

## SANAYİ 4.0 VE SİMÜLASYON

Doç. Dr. Serap ÇELEN<sup>1</sup>

[serap.celen@ege.edu.tr](mailto:serap.celen@ege.edu.tr)

1, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir/TÜRKİYE,

### ÖZET

Simülasyon yöntemlerinin endüstriyel kullanım alanları eğitim, sağlık, servis, imalat, işletme, yönetim ve pazarlama faaliyetlerini kapsayan çok geniş bir şemsiye altındadır. Literatürde, 1970’lerde “Tasarla-İnşa-Test Et” modeline dayalı düzlemsel yaklaşım kullanılmaktayken, 1980’lerde simülasyon bilgisayar-destekli bir yapıya kavuşmuş ve 1990’larda ise yüksek kalitedeki grafik sistemlerinin geliştirilmesiyle “Tasarla-Simüle-Test Et” aşamalarından oluşan uzaysal bir kavram olarak tanımlanmıştır. Bilgisayar destekli endüstriyel simülasyon yıllardır kullanılmakta olup, Monte-Carlo simülasyonu, Petri-Ağları simülasyonu, gerçeklik simülasyonu, trafik simülasyonu ve bu yöntemlerin birleşimi ile kurulan hibrit simülasyon teknikleri söz konusudur. Günümüzde kaliteli ekran ve ses tanıma teknolojisine sahip olan bilgisayar-destekli simülasyonların gelişimi e-öğrenme ortamlarının yaygınlaşmasını ve yüksek öğretim kurumlarında simülasyona dayalı bölümlerde lisansüstü öğretim programlarını her geçen gün arttırmaktadır. Bu yazı kapsamında, simülasyon tekniğinin tarihsel gelişiminden başlanarak endüstriyel olarak güçlü ve sağlıklı bir simülasyonun hangi temel bileşenlere ve özelliklere sahip olması gerektiği konusu sunulacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Simülasyon teknikleri, endüstriyel tasarımda innovasyon, yüksek kaliteli grafik sistemleri

## INDUSTRY 4.0 AND SIMULATION

### ABSTRACT

Industrial usage of simulation methods can be given under a wide umbrella such as education, health, service, manufacturing, business, administration and finance. In the literature, 1970’s planar approach was used which based on “Design-Build-Test” stages, it developed with a computer-aided structure during 1980’s, and it was called as a spatial concept which has the new “Design-Simulation-Test” stages with the development of high-quality graphical systems. Computer-aided industrial simulation has been used for many years, many techniques were developed such as Monte-Carlo simulation, Petri-Nets simulation, virtual simulation, traffic simulation and hybrid simulation which based on the combination of this components. Today the development of computer-aided simulations which have high-quality display and voice recognition technology increases e-learning and graduate education programs in simulation-based departments. In the scope of this book chapter, the historical development of simulation method, requirements (basic components and properties) of an industrially strength and sound simulation will be presented.

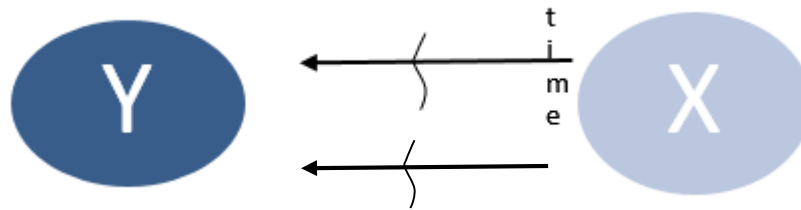
**Key words:** Simulation methods, innovation in industrial design, high quality graphical systems

## 1. SİMÜLASYON TABANLI ENDÜSTRİYEL TASARIMIN TARİHSEL GELİŞİMİ

“**Simülasyon**, gerçek dünyada var olan bir fiziksel sisteme ait verilerin sanal bir ortama taşınmasıyla gerçek sisteme ait özelliklerin izlenmesine altyapı oluşturan bir modelleme tekniğidir”. Proseslerin gelişimini takip edilebilir hale getirebildiği için zaman, maliyet ve risk yönetimi bakımından avantajlar sağlamaktadır. Simülasyonun amacı, olasılıkların sanal dünyada önceden gözlenebilmesi ve gerekli hazırlıkların planlanabilmesidir. Başarılı bir simülasyon fiziksel sistemin tüm verilerinin dijital ortamda modellenebilmesi ile mümkündür. Karşılaşılan yeni durumlara hazırlanan planlar sayesinde gerekli tepkilerin verilebilmesi bakımından günümüzde imalattan işletmeciliğe, sağlıktan eğitime kadar her alanda kullanılabilen bir yöntem durumuna gelmiştir [1, 2].

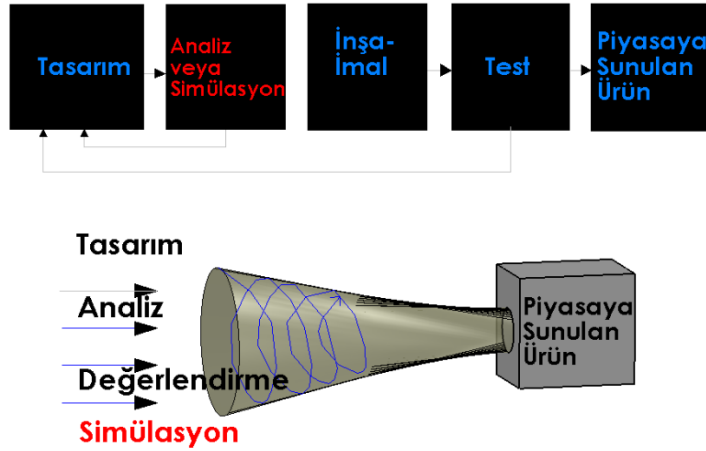
Simülasyona dayalı tasarım teknolojilerin gelişimi bilgisayar sistemleri ve araçlarının artmasıyla hızlanmıştır. Modelleme yöntemleri, hesaplama araçları, sanal gerçeklik ortamları, işbirliğine dayalı mühendislik ortamı altyapısı ve benzeri araçlar her geçen gün artmaktadır [3]. 70’li yıllar öncesinde endüstriyel tasarımın bir çok alanda testlere dayalı bir boyutta olduğu görüşü benimsenmiş model üretimi gerçekleştirip denenmeden sonuçlarının gözlenmesi mümkün olmayacağı inancı yaygındı. 1980’lerde bilgisayar sistemleri yardımı ile bir değişim oluşmuş, günümüzde bilgisayar destekli simülasyon ortamları ile endüstriyel tasarım optimizasyon, analiz, tersine mühendislik gelişmiş hızlı prototipleme öncesinde ve hatta firma endüstriyel dinamiklerinin belirlenmesinde ekonomik açıdan büyük fayda sağlar duruma gelmiştir [3, 4].

Sürekli durum simülasyonları ve özgün durum simülasyonlarının gelişimi birbirlerinden farklılıklar göstermiştir. Sürekli durum simülasyonları bir kimyasal reaksiyon süreci gibi net bir matematiksel yapıda ifade edilirken, özgün durum simülasyonları basit matematiksel gösterimlere sahip olmayabilirler [5-7]. Simülasyon araçlarını geliştirme çalışmaları özellikle 1987’den sonra artış göstermiştir. Günümüzde Monte-Carlo simülasyonu, Petri-Ağları simülasyonu, gerçeklik simülasyonu, trafik simülasyonu ve bu yöntemlerin birleşimi ile kurulan hibrit simülasyon teknikleri yoğun madde fiziğinden imalata, lojistikten yönetime kadar pek çok alanda kullanılmaktadır [8]. Nicholas Metropolis tarafından adlandırılan Monte-Carlo simülasyonu, Stanislav Ulam ve John Von Neumann tarafından nötron zincir reaksiyonlarının hesaplanmasında kullanılmıştır [9]. Yapılan tüm çalışmalarda temel amaç başarılı bir endüstriyel simülasyonun hangi özelliklere sahip olması gerektiğini bulmaktır [1-10]. 1992 yılında Cornell Üniversitesi profesörlerinden Lee W. Schruben simülasyon, grafik modelleme ve analiz kelimelerinin ilk harflerinden oluşan SIGMA programını simülasyon eğitimi kalitesini arttırmak üzere geliştirdi. İmalat, lojistik desteği, dağıtım, sağlık, iletişim ve hesaplama ağları gibi karara dayalı pek çok alanda özgün durum simülasyonları için grafikler içerisinde olaylar bağlantı düğümleri ile, olaylar arasındaki ilişkiler ise oklarla gösterilmiştir (Şekil 1) [5]. Mackulak ve diğerleri IntelliSIM olarak adlandırdıkları akıllı simülasyon sistemi araştırmalarını rapor etmişlerdir [11].



