

Metin Madenciliği ile Endüstri 4.0'da Yeni Eğilimler

Çağla EDİZ¹

Özet

Bilişim ve teknoloji çağının bir sonucu olarak başlayan Endüstri 4.0 verileri alan, ileten, değerlendiren ve yöneten sistemleri içermektedir. Bu sistemlerdeki cihazların her türlü hareketleri gerçek zamanlı izlenir. Bu izleme verileri çeşitli kanallarla iletilir ve saklanır, bilişim sistemleri kullanılarak değerlendirilir ve siber fiziksel sistemlerle gerekli mekanizmaların harekete geçmesi sağlanır. Bu nedenle bu teknolojilere ait kavramlar Endüstri 4.0 ile ilgili bilimsel makalelerde sıkça yer alır. Bu fikirden yola çıkarak bu çalışmada Endüstri 4.0'daki temel kavramlar ve yeni eğilimler araştırıldı. Bu amaçla Endüstri 4.0 ile ilgili çok atıfa sahip 75 bilimsel makale seçilmiş ve bu makalelerde en çok kullanılan ikili ardışık kelimeler (bigram) ve üçlü ardışık kelimeler (trigram) bulunmuştur. Daha sonra, 2017'e kadar olan yıllara ait bilimsel makalelerde yer almayan, ancak 2017 ve sonrasındaki en az iki farklı yıldaki makalelerde görülen ve aynı zamanda en çok kullanılan ilk 100 bigram arasına giren bigramlar tespit edildi. Son aşamada, bu bigramlardan hangilerinin yıllara göre kullanım frekanslarının arttığını görmek için, bu bigramlar Google Books Ngram Viewer platformu kullanılarak sorgulandı. Bu yöntem uygulanarak, Endüstri 4.0 içindeki yeni eğilimler "katmanlı üretim", "3b yazıcı", "siber güvenlik", "döngüsel ekonomi", "sürdürülebilir iş", "dijital ikiz" olarak bulunmuştur. Böylece, gelecekte endüstride daha fazla üzerinde çalışılacağı tahmin edilen bu bigramlar için farkındalık oluşturmak istenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, dijital ikiz, döngüsel ekonomi, sürdürülebilir iş, metin madenciliği

New Trends in Industry 4.0 Using Text Mining

Çağla EDİZ¹

Abstract

Industry 4.0, which started as a result of the information and technology age, includes systems that receive, transmit, evaluate and manage data. All kinds of movements of the devices in these systems are monitored in real time. These monitoring data are transmitted and stored through various channels, evaluated using information systems and necessary mechanisms are activated by cyber physical systems. For this reason, the concepts of these technologies are frequently included in the scientific articles about Industry 4.0. Based on this idea, the basic concepts and new trends in Industry 4.0 are investigated in this study. For this purpose, highly cited 75 Industry 4.0 articles are selected to reveal the basic concepts of Industry 4.0, bigrams and trigrams in these articles are found. Later, the bigrams, that are not included in the scientific articles belonging to the years until 2017, but are seen in the articles of at least two different years in 2017 and after, and are also among the top 100 most used bigrams are identified. In the last stage, in order to see which of these bigrams usage frequency have increased over the years, these bigrams were queried using the Google Books Ngram Viewer platform. By applying this method, new trends in Industry 4.0 were found as "additive manufacturing", "3d printing", "cyber security", "circular economy", "sustainable business" and "digital twin". Thus, it was aimed to raise awareness for these bigrams, which are expected to be studied more in the industry in the future.

Keywords: Industry 4.0, digital twin, circular economy, sustainable business, text mining

GİRİŞ

İlk Endüstri devrimi makinaların, ikincisi elektriğin ve seri üretim anlayışının, üçüncüsü elektronik cihazların ve bilgi teknolojilerinin endüstride kullanılmaya başlanmasıyla yaşanmıştır (Drath ve Horch, 2015; Zhou ve diğ., 2015). Dördüncü Endüstri devrimi ise tüm bu teknolojilerin birbirleriyle haberleşerek otonom bir yapı kazanmasıyla başlamaktadır. Bu nedenle Endüstri 4.0 için haberleşmeyi sağlayacak iletişim kanalları, iletilecek verilerin yapısı, verilerin depolanacağı yapı, bu verileri alan cihazlar tarafından analiz edilmesi, yorumlanması ve alınan kararlarla mekanizmaların harekete geçirilmesi ile ilgili terimler Endüstri 4.0'da sıkça kullanılmaktadır. Bu terimler hazırlanan çalışmada incelenmiş ve Endüstri 4.0 gelişimiyle önem kazanan değerler bulunmaya çalışılmıştır.

Endüstri 4.0'da yer alan kavramların çıkarılması için, literatürde 2014 yılından 2020 yılına kadar çok atıf almış bilimsel makalelerden 75 tanesi seçildi (Tablo 1). Seçilen makaleler manuel bir şekilde metin formatına çevrildi. Daha sonra ise, Jupyter Notebook programında nltk, numpy, pandas ve matplotlib kütüphaneleri kullanılarak Python dilinde çalışmadaki algoritmalar hazırlandı.

Tablo 1. Bu çalışmada bigramlar açısından incelenen 75 makale ve google scholar'da görülen atf sayıları (13 Kasım 2020 itibarıyla)

Aazam ve diğ., 2018	155	Jazdi, 2014	647	Santos ve diğ., 2017	104
Aceto ve diğ., 2020	52	Kolberg ve Zühlke., 2015	403	Schlechtendahl ve diğ., 2015	253
Almada-Lobo, 2015	438	Lasi ve diğ., 2014	2151	Schuh ve diğ., 2014	71
Ardito ve diğ., 2019	121	Lee ve diğ., 2015	2914	Schumacher ve diğ., 2016	617
Bagheri ve diğ., 2015	220	Lee ve diğ., 2018	138	Shorouf ve diğ., 2014	623
Barreto ve diğ., 2017	217	Li ve diğ., 2017	808	Simota ve diğ., 2017	127
Baygin ve diğ., 2016	124	Lu, 2017	1237	Slusarczyk, 2018	203
Bonekamp ve Sure, 2015	157	Machado ve diğ., 2020	65	Sommer, 2015	295
Brettel ve diğ., 2014	1418	Manavalan ve Jayakrishna, 2019	126	Stock ve Seliger, 2016	1008
Buer ve diğ., 2018	207	Masood ve Egger, 2019	71	Strange ve Zucchella, 2017	243
Büchi ve diğ., 2020	63	Moeuf ve diğ., 2020	43	Sung ve diğ., 2018	277
Dalenogare ve diğ., 2018	326	Moktadir ve diğ., 2018	99	Tjahjono ve diğ., 2017	247
Diez-Olivan ve diğ., 2019	133	Mrugalska ve Wyrwicka, 2017	296	Tortorella ve Fettermann, 2018	221
Dilberoglu ve diğ., 2017	214	Muhuri ve diğ., 2017	154	Tseng ve diğ., 2018	155
Dombrowski ve Wagner, 2014	159	Oztemel ve Gursev, 2020	252	Ungurean ve diğ., 2014	96
Drath ve Horch, 2015	901	Popkova ve Sergi, 2020	80	Vaidya ve diğ., 2018	443
Erol ve diğ., 2016	322	Qi ve Tao, 2018	339	Varghese ve diğ., 2014	143
Faller ve Feldmüller, 2015	202	Qin ve Liu, 2016	643	Wan ve diğ., 2016	465
Fantini ve diğ., 2020	63	Rajput ve Singh, 2019	72	Wang ve diğ., 2016	849
Frank ve diğ., 2019	338	Rauch ve diğ., 2020	58	Wilkesmann ve diğ., 2018	82
Ganzarain ve Errasti, 2016	165	Reischauer, 2018	118	Xu ve diğ., 2018	808
Haseeb ve diğ., 2019	151	Roblek ve diğ., 2016	677	Xu ve diğ., 2019	192
Hofmann ve Rüsich, 2016	802	Rodic, 2017	134	Zheng ve diğ., 2018	237
Ivanov ve diğ., 2019	264	Rojko, 2017	406	Zhong ve diğ., 2017	888
Jabbour ve diğ., 2018	203	Sanders ve diğ., 2016	429	Zhou ve diğ., 2015	570

