

# YAPAY BAĞIŞIKLIK SİSTEMİNİN ÇOKLU ETMEN BENZETİM ORTAMINDA REALİZE EDİLMESİ VE GEZGİN SATICI PROBLEMİNE UYGULANMASI

**Adil BAYKASOĞLU, Alper SALTABAŞ, A. Serdar TAŞAN, Kemal SUBULAN**  
Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir,  
[adil.baykasoglu@deu.edu.tr](mailto:adil.baykasoglu@deu.edu.tr), [alper.saltabas@gmail.com](mailto:alper.saltabas@gmail.com), [serdar.tasan@deu.edu.tr](mailto:serdar.tasan@deu.edu.tr),  
[kemal.subulan@deu.edu.tr](mailto:kemal.subulan@deu.edu.tr)

(Geliş/Received: 12.03.2012; Kabul/Accepted: 09.08.2012)

## ÖZET

Kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilen birçok meta-sezgisel algoritma bulunmasına rağmen bu algoritmaları etmen tabanlı modelleme ortamında realize eden çalışmaların sayısı çok azdır. Özellikle Yapay Bağışıklık Sisteminin (YBS) dinamiklerini modelleyen algoritmaların adaptasyon yeteneğine sahip popülasyon tabanlı yaklaşımlar olması, YBS'nin etmen tabanlı modelleme ortamında gerçeğe daha yakın bir şekilde realize edilmesini sağlayacaktır. Bu amaçla ilk defa mevcut çalışmada, bir kombinatoriyal optimizasyon problemi olan gezgin satıcı probleminin (GSP) modellenmesi ve çözümü için yapay bağışıklık sistemi algoritmalarından klonal seçim algoritması çoklu etmen benzetim ortamında modellenmiş ve algoritmanın gösterdiği davranışın incelenmesi için farklı GSP setleri üzerinde benzetim deneyleri gerçekleştirilmiştir. Etmen tabanlı modellerin geliştirilmesi ve benzetim testlerinin yapılabilmesi için Netlogo yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca geleneksel klonal seçim algoritmasının performansını arttırmak için reseptör değişim süreci ve çaprazlama mekanizması önerilen modele entegre edilmiş ve doğal oluşları daha gerçekçi modelleyebilen etmen tabanlı yaklaşımlar ile de etkin çözümler elde edilebileceği gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Etmen tabanlı modelleme ve benzetim, yapay bağışıklık sistemi, klonal seçim algoritması, gezgin satıcı problemi.

## REALIZING ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEM IN A MULTI AGENT SIMULATION ENVIRONMENT AND AN APPLICATION TO TRAVELLING SALESMEN PROBLEM

### ABSTRACT

Although many meta-heuristic algorithms were developed for solving combinatorial optimization problems, very few of them were realized in an agent based environment. Especially the algorithms which model dynamics of Artificial Immune Systems (AIS) are population based approaches with adaptability characteristics, therefore AIS can be better realized in an agent based modeling environment. For this purpose first time in the literature a clonal selection algorithm which is an AIS based algorithm is modeled in a multi-agent environment for solving the travelling salesmen problem which is a combinatorial optimization problem. In order to observe the behavior of the algorithm, simulation experiments are carried out on several test problems. Netlogo software is utilized for developing agent based models and simulation tests. Moreover, receptor change process and crossover mechanisms are integrated into the proposed model in order to improve the performance of the classical clonal selection algorithm. It is shown that there is a high potential to obtain good solution by making use of agent oriented approaches which more realistically model the natural phenomenon.

**Keywords:** Agent based modeling and simulation, artificial immune system, clonal selection algorithm, travelling salesmen problem.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

NP-zor problemler ailesinin en bilinen üyesi olan ve çok sayıda uygulama sahası bulunan Gezgin Satıcı Problemi (GSP) bilimsel yazında hala güncelliğini korumaktadır. Özellikle büyük boyutlu gezgin satıcı problemlerinin çözümü için bilimsel yazında birçok araştırmacı tarafından sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar üzerine çalışmalar yapılmıştır ve yapılmaya devam edilmektedir. GSP'ne uygulanan meta-sezgisel algoritmalarından birisi de yapay bağışıklık sistemi algoritmasıdır. Örneğin; De Castro ve Von Zuben [1] yapay bağışıklık algoritmalarından birisi olan *klonal seçim algoritmasını* gezgin satıcı problemine uygulamışlardır. Gao vd. [2], reseptör değişim süreci mekanizmasını klonal seçim algoritmasına entegre ederek gezgin satıcı probleminin çözümü için çeşitli deneyler yapmışlardır. Dai vd. [3, 4] tarafından geliştirilen özgün bir çaprazlama mekanizması, klonal seçim algoritması ile birlikte kullanılarak gezgin satıcı probleminin çözümü için kullanılmıştır. Sözü edilen tüm bu ve pek çok diğer doğadan esinlenen meta-sezgisel algoritma klasik yapısal (*structured*) modelleme ve programlama yaklaşımı ele alınarak modellenmiş ve programlanmıştır. Her ne kadar bu şekilde programlanan algoritmalar ile başarılı sonuçlar elde edilmiş olsa da yapısal modelleme ve programlama yaklaşımı doğal sistemlerin dağıtık ve etkileşimli yapısını tam olarak ifade etmekten uzaktır. Yapay bağışıklık sisteminin dinamiklerini modelleyen algoritmaların adaptasyon ve etkileşim yeteneğini öne çıkaran popülasyon tabanlı algoritmalar olması, bu yaklaşım kullanılarak çözülecek problemlerin etmen tabanlı modelleme ortamında gerçeğe daha yakın realize edilmesini sağlayacaktır. Bu çalışmanın ana amacı ve temel katkısı popülasyon tabanlı bir meta-sezgisel olan klonal seçim algoritmasının gezgin satıcı problemi üzerinden etmen tabanlı benzetim ortamında gerçeğe daha yakın bir şekilde realize edilerek performansını incelemektir. Daha önce de ifade edildiği gibi bilimsel yazında GSP'nin çözümü için klonal seçim algoritmasının kullanıldığı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, etmen tabanlı modelleme ortamında yapay bağışıklık algoritmaları kullanılarak GSP ve diğer kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümü için herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bununla birlikte etmen temelli modelleme ve programlama yaklaşımları kullanılarak modellenen çeşitli yapay bağışıklık sistemi algoritmaları bulunmaktadır, bunlardan mevcut makaleye de ilham veren bazı temel çalışmalar takip eden paragrafta özetlenmiştir. Bağışıklık sistemleri ile bilgisayar ağlarının güvenlik sistemleri arasında anlamlı bir benzerlik olduğu düşünüldüğünden, Machado vd. [5] doğal yapıların realize edilmesinde etkin bir modelleme tekniği olan etmen tabanlı modellemeyi kullanarak yapay bağışıklık sistemlerini büyük ölçekli bilgisayar ağlarının güvenliğini sağlamak amacıyla uygulamışlardır. Çoklu etmen sistemleri ile yapay bağışıklık sistemi arasında birçok benzerlik olması, Grilo vd.'nin [6] virüs ve bağışıklık hücrelerinin dinamik değişimlerini gösteren genetik algoritma ve

