

# **Gelecek Nesil İletişim Ağları İçin Biyolojik-Esinli İletişim Teknikleri**

**Proje No: 106E179**

Doç.Dr. Özgür Barış Akan

AĞUSTOS 2009  
ANKARA

## Önsöz

TÜBİTAK tarafından desteklenen "Gelecek Nesil İletişim Ağları İçin Biyolojik-Esinli İletişim Teknikleri" isimli bu projede kablosuz ağlar, algılayıcı ağlar, bilişsel radyo ağları, kablosuz çokluortam algılayıcı ağlar, ve nano-ağlar gibi pek çok gelecek nesil haberleşme ağları için biyolojik tabanlı haberleşme teknikleri geliştirilmiştir. Geliştirilen protokoller değişik uluslararası konferans ve dergilerde bilimsel makale ve bildiri olarak yayımlanmıştır. Biyolojik-esinli iletişim alanında ülkemizde yapılan ilk temel araştırma olan bu proje, yurt dışında da sayılı ilk projeler arasındadır. Bu proje kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen pek çok sonuç ilk olarak literatüre kazandırılmıştır. Yapılan araştırmaların sonuçlarından pek çok konferansta eğitim seminerleri, kitap bölümleri yayımlanmıştır. Bu yönleri ile proje, ülkemizin bilimsel bilgi birikimine önemli katkıda bulunmuştur. Ayrıca projenin toplam 5 dönemi boyunca 2 tam-zamanlı doktora öğrencisine burs desteği sağlanmıştır. Proje, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Gelecek Nesil Kablosuz Haberleşme Laboratuvarı'nda bölüm öğretim üyelerinden Doç. Dr. Özgür Barış Akan yürütücülüğünde tamamlanmıştır.

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	2
İÇİNDEKİLER	3
TABLO VE ŞEKİL LİSTELERİ	4
ÖZET	6
ABSTRACT	7
GİRİŞ	8
GENEL BİLGİLER	9
GEREÇ VE YÖNTEM	9
BULGULAR	9
1. Bağışıklık Sistemi Temelli Kablosuz Algılayıcı Ağlar	9
2. Bilişsel Radyo Ağlarında Biyolojik Esinli Tayf Paylaşımı	16
3. Kablosuz Çokluortam Algılayıcı Ağlarda Homeostazi-tabanlı İletişim	24
4. Moleküler Haberleşme İçin Bilgi Kuramsal Bir Yaklaşım	39
5. Kablosuz Sensör Ağlarda Homeostazi-tabanlı Olay İletim Protokolü	51
6. Bilişsel Ağlar İçin Biyolojik-esinli Haberleşme	58
7. Moleküler Haberleşme İçin Hata Telafi Yöntemi	61
8. Nano-ağlarda Çoklu-erişim, Yayım, Ve Aktarım Kanallarının İncelenmesi	65
9. Moleküler Nano-ağlarda Tekli Ve Çoklu Kanal Kapasiteleri	72
10. Biyolojik Esinli Ağlar Üzerine Geniş Literatür Tarama Çalışması	80
11. Bağışıklık Sistemine Dayanan Fırsatçı Spektrum Erişimi	89
12. Kablosuz Sensör Ve Aktör Ağları İçin Biyolojik Esinli Çapraz Katman Protokolü	102
TARTIŞMA VE SONUÇ	107

## Tablo ve Şekil Listeleri

- Şekil 1.a Temsilci algılayıcı seçim eşiğinin değişimine göre temsilci algılayıcı sayısındaki değişim.
- Şekil 1.b Temsilci algılayıcı seçim eşiğinin değişimine göre ortalama enerji tüketimindeki değişim
- Şekil 1.2. Farklı rapor frekansları ve temsilci algılayıcı sayısının değişimine göre olay kestirim bozulması.
- Şekil 2.1 Tek kanal seçim durumunda zamandaki değişime göre kanallardaki kullanılan iletim gücünün değişimi.
- Şekil 2.2 Tek kanal seçim durumunda değişik kanal sayılarına göre kanal kullanımı.
- Şekil 2.3 Çoklu kanal seçiminde zamana göre kanallarda kullanılan iletim gücünün değişimi
- Şekil 2.4 Tek ve çoklu kanal seçim durumlarında lisanssız kullanıcı sayısına göre kanal kullanımları.
- Şekil 2.5 Tek kanal seçim durumunda lisanssız kullanıcı sayısına göre koordinasyondan kaynaklanan beklenen tayf bırakma gecikmesi.
- Şekil 3.1 Düzensiz Örneklem
- Şekil 3.2 Bozulmanın çokluortam sinyal bant genişliği ile değişimi.
- Şekil 3.3 Bozulmanın örneklem hızı ile değişimi.
- Şekil 3.4 Paket kayıp oranının çokluortam olay sinyalinin bant genişliği ile değişimi.
- Şekil 3.5 Paket kayıp oranının örneklem hızı ile değişimi.
- Şekil 3.6 Enerji tüketiminin çokluortam olay sinyalinin bant genişliğine göre değişimi.
- Şekil 3.7 Örneklem hızına göre düzensiz ve tekdüze örneklem için enerji tüketimleri.
- Şekil 4.1 Moleküler Haberleşme Modeli
- Şekil 4.2 Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli S için M
- Şekil 4.3 Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli  $k_1$  için M
- Şekil 4.4 Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli  $k_{-1}^0$  için M
- Şekil 4.5 Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli  $\alpha$  için M
- Şekil 4.6 Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli  $L_{ex}$  için M
- Şekil 4.7 Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli  $t_H$  için M
- Şekil 4.8 Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli N için M
- Şekil 4.9 Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli T için M
- Şekil 5.1 Biyolojik Homeostazi ve KAA arasındaki benzerlikler.
- Şekil 5.2 HEC ile ESRT ve  $RT^2$ 'nin paket teslimat oranları açısından karşılaştırılması
- Şekil 5.3 HEC ile ESRT ve  $RT^2$ 'nin enerji tüketimleri açısından karşılaştırılması
- Şekil 5.4 HEC' in değişen G-algılayıcı sayısı ve örneklem frekanslarına göre paket teslimat oranları.
- Şekil 5.5 HEC' in değişen G-algılayıcı sayısı ve örneklem frekanslarına göre paketlerin karşılaştığı ortalama baştan sona gecikme (end-to-end delay)
- Şekil 6.1 Doğal bağışıklık sistemi ve bilişsel radyo ağları arasındaki benzerlik.
- Şekil 7.1 İleri hızın değişimine göre kapasitedeki değişim.
- Şekil 7.2 Ortam sıcaklığının değişimine göre kapasitedeki değişim.
- Şekil 8.1 Moleküler Çokluerişim Kanalı
- Şekil 8.2 Moleküler Yayın Kanalı
- Şekil 8.3 Moleküler Aktarım Kanalı
- Şekil 8.4 Farklı  $n$  değerleri için her bir İN tarafından başarılan karşılıklı bilgi.
- Şekil 8.5 Farklı  $N$  değerleri için her bir İN tarafından başarılan karşılıklı bilgi.
- Şekil 8.6 Üç RN'nin bulunduğu bir yayın kanalında her bir RN tarafından başarılan karşılıklı bilgi.
- Şekil 8.7. Aktarım düğümünün olduğu ve olmadığı durumlar için İN ve AN arasındaki karşılıklı bilgi.
- Şekil 9.1 Değişik yapışma hızları  $k_1$  için değişen gürültü standart sapma değerlerine  $\sigma_z$  göre kapasite  $C_s$ .
- Şekil 9.2 Değişik gürültü standart sapmaları  $\sigma_z$  için, değişen ortalama molekül Konsantrasyonuna ( $\mu_x$ ) göre kapasite  $C_s$ .
- Şekil 9.3  $C_{mi}$  farklı  $k_1$  değerleri için İN sayısına (n) göre gösterilmektedir.
- Şekil 9.4  $C_{mi}$  farklı  $\mu_x$  değerleri için İN sayısına (n) göre gösterilmektedir.
- Şekil 9.5  $C_{mi}$  farklı N değerleri için İN sayısına (n) göre gösterilmektedir.
- Şekil 11.1 Bağışıklık sistemi ve fırsatçı spektrum sistemi arasındaki benzerlik
- Şekil 11.2 İkincil kullanıcının zaman dilimi yapısı

Şekil 11.3 Mutasyon ve seçkinci seçim metotları kullanarak FAD üretimi yoluyla spektrum erişim ve paylaşımı.