Çalışmanın ikinci bölümünde, Endüstri 4.0 makalelerindeki temel kavramlar, makalelerdeki bigramların ve trigramların kullanım sıklıkları ölçü alınarak bulunmaya çalışılmıştır. Sonrasında en sık kullanılan 20 bigramın, makaleler bazında kullanım sayıları bulunarak, bu bigramların birlikte kullanımları incelenmiştir. Üçüncü bölümde sık kullanılan bigramların yıllara göre değişimleri incelenerek Endüstri

4.0’da yeni eğilimler araştırılmış ve son kısımda ise Endüstri 4.0 makalelerinin üretim ve hizmet sektöründeki farklılığı incelenmiştir.

En Sık Kullanılan Bigramlar, Trigramlar ve Birlikte Kullanımları

Endüstri 4.0’a ait temel kavramların ortaya çıkarılabilmesi için bigramların ve trigramların sayılmasından önce bazı ön işleme işlemleri yapıldı. Böylelikle, genel olarak veya makale paylaşım platformlarında çok sık kullanılan terimler yerine, Endüstri 4.0 terimlerinin bulunabilmesi amaçlandı. Bu ön işlemlerde, tüm makalelerin birleşimi ile oluşan korpustaki karakter sayısı çok yüksek olması nedeniyle iterasyon algoritmaları kullanılmış ve her makale için aşağıdaki adımlar tekrarlanmıştır:

- “I, the, of..v.b.” ingilizcede çok kullanılan ve daha çok diğer kelimelerin anlaşılması için yardımcı kelimelerden oluşan etkisiz kelimeler (stopwords) ile bazı noktalama işaretleri çıkarıldı.
- Yayınlanan dergi ve konferans adlarıyla ilgili bigram ve trigramların ayıklanması için “journal, conference, open, literature, study, procedia, ieee...v.b.” kelimeler de oluşturulan korpustan çıkarıldı.
- Daha sonra tüm harfler küçük harfe çevrildi.
- Her makalede iki veya daha çok tekrarlanan bigramların ve trigramların kullanım adetleri hesaplandı.

Tablo 2. En çok kullanılan bigramlar

Sıra	Bigram	Adet	Sıra	Bigram	Adet	Sıra	Bigram	Adet
1	industry 4.0	4764	35	business models	91	69	manufacturing companies	52
2	cyber-physical systems	1112	36	artificial intelligence	91	70	data mining	51
3	big data	881	37	augmented reality	87	71	operations management	51
4	internet things	772	38	it implementation	85	72	context industry	51
5	supply chain	436	39	production processes	84	73	available august	51
6	industrial revolution	328	40	implementation industry	84	74	supply chains	50
7	cloud computing	261	41	cloud manufacturing	84	75	product development	50
8	manufacturing systems	258	42	ripple effect	82	76	social companies	50
9	smart factory	256	43	life cycle	80	77	simulation modelling	50
10	production systems	213	44	machine learning	79	78	smart products	49
11	intelligent manufacturing	198	45	sustainable business	79	79	lean automation	49
12	lean manufacturing	189	46	chain management	74	80	industrial wireless	49
13	data analytics	185	47	future research	73	81	cyber-physical system	48
14	smart manufacturing	181	48	value chain	72	82	research agenda	48
15	digital twin	181	49	information communication	70	83	4th industrial	48
16	lean production	180	50	value creation	69	84	cyber security	46
17	manufacturing industry	147	51	decision making	69	85	industry 4.0.	46
18	production research	143	52	data collection	68	86	success factors	46
19	digital technologies	142	53	information technology	68	87	advanced manufacturing	45
20	4.0 technologies	132	54	risk management	68	88	manufacturing technologies	45
21	industrial engineering	125	55	manufacturing process	67	89	production management	45
22	real time	122	56	4.0 lean	65	90	manufacturing processes	45
23	information systems	119	57	energy consumption	62	91	expected benefits	45
24	production system	112	58	4.0 concept	62	92	learning factory	45
25	fourth industrial	107	59	intellectual capital	62	93	social entrepreneurship	45
26	additive manufacturing	107	60	computer science	59	94	production process	44
27	industrial internet	102	61	shop floor	59	95	data fusion	44
28	sensor networks	101	62	circular economy	58	96	manufacturing industrys	43

29	smart factories	99	63	data analysis	57	97	manufacturing engineering	42
30	sustainable manufacturing	97	64	physical systems	57	98	new technologies	42
31	manufacturing system	96	65	energy efficiency	56	99	3d printing	42
32	wireless sensor	95	66	wireless networks	55	100	new technologies	42
33	business performance	92	67	production economics	53			
34	systems industry	91	68	data acquisition	52			

En çok kullanılan bigram şüphesiz “Industry 4.0” kelimesidir. “Industrie 4.0” da aynı anlamda olduğundan başta ayrı ayrı olarak en sık kullanılan kelimeler arasında görülen bu iki kelime “Industry 4.0” olarak birleştirilmiş ve 4764 kere bu bigramın geçtiği görülmüştür (Tablo 2) . Diğer yandan, “Industry 4.0” ile aynı anlamda kullanılan bir başka terim de “Fourth Industrial Revolution” dır. Bu trigram da en çok kullanılan trigramlarda “Industrial 4.0 Technologies” trigramından sonra 105 kere sayılarak ikinci sırada yerini almıştır (Tablo 3). Bu trigramdan “Fourth” kelimesi çıkarıldığında elde edilen “Industrial Revolution” bigramının ise 328 kere makalelerde yer aldığı görülmektedir. Sayılardaki bu farklılık bazı makalelerde önceki endüstriyel devrimlerden de bahsedilmesinden ve bazı makalelerde fourth kelimesinin rakamla yazılmış olmasından kaynaklanmaktadır.