hücresel otomatın kombinasyon özelliğine dayalı bir bağışıklık sistemi modeli geliştirmişlerine yön vermiştir. Bağışıklık sistemindeki tehlike teorisinden ilham alan çoklu etmen tabanlı bir yapay bağışıklık sistemi modeli bilgisayar ağlarının güvenliği için Ou vd. [7] tarafından önerilmiştir. Mendao vd. [8] etmen tabanlı modelleme ve UML (*Unified Modelling Language*) tekniklerini bir arada kullanarak bağışıklık sistemlerinden ilham alan bir algoritma geliştirmişlerdir. Sathyanath ve Sahin [9] mayın tarama ve difüzyon problemi için çoklu etmen modellemeye dayalı bir yapay bağışıklık sistemi önermişlerdir, bu sayede önerdikleri model ile etmen tabanlı uygulamaların çözümü sağlanabilmektedir. Mamady vd. [10] çoklu etmen modellemeye dayalı bir yapay bağışıklık sistemi geliştirerek birden çok robotun ve nesnenin bulunduğu bir yer değiştirme probleminin çözümüne çalışmışlardır. Chingtham vd. [11] ortak bir amacı gerçekleştirmeye çalışan robotların hareketlerini düzenlemek için özgün bir yapay bağışıklık sistemini çoklu etmen paradigmasına dayanarak modellemişlerdir. Ayrıca robotlara otonom öğrenme yeteneği kazandıran bir yapay bağışıklık sistemini Singh ve Nair [12] çoklu etmen robot sistemi için geliştirmişlerdir. Daha önce de ifade edildiği gibi; bu çalışmanın ana amacı, bir kombinatoriyal optimizasyon problemi olan gezgin satıcı probleminin çözümü için yapay bağışıklık sistemi algoritmalarından klonal seçim algoritmasının çoklu etmen benzetim ortamında modellenmesi ve algoritmanın gösterdiği davranışın incelenmesi için benzetim deneylerinin yapılmasıdır. Bağışıklık hücrelerinin otonom olması, ayrıca birbirleriyle ve çevreyle etkileşim içinde oldukları düşünüldüğünde etmen tabanlı modelleme ve benzetimin yapay bağışıklık sistemlerinin modellenmesi için son derece uygun bir araç olduğu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca; bağışıklık hücrelerinin öğrenme ve adaptasyon yeteneği de bir etmen tabanlı modelleme ve benzetim aracı olan Netlogo'nun problemin çözümü için son derece uygun bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Mevcut çalışma ile ilk defa bir kombinatoriyal optimizasyon problemi için yapay bağışıklık temelli bir algoritma (klonal seçim algoritması) etmen tabanlı bir benzetim ortamında (Netlogo) realize edilecek ve performansı test edilecektir. Önerilen yaklaşımın performansını değerlendirmek üzere optimum sonuçları bilinen sekiz farklı gezgin satıcı problemi ele alınmış ve toplam 4800 adet benzetim deneyi Netlogo ortamında gerçekleştirilmiştir.

## 2. BAĞIŞIKLIK BİLİMİ VE YAPAY BAĞIŞIKLIK SİSTEMİ (IMMUNOLOGY SCIENCE AND ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEM),

### 2.1. Biyolojik Bağışıklık Sistemi (Biological Immune System)

Dasgupta ve Nino [13] biyolojik bağışıklık sistemini şu şekilde tanımlamaktadır: bağışıklık sistemi bir dizi organların, moleküllerin ve hücrelerin bir araya gelmesinden oluşur ve bir patojen varlığında bu sistemi oluşturan parçaların gösterdiği düzenli tepkiye bağışıklık tepkisi (*immune response*) denir. Bağışıklık

**Tablo 1.** Yapay bağışıklık algoritmaları ve uygulama alanları [13] (Artificial immune algorithms and the application areas)

İlham kaynağı olan bağışıklık mekanizması	Yapay bağışıklık algoritması	Uygulama Alanı
T hücreleri, “kendinden”/”kendinden olmayan” ayrımı	Negatif seçim algoritması	Anormallik tespiti, değişiklik tespiti
Bağışıklık hafızası, bağışıklık ağları ve B hücreleri	Yapay bağışıklık ağı algoritması	Öğrenme
Klonal çoğalma, benzerlik olgunlaşması ve B hücreleri	Klonal seçim algoritması	Arama ve optimizasyon
Doğal Bağışıklık Sistemi	Tehlike teorisi	Savunma stratejileri

sistemini meydana getiren hücreler ve mekanizmalar üzerine yapılan teorik araştırmalar sonucunda, yapay bağışıklık sistemine ilham kaynağı oluşturan birçok özellik keşfedilmiştir. Bu çalışmanın kapsamında ele alınan klonal seçim algoritması da, biyolojik bağışıklık sistemindeki B hücrelerinin ve bu hücrelerin ürettiği antikorların davranışları göz önüne alınarak bilimsel yazında geliştirilmiştir.

### 2.1.1. Bağışıklık Sisteminde Klonal Seçim Mekanizması (Clonal Selection Mechanism in Immune System)

B hücresinin yüzeyindeki reseptörler bir antijen ile birleştiğinde, B hücresi çoğalmaya ve ayrılmaya maruz kalacak şekilde uyarılır [13] ve antijenle birleşme gerçekleştikten sonra klonal seçim mekanizması devreye girer. B hücreleri, plazma ve hafıza hücreleri şeklinde ikiye ayrılır ve plazma hücreleri aracılığıyla antijene uygun antikorlar üretilir.