Şekil 1. Zaman Gecikmeli bir Şart Durum Grafiği Örneği [5]

Simülasyonlar ile oluşturulan sanal gerçeklik alt yapısı rekabetin çok yüksek olduğu günümüz koşullarında zamansal kazanımlar sağlamaktadır. Bir çok alanda yeni tasarlanan ürün özellikleri bilgisayar ortamında test edilip, en uygun özellikler elde edildikten sonra üretim gerçekleştirilebilmektedir. 1998 yılında, tasarım yaklaşımındaki genel değişim geri beslemeli iki boyutlu düzlemsel modellerle olmaktan çok dinamik bir spiral dizayna sahip tasarım, simülasyon ve değerlendirme süreçlerinin beraber işlediği sürekli bir geri dönüşümü olan uzaysal bir konsept olarak tanımlanmıştır [3]. (Şekil 2) Bu tanıma göre simülasyona dayalı tasarımda simülasyon ürünün konsept geliştirmeden detaylı tasarımına, prototip imalatından imalat proseslerine ve bakıma kadar tüm yaşam döngüsü boyunca kullanılmalıdır. Bu konsept endüstriyel dinamiklerin simülasyonunda da önemlidir [4].

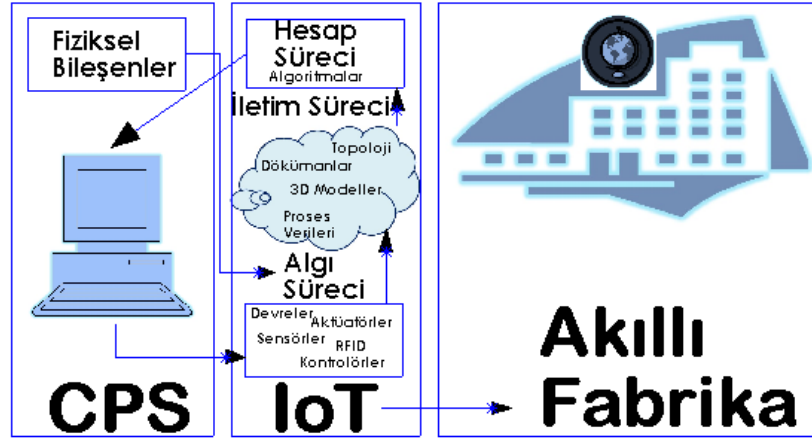


Şekil 2. Endüstriyel Tasarım Yaklaşımları [3]

## 2. SANAYİ 4.0'DA GELECEĞİN AKILLI FABRİKALARI VE GÖRÜNMEZ TUĞLALAR

Sanayi 4.0'da simülasyonun yeri ve kullanımı konusuna başlamadan önce tarihçesi ve özelliklerinden bahsetmek faydalı olacaktır. Endüstriyel devrimin tarihsel gelişimini birbirini takip eden dört aşamalı bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Bu süreç James Watt ile başlamış, Adam Smith ve Charles Babbage'ın araştırmaları ile devam etmiş ve 1911 yılında Frederick Winslow Taylor tarafından bir sistematığe kavuşturulmuştur. Zaman içerisinde kaynakların ekonomik kullanımı iş verimliliği açısından önem kazanmış, yeni fikir ve stratejilerin ortaya çıkmasına neden olmuştur [12-15]. Sürecin ikinci aşaması yirminci yüzyıl başlarında, elektriğin üretim hatlarında etkin kullanımı ile seri üretimin yaygınlaşması ve üçüncü aşaması ise 1970'lerde elektronik ve bilgisayar sistemleri ile üretimin otomasyonu olarak gözlenmiştir. Tüm bu aşamalar 2011 yılında imalat endüstrisinin rekabet gücünü arttırmak amacıyla Almanca'da "Industrie 4.0" olarak adlandırılan, imalat, servis, lojistik ve kaynak planlama konularında gerçek ve sanal dünyanın entegrasyonu ile sistemik bir otomasyon fikrine olanak sağlamıştır. Sanayi 4.0 ürün yaşam döngüsü yönetimi, tedarik zinciri gibi endüstriyel proseslerde olduğu kadar imalat, mühendislik ve malzeme kullanımında temel iyileştirmeler olarak yorumlanmaktadır [16, 19]. Aslında diğer ülkelerde bu amaçla kullanılan farklı terimler söz konusudur; örneğin İsviçre "Sanayi 2025 (Industrie 2025)", Amerika "Endüstriyel İnternet (Industrial Internet Consortia)"i, İsviçre "İmalat 2030" u (Produktion 2030)", Fransa "Alliance Usine du Futur", Avusturya "Sanayi 4.0"ı (Industrie 4.0 Avusturya) kullanmaktadır [17].

Aslında Sanayi 4.0'ın "Almanya Yüksek Teknoloji Stratejisi 2020"nin bir parçası olduğuna inanması bu alandaki araştırmalara büyük bir fon tahsis etmesi ile görülmüştür [16, 18]. İlgili çalışma grubu 2013 yılında Sanayi 4.0 için üç anahtar bileşen sunmuştur; Nesnelerin İnterneti (IoT), Siber-Fiziksel Sistemler (CPS) ve Akıllı Fabrikalar (SF). Bu bileşenler ve birbirlerine olan etkileri ise takip eden şekilde özetlemektedirler (Şekil 3) [16, 19].



Şekil 3. Sanayi 4.0 için Sistem Bileşenleri [16, 18, 19]

**Nesnelerin İnterneti** radyo frekans algılayıcıları (RFID), sensörler, aktüatörler, cep telefonları ve benzeri "akıllı" bileşenlerin endüstriyel amaçlara ulaşılması için kullanımı olarak ifade edilmektedir. **Siber-Fiziksel Sistemler** (CPS) bilgisayarlar ve ortak ağlar ile fiziksel proseslerin görüntülenme ve kontrolünün hesaplamalar sonrası geri besleme yapabilen döngülerle sağlanmasını böylece gerçek ve sanal dünyanın birleştirilmesini sağlamaktadır. Bu sistemlerin gelişiminin üç evrede gerçekleştiği bildirilmektedir. Literatürde ilk CPS'lerin radyo frekans algılayıcıları (RFID) gibi tanımlama teknolojileri olduğu, bu dönemde depolama ve matematiksel analizin bir merkezi servis olarak sunulduğu, daha gelişmiş CPS'lerin sınırlı bir fonksiyon aralığında aktüatörlerle ve sensörler donatıldığı ve günümüzdeki CPS'lerin ağlarla birbirine bağlı çoklu sensör ve aktüatörlerle bilgiyi depolayıp analiz edebilme kabiliyetine sahip olduğu bildirilmiştir [16-21].

Literatür nesnelerin internetini algı, iletim, hesap ve uygulama katmanları ile sınıflandırmıştır. Algı katmanında aktüatörler ve sensörler aracılığıyla fiziksel nesnenin doğru şekilde tanımlanması sağlanmaktadır. İletim katmanında ise sensörlerden toplanan verilerin üst katmanlara kablolu veya kablosuz sistemlerle protokoller üzerinden aktarımı sağlanmaktadır [22]. Bu aşamada dünyada internet protokollerinin kritik bir rol oynadığı söylenebilir. IPv4 protokolü adres alanının 2011 yılında tükenmesi ile,  $2^{128}$  bit'lik alana sahip olan IPv6 kullanıma geçirilmiştir. IPv6'nın nesnelerin interneti için önemli rol oynayacağı belirtildi en büyük gücünün  $2^{32}$  bit'lik IPv4 ile birlikte çalışabilirliği konusunda olduğu vurgulanmaktadır. Diğer bir konu ise nesnelerin internetinde kullanılan radyo frekans tanımlayıcıları gibi bazı cihazların numaraları gibi kendi özel adres şemalarına sahip olmaları dolayısıyla IP ve IPv6'yı destekleyememesidir. Endüstrilerin global IPv6'ya uyum sağlayabilmesi için kapalı nesnelerin internet sistemlerini güncellemeleri gerektiği belirtilmektedir [23]. Ülkemizde Orta Doğu Teknik Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı tarafından IPv6'nın kullanımı bildirilmektedir [24]. Hesaplama katmanında sensörler aracılığıyla toplanan verilerden karar verme işleminin gerçekleştirilip, bu kararların uygulama katmanına ulaştırılması söz konusudur. Bu katmanın donanım,

yazılım, algoritmalar, bulut hesaplama, büyük veri analizi ve güvenlik konularını kapsadığı bildirilmektedir. Uygulama katmanı toplanan verileri kullanıcı ve yönetime ulaştırmaktadır [22].

