkün kılmamaktadır. Böylece katmanlı üretim, endüstri 4.0'ın sunmayı amaç edindiği misyon olan işletme çevresindeki değişikliklere çok hızlı uyum sağlama idealini daha da mümkün kılmaktadır (Güngör, 2020: 42). Aynı zamanda üreticinin ölçeklenebilir ve daha verimli üretim akışı yapmasına da yardımcı olarak işletmelere *süreç verimliliğinin sağlanması* avantajı sunmaktadır (Wankhede ve Vinodh, 2021: 1603). Süreç verimliliği sağlanması, *üretimdeki işlem hızını arttırarak, üretim süresinin azalmasına* da neden olmaktadır. Üretim süresinin azalması ise *ürünü pazara sunma süresindeki azalmayı* tetiklemektedir. *Nesnelerin interneti*, katmanlı üretim teknolojisinin kullanılmasından elde edilen kazanımlar üzerinde en önemli etkiye sahip gibi görünen endüstri 4.0'ın teknolojik kavramlarından biridir (Godina vd., 2020: 2). Nesnelerin interneti, makinaların kendi içerisinde bağlantı kurmasına imkân tanıyan ve karşılaştıkları sorunları kendi çözümleyebilen makinaların oluşmasını sağlayan *bir internet sistemidir* (Kaygın vd., 2019: 1069). Bu teknoloji, daha uzak konumlardan çalışabilen şirketlerin taşınma süreçlerine de yardımcı olabilmektedir (Godina vd., 2020: 2). Nesnelerin interneti, iletişimdeki aksaklıkları önleyerek *kesintisiz veri alışverişini* de mümkün kılmaktadır.

Wankhede ve Vinodh (2021) katmanlı üretim ile endüstri 4.0'ın bütünleşmesini etkileyen faktörleri detaylı bir literatür taraması sonucu belirlemiştir. Bu çalışmada, Wankhede ve Vinodh (2021) tarafından belirlenen faktörlerden birbiriyle yakından ilişkili olabilecek faktörler seçilerek daha yalın ve anlaşılır bir ISM modelinin oluşturulması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, katmanlı üretim alanında çalışan iki akademisyenden görüş alınarak faktörler seçilmiş ve ilgili literatürde faktörleri destekleyen farklı çalışmalar incelenmiştir. Araştırma kapsamında belirlenen faktörler Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. Katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ın bütünleşmesini etkileyen faktörler

Kod	Faktörler	İlgili kaynaklar
F1	Süreç verimliliğinin sağlanması	Horst vd. (2018), Sartal vd. (2019), Agrawal ve Vinodh (2021)
F2	Merkezi olmayan üretim süreci	Horst vd. (2018), Wankhede ve Vinodh (2021)
F3	Nesnelerin interneti	Qin vd. (2017), Dilberoglu vd. (2017), Haleem ve Javaid, (2019), Çelebi ve Koda (2021), Wankhede ve Vinodh (2021), Ashima vd., (2021)

F4	Üretim süresinin azalması	Haleem ve Javaid, (2019), Öberg (2019), Wankhede ve Vinodh (2021), Charles vd. (2023)
F5	Hammadde tüketiminin en aza indirgenmesi	Haleem ve Javaid, (2019), Wankhede ve Vinodh (2021), Jayawardane vd. (2023)
F6	Üretimdeki işlem hızı	Haleem ve Javaid, (2019), Kulkarni vd. (2021), Wankhede ve Vinodh (2021)
F7	Ürünü pazara sunma süresindeki azalma	Haleem ve Javaid, (2019), Sartal vd. (2019), Delic vd. (2019)
F8	Kesintisiz veri alışverişi	Haleem ve Javaid, (2019), Bordron vd. (2019)
F9	Değişen müşteri ihtiyaçlarına hızlı cevap verebilme	Agrawal ve Vinodh (2021), Wankhede ve Vinodh (2021), Kulkarni vd. (2021), Azarian ve Solvang (2021), Malaga ve Vinodh (2022)

3. Metodoloji

3.1. Yorumlayıcı yapısal modelleme (ISM)

ISM, herhangi bir durumun doğrudan veya dolaylı olarak ilgili faktörlerini veya bileşenlerini yapılandırmak için geliştirilmiş bilgisayar destekli bir öğrenme tekniğidir (Singh vd., 2019: 676). Bu yöntem, karmaşık bir olguyu önce birkaç parçalara ayırmakta ve daha sonra ise hiyerarşik bir model oluşturarak sorunu çözüme kavuşturmaktadır. Takip ettiği bu hiyerarşik yapı modeli vasıtasıyla ISM, farklı değişkenler arasındaki bağlamsal ilişkileri ve hiyerarşiyi oluşturmayı mümkün kılmaktadır (Yıldız Çankaya, 2022: 7). Tedarik zinciri çevikliği, döngüsel ekonomi, akıllı liman dönüşümü, ters lojistik gibi birçok alanda gerçek hayatta karşılaşılan karmaşık sorunların çözümünde yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Singh vd., 2019: 677).

