



## The role of MAS interoperability for IoT applications: A survey on recent advances in manufacturing systems

Banu Çalış Uslu\*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Marmara University, Istanbul, 34854, Türkiye

### Highlights:

- Agent, Multi-Agent Systems (MAS) and Internet of Things (IoT)
- Interoperability of IoT applications via MAS
- Current practical applications of MAS cooperation in manufacturing systems

### Keywords:

- IoT
- Multi-agent system
- Interoperability
- Cooperation
- Manufacturing system

### Article Info:

Research Article

Received: 28.05.2021

Accepted: 10.04.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.944264

### Correspondence:

Author: Banu Çalış Uslu

e-mail:

bcalis@marmara.edu.tr

phone: +90 216 777 3645

### Graphical/Tabular Abstract

Multi-Agent Systems (MAS) make it possible to perceive, collect, share, consolidate and revise information from multiple smart devices through the design of smart objects as agents within the Internet of Things (IoT) systems. The generic agent architecture in MASs is illustrated in Figure A. Although MASs and related tools significantly change the paradigms used in systems optimization, the existing literature on MAS is not sufficient to explain modern distributed computing methods describing enhanced collaboration of IoT devices. This article presents comprehensive research that explains how smart objects such as sensors, smartphones, and data centers in IoT affect the system's performance if they are integrated with MAS technology.



Figure A. The generic agent architecture in MASs

**Purpose:** This research explores the technical, semantic, syntactic, and platform interoperability infrastructures between smart objects and the advantages that MASs will provide in increasing the system's performance if integrated with IoT technology. In order to do that, integration is analyzed with centralized and decentralized control approaches under a five-tier IoT infrastructure. In addition, due to their competitive nature and need to react quickly to market experiences and represent distributed systems very well, MAS interoperability applications have been analyzed in the manufacturing sector.

**Theory and Methods:** Within the scope of the research, the following keywords were used in different combinations to reach the related studies in the literature; IoT, MAS, interoperability, cooperation, manufacturing systems, optimization, advantages, networking, disadvantages, issues, challenges.

**Results:** Depending on the findings obtained from the research, it has been revealed that multi-agent systems can be integrated into each layer of the IoT and in this way, it can increase the effectiveness of IoT in many areas from information security to efficient use of energy, from routing to increase system efficiency.

**Conclusion:** The Internet of Things (IoT) can be defined as a network of billions of hardware devices connected to the Internet and communicating with each other. In this network, the autonomous communication nature of MAS through message exchange forms the basis of interoperability in IoT systems. It has been proven that intelligent agents can make better decisions in very complex situations, act as flexible as possible, and prevent information abuse with their excellent communication skills. Based on these features, MAS optimizes the production process and improves production planning and control for enhanced profitability and competitive advantage. The findings will guide researchers, designers, and managers working on IoT and MAS.



## IoT uygulamalarında çok etmenli sistemlerin (MAS) birlikte çalışabilirliğinin rolü: Üretim sistemlerindeki son gelişmeler üzerine bir araştırma

Banu Çalış Uslu\*<sup>ID</sup>

Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Etmen, Çok Etmenli Sistemler (MAS) ve Nesnelerin İnterneti (IoT)
- IoT uygulamalarının birlikte çalışabilirliği ve MAS
- Üretim sistemlerinde MAS iş birliğinin güncel pratik uygulamaları

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 28.05.2021

Kabul: 10.04.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.944264

### Anahtar Kelimeler:

IoT,  
MAS,  
birlikte çalışabilirlik,  
iş birliği,  
üretim sistemleri

### ÖZ

Çok Etmenli Sistemler (MAS), Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamaları içerisinde, akıllı nesnelerin etmenler (agent) olarak tasarlanması aracılığıyla birden çok akıllı cihazdan bilgilerin algılamasını, toplamasını, paylaşmasını, pekiştirilmesini ve revize edilmesini mümkün kılmaktadır. Çok etmenli sistemler ve ilgili araçlar, sistemlerin optimizasyonunda kullanılan paradigmlar için önemli değişikliklere katkıda bulunmakla birlikte, MAS hakkındaki mevcut literatür, IoT cihazlarının gelişmiş iş birliğini açıklayan modern dağıtılmış hesaplama yöntemlerini açıklamak için yeterli düzeyde değildir. Bu makale, IoT içerisinde yer alan, sensörler, akıllı telefonlar ve bilgi işlem merkezleri gibi akıllı nesnelerin, MAS teknolojisiyle entegre edilmeleri durumunda, sistemin performansına nasıl etki edeceğini açıklayan kapsamlı bir araştırma sunmaktadır. Bu kapsamda öncelikle, MAS ve IoT teknolojileri hakkında genel bir bilgilendirilme, MAS'ler içerisinde birlikte çalışabilirliğin önemi ve üretim sistemleri özelinde çoklu etmen teknolojisinin, sensör verilerini yakalamadan karar vermeye kadar çeşitli amaçlarla nasıl kullanılabileceği açıklanmıştır. Sonrasında, IoT sistemlerinde, akıllı nesnelerin birbirleriyle iletişim ve etkileşimini sağlayacak, teknik, anlamsal, sözdizimsel ve platform iş birlikteliği yaklaşımları ve MAS'lerin bu iş birlikteliklerinin kurulmasına nasıl katkı sağlayabileceği ifade edilmiştir. Son olarak, üretim sektörü özelinde, etmen tabanlı iş birliği modellerinin, merkeziyetçi ve merkeziyetçi olmayan yaklaşımla sistemin performansını nasıl etkilediği sunulmuştur. Araştırma, çok etmenli sistemlerin IoT'nin her bir katmanına entegre edilebileceğini ve bu yolla, bilgi güvenliğinden, enerjinin etkin kullanımına, rotalamadan sistem verimliliğinin artırılmasına kadar birçok alanda, IoT'nin etkinliğini arttırabileceğini ortaya koymuştur.

## The role of MAS interoperability for IoT applications: A survey on recent advances in manufacturing systems

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

- Agent, Multi-Agent Systems (MAS) and Internet of Things (IoT)
- Interoperability of IoT applications via MAS
- Current practical applications of MAS interoperability in manufacturing systems

### Article Info

Research Article

Received: 28.05.2021

Accepted: 10.04.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.944264

### Keywords:

IoT,  
MAS,  
interoperability,  
cooperation,  
manufacturing systems

### ABSTRACT

Multi-Agent Systems (MAS) make it possible to perceive, collect, share, consolidate and revise information from multiple smart devices through the design of smart objects within the Internet of Things (IoT) systems. Although multi-agent systems and related tools significantly change the paradigms used in systems optimization, the existing literature on MAS is not sufficient to explain modern distributed computing methods describing enhanced collaboration of IoT devices. This article presents comprehensive research that explains how smart objects such as sensors, smartphones, and data centers in IoT will affect the system's performance if they are integrated with MAS technology. In this context, general information about MAS and IoT technologies, the importance of interoperability in MAS, and how multi-agent technology can be used for various purposes, from capturing sensor data to decision making, specific to manufacturing systems, are explained. Afterward, technical, semantic, syntactic, and platform interoperability approaches that will enable communication and interaction of smart objects in IoT systems and how MAS can contribute to the establishment of these collaborations are expressed. Finally, it is presented how agent-based interoperability models affect the system's performance with a centralized and decentralized approach, specific to the manufacturing sector. The research has revealed that multi-agent systems can be integrated into each layer of the IoT, and in this way, it can increase the effectiveness of IoT in many areas from information security to efficient use of energy, from routing to increase system efficiency.

## 1. Giriş (Introduction)

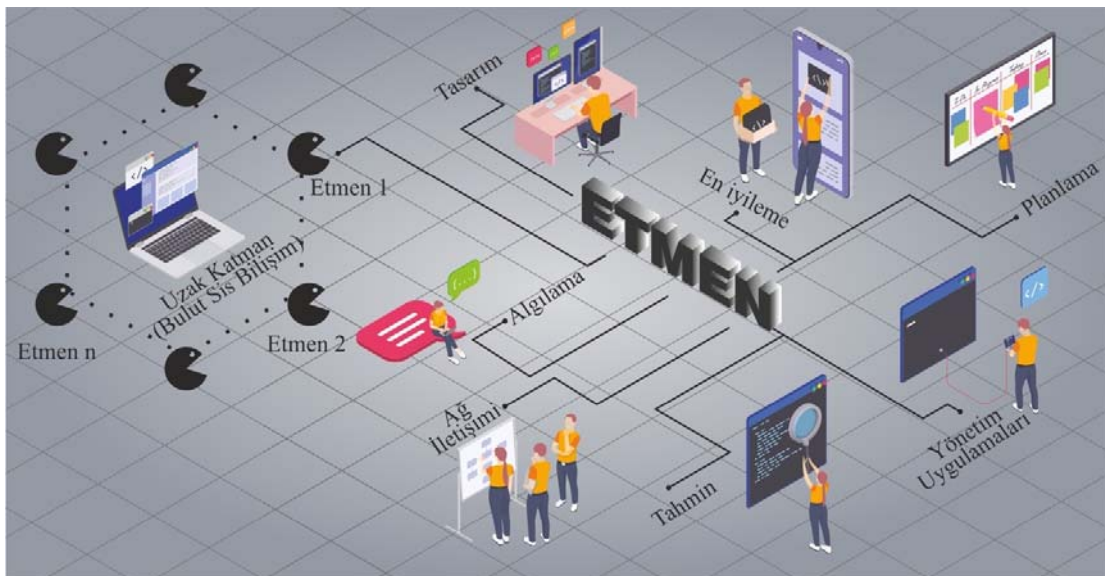
Nesnelerin İnterneti (IoT), internet aracılığıyla birbirine bağlı farklı nesnelerin, dünya çapındaki ağını kullanarak, gerçek dünyayı geliştirmek ve kontrol etmek için kullanılan modern bir teknolojidir [1]. İnternete bağlı milyarlarca akıllı nesneyi / cihazı ifade eder [2]. Bu akıllı nesnelere, kuruldukları ağ içerisinde meydana gelen talepleri / sorunları / değişiklikleri tespit edip, takip edebilir ve elde edilen verileri karar destek sistemlerine ileterek hızlı ve doğru bir şekilde dinamik çözümler sunabilirler. Bu dinamik çözümler, farklı noktalarda bulunan karar destek sistemlerinin iş birliği ve iletişiminin akıllı nesnelere aracılığı ile sağlanması ile mümkündür [3]. Akıllı nesnelere, sensörler aracılığıyla tespit ettikleri durum değişimlerini veya toplanan verileri, ağ katmanı aracılığı ile diğer nesnelere ve karar destek sistemlerine ileterek, sistemin, bu verilerden anlamlı bilgiler üretebilmesini sağlarlar ve bunu sağlayabilmek için sistemin teknik, anlamsal, sözdizimsel ve platform iş birliği altyapılarını kullanırlar [4]. Özellikle sistemler dağıtık, çok karmaşık ve oldukça çeşitli olduğunda, bu altyapı iyi kurulmuş iş birliği prosedürlerine ihtiyaç duyar. Etmen tabanlı (agent-based) teknoloji, kendi kendine organize olan özellikleri ve esnek niteliklerinin yanı sıra, bilgi işleme yeteneklerinin de katkısı ile bu tür iş birlikteliği kanallarının oluşturulmasını sağlar veya destekler.

Zeki etmenlere dayalı modellerin kullanımı, otomatik karar verme kabiliyetine sahip yapıların tasarlanmasında ve operasyonel uygulamalarda, popülerliğini gün geçtikçe artırmaktadır. Etmenler, bağımsız çalışabilen, ilgili olayları yönetebilen ve bu olaylara bağlı problemlere karşılık gelen sorunlara, mümkün olan en iyi çözümü üretebilen, bilgisayar tabanlı sistemlerdir [5]. Çok Etmenli Sistemler (MAS) ise, birçok farklı akıllı etmen etkileşimlerini içeren bilgisayarlı bir ortamda [6], bağımsız olarak çalışabilen otomatik sistemler olarak tanımlanabilir [7].

Şekil 1'de, MAS'ler içerisindeki jenerik etmen mimarisini gösterilmektedir. Sunulan mimari, MAS içerisinde yer alan her bir etmen 1'den n'ye kadar olmak üzere bir pack-man ile resmedilmiştir. Pack-manlar arasına yerleştirilen kesikli noktalar, yerel ağda (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRa, gibi), etmenlerin iş birliği ve koordinasyonunu (iş birliği ve koordinasyon türleri hakkında detaylı bilgi için lütfen 2. Bölümü inceleyiniz) temsil etmektedir. Pack-

manlar ağına ortasına yerleştirilen dizüstü bilgisayar, MAS'lerin bulut bilişim, sis bilişim gibi uzak servislerle entegrasyonunu ve bu yolla sistemin ölçeklenebilirliğinin (scalability) ve hata toleransı (fault-tolerance) gibi performans parametrelerinin etkinleştirilmesini temsil etmektedir (Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'de detaylı olarak sunulmuştur.). Bu entegrasyon, çok etmenli dağıtılmış sistemlerin tasarımına izin vererek sadece verileri toplanması, depolanması, işlenmesi ve sistem kullanıcıları tarafından kolaylıkla erişilebilmesini değil, aynı zamanda sistem hedefleri doğrultusunda aktifleştirilmiş küresel optimizasyon teknolojileri ile daha hızlı, daha etkin ve gerçek zamanlı sistemlerin geliştirilebilmesini ve enerji verimliliğinin artırılmasını mümkün kılmaktadır [8, 9]. MAS'ler içerisindeki spesifik bir etmen (Şekil 1 içerisinde Etmen 1 olarak gösterilmiştir), bir veya birkaç tanımlanan görevi (Algılama, Planlama, Tasarım, Optimizasyon gibi) yerine getirmekten sorumlu olabilir, statik (tanımlandığı node da, diğer etmenlerden veya çevrelerinden algıladıkları bilgilere bağlı olarak, sadece kendi durumlarını (state) etkileyebilen) veya dinamik (sistemden veya statik etmenlerden gelen bilgi ve taleplere bağlı olarak sistem içerisinde hareket edebilen ve rotası bu isteklere bağlı olarak oluşan mobil etmenlerdir). Bunun için FIPA tarafından geliştirilen Simple Migration Protocol gibi platformları kullanarak [10] verileri işleyebilir ve aynı zamanda benzer veya farklı etmenlerle paylaşabilirler.

*Mimari içerisinde etmen davranışının modellenmesi:* Modelleme, etmenin bireysel davranışının, çok etmenli bir yapı içerisinde tanımlanan bir grup etmenin davranışının ve hem tekil bir etmenin hem de bir dizi etmenden oluşan bir grup etmenlerinin davranışının belirlenmesi ve performansının ölçülmesini temsil etmektedir. Bu davranışlar, etmenlerin koordinasyonunun sağlanmasına dayanmaktadır ve bunun için yaygın olarak iki yaklaşımdan biri benimsenmektedir. Bunlar; merkezileştirilmiş bir kontrol ve dağıtılmış bir kontrol (merkeziyetçi olmayan) yaklaşımlardır. Merkezi yaklaşım içerisinde, etmenler arasındaki bilgi alışverişi, bir kontrol etmeni tarafından koordine edilir ve bu yolla çatışmaların önlenmesi sağlanır. Bu yaklaşımda, tanımlanan küresel bir merkezi istasyon, MAS içerisinde gerçekleştirilen tüm operasyonlara ilişkin hesaplamaları ve kontrolleri tanımlamak ve yönetmekten sorumludur. Bu nedenle bellek kapasitesi, iş ve hesaplama yükü açısından büyük kapasite gereksinimlerine ihtiyaç duymaktadır. Merkeziyetçi olmayan yaklaşımda ise bir aracı etmeni tasarlanır, merkezi bir kontrol etmeni



Şekil 1. MAS'lerde jenerik etmen mimarisini (The generic agent architecture in MASs).

yoktur bunun yerine tüm önlemler ve kontroller farklı birçok yerel merkezde gerçekleştirilir. Aracı etmen kaynak istekleri arasındaki çakışmaları önlemekten sorumludur. Aşağıdan yukarıya bir yaklaşım (bottom-up approach) kullanılarak tasarlanabilen bu sistemler, [11] verileri, yukarıdan aşağı kontrole tabi olmayan bireysel kişiselleştirilmiş etkileşim yoluyla paylaşabilme yeteneğine sahiptir [12]. Bu yetenekleri sayesinde, IoT sistemi içerisinde, bileşenlerinin konumlarını, hareketlerini ve etkileşimlerini takip edebilir, gerekli aksiyonların alınmasını sağlayabilecek şekilde birçok akıllı nesne ile entegre edebilir [13] ve akıllı nesnelerin birlikte çalışabilirliği artırmak için kullanılabilirler [14].

Her iki yaklaşım içinde (Merkeziyetçi ve Merkeziyetçi olmayan) en önemli unsur etmenler arasında uzlaşmanın nasıl sağlanacağıdır. Uzlaşma etmenler arasında bilgi alışverişinde, bir etmenin bir başka etmeden bilgileri kabul etmesini sağlayan bir iletişim protokolünü temsil eder. Bu durum literatürde koordinasyon kontrol problemi olarak adlandırılır [15]. Koordinasyon kontrolün sağlanabilmesi için etmenler arasında öncelik (priority) ve nedensellik (causality) unsurlarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Öncelik, etmenler grubu içerisinde, bir lider etmenin tanımlanıp tanımlanmayacağını temsil etmektedir. Lider etmen, diğer etmenlerin uzlaşma esnasında ortak davranışlarını belirleyen ve ilgili talimatları sağlayacak olan etmendir. MAS içerisinde, yerel bilgiler tüm etmenler tarafından kullanılabilirlikle birlikte, lider etmenin diğer etmenlerden gelen bilgileri sınırlayan komut oluşturucu bir görevi vardır ve bu yolla her bir etmenin lider etmene erişimi sınırlandırılmaktadır. Literatürde önceliklendirme ile etmenler arasında koordinasyonun sağlandığı birçok araştırma mevcuttur [16-18].