Şekil 11.4 Spektrum fırsat tanımlaması, paylaşımı ve erişimini gösteren genel ESE operasyonu. Tüm protokol adımları kolaylıkla takip edilebilir ve ESE operasyonunun hangi kısımlarının bağışıklık sisteminden esinlendiği görülebilir.

Şekil 11.5 ESE algoritmasının akışının değişken BK kanal boşta olasılıklarına göre sadece spektrum tanımlama ve hem tanımlama hem paylaşım yapan algoritmalarla karşılaştırılması.

Şekil 11.6 ESE algoritmasının akışının değişken kanal sayısına göre sadece spektrum tanımlama ve hem tanımlama hem paylaşım yapan algoritmalarla karşılaştırılması.

Şekil 11.7 ESE algoritmasının akışının değişken düğüm sayısına göre sadece spektrum tanımlama ve hem tanımlama hem paylaşım yapan algoritmalarla karşılaştırılması.

Şekil 11.8 ESE algoritmasının adilliğinin değişken düğüm sayısına göre sadece spektrum tanımlama ve hem tanımlama hem paylaşım yapan algoritmalarla karşılaştırılması.

Şekil 11.9 Çarpışma olasılığı ve ESE algoritmasının zamanla yakınsaması.

Şekil 11.10 Akış performansının mobilite etkisine göre zamanla performansı. (a) Mobilite endeksi = 0.2 (b) Mobilite endeksi = 0.4 (c) Mobilite endeksi = 0.6 (d) Mobilite endeksi = 0.8.

Şekil 11.11 ESE'nin hata tolerans yeteneğini gösteren,  $H_i^j$  değerinin farklı  $\sigma_S^2$  değerleri için değişken  $p_a$  'ya göre değişimi.

Şekil. 12.1 BEÇK'in tüketilen ortalama enerjiye göre enerji koruma performansı

Şekil. 12.2 BEÇK'in kalan enerji varyanslarına göre enerji performansı

Şekil12.3. BEÇK'in zamanla enerjisi tükenen düğüm sayısına göre performansı

Şekil. 12. 4. BEÇK'in değişik sayıdaki kaynak düğümlere göre paket gönderim performansı

Şekil. 12.5. BEÇK'in zamana göre (RT)<sup>2</sup> protokolü ile karşılaştırması

Tablo 1.1 Bağışıklık Sistemi ile Kablosuz Algılayıcı Ağlar Arasındaki İlişki

Tablo 2.1 Benzetim Parametreleri

Tablo 4.1 Benzetim Parametreleri

Tablo 5.1 Biyolojik homeostazinin bileşenleri ile KAA arasındaki benzerlikler.

Tablo 5.2 Benzetim Deney Parametreleri

Tablo 6.1. Doğal bağışıklık sistemi ve bilişsel radyo ağları arasındaki benzerlik.

Tablo 9.1. Deneysel Benzetim Parametreleri

Tablo 12.2 Dağınık FSE MAC protokollerinin özelliklerine göre karşılaştırılması (Pawelczak, 2009)

## Özet

Bu projede gelecek nesil haberleşme ağları için biyolojik-esinli haberleşme algoritmaları geliştirildi. Projenin Şubat 2007 - Ağustos 2007 arasındaki ilk döneminde, kablosuz algılayıcı ağlar ve bilişsel radyo ağları için biyolojik esinli haberleşme protokolleri geliştirilmiştir. Bir sonraki Ağustos 2007 - Şubat 2008 çalışma döneminde, kablosuz çokluortam algılayıcı ağlarında homeostazi tabanlı haberleşme çalışmaları ve moleküler haberleşme için bilgi kuramsal çalışmalar yapılmıştır. Projenin Şubat 2008 - Ağustos 2008 arasındaki döneminde, kablosuz sensör ağlarda homeostazi-tabanlı olay iletim protokolü, bilişsel ağlar için biyolojik-esinli haberleşme, moleküler haberleşme için hata telafi yöntemi, nano-ağlarda çoklu-erişim, yayım, ve aktarım kanallarının incelenmesi konularında çalışmalar yapılmıştır. Projenin Ağustos 2008 - Şubat 2009 arasındaki döneminde, moleküler nano-ağlarda tekli ve çoklu kanal kapasiteleri, biyolojik esinli ağlar üzerine geniş literatür tarama makalesi, biyolojik esinli çapraz katmanlı haberleşme ve bağışıklık sistemine dayanan fırsatçı spektrum erişimi konularında çalışmıştır. Projenin en son döneminde ise kablosuz sensör ve aktör ağları için biyolojik esinli katmanlar arası iletişim algoritması ve nano-ağlarda yapılan kanal kapasitesi araştırmalarının daha gerçekçi modellerle geliştirilmesi çalışmaları yapılarak proje tamamlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Biyoloji-esinli iletişim teknikleri, gelecek nesil iletişim ağları, biyolojik sistemler, bağışıklık sistemi, kablosuz algılayıcı ve aktör ağları, çoktürel ağlar, dinamik tayf erişimi, bilişsel radyo ağları, moleküler haberleşme, nano-ağlar.

## Abstract

In this project which aims the development of communications protocols for next-generation networks, bio-inspired communication techniques have been developed for next generation networks. Of the project in February 2007 - August 2007 in the first period, for the wireless sensor networks and cognitive radio networks, bio-inspired communication protocols have been developed. Next August 2007 - February 2008 study period, homeostasis-based communication in the wireless multimedia sensor networks, and information theoretical studies for molecular communication have been made. Of the project in February 2008 - August 2008 period, homeostasis-based event delivery protocol in the wireless sensor networks, biologically-inspired communication for cognitive networks, error compensation method for molecular communication and the investigation of multi-access, broadcast, and relay channels in nano-networks have been done. In August 2008 - February 2009 period of the project, single and multi-channel capacity for molecular nano networks, extensive survey work on bio-inspired networks, bio-inspired cross-layer communication and immune system-based opportunistic spectrum access have been worked on. In the last period of the project, bio-inspired cross-layer communication technique for wireless sensor and actor networks have been developed and the previous work on capacity analysis of nano-scale networks have been improved by incorporating more realistic molecular behavior models observed in living organisms.

**Keywords:** Biologically-inspired communication techniques, next generation communication networks, immune system, wireless sensor networks, dynamic spectrum access, cognitive radio networks, molecular communication, nano networks.

## Giriş

Son günlerde ağ teknolojilerindeki gelişmeler yeni bir gelecek nesil ağ vizyonunun ortaya çıkmasına sebep oldu. Milyonlarca insanın her türlü bilgiyi, herhangi bir iletişim cihazı ve servisi ile herhangi bir yerden, her an elde edebilmesini sağlayacak olan gelecek nesil ağ yapısı, günümüz ağ teknolojilerinin başa çıkmak zorunda olduğu büyük zorluklar getirdi. Gelecekteki ağ uygulamaları, algılayıcılardan sayısal telefon terminallerine birçok iletişim cihazını ve kablosuz algılayıcı ağlardan gezegenler arası uzay ağlarına bir çok ağ yapısını içereceğinden, gelecekteki ağ uygulamalarını merkezi bir kontrol edici ile kontrol edebilmek olası değildir. Bu nedenle, gelecekteki ağ uygulamaları ölçeklendirilebilme, kendi kendine organize olabilmeye, kendi kendini adapte edebilmeye ve hayatta kalabilme yeteneklerine sahip olmak zorundadır.