Makalelerde en sık kullanılan diğer bigramlar sırasıyla “cyber-physical systems” , “big data”, “internet things” ve “supply chain” olarak görülmektedir. Korpusta, “of, in, the...v.b.” kelimeleri kapsayan stopwords kelimeler çıkarıldığından “internet of things” yerine “internet things” bigramına ulaşılmıştır. Ayrıca en çok kullanılan bigramların kısaltılmış hali var mı diyerek bakıldığında, makalelerde “internet of things” yerine IoT (806 kere), “cyber-physical systems” yerine CPS (702 kere) kullanıldığı görülmüş ve bu kelimeler açılmış haliyle değiştirilerek Tablo 2’ e işlenmiştir. Çoğu makalede “cyber-physical systems” kelimelerinin kesme işareti kullanılarak yazıldığı görülmüş, kesme işareti olmayan makalelerde de bu kelimeler kesme işareti içerecek şekilde değiştirilmiştir.

Endüstri 4.0 kavramı verilerin anlık olarak izlenmesi, iletilmesi ve akıllı sistemlerle değerlendirilmesine dayanmaktadır. Diğer bir deyişle Endüstri 4.0, gömülü yazılımları, ağ bağlantılı sensörleri (“sensor networks”) ve harekete geçebilen mekanizmaları içinde barındıran, algoritmalarla kendi kararlarını alarak uygulamaya geçebilen akıllı yapılardır (Almado-Lobo, 2015). Bu nedenle “cyber-physical systems” in, Endüstri 4.0 makalelerinde en sık kullanılan bigram olması beklenen bir durumdur. “Cyber-physical systems” çoğu durumda anlık, bazı durumlardaysa bir uyarım sonrası devreye girerek alınan “big data” yı değerlendirir. “Big data”, yüksek miktardaki verinin elde edilmesi, aktarılması, depolanması, korunması, görselleştirilmesi gibi farklı prosesleri de içeren zengin bir kavramdır (Xu ve diğ., 2019). “Big data” genel uygulamalarda internet üzerinden “real time” olarak bulut ortamına aktarılmakta ve “cloud computing”, “big data analytics”, “data analysis” ile değer kazanmaktadır. “Data analysis” ile veriler daha yüksek hizmet seviyeleri, daha düşük tedarik maliyetleri, daha kısa çevrim süreleri, daha az envanter maliyetleri, tahmin hatalarında azalma ve değer zinciri boyunca daha hızlı etkileşimler gibi değerlere dönüştürülür (Ardito ve diğ., 2019). Öte yandan, “data analysis” in eksik veya yanlış olması istenmeyen sonuçlara neden olabilmektedir. Örneğin, hızlı sipariş temini bekleyen müşterilere, hızlı davranmak yerine fiyat indirimleri yapmak hem onların beklentilerinin karşılanmamasına hem de kazancın azalmasına sebep olacaktır.

Tablo 3. En çok kullanılan trigramlar

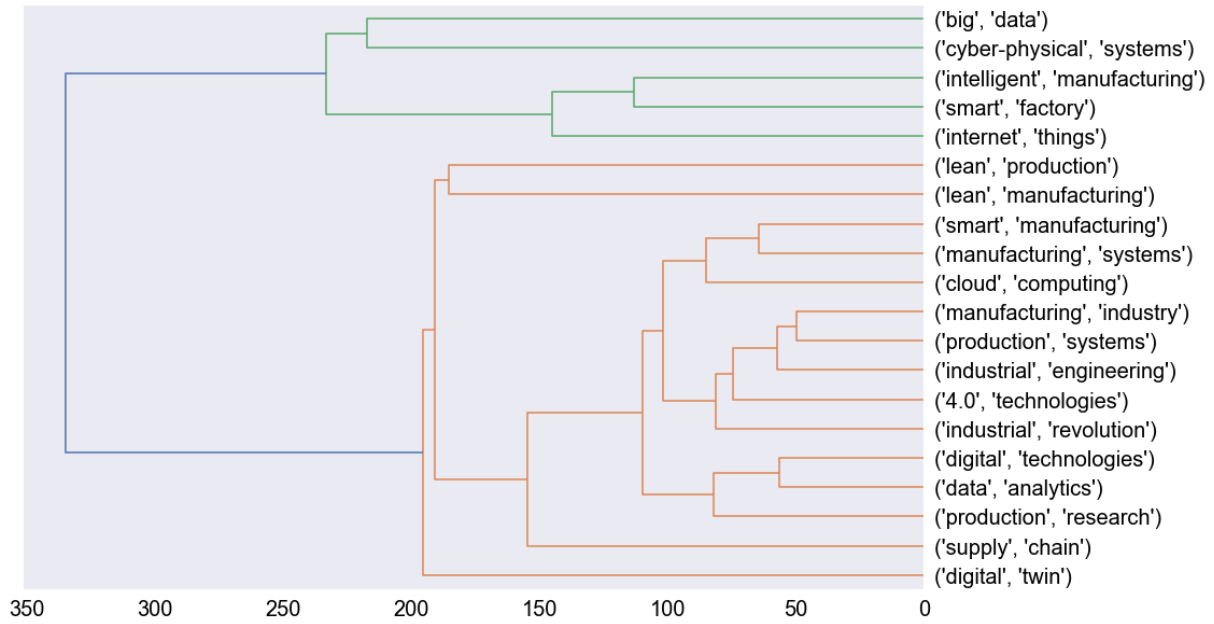
No	Trigram	Adet	No	Trigram	Adet
1	industry 4.0 technologies	132	11	manufacturing industry 4.0	56
2	fourth industrial revolution	105	12	industry 4.0 concept	46
3	big data analytics	96	13	4th industrial revolution	46
4	implementation industry 4.0	74	14	context industry 4.0	46
5	systems industry 4.0	74	15	industrial internet things	40
6	supply chain management	72	16	concept industry 4.0	40
7	sustainable business performance	68	17	cyber-physical systems industry	40
8	industry 4.0 lean	65	18	critical success factors	38

9	wireless sensor networks	62	19	computer integrated manufacturing	37
10	4.0 lean manufacturing	61	20	implementing industry 4.0	34

“Internet of things” ile internete bağlanmış nesnelere hem hareketleri izlemek için veri alınır, hem de yönetmek için onlara veri gönderilir. Endüstrideki her nesnenin internete bağlı olması çok sayıda IP adresi ihtiyacını ortaya çıkaracağından IPv6 (Internet Protocol version 6) için çalışmalar devam etmektedir. Gelecekte, IP adreslerinin 128 bit olarak kullanılması 2^{128} adresin tanımlanabilir olmasını sağlayacaktır (Anderl, 2014). Böylece çok daha fazla nesne “real time” olarak internete bağlanarak izlenebilecek ve yönetilebilecektir.