Önceliklendirmenin daha iyi anlaşılabilmesi için graf teorisini kısaca hatırlayalım [18-21]. Bu teori ile etmenler arası iletişim bir graf (graph) ile tanımlanır  $[G(V, E, W)]$ . Bu graf içerisinde her bir düğüm (node) bir etmeni temsil etmektedir [node seti:  $V = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_{M-1}, i_M\}$ ]. Eğer bir  $i$  etmeni ile bir  $j$  etmeni arasında bilgi alışverişi mümkünse, bu bilgi alışverişi bir kenar (edge) ile temsil edilir [kenar seti:  $E \subseteq V \times V$ ]. Lider etmenin tanımlandığı önceliklendirilmiş bir grafa, etmenlerin iletişim topolojisi, yönlendirilmiş kenarlar (directed edge: often called arcs) ile temsil edilirken, önceliklendirmenin olmadığı graflarda etmenlerin iletişim topolojisi yönlendirilmemiş bir kenar (edge) ile temsil edilmektedir. Yönlendirilmiş graf içerisinde lideri takip eden etmenler arasındaki iletişim ( $i_1$  düğümünden  $i_m$  düğümüne bilgi alışverişi) hala yönlendirilmemiş kenarlar (undirected graph) ile ifade edilirken, mesajları diğer tüm etmenlere yönlendiren en az bir lider etmen (node) mevcuttur. Lider etmen basitçe komşusu olmayan etmen olarak tanımlanır, takipçi etmenler ise en az bir komşuya sahiptir. Graf için, ağırlıklı komşuluk matrisi gerçek sayılar kümesinde  $W = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{M \times M}$  ile tanımlanır ve burada kenar setinin elemanı olan her bir ikili için matris elemanının değeri 0'dan büyükken  $[(i, j) \in E \Leftrightarrow a_{ij} > 0]$  aksi durumlarda matris elemanı sıfıra eşittir  $[a_{ij} = 0]$ . Oluşturulan grafa ait Laplace matrisi ise  $L = (l_{ij}) \in \mathbb{R}$  olarak tanımlanır, öyleki  $i \neq j$  için  $l_{ij} = -a_{ij}$  ve  $\sum_{j=1}^M a_{ij}$  dir. Yönlendirilmiş grafa yol (path), başlangıç düğümünden bitiş düğümüne sıralı kenarların dizisi ile ifade edilir ( $i_1$  düğümünden  $i_m$  düğümüne yönlendirilmiş bir yol:  $[(i_1, i_2), (i_2, i_3), \dots, (i_{M-1}, i_M)]$ ).  $G^-$  grafiği sabittir lider ile tüm takipçilerin iletişim topolojisini tanımlar. Önceliklendirmenin olmadığı durumlarda graf yönsüzdür,  $L$  simetrik pozitif yarı tanımlıdır. Önceliklendirmenin olduğu, lider etmeni takip eden etmenlerin olduğu durumunda ise, lider düğüm 0, takipçi düğümler ise  $1_M$  ile ifade edilir. Ağırlık matrisi  $H = L + D \in \mathbb{R}^{M \times M}$ ,  $G^-$  grafının topolojisini tanımlar. Burada  $D = \text{diag}(a_{i0}, \dots, a_{M0})$  her bir takipçi düğümün, lider ile iletişiminde, eğer bu iletişime izin verilmişse (state availability) 0'dan büyük ( $a_{i0} > 0$ ) bu duruma izin verilmemiş ise 0 ( $a_{i0} = 0$ ) değerini alır. Etmenler arasında nedenselliğin (causality) tanımlanmasında ise [22-25], yönlendirilmiş bir grafa, yönlendirilmiş bir kenarın (directed edge: arc) başlangıç

noktası düğümünü "ana düğüm" (parent), bitiş düğümü ise "alt düğüm" (child) olarak adlandırır. Her bir düğüm noktası şartlı olasılık dağılımı tablosuna (conditional probability table -CPT) sahiptir [26]. Öyle ki bu tablo spesifik bir düğümün, kendisi ile tüm ana düğümler arasındaki bağımlılık ilişkilerini nicelleştirebilmeyi sağlar. Yarı zamanlı bir markovian model (causal Bayesian network olarak adlandırılır) bazı değişkenlerin gözlemlenebilir, bazılarınsa gözlemlenemediği durumu temsil eder. Peralı [27] tarafından olasılıksal bir nedenselliği ölçmek için önerilmiştir. Model, gözlemlenebilen değişkenler setini  $V$ , gözlemlenemeyen değişkenler setini  $U$  ile göstermektedir. Nedensellik grafi  $G_{vu}$  ( $V \times U$  cinsinden değişkenlerden oluşan) olarak ifade edilmektedir.  $P(v_i | pa_i u_i)$ , gözlemlenebilen değişkenlerin ( $V_i$ ), onun ana düğümdeki olasılık fonksiyonuna  $P(A_i)$  ve onu etkileyen gözlemlenemeyen değişkenlerin ( $U_i$ ) değerine bağlı olasılık fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Bu tahminleme ( $P(v_i | pa_i u_i)$ ), meydana gelen olayların fiziksel çevreleri ile olan ilişkilerini ve bu çevreye olan etkilerini göstermektedir.  $X$  node seti olmak üzere,  $X_i, X_j$  için ancak eğer  $X_i$ 'den  $X_j$ 'ye yönlendirilmiş bir yol (nedensel bir yol) varsa nedensel bir anlam dilim içerir, yani  $X_i, X_j$  için bir potansiyel nedenidir. Ve bu şekilde model  $M = \langle VUG_{vu}, P(v_i | pa_i u_i) \rangle$  olarak ifade edilmiş olur.  $U = \emptyset$  yani gözlemlenemeyen ya da gözlemlenemeyen bir değişken olmadığında, Markovian nedensel model elde edilmiş olur. Nedensellik, özellikle etmene çıkarım (inference) mekanizmasının (tahmin, müdahale, gözlem gibi) tanımlanabilmesi için oldukça önemlidir.

Muscalagiu vd. [28], MAS'leri, sorunları tek tek etmenlerin yeteneklerinin ötesinde ele almak ve çözmek için birlikte çalışan, yazılım sistemlerinin entegre bir ağı olarak tanımlamıştır. Bu ağ içerisinde;

1. MAS'ler, bir entegre etmenler ağında, hesaplama becerilerinin dağıtımı sağlarlar [29]. Entegrasyon, hesaplama kaynaklarını merkezden uzaklaştırırken, sistemlerin merkezileştirme problemlerinden ve başarısızlıklarından kaçınılmasına da yardımcı olurlar [30].
2. MAS'ler, birden fazla etmenin birbirine bağlanması ve birlikte çalışmasına izin vererek, etmenlerin problem çözme yeteneğinin geliştirilmesine yardımcı olurlar [31, 32].
3. MAS'ler, planlama, görevlerin tahsisi ve kullanıcı tercihlerini tanımlamayı teşvik eden bireysel etmenlerin etkileşimini, özerk bir şekilde sağlayarak sistemin değişikliklerine dinamik olarak uyum sağlayabilmesine yardımcı olurlar [33].
4. MAS'ler, tanımlanan sorunlar için, bileşen-etmenler arasındaki etkileşimlere dayalı olarak verileri alır ve analiz eder [33] ve mekânsal olarak dağıtılmış bilgi ve verileri koordine ederek sorunların daha hızlı çözümlenmesine yardımcı olurlar [34].
5. MAS'ler, oluşturulan etmenler ağında, belirli bir sorunu ele alırken aynı zamanda da faydayı teşvik etmek için, bireysel kapasitelerinin yanı sıra, birbirleri ile etkileşime girebilme yeteneğine sahiptir. Bu etkileşim sayesinde, ortak veya çelişkili bir hedefe ulaşmak için, iş birliği yapabilirler [35-38].
6. MAS'ler, düşük iletişim ve hesaplama gereksinimlerine sahiptir, yani sistem boyutunda neredeyse hiçbir kısıtlama yoktur ve bu özellikleri ile, iş birlikteliği, hesaplama verimliliği, sağlamlık, güvenilirlik, esneklik ve sürdürülebilirlik ile ilgili, sistemin genel performansının geliştirilmesine yardımcı olurlar [39].

Ayrıca etmenlerin, özellikle karmaşık sistemlerde kullanıldığında, ortam zekâsı yoluyla özerkliği sağladığı dikkate alındığında, IoT'nin ihtiyaç duyduğu ortam zekâsının ve yaygın bilgi işlem ağının oluşturulmasında [40, 41], akıllı nesnelerin bilgiyi özgürce paylaşabilmelerinde ve ihtiyaç duyduklarında farklı bilgisayar sistemlerine bağlanarak iletişim kurabilmelerinde, önemli avantajlar sunacağı oldukça açık bir şekilde görülmektedir [42, 43]. Bunun bir

sonucu olarak, literatürde, sağlık hizmetleri, akıllı evlerde konfor yönetimi, akıllı şehirlerin kamu hizmetleri, atık toplama ve yönetiminden üretimin çizelgenmesine kadar birçok alanda, MAS teknolojisi ile geliştirilmiş IoT sistemleri geniş bir fiziksel uygulama yelpazesini sahiptir [44-47].

Üretim sektörü oldukça rekabetçidir ve üreticiler harcamaları azaltırken performansı en üst düzeye çıkarmaya odaklanmaktadır [48, 49]. Bu nedenle, gelecekteki üretim sistemlerinin mobil olduğu kadar giderek daha dinamik ve esnek sistemler olması beklenmektedir. Üreticilerin, birden çok üretim kısıtlamasını aynı anda dengeleyerek ve optimize ederek, değişen koşullara hızla yanıt verebilmeleri de gerekmektedir. MAS'ler, üretim sistemlerinde, makine arızaları, üretimin özelleştirilmesi ve optimum üretimi desteklemek için geliştirilen modeller ile popülerlik kazanmıştır [50, 51]. Ciorte vd. [52] ve Coroiu [53] MAS'lerin otonom karar verme ve mevcut üretim süreçlerinin verimliliğini artırarak üretim sistemlerini optimize etmeye yardımcı olduğunu vurgulamışlardır. Bunun yanı sıra sipariş işleme, ürün tasarımı, mühendislik analizi, süreç planlama, üretim planlama ve çizelgeleme, simülasyon, kontrol ve yürütme gibi birçok fonksiyonun tasarlanması ve modellenmesinde araştırmacılar çok etmenli sistemlerden faydalanmışlardır. Teknolojideki ilerlemeler ile birlikte, MAS'ın, IoT sistemlerine entegrasyonunu içeren araştırmalar da gün geçtikçe daha fazla artmıştır. 2016-2021 yılları arasındaki çalışmalar "IoT" ve "MAS" anahtar kelimeleri ile Google akademikte listelendiğinde; 2016 yılında 3.083, 2017 yılında 6.190, 2018 yılında 8.540, 2019 yılında 11.900, 2020 yılında 15.000 ve 2021 yılında 19.400 farklı çalışmanın literatüre kazandırıldığı gözlemlenmiştir. Yıllara göre araştırma sayılarındaki bu artış trendi, MAS'ın IoT sistemleri içerisindeki akıllı nesnelerin birlikte çalışabilirliğini daha etkin bir hale getirerek, sistemlerin performansını arttırmadan kaynaklandığı düşünülmektedir [54]. IoT uygulamalarının birlikte çalışabilirliği; Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRa, SIGFOX gibi farklı standart ve protokollere sahip IoT teknolojileri ya da daha üst düzey IoT teknolojilerinin bir uygulamada ya da bir kuruluştaki birlikte nasıl çalışacağı ile ilgilidir. Bu kapsamda literatürde yer alan çalışmaların bazıları şöyledir; Calveresi vd. [14] MAS'ın, IoT ve Siber-Fiziksel Sistemlerin (CPS) ihtiyaç duyduğu zekâ, özerklik ve gerçek zamanlı davranış gibi özellikleri sağlamak için yaygın olarak kullanılan teknolojik paradigmalardan biri olduğunu ifade etmişlerdir. Bu yaygın kullanımın başlıca nedeni veri setlerinin ve veri akışlarının gömülü IoT cihazlarında bağımsız olarak yapılandırılabilmesi ve bu yolla IoT ve CPS sistemlerinin ihtiyaç duyduğu özerklik ve de heterojenlik ile başa çıkmayı mümkün kılmasıdır [55]. MAS'lerin IoT ile entegrasyonunu ele alan bir diğer araştırma [56] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, etmenleri dağıtılmış bir sistem mimarisi içerisinde tanımlayarak, makinelerden verilerin verimli bir şekilde toplanabildiği ve sistemde meydana gelen anormalliklere sistemin otonom olarak cevap verebildiği merkezi bulut tabanlı bir model önermişlerdir ve bu modelle IIoT'de (endüstriyel nesnelerin interneti), sistem durumunun ve tehlikeli eylemlerin izlenebilmesinin mümkün olduğunu göstermişlerdir. Cagnin vd. [57], IoT içerisinde otonom cihazların iş birliğini sağlamak için MAS ve semantic web teknolojilerini kullanarak bir mimari geliştirilmiştir. Sunulan mimaride otonom yapı ontolojiler aracılığı ile sağlanarak, simülasyon yöntemiyle test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak yazarlar, geliştirilen mimarinin, adaptasyon, yeni özelliklerin eklenmesi ve esnekliğe olanak sağladığını göstermişlerdir. Yapılan bu araştırmalar ile birlikte MAS'ın IoT entegrasyonu ile elde edilen performans artışı araştırmacıları bu kapsamda daha derin araştırmalar yapmaya sevk edecektir. 2022 Mart ayı itibarı ile bu artış ivmesi tekrar kontrol edildiğinde, son üç ay içerisinde artan 4.640 farklı yeni araştırma literatüre kazandırıldığı gözlemlenmiştir ve bu artış trendini devam edeceğini açıkça görmektedir. Bu nedenle, bu makale kapsamında sunulan araştırma, gerçekleştirilecek yeni araştırmalara yol gösterici olacaktır. İlave olarak, literatürde, MAS ve IoT'yi ayrı ayrı ele alan

ve bu teknolojilerin entegrasyonu ile geliştirilmiş birçok farklı uygulama yer almakla birlikte, MAS'lerin, gömülü IoT cihazlarının birlikte çalışabilirliğine sağlamış olduğu katkıya işaret eden bir araştırmaya da rastlanmamıştır. Oysaki nesnelerin interneti alt yapısının geliştirilmesindeki en temel sorunlardan biri bu akıllı nesnelerin birlikte çalışmasının sağlanabilmesidir. Literatürdeki bu açığı kapatmak için, son 10 yıl içerisinde yapılan araştırmalar, aşağıda yer alan üç araştırma sorusuna (AS) cevap vermek üzere detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

*AS1:* Etmen tabanlı sistemlerin yıllar içerisinde gelişimine bağlı olarak, IoT içerisinde (gömülü IoT cihazları) nasıl kullanılabileceğinin ve entegre edilebileceğinin araştırılması. Bu araştırma sorusuna cevap vermenin, literatürdeki bu alandaki eksikliğin kapatılmasına ve bu alanda yapılmış araştırmalara hızlı bir şekilde erişilmesine olanak sunarak yeni katkılar üretilmesine destek olması beklenmektedir.

*AS2:* Akıllı nesnelerin birbirleri ve ağa bağlanmak için ihtiyaç duydukları iş birliği türlerinin ve MAS'lerin bu iş birlikteliği altyapılarını ne ölçüde desteklediğinin araştırılması. Bu araştırma sorusuna cevap vermenin, MAS'lerin, akıllı nesneler arasında kurulması gereken iş birliği alt yapılarını, etmenlerin hangi özellikleri ile ve ne ölçüde desteklediğini ortaya çıkararak, yeni çalışmalarını tetikleme ve yeni çalışmalara yol gösterici olması beklenmektedir.

*AS3:* Üretim sektörü özelinde, MAS'ler ile geliştirilen modellerde, merkezi ve merkezi olmayan iş birlikteliği altyapılarına bağlı uygulamalardan elde edilebilecek kazanımların neler olduğunun araştırılması. Bu araştırma sorusuna cevap vermenin, üretim sektörü özelinde geliştirilecek IoT sistemlerinde, MAS'ın uygulanabilirliğini göstererek, öne çıkarması ve bu alanda yeni uygulamalar geliştirilmesine yol gösterici olması beklenmektedir.

Bu makale dört ana kısımdan oluşmaktadır. İkinci bölümde, etmen, çok etmenli sistemler ve nesnelerin interneti hakkında genel bilgiler sunulmuş ve MAS'lerin IoT ile entegrasyonu açıklanmıştır. Bu entegrasyon sonucunda IoT'nin her bir katmanında MAS'lerin kullanımı ile sağlanacak avantajlar Tablo 1, Tablo2 ve Tablo 3 de sunulmuştur. Üçüncü bölümde, MAS'lere dayalı iş birliği yaklaşımları, üretim sektörü özelinde analiz edilmiştir. Araştırmadan elde edilen bulgular ve sonuçlar dördüncü bölümde tartışılmıştır.

## 2. Mas, Iot ve Birlikte Çalışabilirlik (Mas, Iot snd Interoperability)

Yaygın bilgi işlem (pervasive computing or ubiquitous computing), zekânın, fiziksel nesnelerle etkileşime giren, insanların günlük olarak kullandıkları şeylerin veya nesnelerin içine, fark edilemeyecek veya bu tür nesnelerle etkileşim düzeyini minimum da tutacak şekilde yerleştirilmesini içermektedir [58]. Bu yaygın bilgi işlem sistemleri bir iletişim ve ağ bağlantısı teknolojisi ile desteklenmekte [59] ve nesnelerin birbirleriyle iletişim kurarken insanlarla etkileşimlerini yaygın bir şekilde güçlendirmektedir [60]. IoT yaklaşımı, akıllı cihazların çevrelerinde olup biteni algılayabilmeleri, ağ içerisinde yer alan diğer nesnelere ile gerekli iletişimi kurabilmeleri ve gerektiğinde insanlarla etkileşime girebilmelerini sağlayacak kapsamlı bir entegrasyon altyapısına sahiptir. Bu entegrasyon altyapısında, yaygın bilgi işlem ile birlikte ortam zekasının (Ambient Intelligence) günlük nesnelere, ihtiyaçlara göre uyarlanarak mikro elektronik işlemciler ve sensörler aracılığı ile entegre edilerek kullanılmasını desteklemekte ve bu yolla elde edilen minyatürleştirilmiş modern bilgi aracılığı ile ortam zekasına öğrenme yeteneğinin kazandırılmasını sağlamaktadır [60].