Doğada biyolojik sistemlerin bu kabiliyetlere sahip olduğunu kolayca gözlemleyebiliriz, öyle ki bu kabiliyetler sayesinde bağışıklık sistemini oluşturan milyonlarca kan hücresi beynin merkezi kontrolüne ihtiyaç duymadan organizmayı patojenlere karşı korurlar. Bu nedenle, doğal biyolojik sistemler araştırmacılara geleceğin nesil ağ yapılarına iletişim ağı modeli geliştirmek için büyük esin kaynağı olmaktadır. Mevcut literatürde biyolojiden esinlenen az sayıda iletişim ağı modeli bulunmaktadır. Ancak bu modeller sadece biyolojik koordinasyon modellerini taklit eden yaklaşımlar olup, gelecekteki ağ yapılarının karşılaşılabilecekleri iletişim problemleri için etkili çözümler sağlamamaktadır. Bu nedenle, gelecekteki ağ yapılarının karşılaşılabilecekleri iletişim problemlerini çözebilen, ölçeklendirilebilen, kendi kendine organize olabilen, kendi kendini adapte edebilen, hayatta kalabilen iletişim katmanlarını içeren iletişim modellerine ve tekniklerine ihtiyaç vardır.

Bu projenin amacı doğal biyolojik sistemlerden esinlenerek, gelecekteki ağ yapıları için ölçeklendirilebilen, kendi kendine organize olabilen, kendi kendini adapte edebilen, hayatta kalabilen iletişim modelleri ve teknikleri geliştirmektir. Bu projede, merkezi bir kontrol ediciye ihtiyaç duymadan etkili bir şekilde çalışabilen bağışıklık sistemi, endokrin sistem, beynin sinir sistemi, genetik sistem ve böceklerdeki sosyal koordinasyon sistemleri gibi değişik biyolojik sistemler incelenecektir. Matematiksel biyolojideki mevcut modeller ve analizler incelenip, gelecek nesil ağ yapıları için uygun biyolojik-esinli iletişim modelleri geliştirilmiştir.

Geliştirilen bu modellere dayanarak, gelecek nesil haberleşme ağları için ölçeklenebilir, kendi kendine organize olabilen, kendi kendini adapte edebilen, hayatta kalabilen iletişim teknikleri ve algoritmaları geliştirilmiştir. Geliştirilen model ve iletişim tekniklerinin doğrulaması ve başarımların değerlendirilmesi analitik ve bilgisayar tabanlı simülasyon deneyleriyle yapılmıştır. Bu proje gelecek nesil ağ yapıları için ölçeklenebilir, kendi kendine organize olabilen, kendi kendini adapte edebilen ve kendi kendini iyileştirebilen biyolojik sistemlerden esinlenerek geliştirilen iletişim teknikleri ve algoritmaları literatürdeki ilk çalışmaları ortaya çıkarmıştır.

Bu projede yapılan çalışmalarının sonuçları önemli uluslararası dergi ve konferanslarda yayınlanmış, bu konuda pek çok konferansta eğitim semineri verilmiş, proje yürütücüsü bu projedeki çalışmaları nedeniyle bu alandaki en önemli konferans olan International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems (ICST/IEEE BIONETICS) isimli konferansın 2007 yılında Budapeşte'de Teknik Program Komitesi Başkanlığını ve 2008 yılında Japonya'nın Hyogo kentinde Genel Başkanlığı'nı gerçekleştirmiştir. Ayrıca proje yürütücüsü bu alanda iki adet özel dergi sayısı organize etmiş ve misafir editörlüğü görevini yapmıştır (Springer Transactions on Computational Systems Biology, Special Issue on Bio-inspired Computing and Communications ve AD HOC Networks Journal (Elsevier), Special Issue on Bio-inspired Computing and Communication in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks).



## Genel Bilgiler

Gelecek Nesil İletişim Ağları İçin Biyolojik-Esinli İletişim Teknikleri geliştirilmesini amaçlayan bu proje, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Gelecek Nesil Kablosuz Haberleşme Laboratuvarı'nda bölüm hocalarından Doç. Dr. Özgür B. Akan yürütücülüğünde tamamlanmıştır. Ayrıca doktora öğrencileri Barış Atakan ve Burhan Gülbahar tam zamanlı burslu araştırmacı olarak projenin gerçekleşmesinde görev almışlardır.

## Gereç ve Yöntem

Bu proje kapsamında, gelecek nesil iletişim ağları için biyolojik-esinli etkili algoritmalar ve haberleşme protokolleri geliştirilmiştir. Bu algoritmalar ve protokollerin geliştirilmesi sırasında izlenen yol aşağıdaki gibidir.

- Kapsamlı literatür araştırmasının yapılması
- Biyolojik sistemlerin ve modellerinin incelenmesi
- Gelecek nesil ağ yapılarının iletişim problemlerinin belirlenmesi
- Gelecek nesil ağlar için biyolojik-esinli iletişim modellerinin geliştirilmesi
- Problemler için uygun ve etkin çözümlerin geliştirilmesi
- Biyolojik-esinli ağ iletişim teknik ve algoritmaların tasarımı
- Geliştirilen algoritmalar ve protokollerin benzetim deneyleri ve matematiksel analiz yöntemleriyle performans değerlendirmelerinin yapılması
- Algoritma ve protokollerin gerekli iyileştirme ve düzeltmelerinin yapılması
- Araştırmalardan elde edilen sonuçların literatürde yayınlanması

## Bulgular

Proje dahilinde elde edilen bilimsel bulgular ve yapılan çalışmaların sonuçları aşağıdaki bölümlerde detaylı olarak sunulmuştur.

### 1. BAĞIŞIKLIK SİSTEMİ TEMELLİ KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR

Uygulamaya bağlı olarak, gözlenmek istenen alana rasgele ya da belirli bir düzene uygun olarak dağıtılan küçük boyutlu kablosuz algılayıcılar, *kablosuz algılayıcı ağları* (wireless sensor networks) meydana getirirler (AKYILDIZ, 2002). Kablosuz algılayıcı ağların en temel özelliği, çok sayıda kablosuz algılayıcının çevreden algıladıkları veriyi, kısa mesafeli ve çoklu atlamalı (multi-hop) yöntemlerle alıcıya (sink) ileterek ortak bir uygulama hedefine yönelik kolektif çalışmasıdır. Bu özelliği ile kablosuz algılayıcı ağlar, mevcut algılama yöntemlerinin çok ötesinde bir algılama ve gözlemeleme yeteneği sağlar. Bu nedenle, kablosuz algılayıcı ağların, ulaşım, sağlık, felaket yönetimi, güvenlik, savaş donanımı, uzay keşifleri ve daha çok çeşitli uygulama alanı bulunmaktadır. Bağışıklık sistemi ve kablosuz algılayıcı ağlar birbirinden çok farklı görünmesine rağmen, yerine getirdikleri görevleri düşünüldüğünde aralarında büyük bir benzerlik olduğunu görebiliriz. Örneğin, bağışıklık sistemi bir patojenle karşılaştığında bazı B hücreleri bu patojen için uyarılır ve patojeni ortadan kaldırmak için değişik yoğunluklarda antikör salgılamaya başlar (FARMER, 1986). Benzer şekilde, kablosuz algılayıcı ağ ortamında bir olay (event) olduğunda, bu olayı algılayan bazı algılayıcılar, olay tarafından uyarılır ve uyarılan algılayıcılar alıcıdaki belli bir güvenilirlik ve bozulma sınırlamasını (reliability/distortion constraint) başarabilecek şekilde belli bir rapor frekansı (reporting frequency) ile alıcıya (sink) algıladığı verileri gönderebilir.