ISM metodunun kritik aşamalarından biri, konuyla ilgili uzmanlardan görüş alınmasıdır (Patel vd., 2021: 7). Fakat bu aşamada kaç uzmandan görüş alınacağıyla ilgili üzerinde uzlaşılmış bir fikir birliği bulunmamaktadır. Literatürdeki argümanlar genelde en az üç kişiden, en ideal ise beş kişiden görüş alınması gerektiği yönündedir (Çalışkan, 2020: 312). Bazı araştırmacılar ise en fazla sekiz uzman görüşü alınmasının yeterli olacağı görüşündedir (Patel vd., 2021: 7). Araştırmaya hangi katılımcıların davet edilmesi gerektiği konusu ise uzmanlığı nedeniyle araştırmacıya bırakılmaktadır (Çalışkan, 2020: 312).

Bu araştırmanın hedef kitlesi Türkiye’de imalat sektöründe katmanlı üretim gerçekleştiren işletmelerdir. Literatür incelemeleri sonucunda belirlenen 9 faktör arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla kolayda örnekleme yöntemiyle endüstri 4.0 konusunda uzman ve katmanlı üretim hakkında bilgi sahibi olan 9 kişi ile iletişime geçilmiş, bunlardan 7’si

araştırmaya katılmayı kabul etmiştir. Araştırmaya katılmayı kabul eden 7 katılımcıdan 3'ü otomotiv parça üretimi sektöründe, 4'ü ise teknolojik ürün üreten işletmelerde çalışmaktadır. Katılımcıların 2'si doktora mezunu, 2'si yüksek lisans mezunu ve 3'ü lisans mezunudur.

Farklı yanıt verilen ilişkilerde, literatürün önerisi doğrultusunda çoğunluğun belirttiği ilişki dikkate alınmıştır (Çalışkan, 2020: 312). Araştırmaya katılım gösteren uzmanların görüşleri ışığında, saptanan ilişkiler Tablo 2'de sunulmuştur. İki faktör arasında ilişki türleri dört ayrı sembol ile tasvir edilmiştir:

V: Faktör i , faktör j 'yi etkilemektedir.

A: Faktör j , faktör i 'yi etkilemektedir.

X: Faktör i ve faktör j birbirlerini etkiler ama biri diğerinin ön koşulu değildir.

O: Faktör i ve faktör j arasında bir ilişki yoktur.

Tablo 2. Yapısal iç-etkileşim matrisi

Faktörler	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
F1	A	X	X	X	A	V	A	V
F2		O	X	X	X	X	A	V
F3			V	O	V	V	V	X
F4				O	A	V	O	X
F5					O	O	O	X
F6						V	O	V
F7							A	V
F8								X
F9								

Yapısal iç-etkileşim matrisinde kullanılan sembollerin sayısal ifadelerle dönüştürülmesi amacıyla Tablo 3'de gösterilen değerler yardımıyla erişim matrisi oluşturulmuştur (Tablo 4).

Tablo 3. Bağlamsal ilişkinin ikili sayılarla değiştirilmesi

No	Yapısal iç-etkileşim matrisindeki değerler (t, u)	Erişim matrisi değeri	
		(t,u)	(u,t)
1	V	1	0
2	A	0	1
3	X	1	1
4	O	0	0

Tablo 4. Erişim matrisi

Faktörler	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
F1	1	0	1	1	1	0	1	0	1
F2	1	1	0	1	1	1	1	0	1
F3	1	0	1	1	0	1	1	1	1
F4	1	1	0	1	0	0	1	0	1
F5	1	1	0	0	1	0	0	0	1
F6	1	1	0	1	0	1	1	0	1
F7	0	1	0	0	0	0	1	0	1
F8	1	1	0	0	0	0	1	1	1
F9	0	0	1	1	1	0	0	1	1

Erişim matrisi oluşturulduktan sonra ISM metodunun temel kurallarından olan geçişlilik kontrolleri yapılmaktadır (Yıldız Çankaya, 2022: 9). Geçişlilik kontrollerinde eğer gerekli görülürse düzeltmeler yapılarak nihai erişim matrisi oluşturulmaktadır. Buradaki temel amaç, faktörler arasındaki endirekt ilişkileri ortaya çıkarmaktır. Örneğin, ürünü pazara sunma süresindeki azalma faktörü merkezi olmayan üretim sürecini etkiliyorsa, merkezi olmayan üretim süreci ise üretim süresinin azalması faktörünü etkiliyorsa, ürünü pazara sunma süresindeki azalma faktörünün üretim süresinin azalması faktörünü etkilediği kabul edilmektedir (Tablo 5).