Bu akıllı varlıklar donanım ya da yazılım ortamında hayata geçirilebilen, özerk bir ortamda veya proaktif olarak çalışabilme potansiyeline sahip, duyarlı, algılayabilen ve cevap verebilen akıllı nesnelere (SOs) olarak tasarlanmaktadır [61]. Bu yolla sistemlerin, daha güvenilir ve daha verimli şekilde tasarlanabilmesini sağlamaktadır [62]. Çok sayıda ve birbirine entegre akıllı nesnelere oluşan IoT mimarisinin benzersizliği, IoT konseptinin en ayırt edici özelliğidir ve bunun nedeni, IoT'nin verileri paylaşma potansiyeli, büyük ölçekli etkileşim geliştirebilme yeteneği ve bunun için gerekli olan zekaya sahip olmasıdır [63,64]. Bu mimari içerisinde, sensörler aracılığı ile toplanan veriler, bir ağ bağlantısı ve bağlantı protokolleri aracılığıyla, uzaktan servis sağlayıcılarına (bulut bilişim-cloud computing, uç/kenar bilişim-edge computing gibi) iletilir ve burada depolanması sağlanır. Bilgi katmanında bu veriler, veri analitiği yoluyla anlamlı bilgilere dönüştürülür ve uygulama katmanı yoluyla son kullanıcıya sunulur [65]. IoT içerisindeki veri paylaşım kalitesi, bilgiyi paylaşan iki internet bağlantılı cihazı tanımlarken [66], zekâ, IoT'nin verileri işleme ve farklı komutları geliştirmek için verilerin kullanılma şeklini düzenleme becerisini ifade eder [2]. Burada veri paylaşımındaki en önemli noktalardan biri, IoT'nin nesnelere geniş ölçekte bağlama (large scale) yeteneğine sahip olmasıdır.

IoT, mimarisi itibari ile basit ve dolayısıyla dinamik bir yapıdadır [6]. Beş katmanlı bir IoT mimarisi [67]; algılama, ağ iletişimi, uzak servis sağlayıcıları, bilgi ve uygulama katmanlarından oluşmaktadır (Şekil 2). IoT mimarisi içerisinde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta; mimarinin, aşağıdan yukarıya yaklaşımı kullanılarak inşa edilmiş olmasıdır. Bu yaklaşımda, algılama katmanı, RFID ve diğer sensörler gibi algılama teknolojileri aracılığıyla, bağlantılı nesnelere verilerin toplandığı katman olarak açıklanabilir [68]. Ağ iletişimi katmanı ile, algılanan verilerin yerel ağ veya internet kullanılarak diğer nesnelere ve uzak servis sağlayıcıları ile paylaşılması sağlanır. Ağ katmanı ile elde edilen veriler, uzak servis katmanında, uzaktan hesaplama teknolojisi ile depolanır ve IoT sistemindeki bilgi katmanına iletilir. Bilgi katmanında, veriler akıllı karar verme ve analiz yöntemleri ile anlamlı bilgilere dönüştürülür. Uygulama katmanında ise, işlenen veriler kullanıcılar veya diğer uygulama sistemleriyle paylaşılır [67].

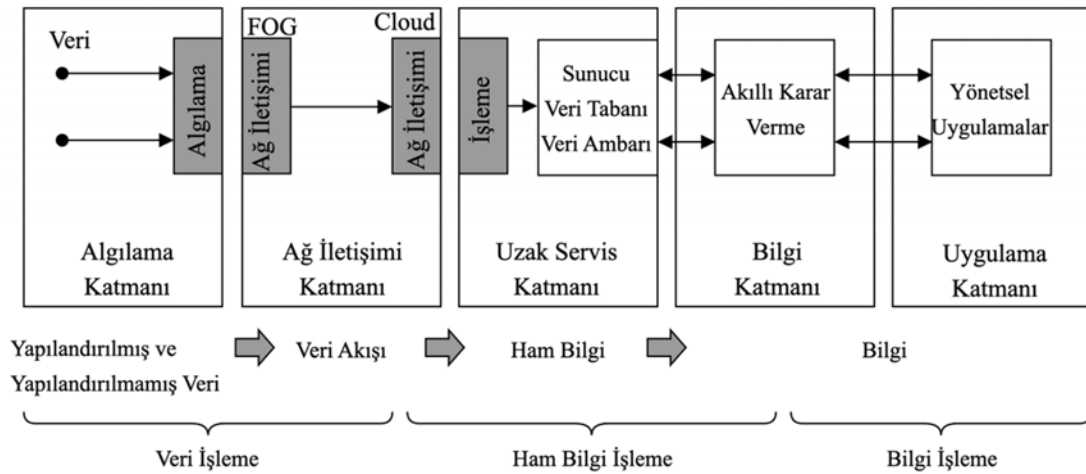
Farklı üreticiler tarafından, farklı teknik özelliklerde, kendi cihaz tanımlama ve güvenlik sistemlerine dayalı olarak geliştirilmiş IoT sistemleri içerisindeki akıllı nesnelere ve bunların oluşturduğu farklı IoT sistemlerinin, birbirleriyle etkileşim ve iletişim kurma yeteneği, birlikte çalışabilirlik (iş birliği) olarak tanımlanmaktadır [69-71]. Bu iş birliği, her bir bileşeni (heterojen cihazlar veya sistem), mevcut internet altyapısı aracılığıyla bir araya getirerek, diğer platformlarda

yer alan bileşenlerle iletişim kurabilmesini, farklı kullanıcı ve/veya uygulama sistemlerine ve sunucularına etkili veri aktarımı ile güvenli bir bilgi alışverişi sunabilmesini amaçlamaktadır [72-75]. Heterojen IoT ağında nesnelere birlikte etkin bir şekilde çalışabilmeleri için gerekli dört temel iş birliği altyapısı aşağıda listelenmiştir:

1. *Teknik birlikte çalışabilirlik (Technical interoperability)*: İletişim protokolleri aracılığıyla, makineler ve/veya kullanıcıların birlikte ve etkin bir şekilde çalışabilmeleri için gerekli olan, donanım veya yazılım bileşenleri ve mesaj transferi ile iletişim sağlayan alt yapının kurulmasını temsil eder [76-78]. Java Etmen Geliştirme Platformu (JADE), Akıllı Python Çoklu-Etmen Geliştirme Ortamı (SPADE) gibi platformlar aracılığı etmen tabanlı teknoloji, akıllı nesnelere arasında oluşturulmak istenen mesaj aktarımını sağlayabilme yeteneğine sahiptir [79].

Bu platformlar arasında en yaygın olarak kullanılan, FIPA uyumlu olan Self-StarMas sistemidir. Bu sistem, IoT uygulamalarının geliştirilmesine yardımcı olabilecek temel etmen teknolojilerinin uyarlamalarına ve uzantısına dayanmaktadır [80]. Self-StarMAS sisteminin iki temel ayırt edici özelliği bulunmaktadır [81]. Birincisi, Self-StarMAS sistemi, hafif cihazlar için oluşturulmuş bir dizi farklı işbirlikçi özerk etmeden oluşur [82], ikincisi ise, çeşitli hafif cihazlarda çalışan bu etmenlerin Self-StarMAS araçları için tanımlanmış aracı tabanlı bir ara yazılımda (agent-based middleware) uygulanabilir olması ve platformun FIPA ile uyumlu olmasıdır [83]. Self StarMAS etmenlerinin farklı versiyonları vardır ve bunlar farklı türleri sunan bir ara yazılımdır ve iletişim heterojenliğini desteklemede bir hareket alanı görevi görür [85]. Sol platformunun en kritik özelliği, çok boyutlu veya heterojen bir cihazda etmenlerin iletişimini destekleyebilmesi ve heterojen taşıma protokollerinin yanı sıra grup iletişimleri ve sıklıkla invaziv sistemlerle (istilacı saldırılar-invasive systems) baş edebilmesidir [86]. Bu nedenle, IoT'de MAS geliştirmek için hem MAS Sol hem de Self-StarMAS platform teknolojileri kullanılabilir.

2. *Anlamsal birlikte çalışabilirlik (Semantic interoperability)*: Heterojen IoT cihazları tarafından üretilen ve toplanan farklı formatlardaki mesaj içeriklerinin, ontoloji ve bilgi temsili yoluyla tüm



Şekil 2. Beş katmanlı IoT mimarisi (The five-layer architecture of IoT) [67].



yerleştirilmiş akıllı senör içerisine yerleştirilmiş statik etmen, montajı tamamlanmış ürünleri kaydetmek, montaj hattı duraklamaları meydana geldiğinde, bakım etmenine iletecek talimatları hazırlamaktan ve montaj hattına ilişkin raporları hazırlamaktan sorumludur. Burada toplanan veriler yönetim etmenine raporlanmaktadır. Cep telefonu ve bilgisayar içerisine yerleştirilmiş statik etmenler grafiksel bir arayüz aracılığıyla kullanıcıların MAS ile etkileşimini sağlamaktan sorumludur. Bilgi katmanına yerleştirilmiş (şekil de iki masa üstü bilgisayar olarak resmedilmiştir) statik etmenler grubu, akıllı karar destek sistemini temsil etmektedir. Etmenler burada, toplanan verilerin anlamlı bilgilere dönüştürülmesinden (veri madenciliği, matematiksel modeller, karar ağaçları gibi ilgili zekâ algoritmaları ile) sorumludur. Mimari içerisinde mobil etmenler, Heterojen IoT ağı içerisinde, WSN'lerde, JADE, SPADE ve JASON gibi platformlar aracılığı ile, mesaj aktarımına olanak sunar. Bu yola, akıllı nesnelere arasında kurulması gereken teknik iş birliğine katkı sağlar. Sistem içerisinde paylaşılan bilgilerin tüm etmenler tarafından anlaşılabilir olması sağlanması için gerekli ontoloji ve semantic (yukarıda açıklanmıştır) hem static hem de mobil etmenler içerisinde tanımlanmalıdır. Kuşkusuz böyle bir üretim çevresini tümüyle otonom ve MAS ile entegre tabanlı geliştirmek için sayısız etmen tanımlanması gerekmektedir. Şekil 3 ile sunulan mimari okuyucular için genel bir perspektif sunmaktadır.

Bu mimari içerisinde tanımlanması gereken en önemli unsur ise mobil etmenin nasıl davranacağını tanımlanmasıdır. Burada kastedilen, mobil etmenin, temel olarak bir lider etmen gibi davranarak, sorumlu olduğu etmenler/aygıtlar (agent/device) arasındaki nedensellik ilişkisine bağlı olarak nasıl bir yol izleyeceğinin kodlanmasıdır. Örneğin [105]; etmen node seti  $V = (i_1, i_2, i_3, \dots, i_{M-1}, i_M)$ , mobil etmenin rotası için tanımlanacak aygıt seti  $D_i$  olmak üzere, her bir aygıtta kontrol edilecek nesne setini  $N = (N_{i1}, N_{i2}, N_{i3}, \dots, N_{iM-1}, N_{iM})$  olarak tanımlayalım.  $D_i$  aygıtından  $O_i$  nesnesinin alınması için gerekli olan,  $D_{i-1}$  aygıtından  $D_i$  aygıtına,  $K$  istasyonundan yönetilen mobil etmenin hareketini, kontrol edilecek nesne ile birlikte  $\{D_{i-1} D_i : O_i\}$  ile ifade ederiz. Bu durumda mobil etmenin yolu (EY) şu şekilde tanımlamak mümkündür.  $EY = \{K, D_1 : O_1, \langle D_1, D_2 : O_2 \rangle, \dots, \langle D_{k-1}, D_k : O_k \rangle\}$ . Bu şekilde bir modelde olayların sıralı bir şekilde gerçekleştiği gözden kaçırılmamalıdır. Aksi durumda yol farklı şekilde tasarlanabilir.

MAS'lerin, IoT içerisindeki her bir katmanda alabileceği roller ve sağlayabilecekleri avantajları daha detaylı ifade edebilmek için Tablo 1, Tablo2 ve Tablo 3 oluşturularak detaylı bir analiz sunulmuştur. Kuşkusuz optimize edilmek istenen her bir parametre (güvenlik, enerji tasarrufu, verimlilik gibi) için akıllı nesnelere birlikte çalışması gerekmektedir ve etmen tabanlı teknolojinin bu konuda çok önemli bir katkı sağladığı, incelenen literatürde açıkça her bir katmanda gözlemlenmiş ve tabloda listelenmiştir. Bu iş birliği ve etkileşiminde Kablosuz Sensör Ağları (WSN'ler), veri alışverişinin sağlanmasında, IoT sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan, otonom cihazlar aracılığı ile ölçümlerin gerçekleştirerek elde edilen verileri algılanmasını ve depolanmasını sağlayabilen, sensörler ile donatılmış ve birbirleri arasında iletişim kurabilme yeteneğine sahip olan, çok sekmeli bir ağ sistemidir. WSN'ler, kablosuz aktüatörler ve düğümlerden oluşan enerji kısıtlatmalı sensörlerin yanı sıra kendi kendine organize edilerek dağıtımı yoluyla oluşturulmaktadır. İzleme noktasından belirli uygulamalar için gerekli bilgileri toplarlar ve böylece izleme sisteminin performansını iyileştirirler ve böylelikle maliyetin azaltılmasını sağlar. WSN'lerin birincil işlevi, gerekli bilgileri kendi görüş alanlarından (Field of View) toplamaktır. Toplanan veriler, Baz İstasyonuna (BS: Base Station) taşınır, böylece üzerlerinde ekstra işlem yapılabilmesini veya farklı bir amaçların gerçekleştirilebilmesi mümkün kılınır. WSN'lerde MAS uygulanması iki şekilde avantaj sağlamaktadır;

- i. İlk avantaj, MAS'lerin, işlenmiş veri kodunun izleme alanından verileri de algılayan kablosuz sensör konumuna iletilmesi yoluyla bant genişliği tüketiminin azaltılmasından sorumlu olmasıdır. Bu durum, WSN sensör düğümleri tarafından önemli miktarda veri algılandığında ve böylece havuza taşındığında bant genişliği kullanımında iyileştirmeler sağlar ve böylece etkinliği artırır.
- ii. İkinci avantaj ise, MAS'ın WSN'lerde iş birliğine dayalı veri işlemeyi kolaylaştırarak yüksek bir esneklik derecesi sunmasıdır. Bu avantajlar sayesinde, MAS uygulamaları, verilerin bir alandan diğerine hareketini geliştirmek için WSN'lerde rahatlıkla çalışabilmektedirler. WSN'lerdeki MAS uygulamaları, mobil hedeflerin hareket paradigmasını izlemek için yapılan hedef izleme için kullanılabilir ve süreçte azaltılmış gecikme ile havuza rapor verebilirler. Sağlık sistemlerinde, kablosuz vücut alanı ağı (WBAN'lar) ve sağlık hizmetleri uzaktan izleme sistemleri bu kapsamda geliştirilmiş uygulamalardır. Bunlar insan vücudunda kullanılan akıllı tıbbi cihazlardır. MAS'ı kendi kendine uyarlanabilen WSN'lerde kullanmak, akıllı tıbbi cihazların işlevlerini yerine getirmesi için iyi bir çerçeve sunacaktır.

Tablo 3'e ilave olarak, etmen tabanlı teknoloji aracılığı ile çözüm üretilebilen diğer iş birliği yaklaşımları da mevcuttur. Bunlardan bazıları; 1. Heterojen iletişim ara yüzlerini destekleyen IoT cihazlarında, farklı domainlerdeki farklı platformların birlikte çalışabilirliği (Cross-domain interoperability) [14]. 2. Paylaşılan mesajların güvenli ve hatasız şekilde iletilmesini sağlamak üzere fonksiyonların birlikte çalışabilirliği (Functional semantics interoperability) [106] ve 3. Süreç içerisinde ve sonrasında üretilen bilginin etkin bir şekilde paylaşılması ve kullanılmasını sağlamak üzere bilgi iş birliği (Information interoperability) [76, 107] olarak sıralanabilir.

### 3. Mas, İmalat Sistemleri ve Birlikte Çalışabilirlik (Mas, Manufacturing Systems and Interoperability)

Çok etmenli sistemlerde iş birliği, yapay zekâ araştırmalarının erken dönemlerinde, 1980'lerde gelişmeye başlamıştır [149]. İlk olarak, yapay zekâ için tekli etmenlerin hesaplama yeteneğinden faydalanılırken, sonrasında yapay zekâ alanındaki araştırmalar ilerledikçe, tek etmen paradigması, üretim ve robotik gibi alanlarda daha fazla kullanım elde etmek için bir değişikliğe ihtiyaç duymuş ve bu durum çok etmenli sistemler üzerindeki araştırmaların sayısını arttırmıştır [150-152]. Bu yeni araştırmalar, etmenlerin her birinin, problemlerin çözümü için diğer etmenler ile iş birliği yapacak ve iletişim kuracak şekilde tasarlanabilmesini [153, 154] ve bu da daha verimli sistemler elde edilebilmesini sağlamıştır [155, 156]. Üreticiler, ürün ve hizmetleri sağlamanın daha verimli yollarını araştırmasının bir sonucu olarak, yapay zeka teknolojisinde birçok farklı alanda kullanılmak üzere gelişme gösteren MAS'ler [154, 157-159] dinamik performansın değerlendirilmesi, üretim süreçlerinin optimizasyonu, üretim kontrolü, pazarlama, sağlık hizmetleri, bilgi yönetimi ve oyun dahil olmak üzere bir çok alanda, özellikle takviyeli öğrenme etmenlerini (reinforcement learning agent) içeren bir çok uygulamada, günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır [160-163]. Bu yaklaşımda, tekrarlanan etkileşim yoluyla, etmen, öğrenilen stratejiye dayalı olarak en yüksek ödüllü kazanacak şekilde tasarlanır. Deneme yanılma prosedürüne dayalı olarak geliştirilen tek pekiştirmeli öğrenme aracı yaklaşımı literatürde elde edilen başarıların çoğunluğunu açıklasa da [164, 165] gerçek hayat problemlerinin yüksek karmaşıklığı nedeniyle, karmaşık problemleri modelleme ve çözüme ile baş edemedi gözlemlenmiştir [166, 167]. Çok etmenli takviyeli öğrenme, etmenlerin arasında iş birliği sağlamak için merkezi veya ademi merkeziyetçi olarak tasarlanabilir. Merkezi bir yaklaşım, bir bulut yardımıyla beklenen ödüllü en üst düzeye çıkaracak ortak eylemler kullanılır, ancak bu yaklaşımda, her bir etmenin genel başarıya katkısı görmek zordur [166].