Kablosuz algılayıcı ağlarda birçok algılayıcı tek bir olay hakkında veri toplayabileceği için, algılayıcıların topladığı veriler algılayıcı düğümlerin uzamsal konumuna (spatial location) göre uzamsal ilintilidir (spatially correlated) (VURAN, 2004). Bu yüzden, olayın özelliklerini alıcıda belirli bir güvenilirlik ve bozulma sınırlaması içinde kestirebilmek için olay tarafından uyarılan bütün algılayıcıların alıcıya veri göndermesine gerek yoktur. Bunun yerine olay tarafından uyarılan bütün algılayıcıları temsil edebilecek minimum sayıdaki *temsilci algılayıcı*'nın örnekleme ve gönderim yapması olayın özelliklerini alıcıda belirli bir güvenilirlik ve bozulma sınırlaması içinde kestirebilmek için yeterli olacaktır. Bu, zaten çok sınırlı enerjileri bulunan algılayıcılar ve tüm ağın işlevsel hayat süresi için çok önemlidir. Fakat minimum sayıda temsilci algılayıcı seçimi önemli bir sorundur. Bağışıklık sistemimizde hangi B hücrelerinin vücuda giren patojene karşı uyarılacağı, kablosuz algılayıcı ağlardaki veri gönderecek minimum sayıdaki temsilci algılayıcının belirlenmesi sorunu ile çok benzer sorunlardır. Vücuda bir patojen girdiğinde herhangi bir B hücrelerinin bu patojen tarafından uyarılması üç etkene bağlıdır. Bu üç etken bütün B hücrelerini ve patojeni bir veri parçası olarak düşünen bir yapay bağışıklık sistem modeline göre (TIMMIS, 2000) aşağıdaki gibi modellenmektedir:

Birinci etken B hücresi ve patojen arasındaki yakınlıktır. Bu etken, B hücresi ve patojenin birbirleriyle ne kadar iyi eşleşebildiğinin bir göstergesidir ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$ps = (1 - pd) \quad (1)$$

Burada  $pd$  B hücresi ile patojen arasındaki uzaklığı ifade eder ve  $0 \leq pd \leq 1$  dir.  $pd$  azaldıkça patojenin B hücresini uyarma etkisi artar. İkinci etken B hücresinin komşu B hücreleri tarafından ne kadar uyarıldığıdır ve bu etken matematiksel olarak:

$$ns = \sum_{x=0}^n (1 - dis_x) \quad (2)$$

ile ifade edilebilir. Burada  $ns$  B hücresinin komşu B hücreleri tarafından ne kadar uyarıldığını gösterir,  $n$  B hücresinin komşularının sayısını gösterir.  $dis_x$  ise B hücresi ile  $x$  . komşusu arasındaki uzaklığı gösterir ( $0 \leq dis_x \leq 1$ ). B hücresi, komşu B hücreleri tarafından uyarılacağı gibi, aynı zamanda komşu B hücreleri tarafından bastırılması da mümkündür. Üçüncü etken B hücresinin komşu B hücreleri tarafından ne kadar bastırıldığıdır. Bu etken

$$nn = - \sum_{x=0}^n dis_x \quad (3)$$

ile ifade edilir. Burada  $nn$  bastırılma faktörünü gösterir,  $n$  B hücresinin komşularının sayısını gösterir.  $dis_x$  ise B hücresi ile  $x$  . komşusu arasındaki uzaklığı gösterir ( $0 \leq dis_x \leq 1$ ). Böylece herhangi bir B hücresinin vücuda giren patojen tarafından uyarılması yukarıda belirtilen bu üç etkenin toplamı olarak aşağıdaki gibi verilebilir:

$$sl = (1 - pd) + \sum_{x=0}^n (1 - dis_x) - \sum_{x=0}^n dis_x = 1 + n - pd - 2 \sum_{x=0}^n dis_x \quad (4)$$

Burada  $sl$  herhangi bir B hücresinin patojen tarafından ne kadar uyarıldığını gösteren, üç etkenin toplamından oluşan bir ağırlık değeridir. Herhangi bir B hücresi için  $sl$  belli bir eşik değeri geçtiğinde, B hücresinin patojen tarafından uyarıldığı söylenebilir.

Bağışıklık sisteminin yukarıda değinilen patojen tarafından uyarılmış B hücrelerini belirleme yöntemi bir kablosuz algılayıcı ağ ortamında olay tarafından uyarılan bütün algılayıcılar yerine, alıcıdaki güvenilirlik ve bozulma sınırlamasını (distortion bound) başarabilecek minimum sayıdaki temsilci algılayıcının belirlenmesi sorunun çözüm yöntemi için bir esin kaynağıdır. Kablosuz algılayıcı ağlarda sabit sayıdaki veri gönderen algılayıcı için minimum bozulma (i) veri gönderen algılayıcılar olaya ne kadar yakınsa ve

(ii) veri gönderen algılayıcılar birbirinden ne kadar ayırık konuşlandırılmışsa o derece büyük bir başarıyla elde edilir. Daha açık olarak veri gönderen algılayıcılar olaya ne kadar yakınsa ve algıladıkları veriler birbirileri ile ne kadar az ilintili ise alıcıdaki bozulma o kadar azalır. Dolayısı ile bir algılayıcının temsilci algılayıcı olabilmesi bağımsızlık sisteminde B hücrelerinin uyarılma modelinde olduğu gibi üç etkene bağlanabilir (ATAKAN, 2006). Bu etkenler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Birinci etken algılayıcı ile olay arasındaki yakınlıktır. (Bu etken B hücresi ile patojen arasındaki ilişki gibi düşünülebilir.)
2. İkinci etken algılayıcı ile ilintisiz komşu algılayıcılarının arasındaki yakınlıktır. (Bu etken B hücresi ile onu uyaran komşu B hücreleri arasındaki ilişki gibi düşünülebilir.)
3. Üçüncü etken ise algılayıcı ile ilintili komşu algılayıcılarının arasındaki yakınlıktır. (Bu etken de B hücresi ile onu bastıran B hücreleri arasındaki ilişki gibi düşünülebilir.)

Algılayıcıların ilintili ve ilintisiz komşularını belirlemek için ilinti yarıçapı  $r$  kullanılır. Herhangi bir algılayıcı için ilinti yarıçapının içinde bulunan komşu algılayıcıları onunla ilintilidir. Dışında bulunanlar ise onun ilintisiz komşu algılayıcılarıdır. Ayrıca herhangi bir algılayıcının ilintili yada ilintisiz komşu algılayıcıları ve olay ile arasındaki ilintinin miktarını belirlemek için ilinti katsayıları (correlation coefficient)  $\rho_{i,j}$  ve  $\rho_{s,i}$  kullanılabilir.  $\rho_{i,j}$  algılayıcı  $i$  ile algılayıcı  $j$  arasındaki ilintiyi gösterir.  $\rho_{s,i}$  ise olay ile algılayıcı  $i$  arasındaki ilintiyi gösterir ve bu katsayılar kuvvet üssel form (BERGER, 2001) (power exponential form) ile aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\rho_{s,i} = K_{\theta} (d_{s,i}) = e^{(-d_{s,i}/\theta_1)^{\theta_2}}; \theta_1 > 0, \theta_2 \in (0,2] \quad (5)$$

$$\rho_{i,j} = K_{\theta} (d_{i,j}) = e^{(-d_{i,j}/\theta_1)^{\theta_2}}; \theta_1 > 0, \theta_2 \in (0,2] \quad (6)$$

Burada  $d_{s,i}$  ve  $d_{i,j}$  sırasıyla algılayıcı  $i$  ile olay arasındaki ve algılayıcı  $i$  ile algılayıcı  $j$  arasındaki uzaklığı göstermektedir. Bu modelde katsayılar sıfır ile bir arasında sınırlandırılmıştır.