Tablo 5. Nihai Erişim matrisi

Faktörler	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
F1	1	0	1	1	1	0	1	0	1
F2	1	1	0	1	1	1	1	0	1
F3	1	0	1	1	0	1	1	1	1
F4	1	1	0	1	0	0	1	0	1
F5	1	1	0	0	1	0	0	0	1
F6	1	1	0	1	0	1	1	0	1
F7	0	1	0	1*	0	0	1	0	1
F8	1	1	0	0	0	0	1	1	1
F9	0	0	1	1	1	0	0	1	1

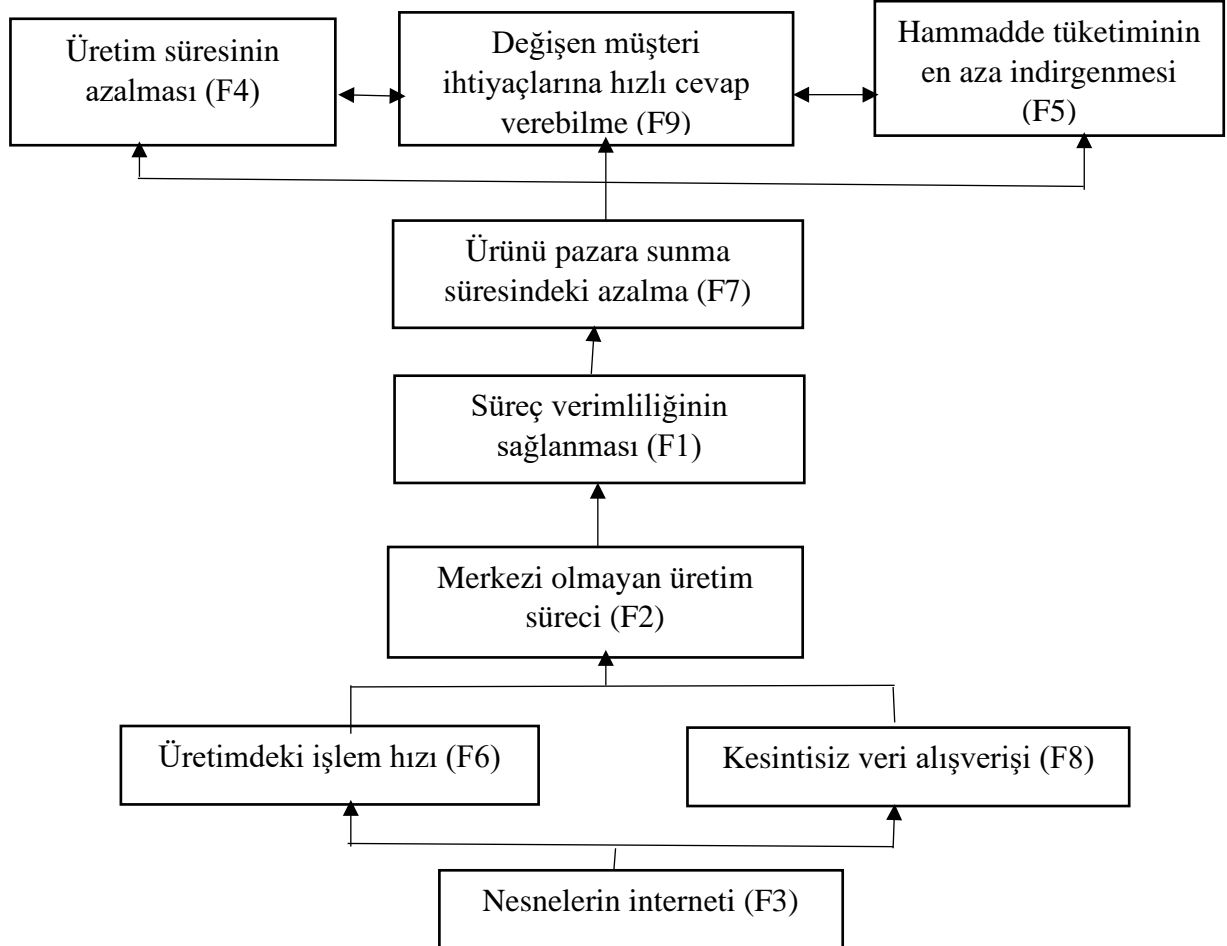
*Geçişlilik kuralı gereğince değiştirilen değerler