MAS yaklaşımı, üretim sürecinin amaçlanan çıktılarına, hedeflerine ve amacına dayalı olarak üretim sistemlerine entegre edilmiştir [168]. MAS, belirli etkileşim ağı rollerine sahip farklı veya benzer etmenlerden geliştirilebilir [169, 170]. Glavic'e [168] göre MAS iş birliği, literatürdeki tipolojilerin tutarsızlığı nedeniyle belirsizdir. Burada esas, MAS'ın tanımlanan sınıflandırmaları ve tipolojisi arasındaki önemli farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Örneğin, Zhang vd. [171], sistemlerin ana kategorileri olarak, bağımsız ve iş birliğine dayalı MAS olarak ele alırken, diğer araştırmacılar MAS'ı merkezi ve merkeziyetçi olmayan sistemler olarak kategorize etmişlerdir [172, 173]. Bu çalışmada, literatürde üretim sistemleri üzerine gerçekleştirilen araştırmalar, merkezi ve merkeziyetçi olmayan MAS türlerini değerlendirilmiş ve tanımlanan MAS türleri koordinatör etmenlerin varlığına dayandırılmıştır.

Sujil vd. [174], merkezi MAS'leri, tek bir etmenin diğer etmenleri koordine ettiği sistemler olarak ele almıştır. Merkezi bir MAS'de, etmen koordinatörü diğer etmenleri kontrol edebilmekte ve bilgi akışına rehberlik edebilmektedir [175]. Bu durumda merkezileştirme kavramı, bir etmenin diğer etmenleri yönetmek için kullanılması olarak açıklanabilir. Esasen, etmenler, diğer etmenler ile doğrudan iletişim kurmadan koordinasyon aracısından bilgi iletmek zorundadır [174, 175]. Bazı merkezi mimarilerde, merkezi bir sistem, koordinatör ile diğer etmenler arasındaki iletişimi yönetmektedir [175]. Merkezileştirilmiş MAS'ların bir kolaylaştırıcı ve arabulucu etmenleri vardır [176]. Etmenler, koordinasyon veya iş birliği etmeni [177] aracılığıyla birbirleriyle etkileşim halindedir. Kolaylaştırıcı etmen, merkezi bir sistem oluşturan diğer etmenler arasındaki iletişimi yöneten programa atıfta bulunmaktadır [178]. Kolaylaştırıcının MAS faaliyetlerini düzenlerken içerdiği bilgilere dayalı olarak etmenler arasında iletişimi kanallandırmada önemli bir sorumluluğu vardır [179, 180]. Kolaylaştırıcının aksine, arabulucu, çıkmazları

önlemek ve zamanında kararlara aracılık etmek için düşük düzeyli karar almaya odaklanmaktadır [178, 179]. Diğer yandan, merkeziyetçi olmayan MAS, merkezi kontrolün veya koordinatörün nasıl bulunmadığını açıklar [181, 182]. Merkezi sistemlerden farklı olarak, merkezi olmayan MAS, üretim sistemi boyunca iletişim kurabilen, etkileşim kurabilen ve kararları bildirebilen araçlardan oluşmaktadır [183, 184]. Merkezi olmayan sistem, ağda alt görevleri gerçekleştiren ve birlikte kararlar alan bir grup aracı oluşturur [185, 186]. Merkezi kontrole sahip etmenlerin aksine, merkezi olmayan sistem, birden fazla etmenin üretim sistemindeki görevlere ve karar verme sürecine katkıda bulunmasını sağlayarak sistemin verimliliğinin artırılmasına katkı sağlar [181, 187, 188]. Bununla birlikte, her iki sistem de üretim sistemindeki birden fazla etmenin etkileşimini içermektedir.

Tablo 4'de yer alan araştırmalara bağlı olarak, etmen tabanlı teknolojinin kullanımının çeşitli geleneksel üretim işlevlerine göre farklı faydalar sağladığı görülmektedir. Literatürde, akıllı etmen tabanlı teknolojinin kayıtsız üretim fonksiyonlarını kullanan sayısız çalışma olduğu görülmektedir. Bu araştırmaların önemli bir çoğunluğunun çizelgeleme, süreç planlama ve üretim sistemlerinin kontrolü üzerine olduğunu gözlenmiş olmasına rağmen, sadece birkaçının gerçek üretim ortamlarında uygulandığı gözlemlenmiştir. Bu programlarda, karmaşık etkileşimlerin, etmen tabanlı modelleme ve simülasyonu (ABMS), yazılım geliştirmede bir paradigma değişikliğini oluştururken [189], aynı zamanda, ABMS yaklaşımının, yalnızca karar/amaç odaklı alternatifleri analiz etme yeteneği sunması ile değil, aynı zamanda kullanıcı ve uygulayıcıların sosyal davranışını ve bireysel karar vermeyi modelleme olanağı sunması yönü ile yapay zekâ (AI) alanında da bir yazılım devriminin ortaya çıkmasını sağlamıştır [190-192]. Bu dönüşüm, birden fazla etmenin birlikte çalışmasına olanak sunan, çok etmenli sistemlere (MAS) duyulan ihtiyacın da artmasına yol açmıştır [193, 194]. IoT ağları için

**Tablo 1.** MAS'lerin, IoT katmanlarındaki uygulamaları ve katkı sundukları performans parametreleri- algılama ve network katmanları (Applications of MASs in the IoT layers and the performance parameters they contribute – perceive an networking layers)

IoT Katmanı	MAS'ın IoT İçerisindeki Uygulamaları	Katkı sunduğu IoT Parametreleri	Referanslar
Algılama Katmanı	IoT algılama katmanı, çok sayıda birbirinden bağımsız algılama cihazından oluşur. Bu cihazlar gerçek zamanlı olarak birçok veri üretir. Bu verilerin tamamının IoT sistemine yüklenmesi, veri iletim miktarının artmasına neden olur. Zeki etmenler WSN'lerde, yalnızca kaynak düğümlerde ham verilerin yerel olarak işlenmesini sağlar. Bu yolla, yalnızca ilgili bilgilerin çıkarılmasına ve iletilmesine izin vererek, akıllı nesnelere arasında gerekli veri iletim miktarının ve maliyetinin azaltılmasına sağlar.	Maliyet, Karmaşıklık, Hizmet Olarak Yazılım (SaaS), Hizmet Kalitesi (QoS)	[104,105,108-110]
	Güvenlik ve gizlilik, IoT algılama katmanının en önemli sorunları içerisinde yer almaktadır. Zeki etmenler, bir operasyon için çağırıldıklarında, kimlik doğrulaması, yetkilendirme ve sertifika doğrulaması yapılarak kontrolünü sağlar. Bu yolla güvenlik ve gizliliğin sağlandığı bir ortamda, akıllı cihazların birlikte ve sürekli bir şekilde çalışmasına katkı sağlar.	Güvenlik, Gizlilik, Süreklilik, Hizmet Olarak Yazılım (SaaS), Hizmet olarak altyapı (IaaS)	[111]
	MAS'ler, farklı türlerdeki etmenlerin iletişimlerini sağlayarak, farklı türlerdeki görevlerin yerine getirilebilmesine olanak sağlar. Bu yolla, WSN'lerdeki düğümlerin yeniden kodlanması ihtiyacı ortadan kaldırılabilir, IoT sistemindeki yerel bellek ve işlemci üzerindeki sınırlılıklara çözüm üretirken aynı zamanda da enerji tasarrufu yapılmasına katkı sağlar.	Depolama, Süreklilik, Karmaşıklık, Enerji Tasarrufu, Hizmet Olarak Yazılım (SaaS), Hizmet Kalitesi (QoS)	[112-115]
Network Katmanı	IoT içerisinde, verilerin algılanması gömülü aygıtlar tarafından yapılmaktadır. Bu aygıtların sadece verilerin algılanmasında ve toplanmasında kullanılması etkin bir yaklaşım değildir. Zeki etmenler, bu aygıtları, bilgileri algılayabilmeye ilave olarak, elde edilen bilgileri depolayabilme, işleyebilme, yorumlayabilme ve ağ oluşturabilme yeteneğine sahip hale getirerek, sensörlerin kullanımını optimize edilmesine katkı sağlar.	Sensör Kullanım Optimizasyonu, Aktivite Tasarımı, Yerinde İşleme, Karmaşıklık	[116,117]
	Zeki etmenler, IoT içerisinde yer alan WSN'lerde, toplanan tüm verilerin baz istasyonuna aktarılması ihtiyacını, yerel işleme yeteği ile ortadan kaldırır. Bu yolla, mesaj trafiğinin azaltılmasına, sensörlerin pil seviyesinin optimize edilmesine ve enerji tasarrufu yapılmasına olanak sağlar.	Enerji Tasarrufu, Karmaşıklık, Rotolama, Büyük Ölçek,	[116,118]
	Zeki etmenler, IoT içerisinde yer alan akıllı nesnelere içerisinde gömülü yazılımlardır ve insan müdahalesi olmadan, otonom bir şekilde görevleri yerine getirebilecek zekaya sahiptir. Bu yolla WSN'lerde network trafiği ve yoğunluğunda azaltma sağlar.	Karmaşıklık, Rotolama, Büyük Ölçek, Enerji Tasarrufu,	[120,121]

karmaşıklıkla azaltılması ve daha yüksek bir güvenilirlik oluşturulmasının gerek ve önemi düşünüldüğünde [195], ABMS'nin sağlayacağı katkı oldukça açıktır.

#### 4. Tartışmalar (Discussions)

Bu makalede sunulan araştırma, IoT ağlarında yer alan sensörler, akıllı telefonlar ve veri merkezleri gibi akıllı nesnelere iletişimi ve etkileşiminde MAS'ler ile entegrasyonu araştırmıştır. Bunun için öncelikle etmen teknolojisi, çok etmenli sistemler ve nesnelere interneti teknolojisi hakkında genel bir bilgilendirme sunulmuş,

sonrasında MAS'lerin, IoT ağlarındaki akıllı nesnelere arasındaki iş birliğini hangi yönleri ile desteklediğini açıklamak için, IoT katmanlarında MAS uygulamalarını inceleyen Tablo 1 oluşturulmuştur. Tablo 1 aracılığı ile elde edilen en önemli bulgulara bağlı olarak, MAS'lerin IoT'nin her bir katmanına entegre edilebileceği ve bu yolla, güvenlikten enerji tasarrufuna, rotalamadan verimliliğin artırılmasına kadar birçok IoT performansı kriterinin etmen tabanlı yaklaşımın etkinliği artırabileceğini görülmüştür.

Üretim sektörü özelinde MAS tabanlı iş birliği modelleri incelenmiş ve burada, merkeziyetçi ve merkeziyetçi olmayan yaklaşım ile

**Tablo 2.** MAS'lerin, IoT katmanlarındaki uygulamaları ve katkı sundukları performans parametreleri – network ve uzak katmanlar (Applications of MASs in the IoT layers and the performance parameters they contribute - networking and remote service layers)

IoT Katmanı	MAS'ın IoT İçerisindeki Uygulamaları	Katkı sunduğu IoT Parametreleri	Referanslar
Network Katmanı	IoT içerisindeki akıllı nesnelere arasındaki ağın güvenliği ve gizliliği (security and privacy), IoT'nin en temel sorunlarından biridir. Etmen tabanlı Saldırı Tespit Sistemi (IDS) MAS'ın en temel olarak geliştirdiği bilinen güvenlik uygulamasıdır. Bu sistemde mobil etmen, sunucu işlemlerini ve iletişimlerini analiz etmek için ağda hareket ederek dinamik olarak (statik etmenler bu yeteneğe sahip değildir, etmenin mobil tasarlanmasını gerektirir) ağ güvenliğinin kontrol eder. Ayrıca proaktif öğrenilme yeteneği ile sürekli zamanda kontrol (monitoring) yeteneği ile ağ güvenliği sağlamada önemli bir katkı sağlar.	Güvenlik, Gizlilik, Kontrol, Süreklilik, Hizmet olarak altyapı (IaaS)	[122-124]
	Heterojen IoT ağı içerisinde, zeki etmenler, WSN'lerde, JADE, SPADE ve JASON gibi platformlar aracılığı ile, mesaj aktarımına olanak sunar. Bu yola, akıllı nesnelere arasında kurulması gereken teknik iş birliğine katkı sağlar	Karmaşıklık, RotoHizmet Olarak Yazılım (SaaS)lama, Büyük Ölçek,	[125,126]
	Heterojen IoT ağı içerisinde, Çoklu etkileşimli otonom etmenler (verilen görevi yerine getirmek, ağ parametrelerini izlemek veya analiz etmek üzere tasarlanmış farklı etmenler), etkin bir network yönetimini kurulmasına katkı sağlarlar	İzleme, Karmaşıklık, Büyük Ölçek, Hizmet Düzeyi Sözleşmesi (SLA), Hizmet Kalitesi (QoS)	[127-129]
	Heterojen IoT ağı içerisinde, WSN'de işbirlikçi bilgi işleminin uygulanmasını kolaylaştırmak için dağıtılmış bilgi işlem paradigmaları gereklidir. Etmen tabanlı sistemleri, birbirleri ile iletişim kurarak dinamik dağıtılmış hesaplama yapabilecekleri ile yük dengeleme (load balancing) maliyetini düşürmeye katkı sağlar.	Yük Dengeleme, Hizmet Düzeyi Sözleşmesi (SLA), Maliyet	[130,131]
	IoT ağı içerisinde, Uzaktan erişim katmanında, zeki etmenler otomatik olarak arama ve karşılaştırma yeteneği ile, çeşitli bulut bilişim platformlarında, hizmetler için otomatik arama ve otomatik entegrasyon sistemi oluşturmaya katkı sağlar	Entegrasyon, Karmaşıklık, Büyük Ölçek, Hizmet Kalitesi (QoS)	[132,133]
	Bulut bilişim ortamlarının başarısını arttırmak ancak verimli yük dengeleme algoritmalarının geliştirilmesi ve gerekli mekanizmaların sağlanması ile mümkündür. İlk başarı kriteri olarak "Verimlilik: birim zamanda tamamlanan işlem" (Throughput) yönüyle incelendiğinde, MAS sağladığı otonom yapı ile sistemdeki yol planlamasını azaltarak verimliliği artırır. MAS Kenar bilişim (edge computing) ile birlikte kullanıldığında ise, bulut bilişime kıyasla performansı %50'nin üzerinde artırılabilir.	Yük dengeleme, Hizmet Kalitesi (QoS), Verimlilik, Maliyet	[134,135]
Uzak Servis Katmanı	Bulun bilişimin ortamlarının ikinci başarı performansı kriteri olarak "cevap süresi: bir görevi yerine getirmek için harcanan süre" (response time) incelendiğinde, zeki etmen tabanlı sistemler, yük durumunu proaktif olarak hesaplama yeteneği ile cevap süresini kısaltır.	Dinamiklik, Cevap Süresi, Hizmet Kalitesi (QoS)	[136,137]
	Bulun bilişimin ortamlarının üçüncü başarı performansı kriteri olarak "maksimum tamamlanma süresi: ağdaki tüm görevlerin tamamlanabilmesi için gereken maksimum süre" (Makespan) incelendiğinde, zeki etmenler otonom önceliklendirme yetenekleri ile, FIFO, WRR ve LS gibi algoritmalar ile kıyaslandığında daha düşük bir makespan elde edilmesini katkı sağlar.	Dinamiklik, Otonomi, Maksimum Süre Minimasyonu, Hizmet Kalitesi (QoS)	[138]
	Bulun bilişimin ortamlarının dördüncü başarı performansı kriteri olarak "enerji tüketimi: Tüm düğümlerin tükettiği enerji miktarı" (energy consumption) incelendiğinde, takviye öğrenme etmenlerinin (reinforcement learning agent) dinamik değerlendirme yeteneğine dayalı tasarlanan dinamik güç yönetim sistemleri, etkin güç ve enerji tüketimi tasarrufuna katkı sağlar.	Enerji Tasarrufu, Dinamiklik, Büyük Ölçek, Hizmet Olarak Yazılım (SaaS), Hizmet Kalitesi (QoS)	[139,140]
	Heterojen IoT ağı içerisinde, MAS, etmen tabanlı bulut bilişim (cloud computing) sistemlerinde, bir ara katman (middle layer) yazılımı ve ağ geçitleri aracılığı ile JADE, MAPS gibi farklı platformlarının sözdizimsel olarak birlikte çalışabilirliğe katkı sağlamaktadır.	Sözdizimsel Birlikte Çalışabilirlik, Büyük Ölçek, Dinamiklik, Hizmet Kalitesi (QoS), Hizmet Olarak Yazılım (SaaS), Etkileşim	[95,96]
İlave olarak heterojen IoT ağı içerisinde yer alan çok sayıda akıllı cihaz tarafından sunulan hizmetler ve müşteriler arasındaki veri akışının güvenliğini ve gizliliğin sağlanması gerekir. Etmenler, bulut bilişimde, deterministik olmayan zaman aralıklarında eylemde bulunabilme, uyarılma ve öğrenme yetenekleri ile anormalliklerin, arızaların, SQL enjeksiyon saldırıları gibi ve güvenli/gizlilik tehditlerinin erken tespit edilebilme olasılığını artırır.	Güvenlik, Arıza Tespiti, Proaktiflik, Süreklilik, Büyük Ölçek, Hizmet Kalitesi (QoS), Hizmet Olarak Yazılım (SaaS), Etkileşim	[122,123] [141,142]	

kurulan iş birliği uygulamalar Tablo 4 de özetlenmiştir. Tablo 4, üretim içerisinde karşı karşıya kalınan birçok problemin çözümünde etmen tabanlı iş birliği yoluyla problem çöme etkinliğinin artırılabilirliğini göstermiştir. Araştırmadan elde edilen diğer bulgular aşağıda listelenmiştir.