Nesnelerin interneti ve Siber-Fiziksel sistem fikirlerinin entegrasyonu ile Sanayi 4.0'ın anahtar bileşeni “**Akıllı Fabrikalar**” ortaya konmuştur. Akıllı fabrika, insanlara ve makinalara görevlerini gerçekleştirmelerinde fiziksel ve sanal dünyadan gelen bilgilerle yardımcı olmaktadır. Fiziksel dünyadan gelen bilgi bir takımın pozisyonu ve durumu olabilirken, sanal dünyadan gelen bilgi elektronik döküman, çizim ve simülasyon modelleri vb..dir. Hermann ve diğerlerine göre Akıllı Fabrikalar, **Herşeyin İnterneti (IoE)** temelinde insanları ve nesneleri birbirine bağlamak, veriler ve endüstriyel prosesleri düzenleyip yönetmek için kurulmalıdırlar [16-35].

Özetle Sanayi 4.0, makinaların iş parçalarının ve sistemlerin, proseslerin akıllı ağlar vasıtasıyla zincirleme olarak birbirine bağlanması ve eş zamanlı olarak birbirini kontrol etmesi olarak yorumlanabilir. Seri üretimde büyük bir düşüş olmadan makinaların hasarlarını tespit edip, kendiliğinden organize edilen lojistik sistemlerle kendi bakımlarını başlatabilmeleri gibi faydalı etkiler oluşturması bakımından endüstriyel açıdan büyük önem taşımaktadır [16-35].

Şekil 4’de Lee’nin geleneksel fabrika ve akıllı bir fabrikanın öznitelikleri açısından bir karşılaştırması verilmiştir. Günümüzde fabrika yönetiminde hataların tespiti açısından çeşitli araçlar söz konusudur. Buna karşın, Sanayi 4.0 fabrikasında durum belirleme ve hata teşhisine ilaveten kendiliğinden farkındalık ve kendiliğinden tahmin için bileşenler ve sistemlerde kazandırılmıştır. Gerekli olan bakımın mümkün olan en kısa zamanda yapılması ve boşta kalma zamanının olması amaçlanmıştır [20].



Şekil 4. Lee'nin Fabrika Karşılaştırması [20]

Siber-fiziksel sistemler, modern bilgi ve bilişim sistemleri yardımıyla üretim, kalite ve imalat endüstrisindeki esnekliğin artışı ve böylece rekabet için avantajların altyapısını sağlarlar [16-35]. Sanayi 4.0'da Siber-Fiziksel Sistemler aşağıdaki bölümlerden oluşmuştur. Başarılı bir fabrika yönetimi sağlamak ve anlamlı bilgiye ulaşmak için ham bilginin gelişmiş araçlarla işlenmesi (analitik ve algoritmalar) ve bu bağlamda tasarım prensiplerinin iyi anlaşılması gerekmektedir [20].

1. Bağlantı (Sensörler ve Ağlar)
2. Dönüştürme (Makinalar ve Bileşenler)
3. Siber (Uyumlu Analizler)
4. Algı (Karar Destek Sistemleri)
5. Yapılandırma (Kontrol Sistemi)

## 2.1. Sanayi 4.0’da Tasarım Prensipleri:

Literatürde Sanayi 4.0’ın dört adet tasarım prensibini içerdiğinden bahsedilmektedir [16-35].

**İçsel İletişim:** İnsan, makina, cihaz ve sensörlerin birbirleriyle nesnelerin ve insanların interneti (IoT-IoP) aracılığıyla bağlantı ve iletişim kurmasını kapsamaktadır. Bu konuda kablosuz iletişim teknolojilerinin ve iletişim standartlarının anahtar rol oynadığı belirtilmektedir. Herşeyin interneti kosepti ile içsel iletişimi olan nesnelere ve insanların bilgiyi paylaşabilmelerini ve bunun genel hedeflere ulaşmada işbirliğine dayalı bir temel oluşturması anlamına gelmektedir. Herşeyin interneti kapsamında siber güvenlik konusu gündeme gelmiştir [16-35].

Nesnelerin İnterneti bölümünde bahsedilen dört katmanlı IoT kapsamında dünyada ve ülkemizde sensörlerin kullanım alanları Tablo 1’de özetlenmiştir [22]. Tablo 1’den görülebileceği üzere IPv6 bazı uyumluluk problemleri aşılacağına nesnelerin interneti için önemli bir iletim alt yapısı oluşturabilir [35].

**Tablo 1.** Sanayi 4.0 kapsamında Nesnelerin İnterneti-Sensörlerin Kullanım Alanları [22]

ALGI KATMANI	İLETİM KATMANI	HESAP KATMANI
<b>Devreler</b>	<b>Çoklama Yöntemleri</b>	<b>Güç Yönetimi</b>
<b>Sensörler</b>	<b>Topoloji Yönetimi</b>	<b>Kaynak Yönetimi</b>
-Sıcaklık	<b>Anabant İşlemleri</b>	<b>IoT Kaynak Sistemi</b>
-Açık/Kapalı Sistem	<b>Radyo Frekans Protokolleri</b>	<b>Siber-Fiziksel Sistem</b>
-İvme Ölçümü	<b>İnternet Protokolleri (IP)</b>	<b>Gömülü Sistem</b>
-Basınç Ölçümü	<b>Ağ Protokolleri</b>	<b>Oto. IoT-Tem. Erişim Kont. Sist.</b>
-Kuru Temas	<b>Kablosuz Sensörler</b>	<b>Yazılımlar</b>
-Su Saptama ve Seviye Ölçümü	<b>Bağlantı Protokolleri</b>	<b>Algoritmalar</b>
-Hava Akış Ölçümü	-RJ45	-Görüntü İşleme
-Nem Ölçümü	-PLC	-Karakter Tanıma
-Gerilim Ölçümü	-RS-232	-Sinyal Akış Algoritmaları
-Akım Ölçümü	-RS-485	-Yer Belirleme Algoritmaları
-Giriş Darbe Sayıcı	-USB	<b>Bulut Platformu</b>
-Işık Ölçümü	-Kablosuz	<b>Şifreleme</b>
-Pusula	<b>Link Katman Protokolleri</b>	-Hata Düzeltme
-Titreşim Ölçümü	-GSM	-Bilgi Güvenliği

-Hareket Saptama	-Ethernet	-Veri Şifreleme
-Zaman Ölçümü	-Wifi	-IoT Denetleme
<b>Aktüatörler</b>	<b>İletim Protokolleri</b>	<b>Hafıza Yönetimi</b>
<b>Kontrolörler</b>	-IPv4	-Bilgiye Erişim
<b>RFID Cihazları</b>	-IPv6	<b>Hesap Bileşenleri</b>
<b>Devre Bordları</b>	<b>Komünikasyon Protokolleri</b>	-
<b>Kameralar</b>	<b>Veri İşleme Protokolleri</b>	-
-	<b>Veri Depolama Protokolleri</b>	-
-	<b>İşletme Model Protokolleri</b>	-
-	<b>İşletme Uygulama Protokolleri</b>	-
-	-Cihaz Yönetimi	-
-	-İşletme Prosesleri	-
-	-Mantıksal ve matematiksel Analiz	-

**Bilginin Saydamlığı:** Temelde bilişim sistemlerinden faydalanarak fiziksel dünyanın sanal bir kopyasının yaratılmasında bilginin saydamlığı önemlidir. Akıllı fabrikalarda sensörlerden alınan ham sensör datasının yüksek değerli bilgiye dönüştürülmesi ile sağlanması gerektiği vurgulanmıştır. Daha önce yapılan araştırmalarda, saydamlığın oluşturabilmesi için veri analiz sonuçlarının Herşeyin interneti kullanıcılarının erişilebilecek şekilde yardımcı sistemler içerisine yüklenmesi gerektiği belirtilmiştir [16-35].

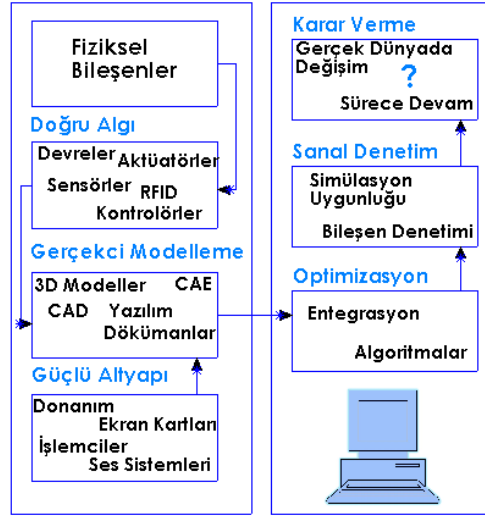
**Teknik Yardım:** Sanayi 4.0’da problem çözmek ve stratejik kararlar almak büyük önem taşımaktadır. Siber-fiziksel sistemlerin karmaşık yapısı, ağlar, özerk karar alma mekanizmaları nedeniyle insanların yardımcı sistemlerle desteklenmesi gerektiği rapor edilmiştir. Daha önceki çalışmalarda bilginin anlaşılabilirliğinin artırılması için görselleştirilmesi, bilgiye dayalı kararların kısa zamanda alınması simülasyonlar, akıllı telefonlar, tabletler ve nesnelerin interneti vasıtasıyla mümkün olabileceği belirtilmiştir [16-35]. Bu noktada bağlantı protokolleri, link katman ve iletim protokolleri ve internetin yaygınlaşması büyük bir rol oynayacaktır [22, 35].