Endüstriyel gelişimde en önemli kavramlardan biri de “supply chain” dir. Endüstriyel faaliyetler sonucu ürün veya hizmet olarak sunulan değerler, çoğu zaman birbiriyle bağlantılı çok sayıda fiziksel ve dijital süreçlerin sonucunda oluşmaktadır. Bu süreçleri kapsayan “supply chain” teknolojileri, küresel çapta birlikliklerin oluşabilmesine fırsat vermiş, ayrıca süreçler daha hızlı bir şekilde izlenebilir ve yönetilebilir hale gelmiştir.

Endüstri 4.’ün farklı uygulamaları, farklı teknolojilerin entegrasyonunu gerektirmektedir. Bu anlayışla Endüstri 4.0 makalelerinde, “Industry 4.0” dan sonra en sık kullanılan 20 bigramın, kullanımına göre aralarında bir ilişki olup olmadığı incelenmek istendi. Diğer bir deyişle, bu bigramların çalışmada kullanılan makaleler ve kullanım adetleri açısından birbirlerine benzerlikleri araştırıldı. Bu amaçla, her bir bigram için, makaleler öznitelikleri (75 adet) ve bigramın bu makalelerdeki kullanım adetleri öznitelik değerlerini oluşturacak şekilde bir vektör oluşturuldu. Bu vektörlerin birbirine olan benzerliklerini gösteren ve böylece bigramların farklı gruplara ayrılabilmesine olanak tanıyan Ward’s Metodu ile oluşturulan dendogramın görüntüsü Figür 1’de görülmektedir.

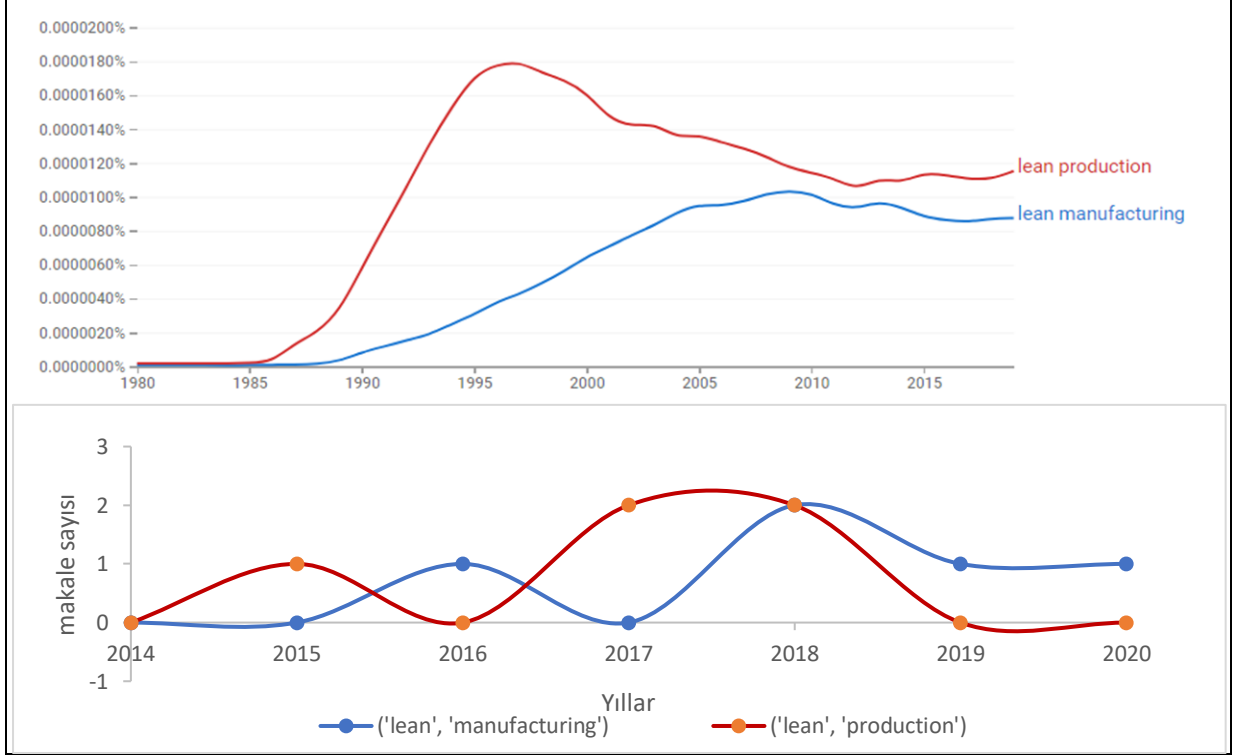


Figür 1. En sık kullanılan bigramların makalelerde kullanım adetlerine göre oluşturulmuş dendogram görüntüsü

Aceto ve diğerlerine ait olan 2020 tarihli çalışmada, “cyber-physical systems” den oluşan Endüstri 4.0’ın başlıca “internet of things,” big data analysis” ve “cloud computing” teknolojilerini kullandığı belirtilmiştir. Bu çalışmada da Figür 1’de görülen dendogram 200-210 aralığından bir çizgi ile kesilerek gruplandırıldığında ve her grup, en sık kullanılan bigramla temsil edildiğinde benzer bir sonuca ulaşılmaktadır. Çünkü bu gruplandırmada ulaşılan bigramlar, “big data”, “cyber-physical systems”, “internet of things” ve Endüstri 4.0 teriminin bir başka şekilde adlandırılması olan “industrial revolution” terimleridir. Ayrıca bu dendogram ve Tablo 1’deki sonuçlardan, “cyber-physical systems” ve “big data”nın aynı makalelerde yüksek adetlerde birlikte kullanıldığı anlaşılmaktadır. “Internet of things” teknolojisinin “smart factory” ve “intelligent manufacturing” kavramlarıyla birlikte çokça kullanıldığı sonucuna da dendogramdan ulaşılabilir. Diğer yandan, turuncu ile görülen grup altında da pek çok grup bulunmaktadır. Bu grup altındaki “lean manufacturing” ve “lean production” birlikte ayrı bir grup

oluşturmuş, “digital twin” bigramı ise diğer bigramlardan daha bağımsız bir kavram olarak dendogramda yerini almıştır.

Malzeme, stok, hareket gibi üretimde ürüne değer katmayan her türlü fazlalıktan kurtulmayı hedefleyen ve yalın üretim olarak Türkçeye çevrilen “lean production” ve “lean manufacturing” kavramları, 1980’lerin sonlarında post-Fordist bir açılım olarak yaygınlaşmaya başlamıştır (Hampson, 1999). Nispeten eski bir kavram olmasına rağmen, bu kavramlar merkeziyetçi kontrolü dağıtmayı, esneklik ve üretkenliği arttırmayı hedeflemesi açısından Endüstri 4.0 ile benzeşmektedir (Buer ve diğ. ,2018). Bu nedenle, Endüstri 4.0 makalelerinde en çok kullanılan 20 bigram arasına bu iki bigram girmektedir ve bu bigramlar popülerliğini hala korumaktadır (Figür 2).