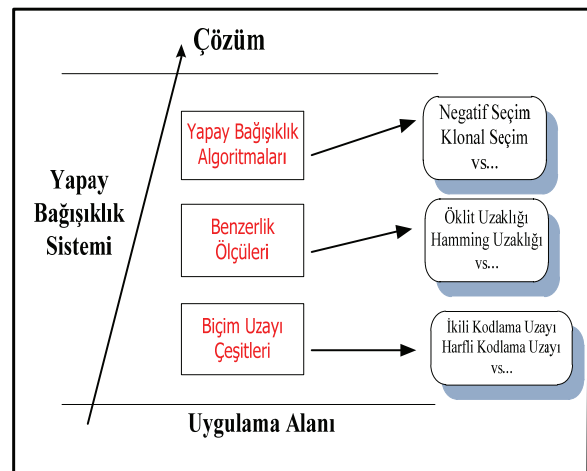
### 2.1.2. Biyolojik Bağışıklık Sisteminin İlham Kaynağı Oluşturan Özellikleri (Properties of Immune System that Form Inspiration)

Biyolojik bağışıklık sistemlerinin bilgisayar biliminde ve hesaplama (computation) alanında kullanılmasını avantajlı hale getiren temel özellikleri Timmis vd. [14] tarafından şu şekilde sıralanmıştır: kendi kendine organize olabilme, öğrenme ve hafıza, adaptasyon, tanımlama ve fark etme, sağlamlık ve ölçeklenebilirlik. Bağışıklık sistemleri, öğrenme ve hafıza yeteneği, dağıtık sistem özelliği, kendi kendine organize olabilme, tanımlama ve fark etme özellikleriyle karmaşık problemlerin çözümü için metafor oluşturmaktadır ve bu özellikleri sayesinde birçok orijinal yaklaşımın geliştirilmesine ilham kaynağı olmuştur.

## 2.2. Yapay Bağışıklık Sistemi ve İlgili Kavramlar (Artificial Immune System and Related Concepts)

Yapay bağışıklık sistemleri, bağışıklık sisteminden esinlenen ve gerçek hayat problemlerini çözmek için geliştirilen zeki ve uyum sağlayabilen sistemlerdir [15]. De Castro ve Timmis [16] tarafından yapay bağışıklık sistemi algoritmalarını tasarlamak amacıyla bir taslak geliştirilmiştir, bu taslağa göre bir yapay bağışıklık sistemi en azından aşağıdaki temel unsurlara sahip olmalıdır:

- Sisteme ait parçaların gösteriminin yapılabileceği bir ortam.
- Sistemdeki parçaların çevreyle ve birbirleriyle ilişkisini değerlendirecek mekanizmalar.
- Sistem dinamiklerini yöneten ve kontrol eden adaptasyon prosedürleri.

**Şekil 1.** Yapay Bağışıklık Sisteminin Tasarım Süreci (Design Process of the Artificial Immune System)

Ortaya konan bu taslak doğrultusunda yapay bağışıklık sisteminin tasarım süreci çok katmanlı bir yapıya sahip olmaktadır (Şekil 1). Yapay bağışıklık sistemlerinde, sisteme ait parçaların belirli yöntemler yardımıyla gösteriminin yapıldığı ortama “biçim uzayı” (shape space) denilmektedir. Sistemi oluşturan parçalar arasındaki etkileşimlerin değerlendirilmesi amacıyla kullanılan ölçü birimi ise “benzerlik ölçüsü” (affinity measure) olarak adlandırılmaktadır. Yapay bağışıklık sisteminin en üst katmanında sistemin dinamiklerini kontrol eden ve sistemin adaptasyon yeteneğini ortaya çıkaran yapay bağışıklık algoritmaları yer almaktadır.

### 2.2.1. Yapay Bağışıklık Algoritmaları (Artificial Immune Algorithms)

Yapay bağışıklık algoritmaları, bağışıklık bilimindeki mekanizmalardan ilham alınarak geliştirilen ve yapay bağışıklık sisteminin dinamiklerini yöneten çeşitli prosedürlerdir. Yapay bağışıklık sistemi algoritmaları, algoritmalara ilham kaynağı olan mekanizmalar ve algoritmaların kullanım alanlarını gösteren bir tablo yukarıda verilmiştir (Tablo 1).

### 3. ETMEN TABANLI MODELLEME VE BENZETİM (AGENT BASED MODELING AND SIMULATION)

Kesikli olay benzetimi ve sistem dinamikleri benzetimi ile ilgili olarak bilimsel yazında pek çok çalışma olmasına karşın, etmen tabanlı benzetim kavramıyla ilgili çalışmaların sayısı çok daha azdır ve yapılan çalışmalar incelendiğinde bu paradigmanın son on yıl içinde ilgi gören bir konu haline geldiği görülmektedir. Çünkü sistemi oluşturan parçalar, kendine özgü ve zaman içinde değişen davranışlar gösterdiğinde, bir başka deyişle otonom bir yapıya sahip olduğunda, bu sistemleri geleneksel modelleme ve benzetim yaklaşımları ile ele almak güçleşir. Etmen tabanlı benzetime olan ilginin artmasında etkili olan sebepler Macal ve North [17] tarafından şöyle özetlenmektedir: İlk olarak, analiz etmek ve modellenmek istenen sisteme ait parçaların etkileşimleri gün geçtikçe daha karmaşık hale gelmektedir. İkinci olarak, bazı sistemleri, gerçeğe en yakın şekliyle modellemek her zaman zor olmuştur. Üçüncü olarak, toplanan ve organize edilen mikro seviyedeki veriler, çok daha detaylı hale gelmiştir. Son olarak ve belki de en önemlisi, bilgisayarların hesaplama gücü gün geçtikçe artmaktadır. Bu sayede çok daha büyük ölçekli mikro-benzetim modelleri oluşturulabilmektedir. Etmen tabanlı modelleme ve benzetim sayesinde birbirleriyle ve çevreyle etkileşimi olan etmenler simüle edilir ve zaman içerisinde nasıl hareket ettikleri incelenir, bu şekilde etmenlerin meydana getirdiği sistemin davranışı da incelenmiş olur. Bu teknik yardımıyla sistemdeki aktörlerin mikro düzeyde modellenmesi söz konusudur ve realize edilen aktörlerin karar süreçlerini tam anlamıyla tanımlamak amaçlanır. Makro düzeydeki yapılar ise, etmenlerin eylemleri, çevreleri ve aynı zamanda birbirleriyle olan etkileşimleri sonucunda ortaya çıkar [18]. Etmen tabanlı modelleme tekniğinde ele alınan sistem, otonom ve karar verme yeteneğine sahip etmenlerden oluşmaktadır. Her etmen, kendi durumunu bireysel olarak değerlendirir ve bir dizi kuralı temel alarak karar verir [19]. Bilimsel yazında oldukça kabul gören bir etmen tanımı Bradshaw [20] tarafından yapılmıştır: “*Etmenler, kendine has davranışları olan nesnelerdir*”. Öte yandan yazında “*zeki etmen*” kavramı ise, kendine ait amaçları ve davranışları olan, karşılıklı etkileşim yeteneğine sahip, davranışlarını adapte edebilen ve değiştirebilen otonom varlık olarak tanımlanmıştır [18]. Macal ve North [17], etmenlerin sahip olması gereken özellikleri şu şekilde sıralamıştır: (1) Otonom olmak ve kendi kendini yönetebilmek; (2) Modüler olmak veya kendi kendine yetebilmek; (3) Sosyal olmak (etkileşimde bulunmak); (4) Bir çevre içerisinde yer almak; (5) Amaçlara sahip olmak; (6) Adaptasyon ve öğrenme.