Bağımsızlık sisteminde uyarılan B hücrelerinin belirlenmesinde kullanılan modelden esinlenerek şimdi herhangi bir algılayıcının temsilci algılayıcı olarak seçimi için yukarıda verilen üç etkeni matematiksel olarak aşağıdaki gibi modelleyeceğiz (ATAKAN, 2006):

- A. Birinci etken olan algılayıcı ile olay arasındaki yakınlık  $\rho_{s,i}$  ile ifade edilir. Burada  $\rho_{s,i}$  olay ile algılayıcı  $i$  arasındaki ilintiyi göstermektedir, algılayıcı ile olay arasındaki uzaklık azaldıkça  $\rho_{s,i}$  artar. Bu nedenle olaya yakın olan algılayıcıların temsilci algılayıcı olma olasılığı daha fazladır.
- B. İkinci etken olan algılayıcı ile ilintisiz komşuları arasındaki yakınlığı aşağıdaki gibidir:

$$\sum_j (1 - \rho_{i,j}) \quad (7)$$

Burada  $\rho_{i,j}$  algılayıcı  $i$  ile algılayıcı  $j$  arasındaki yakınlığı belirtmektedir. Algılayıcı  $j$  algılayıcı  $i$  nin ilinti yarıçapı  $r$  nin içinde değildir. Bu yüzden algılayıcı  $j$  algılayıcı  $i$  nin ilintisiz komşu algılayıcısıdır. Algılayıcı  $i$  ve ilintisiz komşu algılayıcısı  $j$  arasındaki uzaklık arttıkça,  $\rho_{i,j}$  azalır. Bu nedenle  $\sum_j (1 - \rho_{i,j})$  çok fazla ilintisiz komşusu olan algılayıcılar için büyüktür. Bu yüzden çok fazla ilintisiz komşusu olan algılayıcıların temsilci algılayıcı olma olasılığı daha fazladır.

- C. Üçüncü etken olan algılayıcı ile ilintili komşuları arasındaki yakınlığı

$$\sum_k (-\rho_{i,k}) \quad (8)$$

ile ifade edebiliriz. Burada  $\rho_{i,k}$  algılayıcı  $i$  ile algılayıcı  $k$  arasındaki yakınlığı belirtmektedir. Algılayıcı  $k$  algılayıcı  $i$  nin ilinti yarıçapı  $r$  in içindedir bu yüzden algılayıcı  $k$  algılayıcı  $i$  nin ilintili komşu

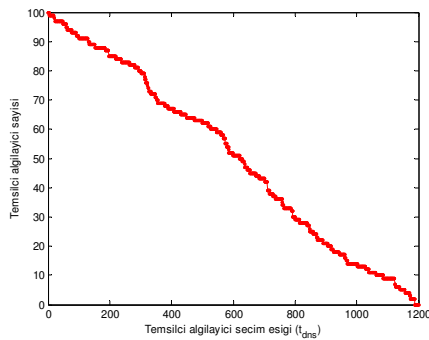
algılayıcısıdır. Algılayıcı  $i$  ve ilintili komşu algılayıcısı algılayıcı  $k$  arasındaki uzaklık azaldıkça,  $\rho_{i,k}$  artar. Bu nedenle  $\sum_k (-\rho_{i,k})$  çok fazla ilintili komşusu olan algılayıcılar için küçüktür. Bu yüzden çok fazla ilintili komşusu olan algılayıcıların temsilci algılayıcı olma olasılığı daha azdır.

Böylece bu üç etkenin ağırlıkları toplama yolu ile birleştirildiğinde B hücrelerinin uyarılma modelinde olduğu gibi temsilci algılayıcı seçim modeli olarak aşağıdaki gibi bir model verilebilir:

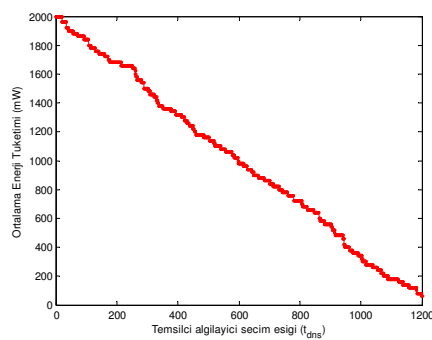
$$T_i = \rho_{s,i} + \sum_j (1 - \rho_{i,j}) + \sum_k (-\rho_{i,k}) \quad (9)$$

Burada  $T_i$  temsilci algılayıcı seçim eşiği ( $t_{dns}$ ) olarak adlandırılan belli bir eşik değeri geçtiğinde algılayıcı  $i$  temsilci algılayıcı olarak seçilir. Temsilci algılayıcı seçim eşiği ( $t_{dns}$ ) arttıkça bu eşiği geçen algılayıcı sayısı da azaldığı için temsilci algılayıcı sayısı azalır. Aynı şekilde, temsilci algılayıcı seçim eşiği ( $t_{dns}$ ) azaldıkça bu eşiği geçen algılayıcı sayısı artacağı için temsilci algılayıcı sayısı artar. Şekil 1(a)'da 100 tane algılayıcının bulunduğu bir kablosuz algılayıcı ağda temsilci algılayıcı seçim eşiğinin ( $t_{dns}$ ) değişimi ile temsilci algılayıcı sayısının nasıl değiştiği gösterilmektedir. Şekil 1(a)'da görüldüğü gibi temsilci algılayıcı seçim eşiği ( $t_{dns}$ ) arttıkça temsilci algılayıcı sayısı azalır. Böylece alıcı kendisinin belirleyeceği bir temsilci algılayıcı seçim eşiği ile kendisine veri gönderebilecek en uygun temsilci algılayıcıları belirleyebilir. Kablosuz algılayıcı ağlar için enerji tüketiminin minimumda tutulması çok önemli olduğundan alıcının temsilci seçim eşiğini mümkün olduğunca büyük tutması gerekmektedir. Şekil 1(b) 100 tane algılayıcının bulunduğu aynı kablosuz algılayıcı ağ için temsilci algılayıcı seçim eşiğinin değişimiyle ortalama enerji tüketiminin nasıl değiştiğini göstermektedir. Burada ortalama enerji tüketimi bir olayın olduğu ve bu olay için her algılayıcının ortalama 15 mW'lık bir enerji harcadığı varsayılarak hesaplanmıştır.

Böylece alıcı, belirleyeceği bir temsilci algılayıcı seçim eşiği sayesinde temsilci algılayıcı sayısını minimumda tutarak enerji tüketimini de minimumda tutmayı başarabilir. Ancak alıcı için önemli olan noktalardan bir tanesi de kendisine temsilci algılayıcılar tarafından gönderilen verilerle kablosuz algılayıcı ağ ortamında olan olayların özelliklerini belli bir güvenilirlik ve bozulma sınırlamasını başarabilecek şekilde kestirebilmektir. Bu yüzden minimum enerji tüketimini başarabilecek temsilci algılayıcı seçim eşiğini olayı belli bir bozulma ve güvenilirlik sınırlamasını başarabilecek şekilde ve enerji tüketimini minimuma indirebilecek bir maksimum değer olarak seçmeye çalışır.



Şekil 1a. Temsilci algılayıcı seçim eşiğinin değişimine göre temsilci algılayıcı sayısındaki değişim.