**Merkezi olmayan (Özerk) Kararlar:** Literatürde bu tasarım bileşeninin kendi kararlarını kendileri verebilen ve eş zamanlı olarak görevlerini gerçekleştirebilen bilgisayar ve sensörlerle Siber-fiziksel Sistemlerin oluşturulması ve fiziksel dünyanın kontrolünün içsel iletişim ile sağlanabileceği vurgulanmaktadır [16-35]. Hartford CNC firmasının HartNet programı sayesinde, imalat prosesinin tamamlandığı bilgisi cep telefonuna mesaj bildirimi olarak gelebilmektedir [36]. Benzer şekilde Mazak firması Siber Üretim Merkezi aracılığıyla fabrikada tezgahla ilgili tüm verilere ulaşabilme ve eş zamanlı kontrol imkanı sunmaktadır. Programın siber monitor kısmında tezgah yönetimini istenilen yerden kontrol imkanı sunmaktadır [37].

Tasarım bileşenlerinin, yüksek seviyede esnek seri üretim, gerekli otomasyon metodlarının iyileştirilmesi, kendi kendine optimizasyon, konfigürasyon, teşhis, çalışanların karmaşık iş koşullarına uygun bilişsel ve akıllı destek sistemlerinin geliştirilmesi öngörülmektedir [16-35].

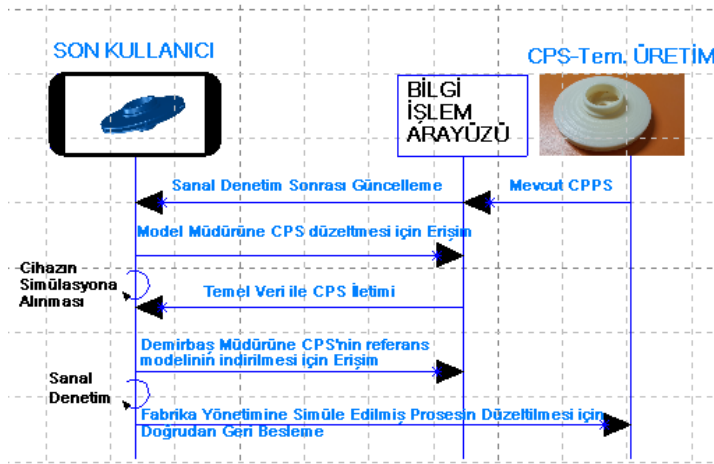
### 3. SANAYİ 4.0'DA SİMÜLASYON VE ÖRNEK UYGULAMALAR

Weyer ve diğerleri 2016 yılında yaptıkları çalışmada yeni nesil akıllı fabrikaların oluşturulabilmesi için fiziksel dünya ile dijital bileşenlerin önemini vurgulamaktadır. Simülasyon araçlarının mühendislik ve karar verme sistemlerine destek olabilmesi için dış ve iç değişimlerin değerlendirilmesi imalat yönetimi üzerindeki kritik etkilere zamanında reaksiyon verebilmesi amaçlanmaktadır. (Şekil 5) Geleceğin fabrikasında alan cihazlarının, takım makinalarının, üretim modülleri ve ürünlerin Siber-Fiziksel Sisteme dönüştürülmesi için daha akıllı bir yapıya kavuşturulmaları ve daha geniş bir ağa sahip olmaları amaçlanmıştır [20, 38].



Şekil 5. Simülasyon Araçları ve Karar Verme Süreci [3, 16-21, 38]

Geleneksel simülasyon teknolojileri çoğunlukla tasarım ve mühendislik safhalarında kullanılırken, geleceğin fabrikalarında çok disiplinli simülasyonun her alanda özellikle üretimin arttığı aşamalarda bile kısa zamanda doğru karar verebilme için kullanılması beklenmektedir. Bu durum “eş zamanlı simülasyon” olarak adlandırılmaktadır. Eş zamanlı simülasyonun başarılı olarak uygulanabilmesi için doğru dijital temsilin fiziksel kopyasına uygun şekilde esnek değişim göstermesi beklenmektedir. İlgili simülasyon modellerinde dinamik zenginlik, iç tedarik hazırlığı, fiziksel ve dijital fabrika arasındaki veri alış-verişi ve gerçek dünyadaki tüm değişimler sanal ortamda görüntülenebilmelidir. Şekil 6’da CPS temelli üretimde karar destek sistemi olarak simülasyon kullanımında işlem basamakları görülmektedir [38].

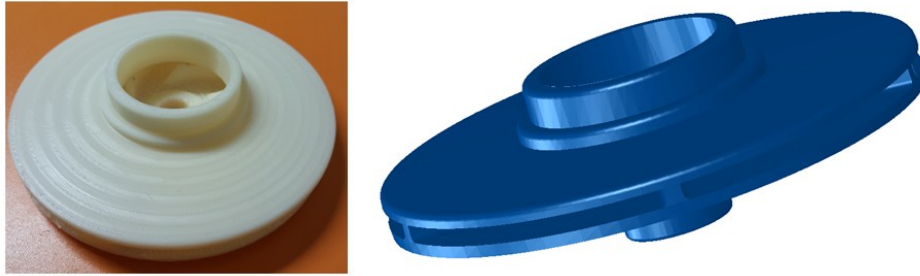


Şekil 6. Gerçek Değişim Kararı Öncesi Simülasyon Düzen Diyagramı [38]



Gelişen internet teknolojileri bölgesel kontrol zekası ile otonom olarak çalışabilen cihazlar, makineler, imalat modülleri ve ürünleri arasındaki iletişimi güçlendirmektedir [38, 39]. Böylece geleneksel olarak kullanılan rijit imalat hiyerarşisi merkezi olmayan kararlar alabilen ve kendiliğinden işleyen bir organizasyona dönüşmektedir [38, 40]. Tak ve çalıştır prensibinin endüstriyel teknolojilere adaptasyonu ile imalat bileşenlerinin operasyonlara eklenip-çıkarılması sağlanabilecektir. Bu aşamada simülasyonlarla sanal olarak önceden görülen süreçler oluşturup, akıllı fabrika yönetiminin özerk yönetim altyapısı kurarak üretimi daha hızlı planlanmasını ve denetlemesini sağlayacaktır [38, 42].

Volkswagen otomotiv firmasının bu sistemi uyguladığı bildirilmiştir [38]. Özellikle müşteri taleplerine göre üretimin gerçekleştirildiği otomotiv endüstrisinde üretim hatları simülasyon yardımıyla sürekli güncellenmelidir. Daha öncede bahsedilen esnek eş zamanlı simülasyon konseptine dayalı olarak gerçek üretim hattındaki ürün, bağlama ekipmanları, kaynak makineleri, robot kolları gibi tüm bileşenlerin dijital bir temsili gerekmektedir [38]. Şekil 7’de gerçek dünyada imal edilen bir ürün ve dijital temsili verilmiştir. Hermann’a göre gerçek ve sanal dünya arasındaki boşluk daraltılıp, dijital üretim karar almada kilit bir rol üstlenmelidir [38, 43]. Otomotiv endüstrisi örneğine bakıldığında, simülasyon yerleşim planlama, elektrik planlama, robotlar gibi üretimin erken safhalarından proses ve enerji simülasyonuna kadar pek çok alanı kapsamaktadır. Sanal ortamda mekanik, pnömatik, elektriksel tasarım, PLC ve robot planlama konularını içeren mekatronik davranışı simüle etmeyi ve zamana bağlı dinamik etkileri içermelidir [38, 44]. Bu bakımdan “**Dijital İkiz**” konsepti modelleme, simülasyon ve optimizasyon açısından önemli bir kavramdır [38-45]. (Şekil 8)