#### 3.1. Çok Etmenli Sistemler (Multi-Agent Systems)

Çok etmenli sistem, birbirleriyle ve çevreleriyle etkileşim içinde olan çeşitli zeki etmenlerden oluşmuş heterojen bir topluluktur. Etmenlerin ortak bir amacı takım olarak başarmak gayesinde olduğu durumlarda

işbirlikçi etkileşim söz konusu olabilir, ya da etmenlerin kendi bireysel faydalarını maksimize etmeyi amaçladığı durumlarda rekabetçi bir etkileşim söz konusu olabilir. Etmenler, diğer etmenlerden ve çevreden bilgi alırlar ve bilişsel karar süreçlerini tanımlayan kurallara sahiptirler, bu şekilde nasıl tepki vereceklerini belirlerler [18, 21].

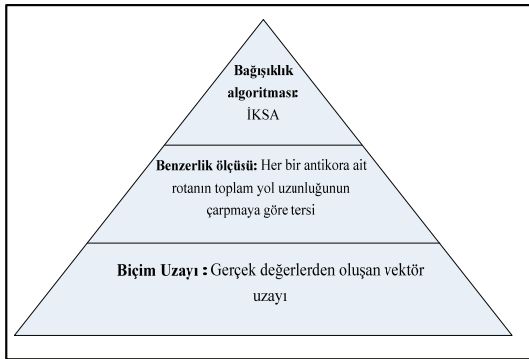
#### 3.2. Bir Etmen Tabanlı Modelleme ve Benzetim Aracı Olarak Netlogo (Netlogo as an Agent Based Modelling and Simulation Tool)

Etmen tabanlı modelleme ve benzetim araçları arasında en çok dikkat çekenlerden birisi de Netlogo’dur. Netlogo, etmen tabanlı modelleme ve benzetim yapmak amacıyla geliştirilmiş kendine özgü bir programlama diline sahip java tabanlı bir yazılımdır. Netlogo sayesinde özellikle karmaşık sistemlerin modellenmesi ve benzetimi etkin bir şekilde yapılabilmektedir. Yazılım, özellikle zaman içinde evrim geçiren ve adaptasyon, öğrenme gibi özelliklere sahip karmaşık sistemlerin modellenmesi amacıyla birçok çalışmada kullanılmıştır [22-24]. Bu açıdan bakıldığında Netlogo, popülasyon tabanlı algoritmaların modellenmesi ve algoritmanın davranışının realize edilmesi açısından son derece uygun bir yazılımdır. Netlogo yazılımında etmenlerin çeşitli tipleri bulunmaktadır. Hareket edebilen etmenlere “turtles” ismi verilmektedir ve bu etmenler, “patches” adı verilen bölgelerin üzerinde hareket etmektedirler. “Patches” olarak adlandırılan bölgeler de programlanabilir birer etmendir. Gözlemci (observer) ise Netlogo ortamındaki bir diğer etmen çeşididir. Gözlemci, bütün model ortamını gözetleyen ve diğer etmenlere (turtles ve patches) komut gönderebilen bir etmendir. Gözlemci etmeninin model ortamında (world) herhangi bir lokasyonu yoktur, diğer etmenleri dışarıdan takip eden bir gözlemci gibidir. Bütün etmenler birbirleriyle etkileşim içindedirler ve birçok görevi eşzamanlı olarak yerine getirebilmektedirler [25]. Tüm bu bilgiler ışığında popülasyon tabanlı bir meta-sezgisel olan klonal seçim algoritmasının etmen tabanlı modellenmesi için Netlogo uygun bir yazılım olarak karşımıza çıkmaktadır. Netlogo aynı zamanda tam sürümü akademik kullanım için ücretsiz olarak sağlanan bir yazılımdır. Yazılıma <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> adresinden erişilebilir.

#### 4. Gezin Satıcı Probleminin Çözümü için Çoklu Etmen Benzetim Ortamında İyileştirilmiş Klonal Seçim Algoritmasının Uygulanması (Application of Improved Clonal Selection Algorithm for Solving Traveling Salesman Problem in Multi-Agent Simulation Environment)

Literatürde üzerine çok sayıda çalışma yapılmış olan gezin satıcı problemi, tipik bir kombinatoriyal optimizasyon problemidir ve NP-zor problemler sınıfına dahildir. Bu problemin çözümü için birçok popülasyon tabanlı meta-sezgisel algoritma geliştirilmiştir fakat bu algoritmalar arasında yapay bağışıklık algoritmalarının kullanıldığı çalışmaların sayısı görece olarak çok daha azdır. Daha önceki bölümlerde de değinildiği üzere yapay bağışıklık

sistemlerinin etmen tabanlı modelleme ve benzetim ortamında realize edilmesinin uygun bir yaklaşım olduğu düşünüldüğünde, ele alınan GSP'nin çözümü için klonal seçim algoritmasının bir etmen tabanlı modelleme ve benzetim aracı olan Netlogo yazılımı kullanılarak modellenmesi uygun bir yaklaşım olarak değerlendirilmiştir. Castro ve Von Zuben [1] tarafından geliştirilen geleneksel klonal seçim algoritmasının (GKSA) GSP'nin çözümü için ortaya koyduğu performans, bu çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda yetersiz görülmüştür (bkz Tablo 4). Bu nedenle, ilk olarak GKSA'ya Gao vd. [2] tarafından önerilen "reseptör değişim süreci" eklenerek KSA-RDS (klonal seçim algoritması - reseptör değişim süreci) algoritması geliştirilmiştir. Daha sonra sonuçları iyileştirmek amacıyla Dai vd. [4] tarafından özgün bir çaprazlama mekanizması olarak geliştirilen "distance maintaining compact quantum crossover" mekanizması KSA-RDS algoritmasına entegre edilmiştir ve İKSA (iyileştirilmiş klonal seçim algoritması) elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında Netlogo yazılımında modellenen yapay bağışıklık sisteminin çok katmanlı yapısı aşağıdaki gibidir (Şekil 2).