Bir sonraki adımda nihai erişim matrisinden elde edilen verilerde erişim, öncül ve kesişim kümeleri saptanarak seviyelendirme süreci yürütülür. Erişim kümesi bir faktörün etkilediği tüm faktörleri göstermektedir. Öncül küme, bir faktörü etkileyen tüm faktörleri nitelemektedir. Kesişim kümesi ise bu iki küme içerisinde ortak olan faktörlerdir. Bir faktörün erişim kümesi ile kesişim kümesi aynı ise bu faktör hiyerarşik sıralamada ilk yeri alır ve sonraki adımda seviyelendirilen faktör tüm kümelerden çıkartılarak aynı işlem tekrarlanır. Bu yolla seviyelendirme işlemi gerçekleştirilir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen seviyelendirme işlemleri Tablo 6'da gösterilmektedir.

Tablo 6. Seviyelendirme

Faktörler	Erişim kümesi	Öncül küme	Kesişim kümesi	Seviye
F1	F1, F3, F4, F5, F7, F9	F1, F2, F3, F4, F5, F6, F8	F1, F3, F4, F5,	III
F2	F1, F2, F4, F5, F6, F7, F9	F2, F4, F5, F6, F7, F8	F2, F4, F5, F6, F7	IV
F3	F1, F3, F4, F6, F7, F8, F9	F1, F3, F9	F1, F3, F9	VI
F4	F1, F2, F4, F7, F9	F1, F2, F3, F4, F6, F7, F9	F1, F2, F4, F7, F9	I
F5	F1, F2, F5, F9	F1, F2, F5, F9	F1, F2, F5, F9	I
F6	F1, F2, F4, F6, F7, F9	F2, F3, F6	F2, F6	V
F7	F2, F4, F7, F9	F1, F2, F3, F4, F6, F7, F8	F2, F4, F7,	II
F8	F1, F2, F7, F8, F9	F3, F8, F9	F8, F9	V
F9	F3, F4, F5, F8, F9	F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9	F3, F4, F5, F8, F9	I

Son aşamada ise seviyelendirmeye göre katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ın bütünleşmesini kolaylaştıran faktörlere ilişkin yorumlayıcı yapısal model geliştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Katmanlı Üretim ve Endüstri 4.0'ın Bütünleşmesini Kolaylaştıran Faktörlere İlişkin Yorumlayıcı Yapısal Model

3.2. MICMAC Analizi

MICMAC analizi faktörlerin etkileme ve bağımlılık güçlerini incelemek için kullanılmaktadır. Her bir faktörün etkileme ve bağımlılık gücü, MICMAC analizi kullanılarak otonom, bağımsız, bağımlı ve bağlantı faktörlerini bulmak için ayrıca kullanılır (Singh vd., 2019:683). Genel bir değerlendirmeyle, daha fazla bağımlılığa sahip bir faktör, bu faktörün kolaylaştırılması için diğer bazı faktörlerin tartışılması gerektiğini ifade etmektedir. Daha fazla etkileme gücüne sahip bir faktör ise, güçlendirilmesini diğer bazı faktörlerin de mümkün kıldığı anlamına gelir (Çalışkan, 2020:314). Tablo 7'de her bir faktörün etkileme ve bağımlılık seviyeleri sunulmuştur.

Tablo 7. Faktörlerin etkileme ve bağımlılık seviyeleri

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Etkileme seviyesi	6	7	7	5	4	6	4	5	5
Bağımlılık seviyesi	7	6	3	7	4	3	7	3	9