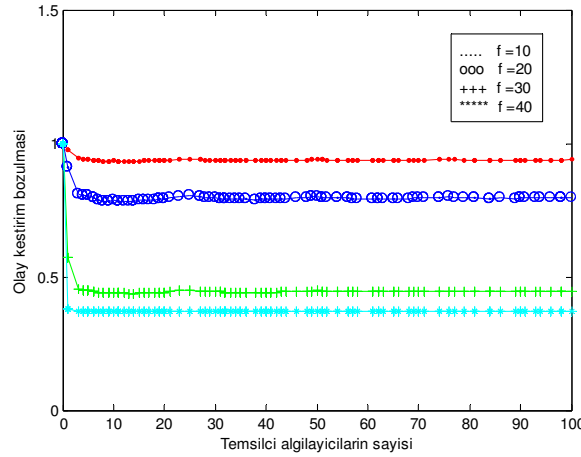


Şekil 1.b. Temsilci algılayıcı seçim eşiğinin değişimine göre ortalama enerji tüketimindeki değişim

Bu aynı zamanda ağda oluşabilecek sıkışıklık ve dolayısıyla iyi bir kapasite kullanımı için gerekli olan başarılı bir sıkışıklık kontrolü algoritmasının tasarımı ile de doğrudan ilgilidir.

Şekil 2 algılayıcıların değişik rapor frekansları ( $f$ ) için temsilci algılayıcı sayısına göre alıcıdaki olay kestirim bozulmasını (event estimation distortion) göstermektedir. Burada rapor frekansı ( $f$ ) bir

sanide bir algılayıcı tarafından gönderilen paket sayısı olarak tanımlanmaktadır. Kestirim bozulması alıcıda uyarlanabilir en küçük ortalama karesel süzgeç (Adaptive Least Mean Square Filter) ile hesaplanmıştır. Şekil 2'de gözlendiği gibi, temsilci algılayıcı sayısının belli bir değerinden sonra alıcıdaki olay kestirim bozulması değişmemektedir. Örneğin, rapor frekansının 10 olduğu durum için ( $f=10$ ) ortalama 5 tane temsilci algılayıcıdan sonra olay kestirim bozulmasında bir değişiklik olmamaktadır. Ayrıca  $f=10$  durumu için 5 temsilci algılayıcıdan sonra belli bir değere yakınsayan olay kestirim bozulması rapor frekansı arttıkça hem azalmakta hem de daha az temsilci algılayıcı olay kestirim bozulmasının yakınsaması için yeterli olmaktadır. Bu durum minimum enerji tüketiminin çok önemli olduğu kablosuz algılayıcı ağlar için çok önemli sonuçlar doğurmaktadır. Örneğin  $f=10$  durumu için sadece 5 temsilci algılayıcı ağ ortamında bulunan 100 tane algılayıcıyı temsil etmek için yeterli olabilmektedir. Bu da ortalama %95'lik bir enerji kazancı sağlamaktadır (ATAKAN, 2006).



Şekil 2. Farklı rapor frekansları ve temsilci algılayıcı sayısının değişimine göre olay kestirim bozulması.

Böylece bağışıklık sisteminden esinlenen temsilci algılayıcı seçim modeli ile algılayıcılar hiçbir merkezi kontrol ediciye ihtiyaç duymadan kendi kendilerine organize olarak temsilci algılayıcıları seçebilirler. Her algılayıcı kendisinin temsilci olup olmadığına sadece komşuları ile koordine olarak karar verdiği için bu yönüyle yukarıda bahsedilen temsilci algılayıcı seçim modeli aynı zamanda ölçeklendirilebilir bir modeldir.

Bağışıklık sisteminde uyarılan B hücreleri vücuda giren patojen tarafından salgılanan antijenleri ortadan kaldırmak için değişik yoğunluklarda antikor salgılamaya başlarlar. Benzer şekilde seçilen temsilci algılayıcılar alıcıdaki olay kestirim bozulmasını başarabilmek için belli rapor frekansları ile alıcıya veri gönderirler. Bu iki süreç B hücrelerinin uyarılması ve temsilci algılayıcı seçiminde olduğu gibi birbirlerine çok benzeyen iki süreçtir. Bağışıklık sistemi tarafından gerçekleştirilen bu süreç birçok araştırmacı tarafından araştırılmış ve bu süreç için değişik matematiksel modeller ortaya atılmıştır [(ATAKAN, 2006). Modeller genel olarak patojen tarafından vücuda salgılanan antijen konsantrasyonunu minimuma indirebilmek için herhangi bir B hücresi tarafından salgılanan antikor yoğunluğunu, antijen yoğunluğuna ( $g_i$ ), T hücrelerinin yoğunluğuna ( $c_i(t)$ ), bu B hücresinin doğal yok oluş oranına ve diğer B hücrelerinin salgıladığı antikor yoğunluğuna bağlı olarak belirlemektedir. Bu belirlemeyi yaparken öncelikle B hücrelerinin antikor salgılamasını etkileyen bütün faktörleri içinde bulunduran genel etkileşim parametresi ( $S_i(t)$ ) aşağıdaki gibidir:

$$\frac{dS_i(t+1)}{dt} = (\alpha \sum_{j=1}^N m_{ij} s_j(t) - \alpha \sum_{k=1}^N m_{ki} s_k(t) + \beta g_i - c_i(t) - k_i) s_i(t) \quad (10)$$

Burada  $m_{ij}$  antikor ile antijen arasındaki karşılıklı etkileşim katsayısını,  $g_i$  antijen yoğunluğunu,  $k_i$   $i$ . B hücresine ait antikorların doğal yok oluş oranlarını göstermektedir.  $\alpha$ ,  $\beta$  ise sabitlerdir.  $s_j$  ve  $s_k$  sırasıyla  $i$ . B hücresine ait olan antikorları uyaran ve bastıran antikorların yoğunluğunu

göstermektedir. Eşitlik (10) ile elde edilen genel etkileşim parametresi  $(S_i(t+1))$  ile  $i$ . B hücrelerine ait antikorların yoğunluğu  $(s_i)$  aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$s_i(t+1) = \frac{1}{1 + \exp(0.5 - S_i(t+1))} \quad (11)$$

Bağışıklık sisteminde T hücreleri vücuda patojen girdiğinde B hücrelerini antikor salgılamaları için uyarır. Patojen tarafından salgılanan antijenler yok edildiğinde T hücreleri B hücrelerinin antikor salgılamalarını durdurur bu yönüyle T hücreleri bağışıklık sisteminde bir kontrol parametresi olarak görev yapar. Bu yüzden T hücrelerinin yoğunluğu  $(c_i(t))$  genel etkileşim parametresine  $(S_i(t))$  ve antijen yoğunluğuna bağlı olarak  $(g_i)$  aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$c_i(t) = \eta(1 - g_i(t))S_i(t) \quad (12)$$

Burada  $\eta$  sabit bir sayıdır. Yukarıda bahsedildiği gibi antijenlere karşı antikor salgılayan B hücreleri gibi kablosuz algılayıcı ağ ortamında bir olay olduğunda seçilen temsilci algılayıcılar alıcıdaki olay kestirim bozulmasını başarabilmek için belli rapor frekanslarıyla alıcıya veri gönderirler. Bu iki süreç arasındaki benzerlikten yararlanarak kablosuz algılayıcı ağlarda temsilci algılayıcılar ve alıcı arasındaki iletişim eşitlik (10), (11) ve (12) ile modellenenir. Bu modelleme bağışıklık sistemi ile kablosuz algılayıcı ağları arasındaki bir eşleştirmeye dayanmaktadır. Bu eşleştirme Tablo I.' de verilmektedir (ATAKAN, 2006).