**Şekil 2.** Modellenen yapay bağışıklık sisteminin çok katmanlı yapısı (Multi-Layer Structure of The Modeled Artificial Immune System)

İKSA algoritmasına ait işlem adımları ve mantıksal akış Şekil 3'de gösterilmiştir.

$n$ : seçim büyüklüğü,  $m$ : klon büyüklüğü,  $pys$ : popülasyon yenileme sıklığı,  $pyo$ : popülasyon yenileme oranını ifade etmek üzere Şekil 3'deki İKSA algoritmasının detayları şu şekildedir:

**1. Adım:** "başlangıç popülasyon büyüklüğü" kadar rastgele etmen oluştur (etmen tipi: antibody-population-set).

**2. Adım:** Her bir antikora ait benzerlik değerini hesapla.

**3. Adım:** En iyi benzerlik değerine sahip  $n$  adet antikoru seç ve antikoları benzerlik değerlerine göre büyükten küçüğe doğru sırala ( $A_1, A_2, \dots, A_n$ ) (etmen tipi: antibody).

**4. Adım:** Seçilen her bir antikoru  $C_i$  adet klonla (etmen tipi: clone-antibody).

$$C_i = i. \text{ antikör için klon büyüklüğü} \\ = \text{yuvarla}((n - i) * m/n)$$

**5. Adım:** Her bir klon kümesindeki antikolar içinden rastgele olarak  $h_i$  ve  $r_i$  adet seçim yap, seçilen antikolar üzerinde hipermutasyon ve reseptör değişim süreci uygula; etmen tipleri: clone-antibody-hypermutated ve clone-antibody-receptor-edited. *Hipermutasyona uğrayacak antikör sayısı* :

$$h_i = \text{yuvarla}(C_i * 0.5)$$

*Reseptör değişim sürecine maruz kalacak antikör sayısı* :  $r_i = C_i - h_i$

**6. Adım:** Üçüncü adımda elde edilen antikoları kullanarak çaprazlama mekanizmasını uygula (etmen tipi: crossover-antibody).

**7. Adım:** Beşinci ve altıncı adımda elde edilen antikoların oluşturduğu  $n$  adet "değişime uğramış antikörler kümesi" için benzerlik değerlerini güncelle ve her bir küme için en iyi benzerlik değerine sahip antikoru seç ( $RS_1, RS_2, \dots, RS_n$ ) (etmen tipi: re-selected-antibody).

**8. Adım:** Yedinci adımda seçilen antikolar ile üçüncü adımda seçilmiş olan antikoları karşılaştır ve antikolar için güncelleme yap. Eski antikoları yok et. Bu aşamada antikör popülasyonunda çeşitlilik yaratabilmek amacıyla  $P$  olasılığı dikkate alınarak güncelleme yapılır. ( $\alpha : 100$ )

$B(\dots)$ : Benzerlik değeri olmak üzere

$$P_i = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } B(RS_i) > B(A_i) \\ 0, & \text{Eğer } B(A_1) > B(RS_1) \\ e^{-\frac{B(RS_i) - B(A_i)}{\alpha}}, & \text{Eğer } B(RS_i) < B(A_i) \end{cases}$$

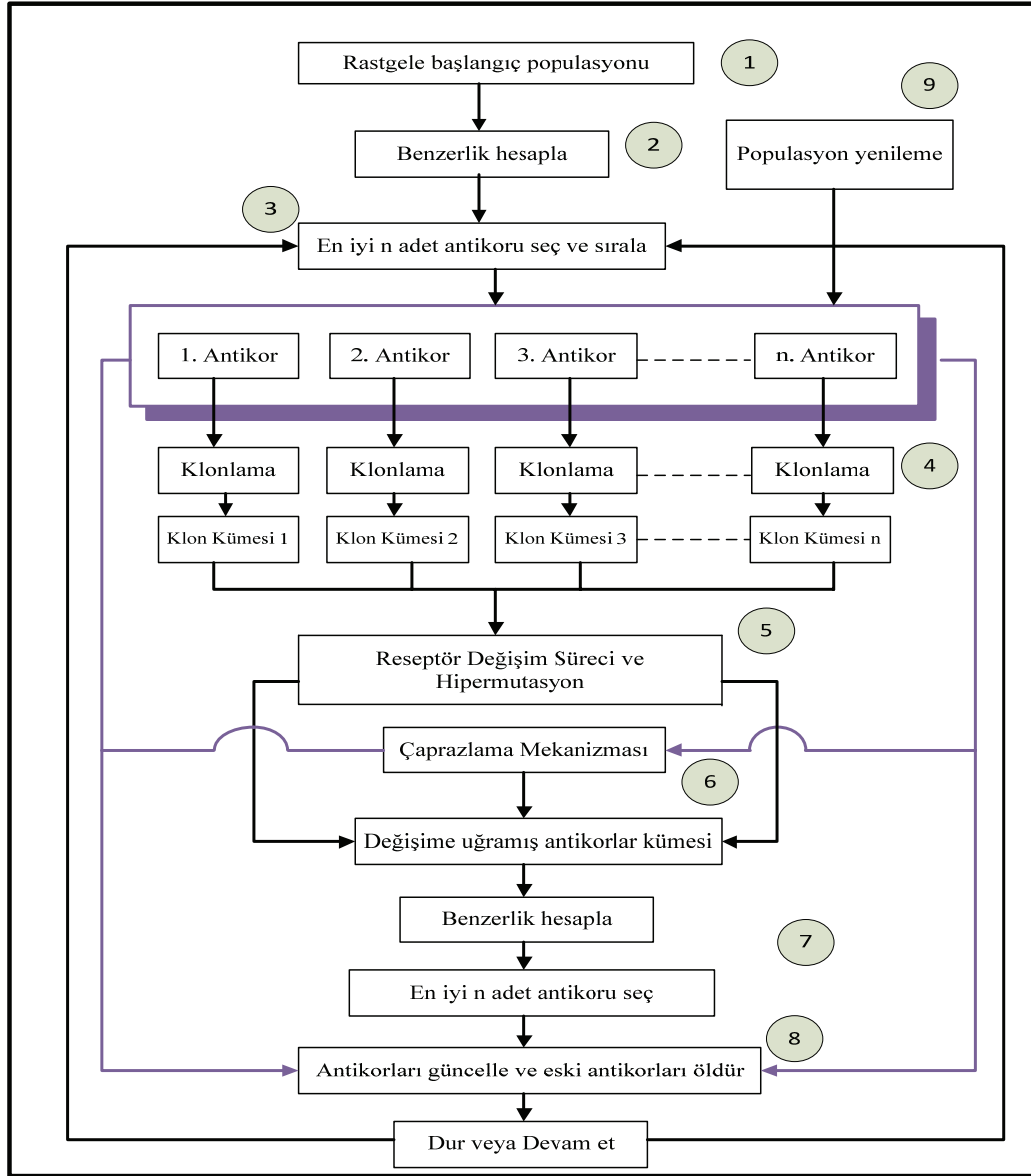
**9. Adım:** Her  $pys$  nesilde bir, seçilmiş antikolar içinden en düşük benzerlik oranına sahip  $k$  adet antikoru seç ve rastgele üretilen  $k$  adet antikör ile yer değiştir. *Yenileme büyüklüğü* :  $k = (n * pyo) / 100$