- IoT sistemine entegre edilecek çok etmenli sistemler ağı, her biri belirli bir işleve sahip etmenler topluluğunu oluşturur.

Etmenlerin entegrasyonu sayesinde, problem çözme verimliliği artırılmasına, mesaj alışverişi yeteneği ve otonom iletişim yoluyla birlikte çalışabilirliğin temel alt yapılarının oluşturulmasına katkı sağlar.

- MAS'ler çevreyi algılamak, akıl yürütmek ve gerekli aksiyonları üretmek için iyi bir donanıma sahiptir. Bu sayede, zeki etmenlerinin artık çok karmaşık durumlarda daha iyi kararlar verebildikleri, olabildiğince esnek davranabildikleri ve

**Tablo 3.** MAS'lerin, IoT katmanlarındaki uygulamaları ve katkı sundukları performans parametreleri- Bilgi ve uygulama katmanları (Applications of MASs in the IoT layers and the performance parameters they contribute Knowledge and application layers)

IoT Katmanı	MAS'ın IoT İçerisindeki Uygulamaları	Katkı sunduğu IoT Parametreleri	Referanslar
Bilgi Katmanı	Heterojen IoT cihazları tarafından, üretilen ve toplanan farklı formatlardaki mesaj içeriklerinin, ontoloji ve bilgi temsili yoluyla tüm kaynaklarca ortak bir anlama sahip olmalarının sağlanması gerekir. MAS, farklı ontolojilere sahip heterojen sistemler arasında mesajların tercümesini sağlamak üzere FIPA tarafından geliştirilmiş ontoloji etmenini ile akıllı nesnelere arasında anlamsal iş birliklerinin kurulmasına katkı sağlar	Anlamsal Birlikte Çalışabilirlik, Hizmet Olarak Yazılım (SaaS), Hizmet Olarak Altyapı (IaaS), Etkileşim	[77, 87-89]
	Heterojen IoT ağı içerisinde, cihazlar arasındaki etkileşimi yönetmek ve akıllı karar verme yeteneğini geliştirmek, hesaplama zekâsı gerektirmektedir. Makine öğrenmesi kullanan bir dizi etmen (problem için gerekli çözüm elde edildikten sonra, gerekli güncellemeleri yaparak sürekli öğrenme yeteneğine sahip), öğrenme ve karar desteğinin verimliliğini, denetimli veya yarı denetimli öğrenme yöntemleri ile artırmaya katkı sağlar ve toplu hesaplama zekâsı birçok ML algoritmasını destekler.	Öğrenme, Karar Destek Sistemi, Verimlilik, Hizmet Kalitesi (QoS), Hizmet Olarak Yazılım (SaaS)	[77, 143-145]
	Heterojen IoT ağı içerisinde, farklı akıllı nesnelere tarafında, farklı formatlarda (Stings, XML, JSON gibi) üretilen ve toplanan mesajların (yapılandırılmış veya yapılandırılmamış formattaki), çoklu olarak kodlanması ve düşük bant genişliği ağ bağlantıları içerisinde kullanımının sağlanması gerekmektedir. MAS, bu sorunun çözümü için FIPA tarafından geliştirilen Etmen Etkileşim Protokolü Paketi (AIPS) içerisinde, mesaj formatlarını ve kodlamalarını düzenleyerek etmenler arasında mesajların doğru bir şekilde paylaşmasını sağlamak üzere birkaç farklı sözdizimsel protokol aracılığı ile sözdizimsel birlikte çalışabilirliğe katkı sağlamaktadır.	Sözdizimsel Birlikte Çalışabilirlik, Büyük Ölçek, Dinamiklik, Hizmet Kalitesi (QoS), Hizmet Olarak Yazılım (SaaS), Etkileşim	[88,93]
Uygulama Katmanı	IoT ağı içerisinde yer alan çok sayıda kullanıcıya hizmet sunmak (verilere, raporlara yahut operasyonlara ilişkin grafiklere erişmek) üzere geliştirilecek uygulamaların, ortamdaki her bir nesneyi dinamik olarak algılayabilecek ve kontrol edebilecek şekilde tasarlanmaları gerekmektedir. MAS, uyarlanabilir etmenler aracılığı ile, bağ içerisindeki sensörlere ve aktüatörlere erişebilir, bu yolla dinamik olarak nesnelere gelen verileri işleme yeteneği sağlar.	Kontrol, Dinamiklik, Etkileşim, Hizmet-Kalitesi (QoS), Hizmet Olarak Yazılım (SaaS),	[95,146]
	IoT ağı içerisinde, çok sayıda kullanıcı, aynı anda birçok dağıtılmış farklı nesneye erişmek isteyebilir ve bu durumda kullanıcıların doğru bilgilere erişmelerini sağlamak için iyi tanımlanmış kimlik doğrulama, yetkilendirme ve veri teslim prosedürlerine ihtiyaç vardır. MAS, anlamsal iş birliklerini kurmayı sağlayan ontolojiler aracılığı ile her etmenin gelen taleplere uygun olarak politikalar geliştirmesine olanak sunan politika uygulama etmeni kullanır.	Güvenlik, Dinamiklik, Süreklilik, Anlamsal İş birlikteliği, (QoS), Hizmet Olarak Yazılım (SaaS), Etkileşim	[147,148]

**Tablo 4.** MAS üretim uygulamaları ve iş birliği yaklaşımları (MAS manufacturing applications and interoperability approaches in manufacturing systems)

Araştırma	Bulgular	Metot	Anahtar Performans	Merkezi-M / Merkeziyetçi olmayan-MO	Problem Türü
[196]	Yöntem, verimliliği, üretkenliği ve sürdürülebilirliği artırmıştır	Holonik MAS	Zaman ve Maliyet	MO	Üretim kontrol ve çizelgeleme
[197]	CASOA, çoklu ürün görevleri için akıllı, uyarlanabilir ve sağlam üretim sistemleri geliştirmek için kullanılabilir.	Bulut asistan mekanizması	Zaman ve Maliyet	MO	Çizelgeleme
[198]	Önerilen çatı modelin üretim sistemini optimize etmede başarılı olmuştur	Kavramsal Birlikte Çalışabilirlik Düzeyleri Modeli heterojen çok etmenli sistemlere uygulanmaktadır.	Zaman ve Maliyet	MO	Üretim Optimizasyonu
[199]	Statik ve gerçek zamanlı problemler için etkili çizelgeleme elde edildi	Esnek bir montaj hattında RFID özellikli bir MASCS'nin incelenmesi için yeni bir simülasyon test platformu geliştirildi	Zaman	MO	Montaj Hattı Çizelgelemesi
[200]	MARL üretkenliği artırır ve maliyet verimliliği sağlar.	Çok Etmenli Pekiştirmeli Öğrenme (MARL)	Maliyet	M	Kapasite Planlama ve Optimizasyon
[201]	MAS, siber saldırılara karşı güvenli kontrol gerektirir.	MAS'ın güncel uygulamalarını içeren bir tarama	Zaman kalite, güvenlik	MO	Optimizasyon ve Güvenli Kontrol

[202]	Önerilen yöntem, üretim süresi, kritik makine iş yükü ve toplam enerji tüketimi açısından geleneksel dinamik planlama stratejilerinden daha iyi performans gösterir.	Pazarlık oyununa dayalı bir müzakere mekanizması	Zaman ve Maliyet	MO	Çizelgeleme
[203]	MAS, akıllı üretim sistemleri aracılığıyla üretim verimliliğini artırılmasını sağlar.	Akıllı üretim sistemlerindeki son teknoloji ve gelecekteki trendler üzerine bir inceleme	Zaman kalite, maliyet	M ve MO	Akıllı Üretim Sistemleri
[84]	PSO, güvenilirliği ve operasyonel programları en üst düzeye çıkarırken kesinti maliyetlerini en aza indirir.	Parçacık Sürü Optimizasyonu	Maliyet ve Kalite, güvenilirlik	MO	Enerji Yönetimi
[204]	Önerilen yöntem, şirket hedeflerinin entegre bir çerçevede ölçülmesini sağlar.	Hedefe yönelik MAS iş birliği	Zaman, Maliyet ve Kalite	MO	Üretim Kontrol ve Çizelgeleme
[205]	CPS ve DT'ler üretim verimliliğini, zekâyı ve esnekliği artırır.	Siber fiziksel sistemler (CPS) ve dijital ikizler (DT'ler)	Zaman, Kalite ve Maliyet	M	Optimizasyon
[206]	Etkili MAS, üretimde enerji yönetimini iyileştirebilir.	Koordineli dağıtılmış üretim (DG) ve talep yanıtı (DR) yönetimi	Maliyet ve Kalite	MO	Enerji Yönetimi
[207]	WSI-GA ve EPW-LS, kesinti olayları meydana geldikten sonra bile çizelgelemeyi geliştirebilmiştir.	Göstergelerin ağırlıklı toplamı-genetik algoritma (WSI-GA) ve olay odaklı öncelik, yerel aramayı (EPW-LS) ağırlıklandırır	Zaman, Kalite ve Maliyet	MO	Çizelgeleme
[208]	MAS teknolojisi, enerji yönetimini destekler.	Mikro şebeke teknolojileri	Zaman, Kalite ve Maliyet	M ve MO	Üretim Planlama ve Kontrol
[209]	Doğru bir iş birliğine dayalı kontrol stratejisi verimliliği artırır.	Kooperatif kontrol stratejisi	Zaman, Kalite ve Maliyet	MO	Üretim Kontrol ve Optimizasyonu
[210]	MAS, mikro şebeke maliyetlerinin azaltılmasını destekler.	Mikro şebeke teknolojileri	Zaman, Kalite ve Maliyet	MO	Enerji Yönetimi
[211]	MAS'ı dolaylı koordinasyonla entegre etmek performansı artırır.	Karınca kolonisi zekâsı	Zaman, Kalite ve Maliyet	MO	Üretim Kontrol
[212]	RFID özellikli MASCS, sistem performans göstergelerini iyileştirir.	Radyo frekansı tanıma özellikli çoklu etmen planlama ve kontrol sistemi (RFID-enabled MASKS).	Zaman ve Maliyet	MO	Optimizasyon
[213]	Önerilen simülasyon yaklaşımı ile, MAS'ın uygulanmasında maliyetleri ve zamanı azaltacağı gözlemlendi	Simülasyon kontrol sistemi	Zaman ve maliyet	M	Üretim Kontrol
[214]	Enerji yönetiminde oyun teorisi kontrolünün finansal ve operasyon el faydalar sağlayacağı ortaya konulmuştur	Oyun teorisine dayalı kontrol	Maliyet ve Kalite	MO	Enerji Yönetimi
[215]	Sunulan yöntem, MAS'ın optimizasyondaki rolünü iyileştirmiştir.	Dağıtılmış işbirlikçi bozulma önleme denetimi (DCADC)	Zaman ve Maliyet	MO	Optimizasyon
[216]	Yaklaşım, MAS'ın esnek iş atölyesi çizelgeleme probleminin (FJSP) çözümünde etkili olduğunu göstermiştir.	Hibrit metasezgisel tabanlı küme holonik çok etmenli model	Zaman ve Maliyet	MO	Çizelgeleme
[217]	Yaklaşım, esnek iş atölyesi çizelgeleme probleminin (FJSP) çözümünde etkili oldu.	Hibrit metasezgisel tabanlı kümelenmiş holonik çok ajanlı model	Zaman, Kalite ve Maliyet	MO	Çizelgeleme
[218]	Dağıtılmış kontrol, programlamadaki zaman gecikmesini azaltır.	Dağıtılmış koordinasyon kontrolü	Zaman, Kalite ve Maliyet	MO	Çizelgeleme
[219]	IC3Net, verimliliği ve performansı artırır.	Bireyselleştirilmiş Kontrollü Sürekli İletişim Modeli (IC3Net)	Zaman, Kalite ve Maliyet	M	Görev Tahsisi
[220]	Önerilen yaklaşım, gerçek zamanlı modelleme ile birlikte akıllı operasyon planlamayı da mümkün kılmıştır	RFID ve modelleme için hiyerarşik zamanlı renkli Petri net (HTCPN) formalizmi	Zaman ve Maliyet	MO	Gerçek Zamanlı Operasyon Planlama
[221]	Model, üretim sistemlerinde yüksek performans ve zamanında süreçleri destekler.	Tri-view modeli	Zaman, Kalite ve Maliyet	M ve MO	Optimizasyon
[222]	Etmenler üretim süreçlerinde devrim yaratmışlardır.	Etmen tabanlı üretim sistemlerine ilişkin bir analiz	Zaman, Kalite ve Maliyet	M ve MO	Üretim Optimizasyonu
[223]	Sunulan yöntemin, tedarik zinciri yönetiminde verimliliği artırdığı gözlemlenmiştir.	İş Dağılımı stratejisi (WBS) ve Akıllı Etmen Teknolojisi	Zaman, Kalite ve Maliyet	M	Tedarik Zinciri Yönetimi
[224]	Dağıtılmış enerji sistemleri, üretimde verimliliği ve yönetimi iyileştirmiştir.	Anlamsal ve holonik çoklu etmen yönetimi	Zaman, Kalite ve Maliyet	MO	Enerji Yönetimi
[225]	Önerilen modelin geliştirilmiş üretim verimliliği, performansı ve üretkenliğe sahip olduğu görülmüştür.	Bulut imalat	Zaman, Kalite ve Maliyet	MO	Üretim Hatı Optimizasyonu
[226]	Bulut tabanlı sistemin, üretim planlamasında etkili olduğu gözlemlenmiştir.	Bulut Tabanlı Süreç Planlama	Zaman, Kalite ve Maliyet	MO	Üretim Planlama ve Hat Optimizasyonu

mükemmel iletişim yetenekleriyle bilginin kötüye kullanılmasını önledikleri kanıtlanmıştır. Bu özellikleri sayesinde karmaşık IoT sistemlerinde güvenlik ve gizliliği korunmasına destek olurlar. Doğrudan çevik üretim bilgi sistemleri ile oluşturan sistemlerde kullanılabilirler, imalatta performansın en üst düzeye çıkarılmasına, operasyon maliyetlerini azaltarak optimizasyon edilmesine ve üretimi otomatikleştirmesine yardımcı olurlar.

- Mesaj alışverişinde MAS, işlevlerin izlenmesini iyileştirmek ve bunları son düğüme bildirmek için kablosuz sensör ağlarından faydalanır. Teknik, anlamsal, sözdizimsel ve platformların iş birliği, özerklik ve dağıtılmış zekâ yetenekleri sayesinde IoT alt yapısını önemli ölçüde destekler. Bununla birlikte, anlamsal iş birliğini sağlayacak ontolojiler yönünden hala gelişmeye oldukça açıktır.

- Çok Etmenli sistemler, içerdikleri birçok özerk uygulama ile dağıtık sistemler için uyumlu bir şekilde birlikte etkileşim ve iletişim kurulabilecek bir platform sunmaktadır. Bu özerk etmenler, hem kendi aralarındaki koordinasyon ve iş birliğini, hem de kendilerine verilen emirleri yerine getirebilme yeteneğine sahiptirler. Özellikler platformlar arası iş birliğinin sağlanmasında, MAS, sistemler arasındaki iletişimi artırması açısından önemli bir bileşen olarak kabul edilmelidir. FIPA uyumlu Self-StarMAS sistemlerini kullanarak geliştirilen IoT uygulamaları, fiziksel dünyada kullanım için gerekli güvenliği ve uygunluğu sağlamaya yetkin olacaktır.
- MAS, üretim sistemlerinin verimliliğini ve sonucunu teşvik etmek için, IoT sistemlerinin kontrol ve izlemesini kolaylaştırmaktadır. Optimizasyon ve kontrol alanları, mevcut üretim sistemlerine ve süreçlerine bağlıdır. MAS, otonom bileşenler aracılığıyla performansı optimize etmek için, IoT cihazlarının üretim sürecinin farklı noktalarında entegrasyonuna da ayrıca izin vermektedir.
- IoT sistemleri içerisinde MAS teknolojisinin, merkezi kontrole dayalı olarak tasarlanması durumunda başarı ve başarısızlığın tek bir noktada toplanacağı ve bunun da IoT sistemi içerisinde yüksek bağımlılığa neden olacağı düşünüldüğünde, merkezi olmayan yaklaşımın IoT performansını daha çok artıracığı gözlemlenmiştir.
- IoT sistemlerine entegre edilen MAS'ler, etmenlerin iki farklı şekilde rotolanmasına olanak sağlamaktadır. Mobil güzergâhlar, mesaj gönderildikten sonra da hesaplamaya izin verirken, statik güzergâhlarda işlem merkezinden mesaj gönderilmeden önce hesaplamalar gerçekleştirilir. Bu özellikleri dikkate alındığında, özellikle kenar bilişim (edge computing) uygulamalarında dinamik rotalama yöntemiyle daha iyi sonuçlar alınabileceği bulgusu elde edilmiştir.
- MAS'ler, IoT ağında rota planlaması ve ağ geçişi için tek bir etmen veya birden çok etmen kullanabilirler. Tek etmenli güzergâh planlamasında, yalnızca bir etmen tüm ağı dolaşır ve veri birleştirme görevini tamamlar. Çok etmenli güzergâh planlamasında, birden çok etmen gönderilirken, her etmene bir grup kaynak düğüm atanır ve veri birleştirme görevini tamamlamak ve geçiş için bir güzergâh bulunur. Dinamik güzergâhlar, değişen topolojilere karşı oldukça esnek olmasına ve değişen çevresel koşullara en uygun şekilde adapte olmasına rağmen, bunların hesaplanması, statik muadillerine kıyasla ek hesaplama süresi ve enerji tüketimi ile sonuçlanabileceği bulgusu da ayrıca göz ardı edilmemelidir.
- MAS ile entegre bir şekilde geliştirilecek IoT ağlarında, hiyerarşik kontrolden kaynaklanan ortalama işlem süresinin (throughput time), merkezi kontrolden kaynaklanan ortalama işlem süresinden düşük olacağı bulgusuna da ulaşılmıştır.
- MAS'ler ile geliştirilen IoT uygulamalarında, modellerin, standardizasyonunu sağlamak için, önerilen modellerden farklı alanlarda test edilmesinin ihtiyaç duyulduğu da ayrıca göz ardı edilmemelidir.
- Son olarak, MAS ile entegre tasarlanacak IoT sistemlerde, görev seti için bir müzakere mekanizması geliştirilmesi hala MAS'ler için gelişmeye açık önemli bir alandır. Bu her hedef görev için, en uygun olanı bulma prosedürünü otomatikleştirecek bir

müzakere mekanizması olarak sunulduğunda, sistemin performansını arttıracığı düşünülmektedir. Bu nedenle bu alanda yapılacak yeni araştırmalara da ihtiyaç olduğu bulgusuna ulaşılmıştır.