**Tablo I. Bağışıklık Sistemi ile Kablosuz Algılayıcı Ağlar Arasındaki İlişki**

Bağışıklık Sistemi	Kablosuz Algılayıcı Ağları
B hücreleri	Algılayıcılar
Antikor	Algılayıcı verisi
Antikor yoğunluğu	Rapor frekansı
T hücreleri	Rapor frekansı kontrol parametresi
Patojen	Olay
Antijen	Olay kestirim bozulması
Antikorların doğal ölüm oranları	Algılayıcı verisindeki paket kayıpları

Kablosuz algılayıcı ağlarda seçilen algılayıcıların rapor gönderim frekansları B hücrelerinin antikor yoğunlukları gibi birçok faktöre bağlıdır. Rapor frekansı arttıkça Şekil 3'ten de kolayca görülebildiği gibi alıcıdaki olay kestirim bozulması azalır. Fakat rapor frekansının artması algılayıcılardaki enerji harcamasını arttırdığı gibi algılayıcıların ileri yollarındaki (forward paths) tıkanıklığı da artırır. Ayrıca olay verisi zamansal ilintili (temporally-correlated) olduğu durumlarda oldukça düşük rapor frekansı alıcıda arzulanan bir olay kestirim bozulmasını sağlayabilir. Bütün bunlardan dolayı minimum enerji tüketimi için seçilen temsilci algılayıcıların rapor frekanslarının ileri yollarındaki tıkanıklığa (congestion in forward paths) ve olay kestirim bozulmasına göre kontrol edilmesi gerekmektedir. Yukarıda bahsedildiği ve eşitlik (10), (11) ve (12) te verildiği gibi B hücrelerinin antikor yoğunlukları da (temsilci algılayıcıların rapor frekansları) antijen yoğunluğuna (olay kestirim bozulması) ve antikorların doğal ölüm oranlarına (algılayıcıların paketlerindeki kayıplar) göre modellenmişti. Bu bağlamda, algılayıcıların rapor frekanslarını Tablo I'de verilen eşleştirmelere dayanarak kontrol edebilen sistem aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

- 1) B hücrelerinin antikor yoğunluklarını algılayıcıların rapor frekansı olarak düşünüldüğünde,  $i$ . B hücrelerinin antikor yoğunluğunu  $(s_i)$  algılayıcı  $i$  nin rapor frekansı  $(f_i)$  olarak tanımlanabilir.
- 2) B hücrelerinin antikorlarındaki doğal ölümleri algılayıcıların paket kayıpları (packet loss) olarak varsayılırsa,  $i$ . B hücrelerinin antikorlarındaki doğal ölümleri  $(k_i)$  algılayıcı  $i$  nin paket kayıpları  $(L_i)$  olarak tanımlanır. Burada paket kayıplarının hattaki tıkanıklıktan ya da başarısızlıktan (link failures) kaynaklandığı varsayılmaktadır.
- 3) Vücuda giren patojen tarafından salgılanan antijenleri olay kestirim bozulması olarak tanımlandığında, antijen yoğunluğunu  $(g_i)$  alıcıda uyarlanabilir en küçük ortalama karesel süzgeç



ile hesaplanan olay kestirim bozulması ( $D$ ) olarak ifade edilebilir. Bu yaklaşım birden çok olayın olduğu durumlar (multiple event case) için de genişletilecektir.

Yukarıda yapılan eşleştirmelerden sonra eşitlik (12) de verilen genel etkileşim parametresi ( $S_i$ ) algılayıcı  $i$  nin rapor frekansı ( $f_i$ ) için genel etkileşim parametresi ( $F_i$ ) olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\frac{dF_i(\tau_k+1)}{dt} = (\alpha \sum_{j=1}^K \gamma f_j(\tau_k) + \beta D - c_i(\tau_k) - L_i(\tau_k)) f_i(\tau_k) \quad (13)$$

Burada  $K$  temsilci algılayıcıların sayısını göstermektedir.  $\alpha, \gamma$  ve  $\beta$  sabitlerdir.  $\tau$  alıcıdaki karar aralığıdır (decision interval) yani alıcı her  $\tau$  saniyede bir olay kestirim bozulmasını uyarlamalı en küçük karesel süzgeçle hesaplar ve algılayıcılara gönderir. Dolayısı ile  $\tau_k$   $k$ . karar aralığını gösterir.  $c_i(\tau_k)$  algılayıcı  $i$  nin rapor frekansı ( $f_i$ ) için kontrol parametresinin  $k$ . karar anındaki değeridir. Şimdi algılayıcı  $i$  nin rapor frekansını ( $f_i$ ) genel etkileşim parametresine ( $F_i$ ) göre aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$f_i(\tau_{k+1}) = \frac{1}{1 + \exp(0.5 - F_i(\tau_{k+1}))} \quad (14)$$

Eşitlik (12)' de verilen  $i$ . T hücrelerinin yoğunluğu ( $c_i$ ) antijenin yoğunluğuna ( $g_i$ ) bakarak  $i$ . B hücresine ait antikor yoğunluğunu kontrol eder. Kontrol parametresi ( $c_i(\tau_k)$ ) her karar anında olay kestirim bozulmasına ( $D$ ) ve paket kayıplarına ( $L_i(\tau_k)$ ) bakarak algılayıcı  $i$  nin rapor frekansını ( $f_i$ ) kontrol eder. Eşitlik (14)' teki gibi algılayıcı  $i$  nin rapor frekansını kontrol parametresi ( $c_i(\tau_k)$ ) aşağıdaki gibi verilebilir:

$$c_i(\tau_k) = \eta(1 - \beta D) F_i(\tau_k) \quad (15)$$

Burada  $\eta$  sabit bir sayıdır.

Dolayısıyla, burada bağışıklık sisteminden esinlenilerek geliştirilen iletişim modeli ve temsilci algılayıcı belirleme ve raporlama frekansı hesaplama tekniği, bir merkezi kontrol ediciye ihtiyaç duymadan temsilci algılayıcıları seçip rapor frekanslarını kontrol ederek, kablosuz algılayıcı ağlar için etkili taşıma ve ortam erişim katmanı (transport and medium access layer) protokollerinin geliştirilmesine yönelik önemli bir başlangıç çalışması olarak düşünülebilir. Bu projede, bu çalışmayı ilerletip, modeli genişleterek gerekli iletişim protokolleri tasarlanacaktır. Geliştirilen modelin doğrulaması ve algoritmaların başarımlarını değerlendirmeleri analitik ve bilgisayar benzetim deneyleri (ns-2 kullanılarak) yöntemleri ile yapılacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] AKYILDIZ I. F. , Su W. , Sankarasubramaniam Y. , and Cayirci E., "Wireless Sensor Networks: A Survey", Computer Networks Journal (Elsevier), vol. 38, no. 4, pp. 393-422, March 2002.
- [2] FARMER J. D. , Packard N. H. , Perelson A. S. , "The immune system, Adaptation, and Machine Learning", Physica 22D 1986, 187-204, North-Holland, Amsterdam.
- [3] VURAN M. C. , Akan O. B. , and Akyildiz I. F., "Spatio-Temporal Correlation: Theory and Applications for Wireless Sensor Networks", Computer Networks Journal (Elsevier), vol. 45, no. 3, pp. 245-261, June 2004.
- [4] TIMMIS J. , Neal M. , Hunt J. , "An artificial immune system for data analysis", Elsevier, BIOSYSTEMS pp. 143-150, 2000.
- [5] ATAKAN B. , and Akan Ö.B.: Immune system based distributed node and rate selection in wireless sensor networks, Proceedings of the 1st international conference on Bio inspired models of network, information and computing systems, 2006
- [6] BERGER J.O. , Oliveira V. de , Sanso B. , "Objective bayesian analysis of spatially correlated data", J. Am. Statist. Assoc. 96 pp. 1361-1374, 2006

## 2. BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA BİYOLOJİK ESİNLİ TAYF PAYLAŞIMI

### 2.1. GİRİŞ

Kablosuz ağların tayf erişimleri genel olarak devletler tarafından sabit tayf atama politikası ile ayarlanmaktadır. Şimdiye kadar, bu politikalar kablosuz ağların tayf ihtiyaçlarını tatmin edici bir şekilde karşılamaktaydılar. Bununla beraber, son yıllarda yayılmış kablosuz teknolojilerinin tayf erişimlerindeki heyecan verici artış mevcut tayf bantlarında bir kıtlığa yol açtı. Bu nedenle sınırlı mevcut tayflar ve bu tayfların etkin kullanılmaması, var olan mevcut kablosuz tayfların fırsatçı bir şekilde lisanssız kullanıcılar kullanılabilmesini sağlayabilecek yeni haberleşme paradigmasını bir zorunluluk haline getirdi (AKYILDIZ,2006). Bu yeni ağ paradigması Gelecek Nesil Ağ (GNA) hem de Dinamik Tayf Erişim (DTE) ve Bilişsel Radyo Ağları (BRA) (AKYILDIZ,2006) olarak adlandırılmaktadır.