**10. Adım:** Maksimum nesil sayısına ulaşılmış ise dur, aksi durumda 3. adıma geri dön.

İKSA'nın kullandığı değişim mekanizmalarına ait açıklayıcı bilgi Şekil 4'de verilmiştir. İKSA'nın etmen tabanlı benzetim ortamında realize edilmesi sırasında kullanılan ve dinamik olarak değişime uğrayan etmen tipleri Şekil 5'de görülmektedir.

#### 4.1. Parametre Analizi ve Sonuçlar (Parameter Analysis and Results)

Parametre analizi sırasında bilimsel yazında referans GSP'ne ilişkin 8 adet veri seti kullanılmıştır: Bays29, Dantzig42, Eil51, St70, Eil76, Eil101, Pr124 ve KroA150. Algoritma performanslarının değerlendirilmesi amacıyla her bir algoritma için (GKSA, KSA-RDS, İKSA) 10 adet parametre seti kullanılmış olup her bir parametre seti için algoritmalar yirmişer kez çalıştırılmıştır ve toplamda 4800 adet benzetim deneyi, AMD Phenom II P920 Quad-core processor 1.60 GHZ işlemci ve 4GB belleğe sahip bir bilgisayarda Win7 işletim sistemi üzerinde Netlogo versiyon 4.1.3 yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



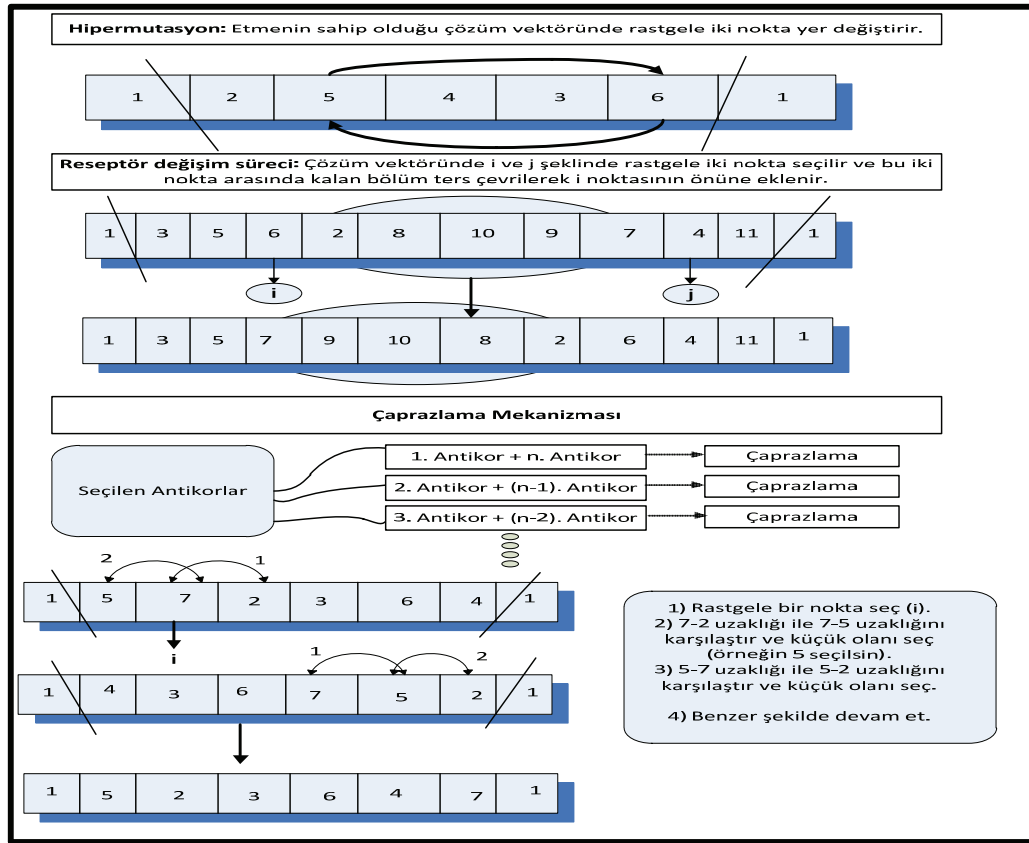
Şekil 3. İKSA'ya Ait Mantıksal Akış (Logical Flow Chart for the İKSA)

Kullanılan algoritmalar için en iyi performansı veren parametre setleri Tablo 2'de verilmiştir. Performans değerlendirmesi sırasında kriter olarak deney sonuçlarının ortalamasının optimum sonuçtan sapması dikkate alınmıştır. Tablo 2'deki parametre setleri dikkate alınarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen performans istatistikleri Tablo 4'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi amacıyla kullanılan EİSS ifadesi, en iyi sonucun sapması, EKSS ifadesi, en kötü sonucun sapması, SOS ifadesi ise, verilerin ortalamasının optimum sonuçtan % olarak ne kadar sapma gösterdiğini ifade etmektedir.

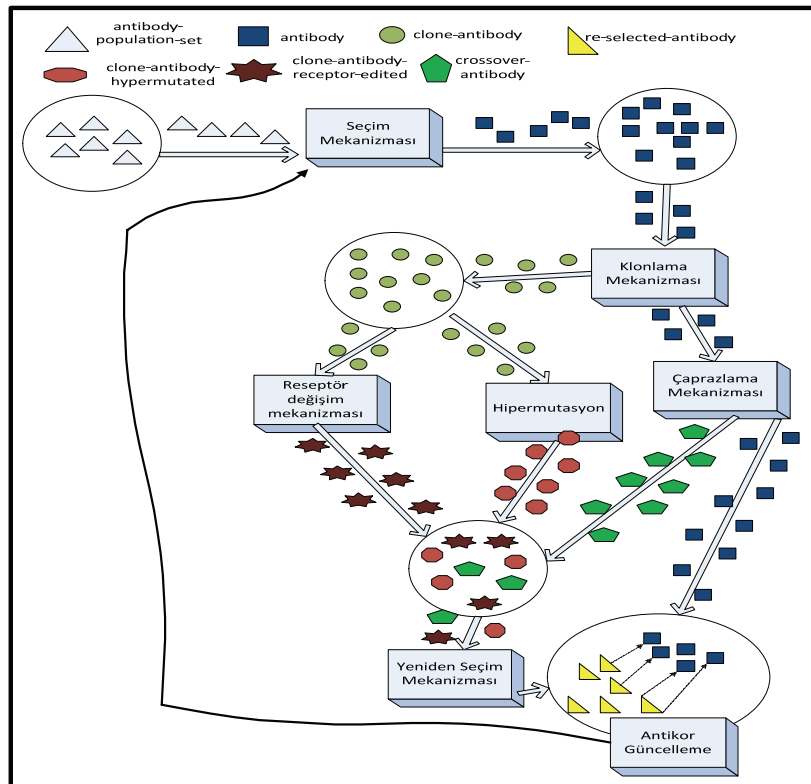
Tablo 2. En iyi performansı veren parametre setleri (Parameter sets that provide best performance for the algorithms)