#### 4.1. Yönetimsel Görüş (Managerial Insight)

Üretim sistemlerinde, IoT teknolojisinin MAS ile entegrasyonu en temle 3 ana süreci içermektedir. Bu süreçler sırasıyla; IoT alt yapısının oluşturulması, MAS alt yapısının geliştirilmesi ve bu iki teknolojinin entegrasyonundan oluşan Entegrasyon sürecidir (Şekil 4). IoT alt yapısının geliştirilmesi sürecinde gerçekleştirilmesi gereken aktiviteler aşağıda listelenmiştir.

- Üretim sisteminde yer alan akıllı nesnelere (makinelere, sensörlere, akıllı tabletler gibi) ve kontrol noktalarına (üretim istasyonları, depo gibi) belirleyin.
- Üretim süreçlerini akıllı nesnelere ve kontrol noktalarına entegre bir şekilde dizayn edin.
- Her bir akıllı nesne için algılanacak/toplanacak veri türlerini belirleyin ve algılama setini oluşturun.
- Her bir akıllı nesne için veri algılama/toplama kaynaklarından verilerin hangi yöntemle ve zamanla toplanacağını belirleyin.
- Her bir akıllı nesne için algılanan/toplanan verilerin nerede işleneceğini belirleyin (yerel, bulut, gibi).
- Her bir akıllı nesne için algılanan/toplanan veriler ile hangi görevlerin yerine getirileceğini gösteren görev setini oluşturun.
- Her bir akıllı nesne için yerine getirilecek göreve ilişkin yöntem, araç ve metodolojileri belirleyin
- Her bir akıllı nesne tarafından işlenen bilgiler doğrultusunda üretilecek bilgi/bilgiler için ilgili aksiyonları gösteren aksiyon setlerini oluşturun.
- Akıllı nesnelere arasında kurulacak IoT ağını oluşturun (W-Fi, ZigBee, gibi)
- Akıllı nesnelere ağa bağlanmasını sağlayacak network alt yapısını kurun (MQTT, CoAP, gibi)

MAS alt yapısının geliştirilmesi sürecinde gerçekleştirilmesi gereken aktiviteler aşağıda listelenmiştir.

1. Her bir akıllı nesne içerisine yerleştirilecek etmenleri belirleyin
  - a. Her bir zeki etmeni, akıllı nesne içerisinde tanımlanan görevi yerine getirecek şekilde geliştirin. Adaptasyon, kontrol ve sistemin birlikte çalışmasını sağlayacak (entegrasyon) görevler için bir mobil etmen. Ölçme ve kendini organize etme tipindeki görevler için bir statik etmen tasarlayın.
  - b. Üretim Süreçleri içerisinde bilgi ve aktivite akışlarına bağlı olarak etmenler arasındaki ilişkiyi gösteren grafi oluşturun.
  - c. Elde edilen grafa bağlı olarak, akıllı nesnelere içerisindeki etmenler arasındaki öncelik ve nedensellik algoritmalarını (fonksiyonlarını) geliştirin ve gerekli iş kurallarını oluşturun.
2. Elde edilen grafa bağlı olarak, üretim sisteminin ihtiyaçları doğrultusunda MAS kontrol alt yapısını geliştirin (Merkeziyetçi veya Merkeziyetçi).
3. Üretim süreçlerinde yer alan nesnelere etmenlerin arasında anlamsal birlikte çalışabilirliği (IoT cihazları tarafından üretilen

#### IoT ve MAS Entegrasyonu



Şekil 4. IoT ve MAS entegrasyonu süreci akış şeması (Process flow of IoT and MAS integration)

ve toplanan farklı formatlardaki mesaj içeriklerinin, ontoloji ve bilgi temsili yoluyla tüm kaynaklarca ortak bir anlama sahip olmalarını temsil eder - Semantic interoperability) sağlamak için MAS ontoloji etmenini/etmenlerini geliştirin

4. Etmenlerin arasında sözdizimsel birlikte çalışabilirliği (mesaj alışverişi türlerinin (Stings, XML, JSON gibi) çoklu olarak kodlanması ve düşük bant genişliği ağ bağlantıları içerisinde kullanımını temsil eder -Syntactic interoperability) etmen etkileşim protokolünü geliştirin.

IoT ve MAS entegrasyonunun geliştirilmesi sürecinde gerçekleştirilmesi gereken aktiviteler aşağıda listelenmiştir.

- Geliştirilen zeki etmen algoritmalarını IoT'nin her bir katmanında yer alan akıllı nesnelere ve kontrol noktalarında programlayın.
- Akıllı nesnelere belirlenen ağda teknik olarak iş birliğini sağlayabilmek için MAS platformlarından en uygun olanı kullanın (JADE, Self StarMAS, gibi)

## 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, MAS teknolojisinin IoT teknolojisi ile entegrasyonu ve bu entegrasyonla akıllı nesnelere arasında kurulacak iş birliği ve koordinasyon ile IoT sistemlerinin performansının artırılıp artırılamayacağı araştırılmıştır. Araştırmanın birinci bölümünde, MAS ve IoT teknolojileri detaylı olarak açıklanmıştır. İkinci bölümde, IoT ve MAS teknolojilerinin entegrasyonu, beş katmanlı bir IoT altyapısı altında analiz edilerek, IoT'nin her bir katmanında MAS teknolojisinin sağlayacağı katkılar Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'de özetlenmiştir. MAS teknolojisi ile gerçekleştirilen güncel araştırmalar üretim sistemleri özelinde araştırılmış ve güncel uygulamalar Tablo 4'de özetlenmiştir. Araştırmadan elde edilen bulgular dördüncü bölümde tartışılmıştır.

Araştırmada sunulan bilgilerin ve elde edilen bulguların, MAS teknolojisi ile entegre olarak tasarlanacak IoT uygulamalarını teşvik etmesi ve bu alandaki gelişime katkı sunması beklenmektedir. Sunular araştırmanın gelecekte, atölye tipi üretim için, üretimin planlanmasında ve çözümlenmesinde MAS tabanlı bir IoT uygulaması yönünde geliştirilmesi hedeflenebilir. Araştırma buna ilave olarak, anlamsal iş birliğinin artırılması için ontoloji etmenleri üzerinde, sürdürülebilirlik bağlamında standartlaştırma ve enerji tasarrufunun artırılması için mobil etmenler üzerinde yapılacak araştırmalar ile genişletilebilir.

## Beyan (Declaration)

Bu araştırma Banu Çalış Uslu'nun 2015 yılında tamamladığı "Cooperation & Coordination of Distributed Intelligent Agents for Manufacturing Systems" isimli doktora tezinden üretilmiştir.

## Kaynaklar (References)

1. Popkova E.G., Egorova E.N. Popova E., Pozdnyakova U.A., The model of state management of economy on the basis of the internet of things, Editör: Popkova E.G., Springer, 1137-1144, 2019.
2. Javaid N., Sher A., Nasir H., Guizani N., Intelligence in IoT-based 5G networks: Opportunities and challenges, IEEE Commun. Mag., 56, 94-100, 2018.
3. Lu M., Fu G., Osman N.B., Konbr U., Green energy harvesting strategies on edge-based urban computing in sustainable internet of things, Sustainable Cities Soc., 103349, 2021.
4. Rahman H., Hussain M.I., A comprehensive survey on semantic interoperability for Internet of Things: State-of-the-art and research challenges, Trans. Emerging Telecommun. Technol., 31 (12), e3902, 2020.

5. Calis B., Agent-Based Simulation Model for Profit Maximization. Journal of Management and Information Science, 4, 26-33, 2016.
6. Pantoja C.E., Soares H.D., Viterbo J., El Fallah-Seghrouchni A., An Architecture for the Development of Ambient Intelligence Systems Managed by Embedded Agents, Software Engineering & Knowledge Engineering, 215-214, 2018.
7. Shen S., Han Y., Wang X., Wang Y., Computation offloading with multiple agents in edge-computing-supported IoT, ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 16, 1-27, 2019.
8. Kotb Y., Al Ridhawi I., Aloqaily M., Baker T., Jararweh Y., Tawfik H. Cloud-based multi-agent cooperation for IoT devices using workflow-nets, Journal of Grid Computing, 17 (4), 625-650, 2019.
9. Chafi F.Z., Fakhri Y., The integration of Multi Agent System within the Internet of Things: the use of SigFox shield as a network, Proceedings of the 3rd International Conference on Smart City Applications, Tetouan, Morocco, 1-8, 10-11 October, 2018.
10. Self A.L., DeLoach, S.A., Designing and specifying mobility within the multiagent systems engineering methodology, Proceedings of the 2003 ACM symposium on Applied Computing, Florida, United States, 50-55, 9-12 March, 2003.
11. Pico-Valencia P., Holgado-Terriza J.A., Agentification of the Internet of Things: A systematic literature review, Int. J. Distrib. Sens. Netw., 14, 1550147718805945, 2018.
12. Dorri A., Kanhere S.S., Jurdak R. Multi-agent systems: A survey, IEEE Access, 6, 28573-28593, 2018.
13. Janiesch C., Koschmider A., Mecella M., Weber B., Burattin A., Di Ciccio C., ..., Zhang L., The Internet of Things meets business process management: a manifesto, IEEE Systems Man and Cybernetics Magazine, 6(4), 34-44, 2020.
14. Calvaresi D., Marinoni M., Sturm A., Schumacher M., Buttazzo G., The challenge of real-time multi-agent systems for enabling IoT and CPS, Proceedings of the International Conference on Web Intelligence, Leipzig, Germany, 356-364, 23-26 August, 2017.
15. Wang X., Zeng Z., Cong Y., Multi-agent distributed coordination control: Developments and directions via graph viewpoint, Neurocomputing, 199, 204-218, 2016.
16. He L., Dong W., Distributed adaptive consensus tracking control for heterogeneous nonlinear multi-agent systems, ISA Trans., 2022.
17. Yang H., Ye D., Distributed fixed-time consensus tracking control of uncertain nonlinear multiagent systems: a prioritized strategy, IEEE Trans. Cybern., 50 (6), 2627-2638, 2019.
18. Trujillo M.A., Becerra H.M., Gómez-Gutiérrez D., Ruiz-León J., Ramírez-Treviño A., Priority task-based formation control and obstacle avoidance of holonomic agents with continuous control inputs, IFAC-PapersOnLine, 51 (13), 216-222, 2018.
19. Defoort M., Polyakov A., Demesure G., Djemai M., Veluvolu K., Leader-follower fixed-time consensus for multi-agent systems with unknown non-linear inherent dynamics, IET Control Theory Appl., 9 (14), 2165-2170, 2015.
20. Yu W., Wang H., Hong H., Wen G., Distributed cooperative anti-disturbance control of multi-agent systems: an overview, Science China Information Sciences, 60, 110202, 2017.
21. Chen K., Wang J., Zhang Y., Liu Z., Leader-following consensus for a class of nonlinear strict-feedback multiagent systems with state time-delays, IEEE Trans. Syst. Man Cybern.: Syst., 50 (7), 2351-2361, 2018.
22. Maes S., Meganck S., Manderick B., Inference in multi-agent causal models, Int. J. Approximate Reasoning, 46 (2), 274-299, 2007.
23. Holmgren J., Davidsson P., Persson J.A., Ramstedt L., TAPAS: A multi-agent-based model for simulation of transport chains, Simul. Modell. Pract. Theory, 23, 1-18, 2012.
24. Lu Y., Liao F., Deng J., Pattinson C. Cooperative optimal preview tracking for linear descriptor multi-agent systems. J. Franklin Inst., 356 (2), 908-934, 2019.
25. Sayed M.S., Lohse N., Distributed Bayesian diagnosis for modular assembly systems-A case study, J. Manuf. Syst., 32 (3), 480-488, 2013.
26. Ceballos H.G., Cantu F.J., Modelling Intelligent Agents through Causality Theory, 2007 Sixth Mexican International Conference on Artificial Intelligence, Special Session (MICAI), IEEE, Aguascalientes, Mexico, 201-210, 4-10 November, 2007.
27. Pearl J., Causality: Models, reasoning, and inference. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
28. Muscalagiu I., Popa H., Vidal J., Large Scale Multi-Agent-Based Simulation using NetLogo for implementation and evaluation of the distributed constraints, Proceedings of IJCAI DCR 2013 (23rd International Joint Conference on Artificial Intelligence) Workshop on

- Distributed Constraint Reasoning, Bochum, Germany, 325-330, 29-31 July, 2013.
29. Novikova G., Azofeifa E., Domain theory verification using multi-agent systems, *Procedia Comput. Sci.*, 103, 120-125, 2017.
  30. Rathore S., Kwon B.W., Park J.H., BlockSecIoTNet: Blockchain-based decentralized security architecture for IoT network, *Journal of Network and Computer Applications*, 143, 167-177, 2019.
  31. Azofeifa E.J., A Multiagent Approach for Cost Estimating in Big Data Analytics, Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems 2019 (ITTMM 2019), 355-360, 15-19 April, 2019..
  32. Azofeifa E., Novikova G.M., Development of a crowdsourcing multiagent system for knowledge extraction, *Artificial Intelligence and Decision Making*, 1, 40-48, 2020.
  33. Bakliwal K., Dhada M.H., Palau A.S., Parlikad A.K., Lad B.K., A multi agent system architecture to implement collaborative learning for social industrial assets, *IFAC-PapersOnLine*, 51, 1237-1242, 2018.
  34. Palau A.S., Dhada M.H., Bakliwal K., Parlikad A.K., An Industrial Multi Agent System for real-time distributed collaborative prognostics, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 85, 590-606, 2019.
  35. Sycara K., Paolucci M., Van Velsen M., Giampapa J., The retsina mas infrastructure, *Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, 7, 29-48, 2003.
  36. Fasanotti L., A distributed intelligent maintenance system based on artificial immune approach and multi-agent systems, 2014 12th IEEE international conference on industrial informatics (INDIN), Porto Alegre, Brazil, 783-786, 27-30 July, 2014.
  37. Kong J., Lomuscio A., Symbolic model checking multi-agent systems against CTL\* K specifications, *Proceedings of the 16th Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, São Paulo, Brazil, 114-122, 8-12 May, 2017.
  38. Iannino V., Vannocci M., Vannucci M., Colla V., Neuer M., A multi-agent approach for the self-optimization of steel production, *Int. J. Simul. Syst. Sci. Technol.*, 19, 1-20, 2018.
  39. Palau A.S., Dhada M.H., Parlikad A.K., Multi-agent system architectures for collaborative prognostics, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30, 2999-3013, 2019.
  40. Elijah O., Rahman T.A., Orikumhi I., Leow C.Y., Hindia, M.N. An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges, *IEEE Internet Things J.*, 5 (5), 3758-3773, 2018.
  41. Datta, S.P.A., Saleem T.J., Barati M., López M.V.L., Furgala M.L., Vanegas D.C., Santucci G., Khargonekar P.P., McLamore E.S., Data, Analytics and Interoperability between Systems (IoT) is Incongruous with the Economics of Technology: Evolution of Porous Pareto Partition (P3), *Big Data Analytics for Internet of Things*, Editör: Saleem T.J., Chishti M.A., Wiley Online Library, 7-88, 2021.
  42. Vieira G., Barbosa J., Leitão P., Sakurada L., Low-Cost Industrial Controller based on the Raspberry Pi Platform, 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Buenos Aires, Argentina, 292-297, 26-28 February, 2020.
  43. Cai Y., Genovese A., Piuri V., Scotti F., Siegel M., IoT-based Architectures for Sensing and Local Data Processing in Ambient Intelligence: Research and Industrial Trends, 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Auckland, New Zealand, 1-6, 20-23 May, 2019.
  44. Thangaraj M., Ponmalar P.P., Sujatha G., Anuradha S., Agent based Semantic Internet of Things (IoT) in Smart Health care, *Proceedings of the 11th International Knowledge Management in Organizations Conference on The changing face of Knowledge Management Impacting Society*, Hagen, Germany, 1-9, 25-28, July, 2016.
  45. Garrab A., Bouallegue A., Bouallegue R., An agent based fuzzy control for smart home energy management in smart grid environment, *International Journal of Renewable Energy Research*, 7 (2), 599-612, 2017.
  46. Silva J., Barišić A., Amaral V., Goulão M., Tezel B.T., Alaca O.F., Challenger M., Kardas G., Comparing the Usability of two Multi-Agents Systems DSLs: SEA\_ML++ and DSML4MAS Study Design, *Proceedings of the 3rd International Workshop on Human Factors in Modeling (HuFaMo 2018)*, held in ACM/IEEE 21st International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS 2018), Copenhagen, Denmark, 770-777, 14-19 October, 2018.
  47. Likotiko E.D., Nyambo D., Mwangoka J., Multi-agent based IoT smart waste monitoring and collection architecture, *International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology (IJCEIT)*, 7 (5), 1-14, 2017.
  48. Zheng G., Kovalenko I., Barton K., Tilbury D., Integrating Human Operators into Agent-based Manufacturing Systems: A Table-top Demonstration, *Procedia Manuf.*, 17, 326-333, 2018.
  49. Kubo R.H., Asato O.L., dos Santos G.A., Nakamoto F.Y., Modeling of allocation control system of multifunctional resources for manufacturing systems, 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), Curitiba, PR, Brazil, 1-8, 20-23 November, 2016.
  50. Pavlatos C., Vita V., Linguistic representation of power system signals, *Electricity Distribution*, Editör: Karampelas P., Ekonomou L., Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 285-295, 2016.
  51. Leusin M.E., Kück M., Frazzon E.M., Maldonado M.U., Freitag M., Potential of a multi-agent system approach for production control in smart factories, *IFAC-Papers OnLine*, 51, 1459-1464, 2018.
  52. Ciortea E., Tulbure A., Huțanu, C.t., Multi-agent for manufacturing systems optimization, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, IOP Publishing, 145, 022007, 2016.
  53. Coroiu A.M., Emotional intelligent agent in decision-making process with implications in manufacturing, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 7, 44, 2015.
  54. Zhou Y., Yang J.J., Zheng L.Y., Multi-agent based hyper-heuristics for multi-objective flexible job shop scheduling: A case study in an aero-engine blade manufacturing plant, *IEEE Access*, 7, 21147-21176, 2019.
  55. Singh M.P., Chopra A.K., The internet of things and multiagent systems: Decentralized intelligence in distributed computing, 2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), IEEE, Atlanta, GA, USA, 1738-1747, 05-08 June, 2017.
  56. Alexakos C., Anagnostopoulos C., Fournaris A., Koulamas C., Kalogeras A., IoT Integration for Adaptive Manufacturing, 2018 IEEE 21st International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC), IEEE, Singapore, 146-151, 29-31 May, 2018.
  57. Cagnin R.L., Guilherme I.R., Queiroz J., Paulo B., Neto, M.F., A multi-agent system approach for management of industrial IoT devices in manufacturing processes, 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), IEEE, Porto, Portugal, 31-36, 18-20 July, 2018.
  58. de Hoz Diego J.D., Saldana J., Fernández-Navajas J., Ruiz-Mas J., Decoupling Security From Applications in CoAP-Based IoT Devices, *IEEE Internet Things J.*, 7, 467-476, 2019.
  59. Diego J.D.D.H., Saldana J., Fernández-Navajas J., Ruiz-Mas J., IoTsafe, Decoupling Security From Applications for a Safer IoT. *IEEE Access*, 7, 29942-29962, 2019.
  60. Javed F., Afzal M.K., Sharif M., Kim B.S., Internet of Things (IoT) Operating Systems Support, Networking Technologies, Applications, and Challenges: A Comparative Review, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 20, 2062-2100, 2018.
  61. Luo T., Xu Z., Jin X., Jia Y., Ouyang X., IoTcandyJar: Towards an Intelligent-Interaction Honeypot for IoT Devices, *Black Hat*, pp. 1-11, 2017.
  62. Fantana N.L., Riedel T., Schlick J., Ferber S., Hupp J., Miles S., Michahelles F., Svensson S., Internet of things: converging technologies for smart environments and integrated ecosystems. Editör: Vermesan O., Friess P., River publishers, Denmark, 2013.
  63. Wang B., Tao F., Fang X., Liu C., Liu Y., Freiheit T., Smart Manufacturing and Intelligent Manufacturing: A Comparative, *Engineering*, 7 (6), 738-757, 2021.
  64. Alzubaidi L., Al-Shamma O., Fadhel M.A., Farhan L., Zhang J., Duan Y., Optimizing the Performance of Breast Cancer Classification by Employing the Same Domain Transfer Learning from Hybrid Deep Convolutional Neural Network Model, *Electronics*, 9 (3), 445, 2020.
  65. Uslu B.Ç., Capability Model and Competence Measuring for Smart Hospital System: An Analysis for Turkey. *International Journal of Health Services Research and Policy*, 5, 41-50, 2020.
  66. Mostafa A.E., Gadallah Y., Uniqueness-Based Resource Allocation for M2M Communications in Narrowband IoT Networks, 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), IEEE, Toronto, ON, Canada, 1-5, 24-27 September, 2017.
  67. Uslu B.Ç., Okay E., Dursun E., Analysis of factors affecting IoT-based smart hospital design. *Journal of Cloud Computing*, 9, 1-23, 2020.