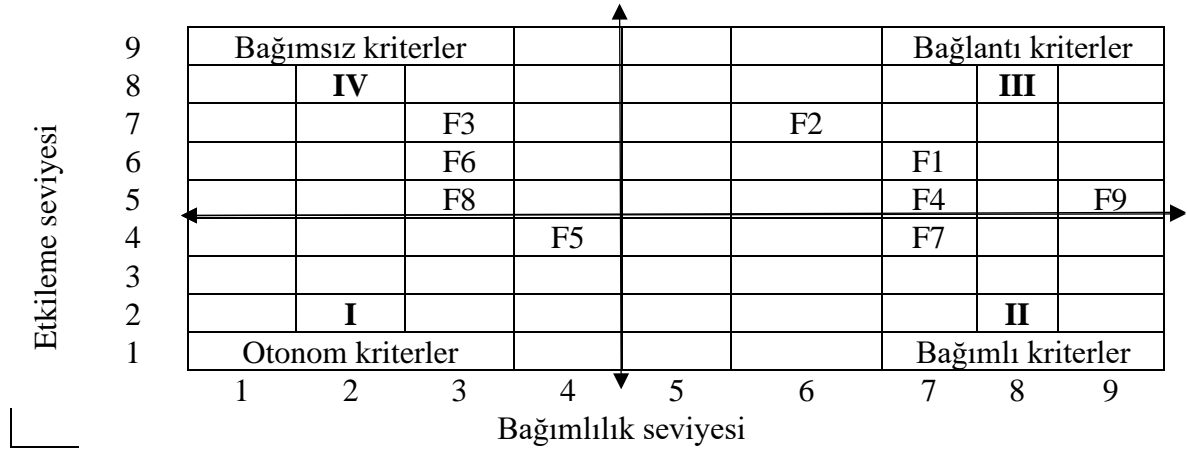
Faktörler etkileme ve bağımlılık seviyelerine göre Şekil 2'de gösterildiği üzere 4 farklı kritere ayrılmaktadır:

I-Otonom Kriterler: Düşük etkileme gücüne sahip ve düşük bağımlılıkları olan değişkenlerin yer aldığı kriterlerdir. Bu kriterler, sistemi çok fazla etkilememektedir (Malviya ve Kant, 2017:557).

II-Bağımlı Kriterler: Bu kriterler, hem yüksek bağımlılık seviyesindedirler hem de düşük etkileme gücüne sahiptirler. Üçüncü ve dördüncü bölgelerdeki değişkenlerden bağımlı kriterler oldukça etkilenmektedirler (Malviya ve Kant, 2017:557).

III-Bağlantı Kriterler: Bu kriterler yüksek bağımlılık seviyesine sahip olmakla birlikte aynı zamanda yüksek etkileme gücüne de sahiptirler. Bağlantı kriterlerinde meydana gelen herhangi bir değişim diğer kriterleri de etkileyecektir (Malviya ve Kant, 2017:558).

IV-Bağımsız Kriterler: Bağımsız kriterler, yüksek etkileme gücüne sahipken düşük bağımlılık seviyesinde yer almaktadır. Bu kriterler, sistemin geri kalanını etkiledikleri için kritik öneme sahip olduğu düşünülmektedir (Malviya ve Kant, 2017:555).



Şekil 4. MICMAC Diyaqramı

4. Bulgular

Şekil 3’de görüleceği üzere, ISM analizinde katmanlı üretim ve endüstri 4.0’ın bütünleşmesini kolaylaştıran 9 faktör 6 seviyeye ayrılmıştır. 1. Seviye, “Üretim süresinin azalması (F4)”, “Değişen müşteri ihtiyaçlarına hızlı cevap verebilme (F9)” ve “Hammadde tüketiminin en aza indirgenmesi (F5)”; 2. seviye “Ürünü pazara sunma süresindeki azalma (F7)”; 3. Seviye “Süreç verimliliğinin sağlanması (F1)”, 4. Seviye “Merkezi olmayan üretim süreci (F2)”; 5. Seviye “Üretimdeki işlem hızı (F6)” ve “Kesintisiz veri alışverişi (F8)”; ve son olarak 6. Seviye “Nesnelerin interneti (F3)” faktörlerinden oluşmaktadır.

MICMAC analizinde ise faktörlerin kategorize edilmesine ilişkin genel bulgular şu şekildedir:

- F3 (Nesnelerin interneti), F6 (Üretimdeki işlem hızı), F8 (Kesintisiz veri alışverişi) en yüksek etkilene gücüne sahipken aynı zamanda en fazla bağımsız güce de sahiptir. Böylelikle, bu faktörlerin diğer faktörleri güçlü bir biçimde etkilene potansiyeli olduğundan, karar verilirken ön planda düşünülmesi gereken konular olduğu söylenebilir.
- Hammadde tüketiminin en aza indirgenmesi (F5) otonom kriterler içerisinde yer almaktadır. Daha önce de bahsedildiği üzere bu kriterler düşük bağımlılık ve düşük etkilene gücüne sahiptir. Dolayısıyla bu faktörlerdeki herhangi bir değişimin diğer faktörleri çok fazla etkilemeyeceği veya tam tersi bir şekilde diğer faktörlerden de etkilenmeyeceği ifade edilebilir. Daha kısa bir şekilde ifade edilirse, bu faktör düşük

önceliğe sahiptir ve yalnızca kendi başına katmanlı üretim ve endüstri 4.0 bütünleşmesini doğrudan pek fazla etkilememektedir.