	GKSA	KSA-RDS	İKSA
Başlangıç popülasyon büyüklüğü	400	M	M
Maksimum nesil sayısı	$N_{max}$	$G_{max}$	$G_{max}$
Seçim büyüklüğü	200	M	M
Klon büyüklüğü	20	50	50
Popülasyonu yenileme sıklığı	10	50	50
Popülasyonu yenileme oranı	20	10	10

M: Şehir Sayısı,  $G_{max}$ : ilgili probleme ait maksimum nesil sayısı (Tablo 3)



Şekil 4. İKSA'nın Kullandığı Değişim Mekanizmaları (Evolutionary Operators Utilized by İKSA)



Şekil 5. Etmen Tabanlı Benzetim Ortamında Kullanılan Etmen Tipleri (Agent Types Used in the Agent Based Simulation Environment)

**Tablo 3.** GSP'ler için maksimum nesil sayıları (Maximum generation numbers for the TSPs)

Gezgin Satıcı Problemi	$G_{max}$	$N_{max}$
Bays29	500	150
Dantzig42	1000	150
Eil51	1000	150
St70	1000	150
Eil76	1000	150
Eil101	1000	600
Pr124	1000	600
KroA150	1000	600

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında GKSA, KSA-RDS ve İKSA algoritmaları bir etmen tabanlı modelleme ve benzetim aracı olan Netlogo üzerinde literatürdeki 8 farklı referans GSP'yi ele alınarak realize edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, İKSA'nın tüm performans kriterleri göz önüne alındığında iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

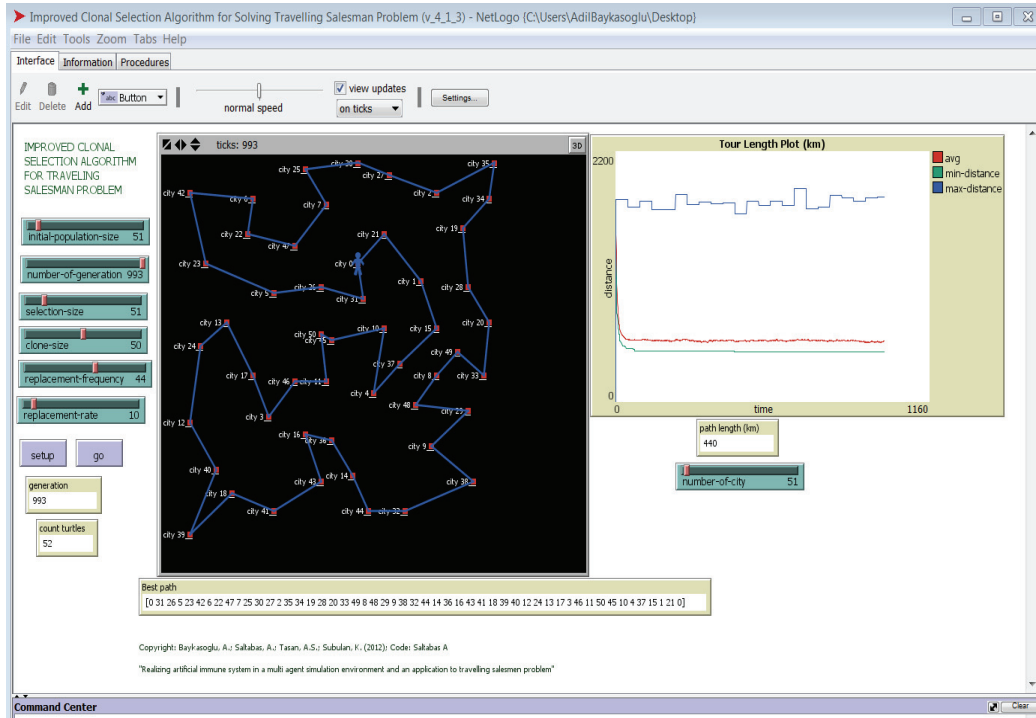
Ayrıca, YBS algoritmalarının etmen tabanlı modelleme ve benzetim ortamında realize edilmesi sonucunda algoritmanın davranışını gerçeğe daha yakın bir şekilde incelemek mümkün olmuştur. Elde edilen sonuçlar bilimsel yazındaki bilinen en iyi sonuçlara oldukça yakın sonuçlardır. Bu sonuçlar meta-sezgisel algoritmaların etmen temelli olarak da modellenip etkin sonuçlar üretilebilmesi olasılığının oldukça yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Önerilen algoritmanın geliştirilip sonuçların iyileştirilmesi mümkündür. Bu gelecek çalışmalara bırakılmıştır. Etmen temelli sistemlerin dinamik sistemleri çok etkin bir şekilde modelleyebilme özelliği olduğundan önerilen algoritmanın dinamik GSP'ne uygulanması da gelecek bir çalışma olarak planlanmıştır. Mevcut çalışma kapsamında geliştirilen yazılıma

<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/community/index.cgi>

adresinden erişilebilir.