68. Nasralla M.M., García-Magariño I., Lloret J., Defenses Against Perception-Layer Attacks on IoT Smart Furniture for Impaired People, *IEEE Access*, 8, 119795-119805, 2020.
69. Di Martino B., Rak M., Ficco M., Esposito A., Maisto S. A., Nacchia S., Internet of things reference architectures, security and interoperability: A survey, *Internet of Things*, 1, 99-112, 2018.
70. Koo J., Oh S.R., Kim, Y.G., Device identification interoperability in heterogeneous IoT platforms. *Sensors*, 19 (6), 1433, 2019.
71. Noura M., Atiquzzaman M., Gaedke M., Interoperability in internet of things: Taxonomies and open challenges. *Mobile Networks and Applications*, 24 (3), 796-809, 2019.
72. Jabbar S., Ullah F., Khalid S., Khan M., Han, K., Semantic interoperability in heterogeneous IoT infrastructure for healthcare. *Wireless Commun. Mobile Comput.*, 2017.
73. Zeid A., Sundaram S., Moghaddam M., Kamarthi S., Marion T., Interoperability in smart manufacturing: Research challenges. *Machines*, 7 (2), 21, 2019.
74. Oh S.R., Kim Y.G., Cho S., An interoperable access control framework for diverse IoT platforms based on oauth and role. *Sensors*, 19 (8), 1884, 2019.
75. Durairaj M., Hirudhaya Mary Asha J., Interoperability in smart living network—a survey. *International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems*, Springer Singapore, 69-79, 2020.
76. Gürdür D., Asplund F., A systematic review to merge discourses: Interoperability, integration and cyber-physical systems. *J. Ind. Inf. Integr.*, 9, 14-23, 2018.
77. Savaglio C., Ganzha M., Paprzycki M., Bădică C., Ivanović M., Fortino G., Agent-based Internet of Things: State-of-the-art and research challenges. *Future Gener. Comput. Syst.*, 102, 1038-1053, 2020.
78. Lakka E., Petroulakis N.E., Michalodimitrakis E., Papoutsakis E., Validation of Semantic Interoperability between IoT Platforms, 2020 Global Internet of Things Summit (GloTS), IEEE, 1-6, 03 June, 2020.
79. Wang X., Wong T.N., Wang, G., Service-oriented architecture for ontologies supporting multi-agent system negotiations in virtual enterprise. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23 (4), 1331-1349, 2012.
80. Omicini A., Calegari R., Injecting (micro) intelligence in the IoT: Logic-based approaches for (M) MAS. *International Workshop on Massively Multiagent Systems*, Springer, 21-35, 2018.
81. Ayala L., Amor M., Horcas J.M., Fuentes L., A goal-driven software product line approach for evolving multi-agent systems in the Internet of Things, *Knowledge-Based Systems*, 184, 104883, 2019.
82. H De La Iglesia D., Villarrubia González G., Sales Mendes A., Jiménez-Bravo D.M., L Barriuso A., Architecture to embed software agents in resource constrained internet of things devices, *Sensors*, 19, 100, 2019.
83. Jiménez-Bravo D., others. Architecture to Embed Software Agents in Resource Constrained Internet of Things Devices. *Sensors (Basel)*, 19 (1), 2018.
84. Khan M.W., Wang J. The research on multi-agent system for microgrid control and optimization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1399-1411, 2017.
85. Huang C.Y., Cheng K., Holt A., An integrated manufacturing network management framework by using mobile agent, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 32(7), 822-833, 2007.
86. Abbas A., Siddiqui I.F., Lee S.U.J., Bashir A.K., Binary pattern for nested cardinality constraints for software product line of IoT-based feature models, *IEEE Access*, 5, 3971-3980, 2017.
87. Olaru A., Sorici A., Florea A.M., A flexible and lightweight agent deployment architecture, 2019 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS), IEEE, Bucharest, Romania, 251-258, 28-30 May, 2019.
88. Ahamed J., Mir R.N., Chishti, M.A., RML based ontology development approach in internet of things for healthcare domain. *International Journal of Pervasive Computing and Communications*, 17 (4), 377-389, 2021.
89. FIPA. FIPA Ontology Service Specification. <http://www.fipa.org/specs/fipa00086/>. Yayın tarihi Ağustos 15, 2000. Erişim tarihi Kasım 24, 2021.
90. Nascimento V., Viamonte M.J., Canito A., Silva N., Improving semantic interoperability with ontology alignment negotiation and reutilization, *Proceedings of International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services*, Vienna, Austria, 368-374, 2-4 December, 2013.
91. Ullah F., Habib M.A., Farhan M., Khalid S., Durrani M.Y., Jabbar, S., Semantic interoperability for big-data in heterogeneous IoT infrastructure for healthcare, *Sustainable Cities Soc.*, 34, 90-96, 2017.
92. Rebelo Moreira J.L., Ferreira Pires L., Van Sinderen M. Semantic interoperability for the IoT: Analysis of JSON for Linked Data, *Enterprise Interoperability: Smart Services and Business Impact of Enterprise Interoperability*, 163-169, 2018.
93. Muppavarapu V., Ramesh G., Gyrard A., Noura, M., Knowledge extraction using semantic similarity of concepts from Web of Things knowledge bases, *Data Knowl. Eng.*, 135, 101923, 2021.
94. Yadgarova Y.V., Taratukhin V.V., Skachko E.N. Multi-agent Product Life Cycle Environment. *Interoperability Issues*, International IFIP Working Conference on Enterprise Interoperability, Springer, Berlin, Germany, 101-112, May, 2015.
95. FIPA. Poslad, S. Specifying protocols for multi-agent systems interaction. <http://www.fipa.org/subgroups/ROFS-SG-docs/2007-TAAS-specifying-MAS.pdf>. Yayın tarihi Kasım, 2007. Erişim tarihi Kasım 25, 2021.
96. Fortino G., Guerrieri A., Russo W., Savaglio C., Integration of agent-based and cloud computing for the smart objects-oriented IoT, *Proceedings of the 2014 IEEE 18th international conference on computer supported cooperative work in design (CSCWD)*, IEEE, Hsinchu, Taiwan, 493-498, 21-23 May, 2014.
97. Wassermann E., Fay A., Interoperability rules for heterogenous multi-agent systems: Levels of conceptual interoperability model applied for multi-agent systems, *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, IEEE, Emden, Germany, 89-95, 24-26 July, 2017.
98. Fortino G., Savaglio C., Palau C.E., de Puga J.S., Ganzha M., Paprzycki, M., Montesinos M., Liotta A., Llop, M., Towards Multi-layer Interoperability of Heterogeneous IoT Platforms: The INTER-IoT Approach, *Integration, Interconnection, and Interoperability of IoT Systems*, Internet of Things, Editör: Gravina R., Palau C., Manso M., Liotta A., Fortino G., Springer, Cham, 199-232, 2018.
99. HoseinDoost S., Adamzadeh T., Zamani B., Fatemi A., A model-driven framework for developing multi-agent systems in emergency response environments, *Software & Systems Modeling*, 18, 1985-2012, 2019.
100. Bircan E., Challenger M., Kardas G., Interoperability of MAS DSMLs via horizontal model transformations, 2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), IEEE, Gdansk, Poland, 1555-1564, 11-14 September, 2016.
101. Tezel B.T., Kardas G., A Conceptual Generic Framework to Debugging in the Domain-Specific Modeling Languages for MultiAgent Systems. 8th Symposium on Languages, Applications and Technologies (SLATE 2019). Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, Coimbra, Portugal, 8:1-8:13, 2019.
102. Alaca O.F., Tezel B.T., Challenger M., Goulão M., Amaral V., Kardas G., AgentDSM-Eval: A framework for the evaluation of domain-specific modeling languages for multi-agent systems. *Computer Standards & Interfaces* 2021, 76, 103513, 2021.
103. Fatehah M., Mezhuyev V., Al-Emran M., A Systematic Review of Metamodeling in Software Engineering. *Recent Advances in Intelligent Systems and Smart Applications*, 3-27, 2021.
104. Miranda T.R.B.d., *Software Language Engineering: Interaction and Usability Modeling of Language Editors*. Doktora Tezi, NOVA University of Lisbon, Faculty of Sciences and Technology, Lisbon, 2017.
105. Abrahao S., Goulao M., Heymans P., Le Pallec X., Renaux E., Third International Workshop on Human Factors in Modeling (HuFaMo 2018)-Preface, *CEUR Workshop Proceedings*, 2245, 728-729, 2018.
106. Vieira-Marques P., Patriarca-Almeida J., Frade S., Bacelar-Silva G., Robles S., Cruz-Correia, R., OpenEHR aware multi agent system for inter-institutional health data integration, 2014 9th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), IEEE, Barcelona, Spain, 1-6, 18-21 June, 2014.
107. Chae C.J., Choi K.N., Choi K., Information interoperability system using multi-agent with security, *Wireless Personal Communications*, 89 (3), 819-832, 2016.
108. Malik H., Shakshuki E., Data dissemination in wireless sensor networks using software agents, 21st International Symposium on High Performance Computing Systems and Applications (HPCS'07), IEEE, Saskatoon, SK, Canada, 28-28, 13-16 May, 2007.
109. Sasirekha S., Swamynathan S., Cluster-chain mobile agent routing algorithm for efficient data aggregation in wireless sensor network, *J. Commun. Networks*, 19 (4), 392-401, 2017.



110. Vijayalakshmi A., Palanivelu T.G., Intelligent mobile agents collaboration for the performance enhancement in wireless sensor networks, *International Journal of Signal and Imaging Systems Engineering*, 10 (1-2), 72-83, 2017.
111. Song T., Li R., Mei B., Yu J., Xing X., Cheng X., A privacy preserving communication protocol for IoT applications in smart homes. *IEEE Internet Things J.*, 4 (6), 1844-1852, 2017.
112. Aiello F., Fortino G., Guerrieri A., Gravina R., Maps: A mobile agent platform for wsns based on java sun spots, *Proceedings of the ATSN*, 200 (9), 2009.
113. Wang Y., Man K.L., Guan S., Hughes D., A new mobile agent-based middleware system design for Wireless Sensor Network, *IAENG International Journal of Computer Science*, 44(4), 591-597, 2017.
114. Gonzalez-Valenzuela S., Chen M., Leung V.C., Applications of mobile agents in wireless networks and mobile computing, *Advances in Computers*, 82, 113-163, Elsevier, 2011.
115. Aloï G., Caliciuri G., Fortino G., Gravina R., Pace P., Russo W., Savaglio C. Enabling IoT interoperability through opportunistic smartphone-based mobile gateways, *Journal of Network and Computer Applications*, 81, 74-84, 2017.
116. Lohani D., Varma S. Energy efficient data aggregation in mobile agent based wireless sensor network, *Wireless Personal Communications*, 89 (4), 1165-1176, 2016.
117. Fortino G., Guerrieri A., Russo W., Savaglio C., Integration of agent-based and cloud computing for the smart objects-oriented IoT, *Proceedings of the 2014 IEEE 18th international conference on computer supported cooperative work in design (CSCWD)*, IEEE, Hsinchu, Taiwan, 493-498, 21-23 May, 2014.
118. Liu T., Feng-Cai F., Mobile agent based metadata framework for heterogeneous wireless sensor network, *2010 International Conference on Educational and Information Technology*, IEEE, Chongqing, China, VI-446, 17-19 September, 2010.
119. Sahli N., Jabeura N., Badra M., Agent-based framework for sensor-to-sensor personalization, *J. Comput. Syst. Sci.*, 81 (3), 487-495, 2015.
120. Al-Sakran H.O., Intelligent traffic information system based on integration of Internet of Things and Agent technology, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 6 (2), 37-43, 2015.
121. Wang J., Gu X., Liu W., Sangaiah A.K., Kim, H.J., An empower hamilton loop based data collection algorithm with mobile agent for WSNs, *Human-centric Computing and Information Sciences*, 9 (1), 1-14, 2019.
122. Dorri A., Kanhere S.S., Jurdak R., Multi-agent systems: A survey. *IEEE Access*, 6, 28573-28593, 2018.
123. Grzonka D., Jakobik A., Kolodziej J., Pllana S., Using a multi-agent system and artificial intelligence for monitoring and improving the cloud performance and security, *Future Gener. Comput. Syst.*, 86, 1106-1117, 2018.
124. Meera A., Swamynathan S., Agent based resource monitoring system in IaaS cloud environment, *Procedia Technol.*, 10, 200-207, 2013.
125. Wang X., Wong T.N., Wang G. Service-oriented architecture for ontologies supporting multi-agent system negotiations in virtual enterprise, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23 (4), 1331-1349, 2012.
126. Minarsch D., Favorito M., Hosseini S.A., Turchenkov Y., Ward J. Autonomous Economic Agent Framework. *Engineering Multi-Agent Systems*, 13190, 237-253, 2021.
127. Arzo S.T., Bassoli R., Granelli F., Fitzek F.H. Multi-Agent Based Autonomic Network Management Architecture, *IEEE Trans. Netw. Serv. Manage.*, 18 (3), 3595-3618, 2021.
128. Terauchi A., Akashi O., Maruyama M., Sugawara T., Fukuda K., Hirotsu T., Kurihara S., Koyanagi K., Agent organization system for multi-agent based network management, *Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, 22 (5), 482-492, 2007.
129. Hippolyte J.L., Howell S., Yuce B., Mourshed M., Sleiman H.A., Vinyals M., Vanhée, L., Ontology-based demand-side flexibility management in smart grids using a multi-agent system, *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, IEEE, Trento, Italy, 1-7, 12-15 September, 2016.
130. Singh A., Juneja D., Malhotra M. Autonomous agent based load balancing algorithm in cloud computing, *Procedia Computer Science*, 45, 832-841, 2015.
131. Zhang Z., Zhang X. A load balancing mechanism based on ant colony and complex network theory in open cloud computing federation, *2010 The 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation*, IEEE, Wuhan, China, 2, 240-243, 30-31 May, 2010.
132. Parhi M., Pattanayak B.K., Patra M.R. A multi-agent-based framework for cloud service description and discovery using ontology, *Intelligent Computing, Communication and Devices*, Springer, New Delhi, 337-348, 2015.
133. De la Prieta F., Rodríguez-González S., Chamoso P., Corchado J. M., Bajo J., Survey of agent-based cloud computing applications, *Future Generation Computer Systems*, 100, 223-236, 2019.
134. Zhang X., Tang S., Liu X., Malekian R., Li Z., A novel multi-agent-based collaborative virtual manufacturing environment integrated with edge computing technique, *Energies*, 12 (14), 2815, 2019.
135. Barenji A.V., Wang W.M., Li Z., Guerra-Zubiaga D.A., Intelligent E-commerce logistics platform using hybrid agent based approach, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 126, 15-31, 2019.
136. Bajo J., De la Prieta F., Corchado J.M., Rodríguez S., A low-level resource allocation in an agent-based Cloud Computing platform, *Appl. Soft Comput.*, 48, 716-728, 2016.
137. Singh A., Juneja D., Malhotra, M., Autonomous agent based load balancing algorithm in cloud computing, *Procedia Comput. Sci.*, 45, 832-841, 2015.
138. Keshvadi, S., Faghih, B. A multi-agent based load balancing system in IaaS cloud environment, *International Robotics & Automation Journal*, 1 (1), 1-6, 2016.
139. Liu N., Li Z., Xu J., Xu Z., Lin S., Qiu, Q., Tang J., Wang, Y., A hierarchical framework of cloud resource allocation and power management using deep reinforcement learning, *2017 IEEE 37th international conference on distributed computing systems (ICDCS)*, IEEE, Atlanta, GA, USA, 372-382, 5-8 June, 2017.
140. Mesbahi M., Rahmani A.M. Load balancing in cloud computing: a state of the art survey, *International Journal of Modern Education and Computer Science*, 8 (3), 64, 2016.
141. Pal S., Khatua S., Chaki N., Sanyal S., A new trusted and collaborative agent based approach for ensuring cloud security, *ArXiv preprint arXiv:1108.4100*, 2011.
142. Manmadhan S., Manesh T., Paul V., SQL Injection Attack Solutions: A Review. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 4 (8), 2013.
143. Zhang Y., Grignard A., Lyons K., Aubuchon A., Larson K., Real-time machine learning prediction of an agent-based model for urban decision-making, *Proceedings of the 17th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, Stockholm, Sweden, 2171-2173, 10-15 July, 2018.
144. Salem H., Attiya G., El-Fishawy N. A survey of multi-agent based intelligent decision support system for medical classification problems, *International Journal of Computer Applications*, 123 (10), 2015.
145. Sebestyénová J., Case-based reasoning in agent-based decision support system, *Acta Polytech. Hung.*, 4 (1), 127-138, 2007.
146. do Nascimento N.M., de Lucena C.J.P., FloT: An agent-based framework for self-adaptive and self-organizing applications based on the Internet of Things, *Information Sciences*, 378, 161-176, 2017.
147. Rao J., Sardinha A., Sadeh N., A meta-control architecture for orchestrating policy enforcement across heterogeneous information sources, *Journal of Web Semantics*, 7 (1), 40-56, 2009.
148. Sicari S., Rizzardi A., Grieco L.A., Coen-Porisini, A. Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead, *Comput. Networks*, 76, 146-164, 2015.
149. Zenzem W., Tagina M., Cooperative multi-agent systems using distributed reinforcement learning techniques. *Procedia Computer Science*, 126, 517-526, 2018.
150. Zenzem W., Hosni I., A New Distributed Reinforcement Learning Approach for Multiagent Cooperation Using Team-mate Modeling and Joint Action Generalization, *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, 5 (2), 1-12, 2020.
151. Sandita A.V., Popirlan C.I., Developing a multi-agent system in JADE for Information management in educational competence domains, *Procedia Economics and Finance*, 23, 478-486, 2015.
152. DiLeo J., Jacobs T., DeLoach S., Integrating ontologies into multiagent systems engineering, *Technical report*, Air Univ Maxwell AFB Al Center For Aerospace Doctrine Research and Education, 2006.
153. OroojlooyJadid A., Hajinezhad D., A review of cooperative multi-agent deep reinforcement learning, *arXiv preprint arXiv:1908.03963*, 2019.
154. Khan M., Speeding up GDL-based distributed constraint optimization algorithms in cooperative multi-agent systems, *Doktora Tezi*,