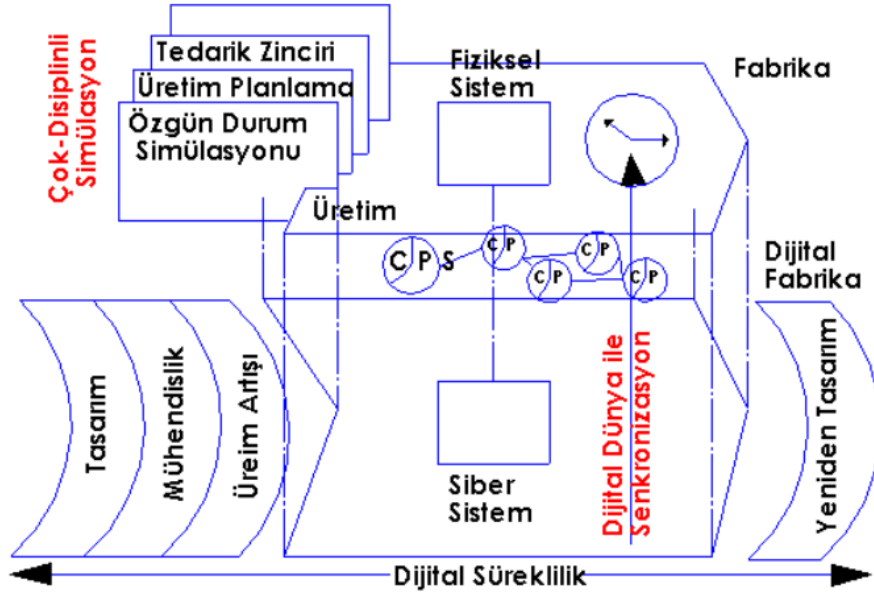
Şekil 7. İmal Edilen Ürün ve Dijital Temsili



Şekil 8. Simülasyonun Gelişimi ve Weyer ve Rosen’e göre Dijital İkiz Konseptinin Önemi [38-45]

Gerçek dünya içerisindeki performans tahminine olanak sağlayacak şekilde tüm fiziksel elementlerin sanal kopyaları gerçek sistemin herhangi bir zamanındaki dinamik durumu yansıtabilmelidir [38-46]. Yeni nesil

simülasyon ortamlarının oluşturulması için üretim bölümü teknolojileri ve cihazların integrasyonu fiziksel ve dijital sistemin oluşturduğu “Dual Vizyon” a olanak sağlayacaktır [38-46]. Şekil 9’da çok disiplinli simülasyon çerçevesinde gerçek ve dijital dünyanın dikişsiz bir senkronizasyonu gösterilmiştir [38].

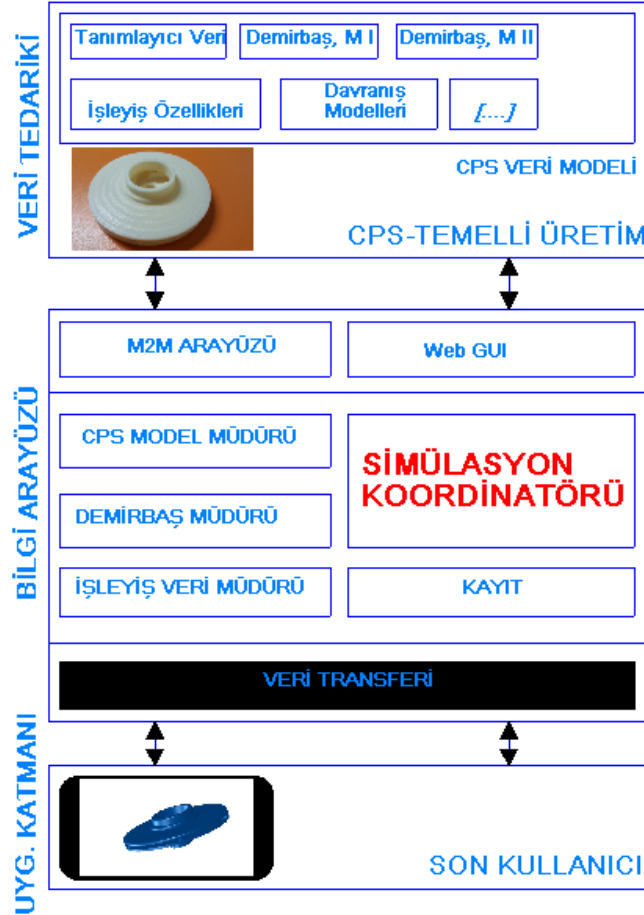


Şekil 9. Siber-Fiziksel Sisteme Dayalı Fabrikalarda Simülasyonun Rolü [38]

Simülasyon modellerinin birbirleri ile içsel olarak bağlı ve senkronize olması, ilgili verinin gerçek zamanlı alışverişini sağlayarak simülasyon araçları arasında gerçek bir sinerji yaratması, daha karmaşık senaryolarda yeni fırsatlara açık olması gerektiği bildirilmiştir. Doğrudan kullanıcı arayüzü (bilgisayar, tablet sistemleri aracılığı ile) son kullanıcının simülasyon araçlarına erişimini sağlamaktadır [38]. (Şekil 10) İkinci aşama fonksiyonel proses mantığının simülasyon gelişim verilerini kapsamakta ve üçüncü safha ise Siber-Fiziksel Sistem sayesinde veri tedarikini temsil etmektedir. Bu aşamada gerçek tanımlayıcı verilerin mevcut standartlarla Siber-Fiziksel sisteme entegrasyonu gerekmektedir. Demirbaş statik veri, alt modelleri, iç standartları kapsamalıdır. Sonuçta Siber-Fiziksel sistemin dinamik verileri ilgili davranış modelleri, uygun mantık sinyalleri, işlem fonksiyonları ile cihazın mevcut durumunu göstermelidir [38].

Weyer’e göre bir bilgi arayüzü gibi oluşturulan mantıksal mimari katman Siber-Fiziksel Sistemin bileşenlerinin kayıt ve iletişimini, demirbaşların ve modellerin yönetimini ve paylaşımını ilgili işleyiş zaman verilerinin ve çevrelerinin etkileşim ve simülasyon ile koordinasyonunu sağlamaktadır [38]. Kayıt bileşeni gerçek ve sanal dünya arasında senkronizasyon için bir temel oluşturmaktadır. Fabrikanın fiziksel bileşenini takip eder, Siber-Fiziksel Sistem cihazlarının entegrasyonundan haberdar olur, böylece simülasyon araçları gerçek çevredeki her bir değişim için bilgilendirir. Siber-Fiziksel sistem müdürü mevcut ve teorik olarak gerçekleştirilebilecek kütüphaneyi yöneterek yeni fabrika ve simülasyon modelleri kurar ve mevcut olanları modifiye eder. Demirbaş müdürü demirbaşların depolanması ve güncellenmesi için gereken tedbirleri alır. İşleyiş zamanı ve veri yönetim müdürü fiziksel cihazlardan gelen verileri biriktirir ve üretim bölümünün ilgili servislerini sağlar, simülasyon koordinatörü için simülasyon zamanı ve veri alışverişini diğer takımların işleyiş zamanlarına göre düzenleyerek çok disiplinli simülasyonların desteklenmesini sağlar. Mantıksal mimarinin

son safhası ise kullanıcının bir web arayüzünü kullanmasını sağlar. Bu arayüz yönetimsel ve görüntüleme aktivitelerini sağlamaktadır [38].



Şekil 10. Weyer'e göre Çok Disiplinli Simülasyon Mimarisi [38]

Lee ve diğerleri 2013 yılında büyük veri ortamında imalat sistemlerindeki verim ve üretkenliği arttırıcı gelişme ve eğilimlerden bahsetmişlerdir [47]. Dolayısıyla siber-fiziksel sistemler büyük veriyi yönetmek için makinalar arası iletişimi arttırmalı akıllı, esnek ve kendi kendini ayarlayabilen makinalar oluşturulmalıdır [20, 47]. Siber-fiziksel sistemlerin iki temel fonksiyonel bileşeni olmalıdır. Bunlardan birincisi fiziksel dünyadan siber uzaya gerçek zamanlı veri edinilmesini sağlamak için gelişmiş bağlantı, ikincisi ise siber uzayın oluşturulması için akıllı veri yönetimi, matematiksel analiz ve hesaplama kabiliyetidir. Siber-fiziksel sistemin uygulanması için gerekli mimari yapı Şekil 11'de verilmiştir. Simülasyon bu mimarinin bilişsel seviyesinde sınıflandırılmaktadır, elde edilen bilginin tam olarak aktarılmasında grafik sistem ihtiyacını anlatmakta, bir karar destek sistemi işlevi oluşturması sağlanmaya çalışılmaktadır [20].