- F7 (Ürünü pazara sunma süresindeki azalma) faktörü bağımlı kriter olarak karşımıza çıkmaktadır. Ürünü pazara sunma süresindeki azalma diğer faktörleri en az etkileme gücüne sahipken, diğer faktörlerden ise en fazla etkilenme gücüne sahiptir. Dolayısıyla bu faktör diğer faktörlerin bir sonucu olarak değerlendirilebilir.
- Süreç verimliliğinin sağlanması (F1), merkezi olmayan üretim süreci (F2), üretim süresinin azalması (F4) ve değişen müşteri ihtiyaçlarına hızlı cevap verebilme (F9) faktörleri bağlantı kriterleri içerisinde yer almaktadır. Bu bulgu, bu faktörlerde meydana gelecek herhangi bir değişikliğin diğer faktörleri etkileyebileceği gibi kendisi üzerinde bir geri bildirim etkisinin de doğabileceğini vurgulamaktadır.

5. Tartışma

Son yıllarda giderek artan sayıda endüstri birimlerinin katmanlı üretimi kullanmaya başlamasıyla birlikte, katmanlı üretim bir dönüm noktasına girmiştir. Katmanlı üretimin teknoloji yelpazesi genişledikçe, daha fazla işletmenin bu yöntemi benimsemesi hızlanmıştır (Özer, 2020:616). Dördüncü sanayi devrimi bir başka deyişle endüstri 4.0 ise, akıllı üretim sistemlerinin ve teknolojilerinin entegrasyonunu teşvik etmektedir. Çeşitli akıllı teknolojiler arasında katmanlı üretim, endüstri 4.0'ın gereksinimlerini karşılamada kritik bir rol oynamaktadır (Kumar, 2018:123). Bu çalışmada katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ın bütünleşmesini mümkün kılan faktörler literatür incelemesiyle toplanmış ve bu faktörler arasındaki ilişkiler uzman görüşleri yardımıyla belirlenmiştir. Sonraki adımda bu faktörler, ISM ve MICMAC metodolojileriyle analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ın bütünleşmesini mümkün kılan en önemli faktör nesnelere internetidir. Bu faktör ayrıca diğer faktörleri de en çok etkileme gücüne sahiptir. Nesnelere interneti, üretim sistemlerinde gelecek vaat eden önemli bir faktördür ve endüstri 4.0'ın misyonunu gerçekleştirmesinde kritik öneme sahiptir (Kumar, 2018:123). Çalışkan (2020:316) yürüttüğü çalışmada limancılık sektöründe endüstri 4.0 uygulamalarının benimsenememesinin altında yatan nedenler arasında nesnelere interneti gibi uygulamaların nüanslarını kaçırmalarının olduğunu önemli bir faktör olarak bulgulamıştır. Üretimdeki işlem hızı ve kesintisiz veri alışverişi endüstri 4.0'ın ve katmanlı üretimin bütünleşmesinde en önemli iki faktörden birisidir ve merkezi olmayan üretim süreci gibi diğer faktörlerin ortaya çıkmasını oldukça etkilemektedir. Bu çalışmanın bulgularına paralel olarak, Wankhede ve Vinodh (2021) da

üretimdeki işlem hızının ve kesintisiz veri alışverişinin otomotiv sektöründe katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ın bütünleşmesini kolaylaştıran önemli faktörler arasında olduğunu ISM analizi ile ortaya koymuştur. Seri üretim yaklaşımından bağımsız olan merkezi olmayan üretim anlayışı ile kişiye özel üretim yapabilme imkânı doğmaktadır. Endüstri 4.0'ın yanı sıra, Özer (2020:608) katmanlı üretim yönteminin özel ürünler üretebilme imkânını sunduğunu vurgulamaktadır. Merkezi olmayan üretim anlayışı ise israfı önleyerek maliyetlerde önemli tasarruflar sağlamaktadır (Özer, 2020:608). Bu da süreç verimliliğinin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır.