- University of Southampton, Faculty of Physical Sciences and Engineering, Southampton, 2018.
155. Zhou P., Shen H., Multi-agent cooperation by reinforcement learning with teammate modeling and reward allotment, 2011 Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), IEEE, Shanghai, China, 1316-1319, 26-28 July, 2011.
  156. Zemzem W., Tagina M., Cooperative multi-agent reinforcement learning in a large stationary environment, 2017 IEEE/ACIS 16th International Conference on Computer and Information Science (ICIS). IEEE, Wuhan, China, 365-371, 24-26 May, 2017.
  157. Gupta J.K., Egorov M., Kochenderfer M., Cooperative multi-agent control using deep reinforcement learning, International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Springer, São Paulo, Brazil, 66-83, 8-12 May, 2017.
  158. Torreno A., Onaindia E., Komenda A., Štolba M., Cooperative multi-agent planning: a survey, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 50, 1-32, 2017.
  159. Egger G., Chaltsev D., Giusti A., Matt D.T., A deployment-friendly decentralized scheduling approach for cooperative multi-agent systems in production systems. *Procedia Manuf.*, 52, 127-132, 2020.
  160. Julian V., Botti V. Multi-agent systems, *Applied Sciences*, 9 (7), 1402, 2019.
  161. Gottesman O., Johansson F., Meier J., Dent J., Lee D., Srinivasan S., Zhang L., Ding Y., Wihl D., Peng X., Yao J., Lage I., Mosch C., Lehman L.H., Komorowski M., Komorowski M., Faisal A., Celi L.A., Sontag D., Doshi-Velez F., Evaluating reinforcement learning algorithms in observational health settings, arXiv preprint arXiv:1805.12298, 2018.
  162. Nguyen T.T., Nguyen N.D., Nahavandi S., Deep reinforcement learning for multiagent systems: A review of challenges, solutions, and applications, *IEEE Trans. Cybern.*, 50, 3826-3839, 2020.
  163. Kuhnle A., Kaiser J.P., Theiß F., Stricker N., Lanza G., Designing an adaptive production control system using reinforcement learning, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32, 855-876, 2021.
  164. Du W., Ding S., A survey on multi-agent deep reinforcement learning: from the perspective of challenges and applications, *Artificial Intelligence Review*, 54 (12), 1-24, 2020.
  165. Lowe R., Wu Y., Tamar A., Harb J., Abbeel P., Mordatch I., Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments, arXiv preprint arXiv:1706.02275, 2017.
  166. Park Y.J., Lee Y.J., Kim S.B., Cooperative multi-agent reinforcement learning with approximate model learning, *IEEE Access*, 8, 125389-125400, 2020.
  167. Hu J., Zhang H., Song L., Schober R., Poor H.V., Cooperative internet of UAVs: Distributed trajectory design by multi-agent deep reinforcement learning, *IEEE Trans. Commun.*, 68, 6807-6821, 2020.
  168. Glavic M., Agents and multi-agent systems: a short introduction for power engineers, Technical report, Electrical Engineering and Computer Science Department, University of Liege, 2006.
  169. Salazar L.A.C., Mayer F., Schütz D., Vogel-Heuser B., Platform independent multi-agent system for robust networks of production systems. *IFAC-PapersOnLine*, 51, 1261-1268, 2018.
  170. Peng C., Optimization Based Control for Multi-agent System with Interaction, Doktor Tezi, University of California, Mechanical Engineering Faculty, Berkeley, 2019.
  171. Zhang H., Ji H., Ye Z., Senping T., Zhang H., Li C., Impulsive consensus of multi-agent systems with stochastically switching topologies, *Nonlinear Anal. Hybrid Syst*, 26, 212-224, 2017.
  172. Lu A.Y., Yang G.H., Distributed consensus control for multi-agent systems under denial-of-service, *Information Sciences*, 439, 95-107, 2018.
  173. Sampaio R.F., Melo L.S., Leão R.P., Barroso G.C., Bezerra J.R., Automatic restoration system for power distribution networks based on multi-agent systems, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 11, 475-484, 2017.
  174. Sujil A., Agarwal S.K., Kumar R., Centralized multi-agent implementation for securing critical loads in PV based microgrid, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 2, 77-86, 2014.
  175. Zhang Z., Yang J., Zha H., Integrating independent and centralized multi-agent reinforcement learning for traffic signal network optimization, arXiv preprint arXiv:1909.10651, 2019.
  176. Wang S., Zhang P., Fan Y., Centralized event-triggered control of multi-agent systems with dynamic triggering mechanisms, 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC), IEEE, Qingdao, China, 2183-2187, 23-25 May, 2015.
  177. Simões D., Lau N., Reis L.P., Multi-agent actor centralized-critic with communication, *Neurocomputing*, 390, 40-56, 2020.
  178. Sayed A.S., Ammar H.H., Shalaby R., Centralized Multi-agent Mobile Robots SLAM and Navigation for COVID-19 Field Hospitals, 2020 2nd Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference (NILES). IEEE, Giza, Egypt, 444-449, 24-26 October, 2020.
  179. Ackermann J., Gabler V., Osa T., Sugiyama M., Reducing overestimation bias in multi-agent domains using double centralized critics, arXiv preprint arXiv:1910.01465, 2019.
  180. Khan A., Zhang C., Lee D.D., Kumar V., Ribeiro A., Scalable centralized deep multi-agent reinforcement learning via policy gradients. arXiv preprint arXiv:1805.08776, 2018.
  181. Dobbe R., Fridovich-Keil D., Tomlin C., Fully decentralized policies for multi-agent systems: An information theoretic approach, arXiv preprint arXiv:1707.06334, 2017.
  182. Mhamdi E.M.E., Guerraoui R., Hendrikx H., Maurer A., Dynamic safe interruptibility for decentralized multi-agent reinforcement learning, arXiv preprint arXiv:1704.02882, 2017.
  183. Ponomarev S., Voronkov A., Multi-agent systems and decentralized artificial superintelligence, arXiv preprint arXiv:1702.08529, 2017.
  184. Samadi E., Badri A., Ebrahimpour R., Decentralized multi-agent based energy management of microgrid using reinforcement learning, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 122, 106211, 2020.
  185. Zhang K., Yang Z., Liu H., Zhang T., Basar T., Fully decentralized multi-agent reinforcement learning with networked agents, International Conference on Machine Learning, PMLR, 5872-5881, 2018.
  186. Krishnan V.G., Ram N.S., Analyze traffic forecast for decentralized multi agent system using I-ACO routing algorithm, *J. Ambient Intell. Hum. Comput.*, 1-8, 2018.
  187. Khan M.M., Kasmarik K., Barlow M., Toward computational motivation for multi-agent systems and swarms, *Front. Rob. AI*, 5, 134, 2018.
  188. Omidshafiei S., Pazis J., Amato C., How J.P., Vian J., Deep decentralized multi-task multi-agent reinforcement learning under partial observability, International Conference on Machine Learning, PMLR, 2681-2690, 2017.
  189. Januário F.E.P., Leitão J., Cardoso A., Gil P., Resilience Enhancement in Cyber-Physical Systems: A Multiagent-Based Framework, Multi-agent Systems, IntechOpen, 2017.
  190. Sibbel R., Christoph U., Agent-based modeling and simulation for hospital management, Cooperative agents, Springer, Dordrecht, 183-202, 2001.
  191. Macal C.M., North M.J., Tutorial on agent-based modeling and simulation, Proceedings of the Winter Simulation Conference, IEEE, Orlando, FL, USA, 14, 4 December, 2005.
  192. Niazi M., Hussain A., Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models: a visual survey, *Scientometrics*, 89 (2), 479-499, 2011.
  193. Konak A., Cabrera-Mora F., Kulturel-Konak S., Agent-based simulations for multi-robot systems exploration of tree-like environments, 2018 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), IEEE, Kandima, Maldives, 172-176, 1-5 August, 2018.
  194. Baykasoğlu A., Saltabaş A., Taşan A.S., Subulan K., Realizing artificial immune system in a multi agent simulation environment and an application to travelling salesmen problem, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (4), 901-909, 2012.
  195. Görmüş S., Aydın H., Ulutaş G., Security for the internet of things: a survey of existing mechanisms, protocols and open research issues, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1247-1272, 2018.
  196. Giret A., Trentesaux D., Salido M.A., Garcia E., Adam E., A holonic multi-agent methodology to design sustainable intelligent manufacturing control systems, *Journal of cleaner production* 2017, 167, 1370-1386, 2018.
  197. Tang H., Li D., Wang S., Dong Z., CASOA: an architecture for agent-based manufacturing system in the context of industry 4.0, *IEEE Access*, 6, 12746-12754, 2017.
  198. Woo J., Shin S.J., Seo W., Meilanitasari P., Developing a big data analytics platform for manufacturing systems: architecture, method, and implementation, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 99, 2193-2217, 2018.
  199. Sahin C., Demirtas M., Erol R., Baykasoğlu A., Kaplanoğlu V., A multi-agent based approach to dynamic scheduling with flexible

- processing capabilities, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28, 1827-1845, 2017.
200. Koren Y., Gu X., Guo W., Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13, 121-136, 2018.
  201. Zhang D., Feng G., Shi Y., Srinivasan D., Physical safety and cyber security analysis of multi-agent systems: A survey of recent advances, *IEEE/CAA J. Autom. Sin.*, 8, 319-333, 2021.
  202. Wang J., Zhang Y., Liu Y., Wu N., Multiagent and bargaining-game-based real-time scheduling for internet of things-enabled flexible job shop, *IEEE Internet Things J.*, 6, 2518-2531, 2018.
  203. Qu Y., Ming X., Liu Z., Zhang X., Hou Z., Smart manufacturing systems: state of the art and future trends, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 103, 3751-3768, 2019.
  204. Calis, B., *Cooperation & Coordination of Distributed Intelligent Agents for Manufacturing Systems*, Doktora Tezi, Marmara University, Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences, Istanbul, 2015.
  205. Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A., Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: correlation and comparison, *Engineering*, 5 (4), 653-661, 2019.
  206. Anvari-Moghaddam A., Rahimi-Kian A., Mirian M.S., Guerrero J.M., A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system, *Appl. Energy*, 203, 41-56, 2017.
  207. Shi L., Guo G., Song X., Multi-agent based dynamic scheduling optimisation of the sustainable hybrid flow shop in a ubiquitous environment, *Int. J. Prod. Res.*, 59, 576-597, 2021.
  208. Khan M.W., Wang J., Ma M., Xiong L., Li P., Wu F., Optimal energy management and control aspects of distributed microgrid using multi-agent systems, *Sustainable Cities Soc.*, 44, 855-870, 2019.
  209. Mohseni S., Moghaddas-Tafreshi S.M., A multi-agent system for optimal sizing of a cooperative self-sustainable multi-carrier microgrid, *Sustainable Cities Soc.*, 38, 452-465, 2018.
  210. Wang B., Chen W., Wang J., Zhang B., Zhang Z., Qiu X., Accurate cooperative control for multiple leaders multiagent uncertain systems: A two-layer node-to-node communication framework, *IEEE Trans. Ind. Inf.*, 14, 2395-2405, 2017.
  211. Barenji A.V., Barenji R.V., Roudi D., Hashemipour M., A dynamic multi-agent-based scheduling approach for SMEs, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 89, 3123-3137, 2017.
  212. Barenji A.V., Barenji R.V., Hashemipour M., Flexible testing platform for employment of RFID-enabled multi-agent system on flexible assembly line, *Adv. Eng. Software*, 91, 1-11, 2016.
  213. Barenji A.V., Shaygan A., Barenji R.V., Simulation platform for multi agent based manufacturing control system based on the hybrid agent, arXiv preprint arXiv:1603.07766, 2016.
  214. Karavas C.S., Arvanitis K., Papadakis G., A game theory approach to multi-agent decentralized energy management of autonomous polygeneration microgrids, *Energies*, 10, 1756, 2017.
  215. Yu W., Wang H., Hong H., Wen G., Distributed cooperative anti-disturbance control of multi-agent systems: an overview, *Science China Information Sciences*, 60, 110202, 2017.
  216. Nouri H.E., Driss O.B., Ghédira K., Solving the flexible job shop problem by hybrid metaheuristics-based multiagent model, *J. Ind. Eng. Int.*, 14, 1-14, 2018.
  217. Wang D., Wang W., Necessary and sufficient conditions for containment control of multi-agent systems with time delay, *Automatica*, 103, 418-423, 2019.
  218. Singh A., Jain T., Sukhbaatar S., Learning when to communicate at scale in multiagent cooperative and competitive tasks, arXiv preprint arXiv:1812.09755, 2018.
  219. Lv Y., Lin D., Design an intelligent real-time operation planning system in distributed manufacturing network, *Industrial Management & Data Systems*, 2017.
  220. Tao F., Cheng Y., Zhang L., Nee A.Y.C., Advanced manufacturing systems: socialization characteristics and trends, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-16, 2015.
  221. Shen W., Norrie D.H., Agent-based systems for intelligent manufacturing: a state-of-the-art survey, *Knowledge and Information Systems*, 1, 129-156, 1999.
  222. Darbari M., Ahmad H., Application of multi agent system in supply chain for e-products of government with special reference to government e-marketplace, *Proceedings of the Third International Conference on Advanced Informatics for Computing Research*, Shimla, India, 10, 1-3, 15-16 June, 2019.
  223. Howell S., Rezgui Y., Hippolyte J.L., Jayan B., Li H., Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 77, 193-214, 2017.
  224. Siderska J., Jadaan K.S., Cloud manufacturing: a service-oriented manufacturing paradigm. A review paper, *Engineering Management in Production and Services*, 10 (1), 22-31, 2018.
  225. Wang X.V., Givvehchi M., Wang L., Manufacturing system on the cloud: a case study on cloud-based process planning, *Procedia CIRP*, 63, 39-45, 2017.
  226. Hmida F.B., Seguy A., Dupuy R., *MultiAgent Systems for Production Planning and Control in Supply Chains*, Distributed Computing and Artificial Intelligence, Springer, Salamanca, Spain, 205-212, 28-30 March, 2012.