Figür 2. “Lean manufacturing” ve “lean production” bigramlarına ait; a) Google Books Ngram Viewer ekran görüntüsü, b) Yıllara göre kullanıldıkları makale sayıları

Bigramlarla Endüstri 4.0 Makalelerinde Yeni Eğilimler

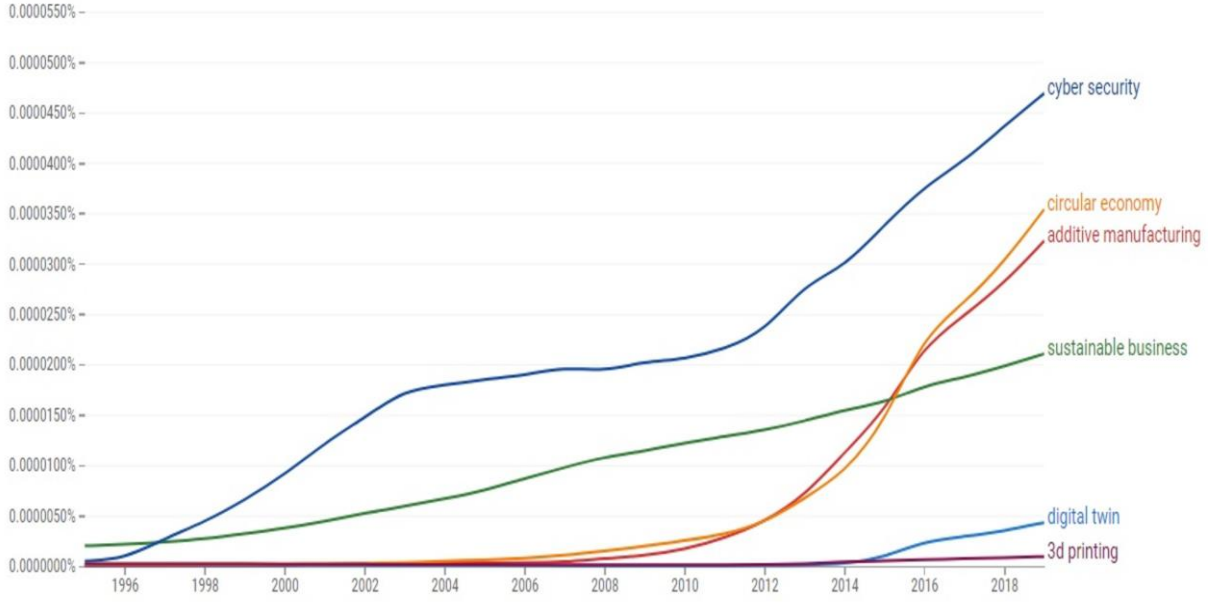
Endüstri 4.0 ile ilgili yeni eğilimleri bulmak için ilk zamanlardaki makalelerde yer almayıp da daha sonraki makalelerde yer alan kavramlar araştırılmıştır. Bu amaçla, öncelikle Endüstri 4.0 ile ilgili çalışılan makaleler yıllar bazında gruplandı. En çok kullanılan 100 bigramın her biri, bu makalelerde ayrı ayrı incelenerek, 2017 yılına kadar hiç görülmemesine rağmen 2017 ve sonraki en az iki yılda görülme oranlarının hangileri olduğu incelendi. Bu sorgulama sonucunda Tablo 4’de görülen bigramlara ulaşıldı.

Tablo 4. Sadece 2017 ve sonrasındaki makalelerde görülen ve sık kullanılan bigramlar

digital twin	computer science	supply chains	manufacturing technologies
additive manufacturing	circular economy	research agenda	3d printing
sustainable business	production economics	cyber security	
chain management	data mining	success factors	
risk management	operations management	advanced manufacturing	

Bu bigramların ilk yıllarda görülmemesinin rastlantısal olup olmadığının incelenmesi için, bu bigramlar ayrıca Google Books Ngram Viewer platformunda da sorgulatılmıştır. Her iki algoritmayla da

yükselişte olduğu gözlemlenen bigramlar; “additive manufacturing”, “3d printing”, “cyber security”, “circular economy”, “sustainable business” ve “digital twin” dir.



Figür 3. Seçilen makalelerde sadece 2017 ve sonrasında görülen, en sık kullanılan 100 bigram arasında yer alan ve Google Books Ngram Viewer’da da arttığı tespit edilen bigramlara ait Google Books Ngram Viewer ekran görüntüsü

Additive Manufacturing (3D Printing) : Malzemeleri katman katman birleştirip şekillendirerek oluşturan “additive manufacturing” , diğer bir adlandırmayla “3d printing” işlemlerinde, fazla stoklar önlenmekte, ürün kişiselleştirmeleri artmakta ve imalatın yerel yapılabilmesi sağlanarak taşıma işlemlerinin önüne geçilmektedir (Ivanov ve diğ., 2019). “Additive manufacturing” teknolojisinin yaygınlaşmasıyla, kritik önem taşıyan parçalar dışındaki çoğu yedek parçanın son kullanıcıya veya son kullanıcıya yakın yerel bir tesiste 3D teknolojisiyle üretilmesi beklenmektedir (Lee ve diğ., 2018). “Additive manufacturing” sayesinde çok küçük serilerin ve kişiselleştirilmiş ürünlerin üretiminin, seri üretim maliyetlerine eşdeğer bir maliyetle yapılabilmesi sağlanabilir (Rodic, 2017). Gıdadan metale kadar farklı malzemeler için kullanılabilen “additive manufacturing” çalışanların iş gücü yerine tasarım, yönetim ve analiz işlerine yönelmesine, kullanıcılara da tasarıma ortak olabilmelerine olanak vermektedir (Dalenogare ve diğ., 2018; Dilberoğlu ve diğ., 2017).

Cyber Security: Endüstri 4.0’da “internet of things” kullanılarak teknolojik cihazların birbiriyle bağlantılı olması sonucunda, çok büyük sayılarda veri internete aktarılmaktadır. Bu durum veri gizliliğinin sağlanıp sağlanamadığı konusunda endişelere sebep olmakta ve veri güvenliğini sağlayacak “cyber security” önem kazanmaktadır (Ardito ve diğ. 2019). Veri güvenliğinin sağlanmasının yanı sıra, “internet of things” e sahip cihazlar kullanarak veri etkileşiminde bulunan paydaşlar arasındaki ilişkilerde yetkilendirme, eş zamanlı bilgilendirme gibi metotlarla güven yönetiminin sağlanabileceği ortamların oluşturulması da “cyber security” konuları arasındadır (Manavalan ve Jayakrishna, 2019). Diğer yandan, “cyber security” sağlanırken, ağ bağlantılarının performansının düşmemesi (Moeuf ve diğ., 2020), paydaşlar arasındaki gerekli şeffaflığın engellenmemesi de ele alınması gereken konular arasındadır.