**Tablo 4.** Algoritmalara ait benzetim deney sonuçları (Results of simulation experiments for the algorithms)

GSP	Optimum Sonuç (km.)	GKSA			KSA-RDS			İKSA			[26]	[27]
		EİSS (%)	EKSS (%)	SOS (%)	EİSS (%)	EKSS (%)	SOS (%)	EİSS (%)	EKSS (%)	SOS (%)	SOS (%)	SOS (%)
Bays29	2020	0,40	16,24	8,55	0,00	2,38	0,72	0,00	0,40	0,07	-	-
Dantzig42	699	11,59	27,18	21,33	0,00	3,15	1,14	0,00	1,43	0,13	-	-
Eil51	426	12,82	29,37	20,65	2,10	6,06	4,14	1,17	3,52	2,25	3,43	2,89
St70	675	30,96	66,67	47,88	3,70	9,78	6,50	0,30	4,74	2,54	-	-
Eil76	538	28,81	55,02	41,95	4,83	12,83	9,82	0,56	4,46	2,70	5,46	4,35
Eil101	629	24,80	47,38	37,55	8,43	15,74	12,43	3,02	9,86	6,53	4,17	3,78
Pr124	59030	103,74	173,89	134,47	6,86	25,89	15,13	2,01	9,07	5,22	-	-
KroA150	26524	79,69	118,31	99,61	12,3	25,93	20,95	4,25	8,63	6,24	4,61	3,06

**Şekil 6.** Eil51 Problemi İçin Yapılan Bir İKSA Benzetimi (A Simulation Result for the Eil51 Problem)



**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

1. De Castro, L. ve Von Zuben, F., "Learning and Optimization Using The Clonal Selection Principle", **Evolutionary Computation**, Cilt 6, Sayı 3, 239-251, 2002.
2. Gao, S., Dai, H., Yang, G. ve Tang, Z., "A Novel Clonal Selection Algorithm and Its Application to Traveling Salesman Problem", **IEICE Trans. Fundamentals**, Cilt E90-A, No 10, 2007.
3. Dai, H., Yang, Y. ve Li, C., "Improved Quantum Crossover Based Clonal Selection Algorithm", **Third International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems**, Shenyang - Çin, 366-369, 01-03 Kasım 2010.
4. Dai, H., Yang, Y. ve Li, C., "Distance Maintaining Compact Quantum Crossover Based Clonal Selection Algorithm", **Journal of Convergence Information Technology**, Cilt 5, No 10, 56-65, 2010.
5. Machado, R.B., Boukerche, A., Sobral, J.B.M., Juca, K.R.L. ve Notare, M.S.M.A., "A Hybrid Artificial Immune and Mobile Agent Intrusion Detection Based Model for Computer Network Operations", **19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium**, Denver - ABD, 04-08 Nisan 2005.
6. Grilo, A., Caetano, A. ve Rosa, A., "Agent Based Artificial Immune System", **Genetic and Evolutionary Computation Congress (Proc. GECCO-01)**, San Francisco - ABD, Cilt LBP, 145-151, 07-11 Temmuz 2001.
7. Ou, C.M. Wang, Y.T. ve Ou, C.R., "Intrusion Detection Systems Adapted From Agent-Based Artificial Immune Systems", **IEEE International Conference on Fuzzy Systems**, Taipei - Tayvan, 115-122, 27-30 Haziran 2011.
8. Mendao, M., Timmis, J., Andrews, P.S. ve Davies, M., "The Immune System in Pieces: Computational Lessons from Degeneracy in the Immune System", **IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence**, Havai, 394-400, 01-05 Nisan 2007.
9. Sathyanath, S. ve Sahin, F., "Application of Artificial Immune System Based Intelligent Multi Agent Model to a Mine Detection Problem", **IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, Hammamet - Tunus, 06-09 Ekim 2002.
10. Mamady, D., Tan, G., Toure, M.L. ve Alfawaer, Z.M., "An Artificial Immune System Based Multi-Agent Robotic Cooperation", **Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications, Automation and Industrial Electronics**, 60-67, 2008.
11. Chingtham, T.S., Sahoo, G. ve Ghose, M.K., "An Artificial Immune System Model for Multi Agents Resource Sharing in Distributed Environments", **International Journal on Computer Sciences and Engineering**, Cilt 2, No 5, 1813-1818, 2010.
12. Singh, C.T. ve Nair, S.B., "An Artificial Immune System for a Multi-Agent Robotics System", **Word Academy of Science, Eng. and Technology**, Cilt 11, Sayı 3, 6-9, 2005.
13. Dasgupta, D. ve Nino, F., **Immunological Computation: Theory and Applications**, Auerbach Publications, 2008.
14. Timmis, J., Hone, A., Stibor, T. ve Clark, E., "Theoretical Advances in Artificial Immune Systems", **Theoretical Computer Science**, Cilt 403, Sayı 1, 11-32, 2008.
15. Dasgupta, D., "Information Processing Mechanisms of the Immune System", **New Ideas in Optimization**, Corne, D., Dorigo, M. ve Glover, F., McGraw-Hill, ABD, 1999.
16. De Castro, L. N. ve Timmis, J., **Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach**, Springer, ABD, 2002.
17. Macal, C.M. ve North, M.J.; "Agent-based Modeling and Simulation", **Winter Simulation Conference 2009**, Austin - ABD, 86-98, 13-16 Aralık 2009.
18. Siebers, P.O. ve Aickelin, U., "Introduction to Multi Agent Simulation", **Encyclopedia of Decision Making and Decision Support Technologies**, Editör: Adam, F., Information Science Reference, ABD, 554-564, 2007.
19. Siebers, P.O., "Lecture Notes", <http://www.cs.nott.ac.uk/~pos/index.html>.
20. Bradshaw, J.M., **Software Agents**, The MIT Press, ABD, 1997.
21. Jennings, N., "On Agent-based Software Engineering", **Artificial Intelligence**, Cilt 117, Sayı 2, 277-296, 2000.
22. Pelta, D., Cruz C. ve Gonzalez, J.R., "A Study on Diversity and Cooperation in a Multiagent Strategy for Dynamic Optimization Problems", **International Journal of Intelligent Systems**, Cilt 24, Sayı 7, 844-861, 2009.
23. Terna P., "The epidemic of innovation - playing around with an agent-based model", **Economics of Innovation and New Technology**, Cilt 18, No 7, 707-728, 2009.
24. Sakellariou, I., Kefalas, P. ve Stamatopoulou, I., "Enhancing NetLogo to Simulate BDI Communicating Agents", **SETN '08 Proceedings of the 5th Hellenic Conference on Artificial Intelligence: Theories, Models and App.**, Syros, 263-275, 02-04,10, 2008.
25. Tissue, S. ve Wilensky, U., "NetLogo: design and implementation of a multi-agent modeling environment", **Proceedings of Agent**, Chicago - ABD, Ekim 2004.
26. Somhom, S., Modares, A. ve Enkawa, T., "A Self-organizing Model for the Traveling Salesman Problem", **J. of the OR Society**, Cilt 48, No 9, 919-928, 1997.
27. Cochrane, E. M., ve Beasley, J. E., "The Co-adaptive Neural Network Approach to the Euclidean Traveling Salesman Problem", **Neural Networks**, Cilt 16,10, 1499-1525, 2003