Şekil 11. Siber-Fiziksel Sistemin Uygulanması için Mimari Yapıda Simülasyonun Rolü [20]

Lee ve diğerleri daha akıllı makinalar ve imalat sistemleri geliştirmeye, hasar önleme yönelik olarak kendiliğinden-bakım ve yaşam döngüsü mühendislik bağımsızlık sistemlerinin geliştirilmesi için biyolojik sistemlerden esinlenerek yeni teşhis ve bakım sistemleri geliştirmişlerdir. Araştırmalarında hassas kontrolörler, sensörler, ölçüm cihazları, hesaplama cihazları, Bayes ağları gibi akıllı algoritmalar, bulanık mantık, gizli Markov modeli ve eşleme matrisi gibi enstrümanlar kullanarak akıllı bakım sistemleri için “hasarı tamir et” yerine “tahmin et ve önle” yaklaşımı kullanımının önemini vurgulamışlardır. Makinalara yönelik teşhis ve sağlık yönetim sistemi hata bileşenlerini ve hasar tiplerini erken belirleyerek bakım takviminin kendiliğinden başlatılmasını ve özellikle rulmanlar ve dişliler gibi makina elemanlarının gereksiz bakım maliyetlerinin önlenmesini hedeflemektedirler [48].

Simülasyon araçları imalattan sağlığa, işletmecilikten pazarlamaya kadar çok geniş bir endüstriyel kullanıma sahiptir. Hatta Kamihigashi ve Stachurski endüstri dinamiklerini modellemek için bir simülasyon algoritması rapor etmişlerdir, endüstrinin gelişimi bile simülasyon ortamında kararlaştırılabilmektedir [49].

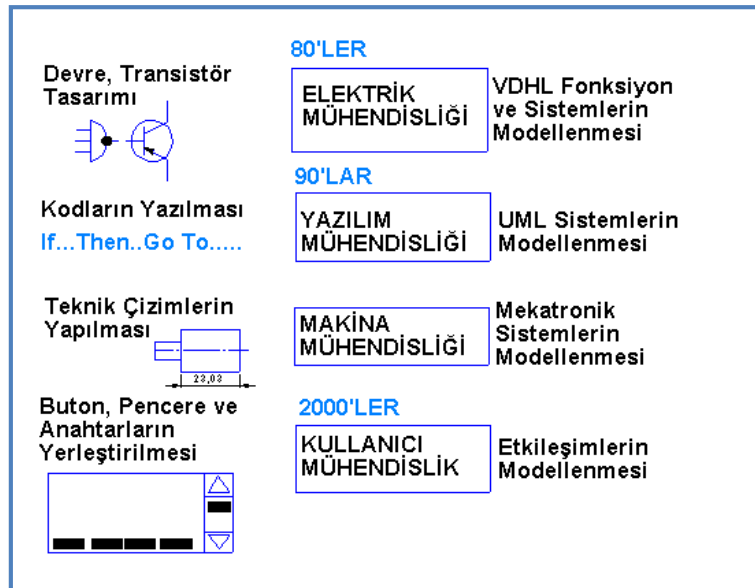
Günümüzde tasarım konusunda hızlı modelleme araçları ve fiziksel-temelli simülasyon araçları geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu alanda bir çok ticari CAD/CAM/CAE sistemleri ve diğer yardımcı bilgisayar programları ve analiz programlarının entegrasyonu ile sanal bir ürün geliştirme ortamı oluşturulduğu görülmektedir. Sanal gerçeklik ortamlarının alt yapısını oluşturduğu teknoloji sayesinde endüstriyel ürün tasarımında değişim etkileri anında gözlenebilmekte ve bu sayede hatalar minimum düzeye indirilebilmektedir. Bu amaçla yüksek-kaliteli grafik sistemleri geliştirilmiştir [3, 50]. Bilgisayar destekli imalat sistemleri ile takım yolları önceden simüle edilebilmekte ve uygunsuz takım ve takım tutucu bileşenlerinin çarpması gibi riskler önlenebilmektedir. Denkena ve Winter rüzgar türbini endüstrisine yönelik olarak rotor kanadı üretim planlama aşamasında zaman ve maliyeti azaltmak için simülasyona dayalı yol haritalama yöntemini rapor etmişlerdir [51].

Leuwer ve diğerleri 2001 yılında ilk defa Voxel-Man simülatorü olarak adlandırdıkları cihazı orta kulak sanal cerrahisinde kullanmışlardır [52, 53] Pohlenz ve diğerleri ilgili simülatorün kullanımı ile alt yapısı oluşturulan sanal cerrahi yönteminin diş hekimliği alanında yeni bir eğitim aracı olabileceğini bildirmişlerdir. Sanal kafatası modelinin bilgisayarlı tomografi verileri ile gerçekleştirildiği uzaysal 3 boyutlu algı ortamının oluşturulduğu kemik delme simülatoründe haptik basınç simülasyonu ile dental cerrahi prosedürlerinin sanal bir eğitimi verilmiştir [53]. Geçtiğimiz yıl düzenlenen 3 Boyutlu Baskı Teknolojileri Sempozyumunda kemik onarımında 3 boyutlu mandibula modeli benzer alanda sunulmuştur [54]. Literatürde öğrencilerin bilgi, tecrübesinin hastalar açısından herhangi bir risk oluşturulmadan artırıldığı simülatorler sağlık alanında gelecek vaadeden araçlar olarak görülmektedir [52-56]. Kunst ve diğerleri ise simülasyona dayalı öğrenme ortamlarının oluşturulmasının hemşirelik eğitimindeki öneminden bahsetmişlerdir [57].

#### 4. SANAYİ 4.0 VE EĞİTİM

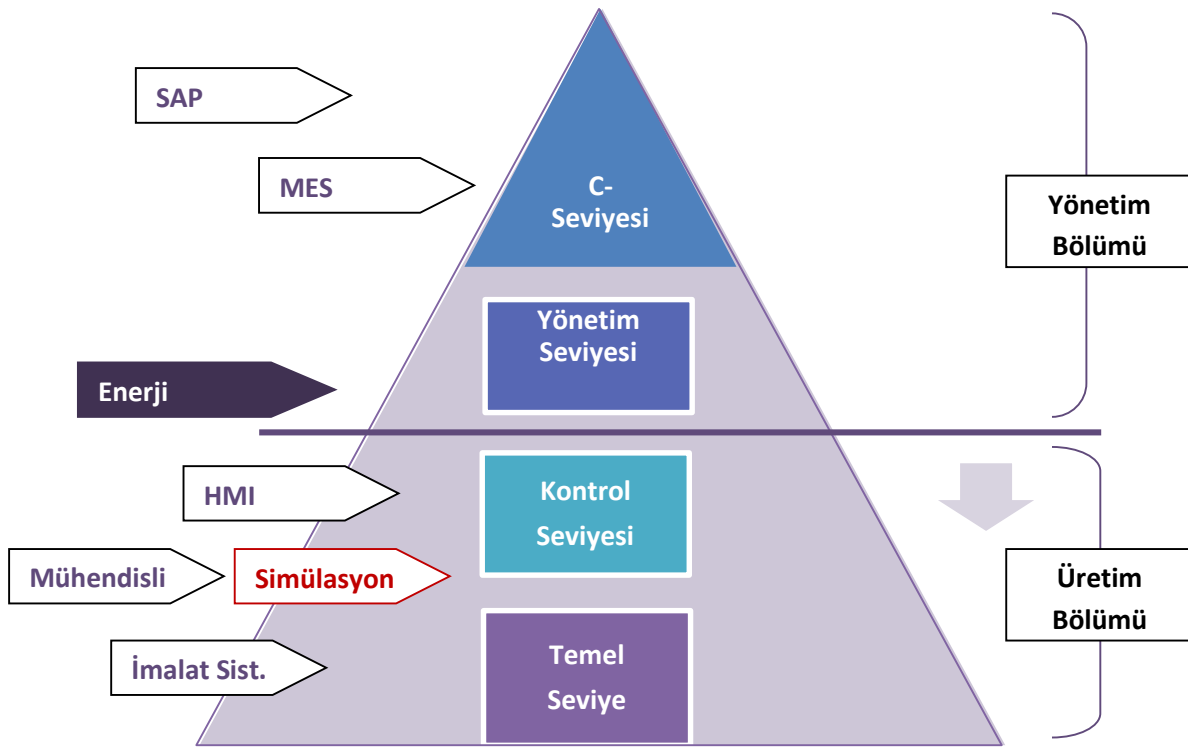
Sanayi 4.0’da eğitim önemli bir konudur. 80’li yıllarda Elektrik Mühendisliği alanında fonksiyon ve sistem modellemeleri ile devre ve transistör tasarımı yapılırken, 90’larda Yazılım Mühendisleri bilgisayar kodları oluşturmaya, Makina Mühendisleri ise tasarım alanlarına yönelmişlerdi. 2000’li yıllardan sonra mühendislik çok disiplinli olarak sistemler arasındaki etkileşimlerin modellenmesini sağlamaya yönelmiştir. (Şekil 12) [26] Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Bölümünün temel bilimsel teoriler, mühendislik prensipleri, analiz, tasarım ve uygulamaları yanında “Simülasyon” konseptine yer verdiği görülmektedir [58]. ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü’nün Mikro ve Nanoteknoloji konusunda, Enformatik Enstitüsü’nün Modelleme ve Simülasyon Anabilimdalı Simülasyon alanında lisans üstü öğrenim vermektedir [59]. Ayrıca ODTÜ “Simülasyon Araştırma Merkezi’nde” bu konuda araştırmaların yapıldığı bildirilmektedir [60].