Circular Economy: Doğal kaynakların kıt olduğu ve atığa çıkan bazı değerlerin tekrar kazanılabileceği anlayışıyla hareket eden “circular economy”, üretimde kullanılan kaynakların ve enerjinin döngüselliklerini en üst seviyeye çıkarmaya odaklanır (Jabbour ve diğ., 2018). Al-yap-tüket anlayışına dayalı ileriye dönük değer zincirinde, tersine lojistik ile tek bir tedarik zinciri boyunca bir döngü sağlanır. Oysa “circular economy”, tersine lojistiğin tekrar kullanımı için toplama, yeniden pazarlama faaliyetlerinden faydalanmakta ancak tersine lojistikten daha geniş bir yelpazeyi içinde barındırmaktadır. Çünkü geri dönüşüm işlemleriyle birlikte yenilenebilir malzemelerin tüm hayat

döngüsündeki operasyonlarını (Dev ve diğ., 2020), kurumlar arası işbirliği ve iletişim faaliyetlerini de kapsayan bir içeriğe sahiptir. Böylece “circular economy“ ekonomik ve çevresel düzeyde endüstriyel veya kentsel yarar ortaklığı anlayışına dayanarak çoklu tedarik zincirleri oluşturur (Tseng ve diğ., 2018). **Sustainable Business:** “Sustainable business” kavramı, bir işletmenin ekonomik, sosyal, kültürel veya diğer bağlamlarda sürdürülebilir bir şekilde nasıl değer yaratabileceğini tanımlamaktadır (Nosratabadi ve diğ., 2019). “Sustainable business” ve “circular economy”, birbirleriyle kesişen ve ortak hedefleri olan iki kavramdır (Geissdoerfer ve diğ., 2018). “Sustainable business” oluşturmak için başlıca dört temel alanda sürdürülebilirlik sağlanmalıdır. Bunlar (Machado ve diğ.,2020);

- Süreç ve ekipmanlara odaklanarak üretim teknolojileri alanı,
- Ürün ve servis tasarımına odaklanarak ürün yaşam döngüsü,
- Şirketlerin organizasyonlarına ve üretim ağlarına odaklanarak değer oluşturma alanı,
- Toplumu, çevreyi, ekonomiyi geniş ölçekli düşünerek sosyal sorumluluk alanı olarak sıralanabilir.

Bu alanlarda Endüstri 4.0 teknolojilerini etkin kullanmak, uzun vadede rekabet ortamında ayakta kalabilmek için kaçınılmaz olacaktır. Çünkü “sustainable business” hem makro hem mikro düzeyde avantajları beraberinde getirmektedir. Makro düzeyde düşünüldüğünde;

- Akıllı teknolojilerle sağlanan akıllı veriler yeni iş modellerinin oluşturulmasına fırsat verecektir.
- “Real time” veriler ile hem ürün yaşam döngülerinde tekrar tekrar kullanımlar sağlanacak hem de yaşam döngüsüne dahil olmayan kuruluşlarla ürün, malzeme, enerji, su, akıllı veri gibi kaynak ticareti veya değişimi yapılarak değer yaratan ağlar oluşturulacaktır (Stock ve Seliger, 2016).

Mikro düzeyde ise ekipman, insan, organizasyon, proses ve ürün ile yeni teknolojilerin entegrasyonu “sustainable business” oluşumuna katkı sağlayacaktır (Stock ve Seliger, 2016). Bu kazançlar şu şekilde sıralanabilir;

- Sensörleri ve hareketli mekanizmaları içeren ekipmanların farklı ihtiyaçlar için otomatik modifiye edilerek çeşitli işlerde kullanılabilmesiyle yedek parça, yer ve zaman kazançları sağlanacaktır.
- “Augmented reality” teknolojisi sayesinde satınalma kararları, tasarım prosesleri ve eğitsel işlevler hızlanacak ve kolaylaşacaktır.
- Operasyonel işlemler, “cyber-physical systems” içinde yer alan robotlara bırakılarak, çalışanların işlerin tasarım, analiz ve geliştirme kısımlarına yoğunlaşması sağlanacaktır.
- Endüstri 4.0 teknolojileri kullanarak alınan veriler ile entegre edilmiş “information systems” sayesinde çalışanlar bilgiye rahat ulaşacaklar ve “decision making” teknolojileriyle daha rahat karar alabilecekler. Böylece, organizasyonlardaki hiyerarşik ve merkezîyetçi yapı yerini daha yatay ve hızlı şekilde karar alımı uygulanabilecek bir yapıya bırakacaktır.
- Hem ürünler hem de prosesler, “circular economy” kapsamında geniş çaplı organizasyonlar arasında iş birliği sağlanarak elde edilecektir.

Digital Twin: “Dijital twin” ile fiziksel hayatta var olan veya var olacak olan bir varlık dijital ortama, “simulation modelling” kullanılarak, özellikleri ve davranışları ile aktarılır. Daha fiziksel varlık tasarlanırken, dijital varlık bu varlığın tüm hayat döngüsü boyunca farklı fonksiyonlardaki performanslarını hesaplamaya ve optimize etmeye çalışır. Fiziksel varlık, dijital varlık ile tüm hayat döngüsünde etkileşimdedir ve “real time” bir şekilde “internet of things” sayesinde izlenerek tüm hayat döngüsünde olabilecek aksilikler için gerekli tedbirler alınmaya çalışılır. Bu nedenle dijital varlığın izlenmesiyle oluşan “big data”; “machine learning” veya daha kapsamlı algoritmaları kapsayan “artificial intelligence” gibi metotlarla eğitilir ve varlığın gelecekteki davranış tahmin edilir. “Digital twin” deki varlık ürün, parça veya sistem olabilir (Boshert ve diğ., 2018).

“Digital twin”, nesnelerin özelliklerini ve davranışlarını dijital ortama taşıdığından çok farklı disiplinlere sahiptir. Ayrıca ideal bir “digital twin” oluşturmak için malzeme, mukavemet, sistem mühendisliği gibi bilimlerin yanında Endüstri 4.0 teknolojilerine ihtiyaç duyulur. Dijital varlığın görsel olarak sunulmasında kullanılan “augmented reality” de “digital twin” için önemli teknolojilerden biridir. Şu an pek çok sektör için daha başlangıç aşamasında olan “digital twin”, zamandan, işçilikten,

maliyetten kazanç sağlamaktadır. Bu nedenlerle, gelecekte teknolojilerin gelişmesi, yaygınlaşması ve entegrasyonu daha yaygın, kapsamlı ve etkin bir şekilde kullanılması beklenmektedir.

“Industry 4.0” mı? “Production 4.0” mı?