Ürünü pazara sunma süresinde azalmanın mümkün olması için süreç verimliliğinin sağlanması gerekmektedir. İşletmelerin nihai amacı faaliyetleri sonucundan ortaya çıkan ürünü müşteri kitlesine sunabilmektir. Dolayısıyla ürünü pazara sunma süresindeki azalma işletmeler için kritik önem taşımaktadır. İşletmeler ürünü pazara sunma süresini kısaltarak, değişen müşteri ihtiyaçlarına hızlı cevap verebilme fırsatını yakalamakta, işletmenin genel üretim süresinin azalması ve hammadde tüketiminin biraz daha minimum seviyelere indirgeyebilmektedir. Bu üç faktör; yani değişen müşteri ihtiyaçlarına hızlı cevap verebilme, işletmenin genel üretim süresinin azalması ve hammadde tüketiminin biraz daha minimum seviyelere düşürmek yorumlayıcı yapısal modelin en üst kademesinde bulunmaktadır. Dolayısıyla, diğer faktörleri etkileme gücü düşükken, diğer faktörlerden en fazla etkilenme gücüne sahiptir denilebilir.

6. Araştırmanın kısıtları ve gelecek araştırmalar için öneriler

Bu araştırma, katmanlı üretim ile endüstri 4.0'ın bütünleşmesini sağlayan faktörlerin ilişkilerini incelemesi bakımında literatürdeki az sayıdaki incelemelere katkı sunması açısından oldukça önem taşımaktadır. Ancak araştırma üretim sektöründe faaliyet gösteren firmaların yöneticilerine uygulandığı için sektör bazında sınırlandırılmıştır. Gelecek araştırmalar hizmet sektöründe uygulamalar yaparak araştırma bulgularının sınırlarını genişletebilir. Böylelikle bu araştırmanın bulguları ile de sonuçlarını kıyaslayabilecektir. Aynı zamanda gelecekteki araştırmalar katmanlı üretim ve endüstri 4.0'ın bütünleşmesini etki eden diğer faktörleri de araştırmalıdır. Bu araştırmada kullanılan yöntem her ne kadar genel kabul görmüş bir metot olsa da az sayıda örneklem kullanması nedeniyle araştırma genellenebilirliğini sınırlandırmaktadır. İleriki araştırmalarda daha yüksek sayıda örneklem kullanılarak DEMATEL, AHP gibi farklı yöntemler kullanılması araştırma sonuçlarının kapsamının genişletilmesini mümkün kılacaktır.

Kaynakça

- Agrawal, R., & Vinodh, S. (2021). Prioritizing drivers of industry 4.0 enabling additive manufacturing: a case study. In *Industry 4.0 and Advanced Manufacturing: Proceedings of I-4AM 2019* (pp. 25-34). Springer Singapore.
- Ashima, R., Haleem, A., Bahl, S., Javaid, M., Mahla, S. K., & Singh, S. (2021). Automation and manufacturing of smart materials in Additive Manufacturing technologies using Internet of Things towards the adoption of Industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5081-5088.
- Azarian, M., Yu, H., & Solvang, W. D. (2021). Integrating additive manufacturing into a virtual Industry 4.0 factory. In *Advanced Manufacturing and Automation X 10* (587-594). Springer Singapore.
- Bordron, M., Mehdi-Souzani, C., & Bruneau, O. (2019). Inline measurement strategy for additive manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(5), 1402-1411
- Charles, A., Bayat, M., Elkaseer, A., & Scholz, S. (2023). Simulation in Additive Manufacturing and Its Implications for Sustainable Manufacturing in the Era of Industry 4.0. In *Sustainable Design and Manufacturing: Proceedings of the 9th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing* (370-377). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Chong, S., Pan, G.T., Chin, J., Show, P., Yang, T., & Huang, C.M. (2018). Integration of 3D printing and industry 4.0 into engineering teaching. *Sustainability*, 10(11), 3960.
- Çalışkan, A. (2020). Akıllı Liman Dönüşümünde Zorlukların Yorumlayıcı Yapısal Modelleme İle Değerlendirilmesi. *Beykoz Akademi Dergisi*, 8(1), 305-320.
- Çankaya, S. Y., & Sezen, B. (2020). Industry 4.0 and Sustainability. In *Handbook of Research on Creating Sustainable Value in the Global Economy* (pp. 67-84). IGI Global.
- Çelebi, A., Koda D. Y. (2021). Endüstri 4.0 çerçevesinde katmanlı imalatta sensör uygulamaları. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(1), 85-97.
- Delic, M., Eyers, D.R. & Mikulic, J. (2019). Additive manufacturing: empirical evidence for supply chain integration and performance from the automotive industry. *Supply Chain Management*, 24(5), 604-621.
- Dilberoglu, U.M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545-554.
- Erik, A. & Kuvvetli, Y. (2021). Üretim İşletmelerinin Endüstri 4.0 Entegrasyonunun Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 637-647.
- Godina, R., Ribeiro, I., Matos, F., T. Ferreira, B., Carvalho, H., & Peças, P. (2020). Impact assessment of additive manufacturing on sustainable business models in industry 4.0 context. *Sustainability*, 12(17), 7066.
- Gökhan, Ö. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606-621.
- Güngör, A. (2020). Türkiye’de Katmanlı İmalat ve Gemi İnşaatı Üzerine Etkileri. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, (218), 36-53.