2000’li yıllarda Baviera eyaleti 31 üniversite ve politeknik okulu arasında bir ağ oluşturarak Baviera Sanal Üniversitesi konseptini oluşturmuştur. Bu sayede bu yüksek öğretim kurumlarından birinde okuyan bir öğrenci yer ve zamandan bağımsız şekilde internet üzerinden derslerini alabilmektedir [61, 62].



Şekil 12. Mühendislik Bilimlerinin Gelişimi [26]

Eğitim alanında, Faller ve Feldmüller 2015 yılında Öğrenen Fabrikalar Konferansında Bochum Uygulamalı Bilimler Üniversitesinin desteği ile Velbert/Heiligenhaus kampüsünde öğrenci eğitimi, küçük ve orta büyüklüklerde işletmelere yönelik olarak kurulan Sanayi 4.0 Eğitim Fabrikalarını tanıtmışlardır. Simülasyon konsepti bu fabrikanın üretim katında gösterilmiştir. (Şekil 13) Sanayi 4.0'a yönelik mekatronik ve bilgi teknolojilerinin klasik ders ve staj uygulamalarında öğrenilemeyeceği, eğitimde çok disiplinli bir yaklaşımın gerektiği vurgulanmıştır. Küçük ve orta ölçekli işletmelerde, kendi ürününü geliştirecek iş gücü eksikliği ve yüksek maliyetleri nedeniyle Sanayi 4.0'ın gerektirdiği önemli teknolojilere yatırım yapma konusundaki eksikliklerden bahsedilmiş bu konuda eğitimin önemini belirtilmiştir. Bu amaçla öğrenciler en alt kattan en üst kata kadar maksimum saydamlıkla kurulmuş olan kampüste teorik dersleri alıp, daha sonra çevredeki küçük ölçekteki firmalarda profesyonellerle çalışarak eğitimlerini almaktadırlar [63].



Şekil 13. Faller ve Feldmüller'in Sanayi 4.0 Eğitim Fabrikasında Simülasyonun Rolü [63]

Bu öğrenme fabrikasında verilen dersler, lisans düzeyinde otomasyon, endüstriyel yönetim, mekatronik, yüksek lisans düzeyinde ise otomasyon ve denetim şeklinde olup, öğrenciler firmalarda ilgili araştırma projelerde çalışarak bilgilerini artırma fırsatına sahip olabilmektedir. Gerçek üretim ortamının öğretici bir imajı sayesinde ölçüm, programlama ve proses optimizasyonu bu sayede yapılabilmektedir. Üst katta üretim talimatları verilip durum gözlemesi yapılmaktadır, imalattan fiziksel olarak ayrılmış durumdadır. Bazı imalat ofisleri entegrasyon etkisinin izlenmesi açısından üretim hattına çok yakın konumlandırılmıştır. Sanayi 4.0 Öğrenme Fabrikasının diğer bir amacında küçük ve orta ölçekli işletmelerde bulunmayan otomatik imalat ve montaj olanaklarının entegre sistem ve bilgilerle kontrol, durum gözlem ve etkileşimini öğretebilmektir. Bu amaçla, PLC, CNC ve robotik kontrol gibi modern kontrol uygulamaları, farklı iletişim standartları,

siber-fiziksel sistem web teknolojilerinin faydaları, gerçek zamanlı veri analizi ve tahmin edici bakım uygulamaları konularında seminerler düzenlenmiştir. Endüstriyel proseslerde enerjinin önemini göstermek amacıyla Öğrenme Fabrikasına sekiz adet enerji ölçüm cihazı monte edilmiştir. Yapılan seminerlerde enerji ölçüm ve gözlem sistemleri, imalat ve montajda enerji verimliliği, ISO 50001 enerji yönetim standardı gibi konular anlatılmaktadır [63].

Dünyada simülasyonun önemi anlaşıldıkça bu konudaki merkez ve enstitü programlarının açıldığı görülmektedir. İngiltere’de 2015 yılında açılan Simülasyon Merkezi ve RWTH Aachen ve Dublin Üniversitesinin sürdürdüğü Simülasyon Bilimi yüksek lisans programları örnek olarak verilebilir [64-66].

#### 4. SONUÇLAR

Sonuç olarak, simülasyonun endüstriyel alanda geleceğin fabrikalarının, sistemlerinin, servislerinin oluşturulmasında vazgeçilmez bir bileşen olduğu açıktır. Bu sebepten takip eden maddeler büyük önem taşımaktadır.

- Otomasyonun her alanda arttırılmasına yönelik olarak simülasyona dayalı karar-destek sistemlerinin geliştirilmesi.
- Mühendislik bölümlerinde geleceğin akıllı fabrikalarını kurabilecek mesleki ve teknik bilgilere sahip öğrencileri profiline oluşturulması.
- Simülasyona dayalı çok disiplinli bölümler açılması, enstitüler oluşturulması ve simülasyon-destekli eğitim altyapısının Sanayi 4.0’a uygun şekilde geliştirilmesi.

#### TEŞEKKÜR

Dr. Ulrich ROSSGODERER’e [Siemens Industry Software GmbH, Digital Factory Division, München/GERMANY], IKON Makina ve MOTORCULAR Ltd.’ye çok teşekkürler.

#### 5. KAYNAKLAR

- [1] Bungartz, H.J., Zimmer, S., Buchholz, M., Pflüger, D., Modeling and Simulation: An Application-Oriented Introduction, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [2] Landriscina, F., Simulation and Learning A Model-Centered Approach, Springer-Verlag New York, 2013.
- [3] Bossak, M. A., Simulation based design, Journal of Materials Processing Technology, 76, pp. 8–11, 1998.
- [4] Garavaglia, C., Modelling industrial dynamics with “History-friendly” simulations, Structural Change and Economic Dynamics, 21, pp. 258-275, 2010.
- [5] Schruben, L.W., SIGMA- A Graphical Approach to Teaching Simulation, Journal of Computing in Higher Education, 4,1, pp. 27-37, 1992.
- [6] Scruben, L.W., Simulation modeling with event graphs, Communications of the ACM, vol. 26, no.11, 1983.
- [7] Banks, J. and Carson, J., Discrete event system simulation, Printice Hall, NJ, 1984.
- [8] Jahangirian, M, Eldabi, T., Naseer, A., Stergioulas, L.K., Young, T., Simulation in manufacturing and business: A review, European Journal of Operational Research, 203, pp. 1–13, 2010.
- [9] Kroese D.P. and Rubinstein R.Y., Monte Carlo methods, WIREs Computational Statics, 4, pp. 48–58, 2012.

- [10] Banks, J., Aviles, E., McLaughlin, J.R., and Yuan, Robert C., The Simulator: New Member of the Simulation Family, *Interfaces*, vol. 21, no. 2, pp. 76-86, 1991.
- [11] Mackulak, G.T., Cochran, J.K., Savory, P.A., Ascertaining Important Features For Industrial Simulation Environments, *Simulation*, pp. 211-221, 1994.
- [12] Smith A., *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*, W.Strahan and T.C. Adell Publishing, UK, 1776.
- [13] Babbage C., *On the Economy of Machinery and Manufactures*, Charles Knight, London UK, 1832.
- [14] Buffa E.S., *Modern Production/Operations Management*, 6<sup>th</sup> Ed., Wiley Publishing, USA, 1980.
- [15] Çelen S., CPE:Novel method to shorten the lead time for Laser-micro machining, *Materials Testing*, vol.57, no.6, p. 585-588, 2015.
- [16] Hermann, M., Pentek, T., Otto, B., *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios*, 49th Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE Computer Society, pp. 3928-3937, 2016.
- [17] Rudolph, R., *Industrie 4.0 A Chance for the Swiss Industry*, Workshop: Industrie 4.0 Chancen für die Photonik, *Industrie 2025 Chancen für den Werkplatz Schweiz*, Switzerland, 2016. <http://www.swissphotonics.net/libraries.files/rudolph.pdf>
- [18] Drath, R. and Horch, A., *Industrie 4.0: Hit or Hype?*, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol.8, no.2, pp. 56-58, 2014.
- [19] Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J., (Editors), *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*, Frankfurt, 2013.
- [20] Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.A., *A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems*, *Manufacturing Letters*, 3, pp. 18–23, 2015.
- [21] Giusto, D., Iera, A., Morabito, G., Atzori, L., (Editors), *The Internet of Things*, Springer, New York, 2010.
- [22] Trappey A.J.C., Trappey C. V., Govindarajan U. H., Chuang A. C., Sun J. J., *A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for Industry 4.0*, *Advanced Engineering Informatics*, Article in Press, 2016.
- [23] Ziegler S., Kirstein P., Ladid L., Skarmeta A., Jara A., *The Case for IPv6 as an Enabler of the Internet of Things*, *IEEE Internet of Things*, 2015, <http://iot.ieee.org/newsletter/july-2015/the-case-for-ipv6-as-an-enabler-of-the-internet-of-things.html>
- [24] Orta Doğu Teknik Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, <https://ipv6.metu.edu.tr/tr/node/4>
- [25] Vilarinho, T., Farshchian, B.A., Floch, J., Mathisen, B.M., *A Communication Framework for the Internet of People and Things Based on the Concept of Activity Feeds in Social Computing*, 9th International Conference on Intelligent Environments, IEEE Computer Society, 2013.
- [26] Zuehlke, D., *SmartFactory - Towards a factory-of things*, *Annual Reviews in Control*, 34, pp. 129–138, 2010.
- [27] Lu, X., Qu, Z., Li, Q., Hui, P., *Privacy Information Security Classification Study in Internet of Things*, *International Conference on Identification, Information and Knowledge in the Internet of Things*, pp. 162-165, 2014.
- [28] Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., Hoffmann, M., *Industry 4.0*, *Business & Information Systems Engineering*, 6, 4, pp. 239-242, 2014.
- [29] Kagermann, H., *Change Through Digitization – Value Creation in the Age of Industry 4.0*, (Editors: Albach H., Meffert H., Pinkwart A., Reichwald R.) *Management of Permanent Change*, Springer, New York, pp. 23-45, 2015.