Bilindiği gibi endüstri hizmet ve üretim olarak iki temel alana bölünmektedir. En sık kullanılan bigramların içinde “manufacturing” ve “production” kelimeleri bulunmalarına rağmen İngilizcede hizmet faaliyetleri için kullanılan “service” kelimesini içeren bigramların, ilk yüz içinde yer almamaları bu alanda bir eksiklik olabileceğini düşündürmektedir. Ancak makalelere tek tek bakıldığında tedarik zincirindeki taşıma işlemleri için “Logistic 4.0” (Barreto ve diğ., 2017), sağlık bakım hizmetleri için “Healthcare 4.0” (Aceto ve diğ., 2020) çalışmalarını görmekteyiz. Bu makalelerde rastlanmamasına rağmen literatürde “Marketing 4.0”, “Accounting 4.0”, “Tourism 4.0” gibi pek çok hizmet sektörünün sonuna “4.0” eklenerek kullanıldığı görülmektedir. Diğer bir deyişle, üretim yapılan yerlerde tüm prosesler, production veya manufacturing kavramlarıyla açıklanabilirken; hizmete dayalı çalışan işletmelerde, “service” kelimesi çok yaygın olarak kullanılmamakta; hangi hizmete dayalı çalışılıyorsa onunla ilgili adlandırma tercih edilmektedirler. Diğer yandan, Google Book Ngrams Viewer tarafından, başına herhangi bir kelimenin gelebileceğini belirtmek için yıldız işareti konularak “4.0” yazıldığında hizmet sektörüne ait bir “4.0” ile biten herhangi bir bigramın 2020 tarihine kadar görülmemektedir. Bu da hizmet sektörleri için Endüstri 4.0’ın üretim sektörlerinden daha geride olduğunun bir göstergesi olabilir.

SONUÇ

Endüstri 4.0 ile ilgili 2014 tarihinden bu yana en çok atıf almış makalelerdeki bigramlar ve trigramlar sayılarak değerlendirildiğinde, Endüstri 4.0’ın oluşmasını sağlayan önemli teknolojiler rahatlıkla görülebilmektedir. Bu teknolojiler ayrı ayrı adlara sahip olsalar da, aslında etkin bir şekilde kullanılmaları için birbirleri ile entegrasyona ihtiyaç duymaktadır. Örneğin; “industry 4.0” , “cyber physical systems” olmadan, “cyber physical systems” “big data” olmadan, “big data” internet of things” olmadan düşünülemez.

Çalışmada, sıkça kullanılan ve bilinen teknolojilerin yanında, kavram olarak daha yeni gelişmekte olan kavramların olup olmadığı sorgulanmış ve makalelerde diğerlerine göre daha sonra kullanıma başlanmış kavramlar bulunmuştur. Gelecekte kullanımının daha da artması beklenen bu kavramlardan ikisi aslında aynı anlamda kullanılan; kişisel ürünlerin yapılmasına olanak tanıyan, hayallerimizi, kişisel beklentilerimizi, dijital ortamda tasarlayıp fiziksel ortamda sahip olmamıza olanak veren “additive manufacturing” ve “3d printing” dir. Bu kavramlara ait teknolojik gelişmeyle günlük hayatlarda da kullanılan pek çok ürün yerine, ürünü üretmede kullanılan veri satın alınacak ve müşterilerin son dokunuşlarıyla ürün “additive manufacturing” kullanılarak oluşturulabilecektir. Gelecekte, “additive manufacturing” gibi birçok farklı teknolojinin sunduğu nimetlerden faydalanılırken aynı zamanda dünyada gelecek kuşakların yaşam kalitelerinin korunması için mevcut kaynakların çok titiz bir şekilde korunması ve kullanılması gerekecektir. Tıpkı biyolojik yaşam döngüsünde örneklerini gördüğümüz bir çevrim sistemi gibi, bizlerin de endüstriyel ürün ve hizmetlerde enerji, madde, veri döngülerini sağlamamız dünyayı her türlü israftan korumamız gereklidir. Bu da, teknolojik gelişmelerle birlikte üst mercilerin yaptırımlarının da sağlanarak küresel ölçekte oluşturulacak “circular economy” ve “sustainable business” sistemlerinin kurulmasıyla olabilir. Diğer yandan, her varlığın internete bağlanmaya başladığı bu çağda fiziksel varlıkların dijital kopyalarıyla birlikte adlandırıldığı “digital twin” in oluşturulabilmesi; bu varlıkların performansının artmasına ve izlenmesine olanak verecek; bu şekilde “circular economy” nin hedeflediği zaman, malzeme, enerji kayıplarının engellenmesine katkı sağlanacaktır. Gelecekte, dijital ortamda küresel aktörler ve bireysel müşteriler arasında veri paylaşımında gerekli şeffaflık ve izleme sağlanırken kişiye veya şirkete özel verilerin korunması, fikir hırsızlığının engellenmesi, mahremiyetin korunması gibi sebeplerle “cyber security” de önemi artacak konular arasına girmektedir. Küresel rekabet ortamında, endüstrinin tüm dallarında güçlü bir şekilde yer edinebilmek için Endüstri 4.0’ın gerekliliklerinin ve eğilimlerinin iyi okunması ve eksiklerin kapanabilmesi için işletmelerin gereken eğitim ve ar-ge yatırımlarının yapılması gereklidir.

KAYNAKÇA

- Aazam, M., Zeadally, S., & Harras, K. A. (2018). Deploying fog computing in industrial internet of things and industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(10), 4674-4682.
- Aceto, G., Persico, V., & Pescapé, A. (2020). Industry 4.0 and health: Internet of things, big data, and cloud computing for healthcare 4.0. *Journal of Industrial Information Integration*, 18, 100129.
- Almada-Lobo, F. (2015). The Industry 4.0 revolution and the future of manufacturing execution systems (MES). *Journal of innovation management*, 3(4), 16-21.
- Ardito, L., Petruzzelli, A. M., Panniello, U., & Garavelli, A. C. (2019). Towards Industry 4.0. *Business Process Management Journal*.
- Bagheri, B., Yang, S., Kao, H. A., & Lee, J. (2015). Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1622-1627.
- Barreto, L., Amaral, A., & Pereira, T. (2017). Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing*, 13, 1245-1252.
- Baygin, M., Yetis, H., Karakose, M., & Akin, E. (2016, September). An effect analysis of industry 4.0 to higher education. In *2016 15th international conference on information technology based higher education and training (ITHET)* (pp. 1-4). IEEE.
- Bonekamp, L., & Sure, M. (2015). Consequences of Industry 4.0 on human labour and work organisation. *Journal of Business and Media Psychology*, 6(1), 33-40.
- Boschert, S., Heinrich, C., & Rosen, R. (2018, May). Next generation digital twin. In *Proc. tmce* (pp. 209-218). Las Palmas de Gran Canaria, Spai
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International journal of mechanical, industrial science and engineering*, 8(1), 37-44.
- Buer, S. V., Strandhagen, J. O., & Chan, F. T. (2018). The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2924-2940.
- Büchi, G., Cugno, M., & Castagnoli, R. (2020). Smart factory performance and Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 150, 119790.
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204, 383-394.
- Dev, N. K., Shankar, R., & Qaiser, F. H. (2020). Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104583.
- Diez-Olivan, A., Del Ser, J., Galar, D., & Sierra, B. (2019). Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0. *Information Fusion*, 50, 92-111.
- 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.
- Dombrowski, U., & Wagner, T. (2014). Mental strain as field of action in the 4th industrial revolution. *Procedia Cirp*, 17(1), 100-105.
- Drath, R., & Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or hype?[industry forum]. *IEEE industrial electronics magazine*, 8(2), 56-58.
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., & Sihn, W. (2016). Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. *Procedia CiRp*, 54(1), 13-18.
- Faller, C., & Feldmüller, D. (2015). Industry 4.0 learning factory for regional SMEs. *Procedia Cirp*, 32, 88-91.
- Fantini, P., Pinzone, M., & Taisch, M. (2020). Placing the operator at the centre of Industry 4.0 design: Modelling and assessing human activities within cyber-physical systems. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105058.
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26.