- Haleem, A. and Javaid, M. (2019). Additive manufacturing applications in industry 4.0: a review. *Journal of Industrial Integration and Management*, 4(4), 1930001,
- Hernandez Korner, M.E., Lamban, M.P., Albajez, J.A., Santolaria, J., Ng Corrales, L.D.C., & Royo, J. (2020). Systematic Literature Review: Integration of Additive Manufacturing and Industry 4.0. *Metals*, 10(8), 1061.
- Horst, D.J., Duvoisin, C.A. and de Almeida Vieira, R. (2018). Additive manufacturing at industry 4.0: a review. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 8(8), 3-8.
- Jayawardane, H., Davies, I. J., Gamage, J. R., John, M., & Biswas, W. K. (2023). Sustainability Perspectives—A Review of Additive and Subtractive Manufacturing. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 100015.
- Kamber, E., & Bolatan, G. İ. S. (2019). Endüstri 4.0 Türkiye Farkındalığı. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 11(30), 836-847.
- Kaygın, E., Zengin, Y., & Topçuoğlu, E. (2019). Endüstri 4.0'a Akademik Bakış. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 33(4), 1065-1081.
- Kulkarni, P., Kumar, A., Chate, G. and Dandannavar, P. (2021). Elements of additive manufacturing technology adoption in small- and medium-sized companies. *Innovation & Management Review*, 18(4), 400-416.
- Kumar, A. (2018). Methods and materials for smart manufacturing: additive manufacturing, internet of things, flexible sensors and soft robotics. *Manufacturing Letters*, 15, 122-125.
- Lemu, H.G. (2018). On opportunities and limitations of additive manufacturing technology for industry 4.0 era. in *International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*, Springer, Singapore, 106-113.
- Malaga, A., & Vinodh, S. (2022). Technology Selection for Additive Manufacturing in Industry 4.0 Scenario Using Hybrid MCDM Approach. In *Industry 4.0 and Advanced Manufacturing: Proceedings of I-4AM (207-217)*. Singapore: Springer Nature Singapore.
- Malviya, R.K., & Kant, R. (2017). Modeling the enablers of green supply chain management: An integrated ISM – fuzzy MICMAC approach. *Benchmarking: An International Journal*, 24(2), 536-568.
- Mitchell, A., Lafont, U., Hołyńska, M., & Semprimoschnig, C. J. A. M. (2018). Additive manufacturing—A review of 4D printing and future applications. *Additive Manufacturing*, 24, 606-626.
- Öberg, C. (2019). Additive manufacturing – digitally changing the global business landscape. *European Journal of Management and Business Economics*, 28(2), 174-188.
- Parvanda, R., & Kala, P. (2022). Trends, opportunities, and challenges in the integration of the additive manufacturing with Industry 4.0. *Progress in Additive Manufacturing*, 1-28.
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2017). A framework of energy consumption modelling for additive manufacturing using internet of things. *Procedia CIRP*, 63, 307-312.
- Sartal, A., Carou, D., Dorado-Vicente, R., & Mandayo, L. (2019). Facing the challenges of the food industry: might additive manufacturing be the answer?. *Proceedings of the*

- Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 233(8), 1902-1906.
- Singh, M., Kumar, P., & Rathi, R. (2019). Modelling the barriers of Lean Six Sigma for Indian micro-small medium enterprises: An ISM and MICMAC approach. *The TQM Journal*, 31(5), 673-695.
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
- Turkcan, H., Imamoglu, S. Z., & Ince, H. (2022). To be more innovative and more competitive in dynamic environments: The role of additive manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 246, 108418.
- Wankhede, V. A., & Vinodh, S. (2021). Application of total interpretive structural modeling for analyzing factors of additive manufacturing and industry 4.0 integration. *Rapid Prototyping Journal*, 27(8), 1591-1608.
- Yıldız Çankaya, S. (2022). Kapalı Döngü Tedarik Zinciri Uygulamalarını Etkileyen Faktörlerin Yorumlayıcı Yapısal Modelleme Ve Mıcmac Yöntemleri İle Analizi. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, (Özel Sayı), 1-25.