- [30] Lucke, D., Constantinescu, C., Westkämper, E., Smart Factory - A Step towards the Next Generation of Manufacturing, Editors: Mitsuishi M., Ueda K., Kimura F., Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier, the 41st CIRP conference on manufacturing systems, Tokyo, pp. 115-118, 2008.
- [31] Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M., Zühlke, D., Human-Machine-Interaction in the Industry 4.0 Era, 12<sup>th</sup> IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 289-294, 2014.
- [32] Miranda, J., Mäkitalo, N., Garcia-Alonso, J., Berrocal, J., Mikkonen, T., Canal, C., Murillo, J. M., From the Internet of Things to the Internet of People, Internet Computing, IEEE Computer Society, vol.19 , no: 2, pp. 40–47, 2015.
- [33] Awais, M. and Henrich, D., Human-Robot Interaction in an Unknown Human Intention scenario, 11<sup>th</sup> International Conference on Frontiers of Information Technology, IEEE Computer Society, pp. 89-94. 2013.
- [34] Jaschke, S., Mobile Learning Applications for Technical Vocational and Engineering Education, International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL), pp. 605-608, 2014.
- [35] Malone, T.W., Is 'empowerment' just a fad? Control, decision-making, and information technology, BT Technology, vol.17, no:4, pp.141-144, 1999.
- [36] Hartford CNC, <http://www.dmscnc.com/mp-include/uploads/2016/02/dms-katalog-2012.pdf>
- [37] Mazak Corporation, <https://www.mazak.com.tr/tr/tezgahlar-teknoloji/urune-gore/cnc-yazilim/>
- [38] Weyer, S., Meyer, T., Ohmer, M., Goreck, D., Zühlke, D., Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: an Example from the Automotive Industry, IFAC-PapersOnLine, 49-31, pp. 97–102, 2016.
- [39] Broy, M., Kargermann, H., Achatz, R., Agenda Cyber Physical Systems: Outlines of a new Research Domain, Acatech, Berlin, 2010.
- [40] Tseng, M. and Piller, F., The customer centric enterprise: advances in mass customization and personalization, Springer Science & Business Media, Berlin, 2011.
- [41] Junker, S. and Vorderer, M., Highly versatile plug&produce assembly systems, 16. Internationales Stuttgarter Symposium, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2016.
- [42] Rossgoderer, U., Industrie 4.0 - Digitalization Strategy, Plant Simulation Worldwide User Conference Siemens AG, Stuttgart, 2015.
- [43] Herrmann, C., Thiede, S., Kara, S., Hesselbach, J., Energy oriented simulation of manufacturing systems– Concept and application, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 60,1, pp.45-48, 2011.
- [44] Reinhart, G. and Wunsch, G., Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems, Production Engineering, 1, 4, pp.371-379, 2007.
- [45] Rosen, R., Von Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K.D., About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing, 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, 48, 3, pp. 567–572, 2015.
- [46] Khajavi, S. H. and Holmström, J., Manufacturing Digitalization and Its Effects on Production Planning and Control Practices, Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth, pp. 179-185. Springer International, Tokyo, 2015.
- [47] Lee, J., Lapira, E., Bagheri, B., Kao, H., Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment, Manufacturing Letters, 1, pp. 38-41, 2013.
- [48] Lee, J., Ghaffari, M., Elmeligy, S., Self-maintenance and engineering immune systems: Towards smarter machines and manufacturing systems, Annual Reviews in Control, 35, pp. 111–122, 2011.
- [49] Kamihigashi T. and Stachurski J., Perfect simulation for models of industry dynamics, Journal of Mathematical Economics, 56, pp. 9–14, 2015.
- [50] NVIDIA, [www.nvidia.com/object/quadro-desktop-gpus.html](http://www.nvidia.com/object/quadro-desktop-gpus.html).

- [51] Denkena, B. and Winter, F., Simulation-based planning of production capacity through integrative roadmapping in the wind turbine industry, 9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering-CIRP ICME '14, Procedia CIRP, 33, pp. 105 – 110, 2015.
- [52] Leuwer, R., Pflesser, B., Urban, M., Stereoscopic simulation of ear surgery intervention with a novel 3D computer models, Laryngorhinootologie, 80, pp. 298-302, 2001.
- [53] Pohlenz, P., Gröbe, A., Petersik, A., Von Sternberg, N., Pflesser, B., Pommert, A., Höhne, K.H., Tiede, U., Springer, I., Heiland, M., Virtual dental surgery as a new educational tool in dental school, Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery, 38, pp. 560-564, 2010.
- [54] Çelen S., Çene Kemiği Onarımında 3B Yazıcıya Yönelik Olarak STL Dosyalarının İyileştirilmesi, 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu (International Symposium on 3D Printing Technologies), pp. 306-310, 2016.
- [55] Von Sternberg, N., Bartsch, M. S., Petersik, A., Wiltfang, J., Sibbersen, W., Grindel, T., Tiede, U., Warnke, P.H., Heiland, M., Russo, P.A.J., Terheyden, H., Pohlenz, P., Springer, I. N., Learning by doing virtually, International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 36, pp. 386–390, 2007.
- [56] Heiland, M., Petersik, A., Pflesser, B., Tiede, U., Schmelzle, R., Höhne, K.H., Handels, H., Realistic haptic interaction for computer simulation of dental surgery, International Congress Series, 1268, pp. 1226–1229, 2004.
- [57] Kunst, E. L., Mitchell, M., Johnston, A.N.B., Using simulation to improve the capability of undergraduate nursing students in mental health care, Nurse Education Today, 50, pp. 29–35, 2017.
- [58] Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Bölümü, <http://www.es.metu.edu.tr>
- [59] Orta Doğu Teknik Üniversitesi Lisansüstü Programlar, Fen Bilimleri ve Enformatik Enstitüsü, <http://www.metu.edu.tr/tr/lisansustu-programlar>
- [60] Orta Doğu Teknik Üniversitesi Simülasyon Araştırma Merkezi, <http://www.modsim.metu.edu.tr>
- [61] Ciolacu, M. and Beer, R., Adaptive User Interface for Higher Education based on webTechnology Research and Innovation in Industry 4.0, IEEE 22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), pp. 300-303, 2016.
- [62] The concept of the “Bavarian Virtual University”, <http://www.vhb.org/en/students/concept/>
- [63] Faller, C., Feldmüller, D., Industry 4.0 Learning Factory for regional SMEs, The 5th Conference on Learning Factories 2015, Procedia CIRP, 32, pp. 88 – 91, 2015.
- [64] Centre for Engagement and Simulation Science, <http://www.imperial.ac.uk/department-surgery-cancer/research/research-centres/centre-for-engagement-and-simulation-science/>
- [65] Simulation Sciences M.Sc., <http://www.rwth-aachen.de/cms/root/Studium/Vor-dem-Studium/Studiengaenge/Liste-Aktuelle-Studiengaenge/Studiengangbeschreibung/~bnzu/Simulation-Sciences-M-Sc/?lidx=1>
- [66] MSc Programme in Simulation Science, <http://www.ucd.ie/simulationsscience/msc/index.html>