- Ganzarain, J., & Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in SME's toward industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9(5), 1119-1128.
- Geissdoerfer, M., Vladimirova, D., & Evans, S. (2018). Sustainable business model innovation: A review. *Journal of cleaner production*, 198, 401-416.
- Haseeb, M., Hussain, H. I., Ślusarczyk, B., & Jermstittiparsert, K. (2019). Industry 4.0: A solution towards technology challenges of sustainable business performance. *Social Sciences*, 8(5), 154.
- Hampson I. Lean Production and the Toyota Production System Or, the Case of the Forgotten Production Concepts. *Economic and Industrial Democracy*. 1999;20(3):369-391.
- Hofmann, E., & Rüsçh, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in industry*, 89, 23-34.
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2019). The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*, 57(3), 829-846.
- Jazdi, N. (2014, May). Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. In *2014 IEEE international conference on automation, quality and testing, robotics* (pp. 1-4). IEEE.
- Kolberg, D., & Zühlke, D. (2015). Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1870-1875.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6(4), 239-242.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3, 18-23.
- Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 18, 20-23.
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941-2962.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of industrial information integration*, 6, 1-10.
- Machado, C. G., Winroth, M. P., & Ribeiro da Silva, E. H. D. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1462-1484.
- Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019). A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 925-953.
- Masood, T., & Egger, J. (2019). Augmented reality in support of Industry 4.0—Implementation challenges and success factors. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 58, 181-195.
- Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo-Giraldo, S., Tobon-Valencia, E., & Eburdy, R. (2020). Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1384-1400.
- Moktadir, M. A., Ali, S. M., Kusi-Sarpong, S., & Shaikh, M. A. A. (2018). Assessing challenges for implementing Industry 4.0: Implications for process safety and environmental protection. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 730-741.
- Mrugalska, B., & Wyrwicka, M. K. (2017). Towards lean production in industry 4.0. *Procedia Engineering*, 182, 466-473.
- Muhuri, P. K., Shukla, A. K., & Abraham, A. (2019). Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview. *Engineering applications of artificial intelligence*, 78, 218-235.
- Nosratabadi, S., Mosavi, A., Shamshirband, S., Kazimieras Zavadskas, E., Rakotonirainy, A., & Chau, K. W. (2019). Sustainable business models: A review. *Sustainability*, 11(6), 1663.
- Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(1), 127-182.
- Popkova, E. G., & Sergi, B. S. (2020). Human capital and AI in industry 4.0. Convergence and divergence in social entrepreneurship in Russia. *Journal of Intellectual Capital*.
- Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *Ieee Access*, 6, 3585-3593.
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond. *Procedia cirp*, 52, 173-178.

- Rajput, S., & Singh, S. P. (2019). Connecting circular economy and industry 4.0. *International Journal of Information Management*, 49, 98-113.
- Rauch, E., Linder, C., & Dallasega, P. (2020). Anthropocentric perspective of production before and within Industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105644.
- Reischauer, G. (2018). Industry 4.0 as policy-driven discourse to institutionalize innovation systems in manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 26-33.
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A complex view of industry 4.0. *Sage Open*, 6(2), 2158244016653987.
- Rodič, B. (2017). Industry 4.0 and the new simulation modelling paradigm. *Organizacija*, 50(3), 193-207.
- Rojko, A. (2017). Industry 4.0 concept: background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*, 11(5), 77-90.
- Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. P. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9(3), 811-833.
- Santos, M. Y., e Sá, J. O., Andrade, C., Lima, F. V., Costa, E., Costa, C., ... & Galvão, J. (2017). A big data system supporting bosch braga industry 4.0 strategy. *International Journal of Information Management*, 37(6), 750-760.
- Schlechtendahl, J., Keinert, M., Kretschmer, F., Lechler, A., & Verl, A. (2015). Making existing production systems Industry 4.0-ready. *Production Engineering*, 9(1), 143-148.
- Schuh, G., Potente, T., Varandani, R., & Schmitz, T. (2014). Global Footprint Design based on genetic algorithms—An “Industry 4.0” perspective. *CIRP Annals*, 63(1), 433-436.
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia Cirp*, 52(1), 161-166.
- Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014, December). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. In *2014 IEEE international conference on industrial engineering and engineering management* (pp. 697-701). IEEE.
- Ślusarczyk, B. (2018). Industry 4.0: Are we ready?. *Polish Journal of Management Studies*, 17.
- Sommer, L. (2015). Industrial revolution-industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution?. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(5), 1512-1532.
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *Procedia Cirp*, 40, 536-541.
- Strange, R., & Zucchella, A. (2017). Industry 4.0, global value chains and international business. *Multinational Business Review*.
- Sung, T. K. (2018). Industry 4.0: a Korea perspective. *Technological forecasting and social change*, 132, 40-45.
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). What does industry 4.0 mean to supply chain?. *Procedia Manufacturing*, 13, 1175-1182.
- Tortorella, G. L., & Fettermann, D. (2018). Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2975-2987.
- Tseng, M. L., Tan, R. R., Chiu, A. S., Chien, C. F., & Kuo, T. C. (2018). Circular economy meets industry 4.0: Can big data drive industrial symbiosis?. *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 146-147.
- Tupa, J., Simota, J., & Steiner, F. (2017). Aspects of risk management implementation for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 1223-1230.
- Ungurean, I., Gaitan, N. C., & Gaitan, V. G. (2014, May). An IoT architecture for things from industrial environment. In *2014 10th International Conference on Communications (COMM)* (pp. 1-4). IEEE.
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0—a glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233-238.

- Varghese, A., & Tandur, D. (2014, November). Wireless requirements and challenges in Industry 4.0. In *2014 International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)* (pp. 634-638). IEEE.
- Wan, J., Tang, S., Shu, Z., Li, D., Wang, S., Imran, M., & Vasilakos, A. V. (2016). Software-defined industrial internet of things in the context of industry 4.0. *IEEE Sensors Journal*, *16*(20), 7373-7380.
- Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., & Zhang, C. (2016). Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*, *101*, 158-168.
- Wilkesmann, M., & Wilkesmann, U. (2018). Industry 4.0—organizing routines or innovations?. *VINE Journal of Information and Knowledge Management Systems*.
- Xu, L. D., & Duan, L. (2019). Big data for cyber physical systems in industry 4.0: a survey. *Enterprise Information Systems*, *13*(2), 148-169.
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, *56*(8), 2941-2962.
- Zheng, P., Sang, Z., Zhong, R. Y., Liu, Y., Liu, C., Mubarak, K., ... & Xu, X. (2018). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering*, *13*(2), 137-150.
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering*, *3*(5), 616-630.
- Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015, August). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In *2015 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD)* (pp. 2147-2152). IEEE.