Bilişsel radyo kendi radyo ortamından bilgi algılama yeteneğine sahiptir. Ortam ile girdiği etkileşime dayanarak, bilişsel radyo kullanıcıları lisanslı yada lisanssız olabilen en uygun tayf bandı üzerinde haberleşme yapabilmesini sağlamaktadır. Çoğu tayf devletsel politikalar ile çoktan lisanslı kullanıcılara atandığı için, bilişsel radyo genel olarak lisanslı bantlar üzerinde haberleşme yapma ile uğraşır. Lisanslı tayf bantlarında, bilişsel radyo tayf deliği yada beyaz aralık (HAYKIN, 2005) diye adlandırılan zamansal olarak kullanılmayan tayfları kullanır. Eğer bilişsel radyo lisanslı bant üzerinde bir lisanslı kullanıcı ile karşılaşır, ya başka bir tayf deliğine geçer yada iletim gücü ve modülasyon modeli gibi haberleşme parametrelerini uyarlayarak lisanslı kullanıcıya karışmadan aynı bant üzerinde kalmaya devam eder. Lisanslı kullanıcıların bulunmadığı lisanssız tayf bantlarında, bütün kullanıcılar mevcut lisanssız tayf bantlarına erişim için aynı önceliğe sahiptir. Bilişsel radyo teknolojisi kullanıcıların fırsatçı bir şekilde mevcut tayf bantlarına ulaşımını dört ana fonksiyon ile sağlar; (i) tayf algılama (ii) tayf yönetimi (iii) tayf hareket kabiliyeti ve (iv) tayf paylaşım (AKYILDIZ,2006). Bu fonksiyonlar arasında, tayf paylaşımı bilişsel radyoların mevcut tayf bantlarını en uygun bir şekilde paylaşmasını sağlayan en önemli fonksiyonlardan bir tanesidir.

Tayf paylaşımı ile ilgili mevcut literatürde bir takım çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazılarında, tayf bölüşümü için geleneksel bir yaklaşım olan merkezi kontrol yaklaşımı (BRİK, 2005), (BUDDHIKOT, 2005) önerilmektedir. Bununla beraber bilişsel radyo ağlarının heterojen ve dinamik doğasından dolayı, merkezi kontrole dayanan yaklaşımlar pratik değildir. Bunun yerine bazı çalışmalarda herhangi bir merkezi kontrol ediciye ihtiyaç duymayan dağıtılmış yaklaşımlar (ZHAO, 2005), (HUANG, 2005) önerilmektedir. (ZHAO, 2005) de merkezi bir kontrol ediciye ihtiyaç duymayan dağıtılmış koordinasyon (distributed coordination) yöntemi önerilmektedir. (HUANG, 2005) da, kullanıcılar arasındaki sinyal değişimine dayanan, Eşzamanlı Olmayan Dağıtılmış Fiyatlandırma (Asynchronous Distributed Pricing) yöntemi artan parazitleri engellemek için önerilmiştir. Dağıtılmış yaklaşımlardan dolayı bu çalışmalar dinamik olarak değişen bilişsel radyo ortamında daha iyi adaptasyon yeteneği sağlamaktadırlar. Bununla beraber, bilişsel radyolar arasındaki koordinasyon büyük bir koordinasyon gecikmesine neden olmaktadır. Bilişsel radyolar dikişsiz haberleşme (seamless communication) sağlayabilmeleri için tayf bırakma sırasında minimum gecikme sağlamak zorunda oldukları için, dağıtılmış tayf paylaşımı minimum gecikme sağlamak zorundadır. Bu çalışmada, böcek kolonilerindeki uyarlamalı görev paylaşımına dayanan Biyolojik Esinli Tayf Paylaşım (BETP) algoritması tanıtılmaktadır. Lisanssız kullanıcılar arasında herhangi bir koordinasyona ihtiyaç duymadan, BETP her bir lisanssız kullanıcının üzerinde haberleşme yapabileceği uygun tayf kanalını dağıtılmış olarak belirleyebilmesini sağlamaktadır. Bundan başka, BETP bilişsel radyoların herhangi bir koordinasyona ihtiyaç duymadan üzerinde eş zamanlı olarak haberleşme sağlayabilecekleri çoklu tayf bantlara karar vermelerini sağlayabilmektedir.

## 2.2. BÖCEK KOLONİLERİ VE BİLİŞSEL RAYDO AĞLARINDA TAYF PAYLAŞIMI

Kendi ortamı ile etkileşiminin bir sonucu olarak, bilişsel radyo kullanıcıların lisanlı yada lisanssız olan tayf bantları üzerinde haberleşme yapmasını sağlar. Bundan başka bilişsel radyo çoklu tayf bantlarını eş zamanlı kullanabilir. Ayrıca kullanılan çoklu tayfların bitişik olması da bir zorunluluk değildir (AKYILDIZ,2006). Bu durum bilişsel radyoya tayf bırakma sırasında daha düşük bir performans azalışı sağlar (AKYILDIZ,2006). Çünkü bilişsel radyo lisanlı kullanıcının iletme başlaması gibi herhangi bir sebepten dolayı herhangi bir tayf bandını boşaltsa bile kalan diğer tayf bantları üzerinden haberleşme yapmaya devam edebilmektedir. Çoklu tayf iletimi bilişsel radyo uygulamaları için gelecek vaat ettiği halde, BRA için etkili bir tayf bölüşüm modeli çözülmeyi bekleyen önemli problemlerden biridir.



Bilişsel radyoya benzer olarak, böcek kolonilerinde, bireyler görevleri belirleyebilmek için ortamlarını algılayarak, kendileri için en uygun olan görevleri yerine getirirler. Burada, bu doğal mekanizma BRA için etkili bir tayf paylaşım modeli vermek için adapte edilmektedir.

## A. Böcek Kolonilerinde Görev Paylaşımı

Binlerce dinamik bireyden (individual) oluşan böcek kolonilerinde, her birey çok küçük bir zekaya sahip olduğu halde koloninin tamamı çok karmaşık görevleri yerine getirirken, çok büyük bir zeka belirtisi gösterebilmektedir (BONABEAU, 1999). Örneğin, arı kolonisindeki her bir arı sadece yakın çevresinin durumuna göre hareket edebilme kapasitesine sahip bir zekaya sahipken, bir arı kovanındaki arıların tamamı aralarındaki iş bölümü (division of labor) sayesinde kilometrelerce genişlikteki arazilerden topladıkları çiçek özleri ile kusursuz bir şekilde arı kovanlarını ve balı yapabilmektedir. Böcek kolonilerinde, ortak bir amaç için gereken değişik görevler, bu görevler için en uygun olabilecek bireyler tarafından eş zamanlı bir şekilde yapılır. Her birey, her görev için ayrı bir yanıt eşikine (response threshold) sahiptir. Yanıt eşik  $\theta$ , bireyin o görevi yerine getirme olasılığını belirler. Yanıt eşik  $\theta$  büyüdükçe görevi yerine getirme olasılığı azalır, küçüldükçe artar. Görevler, bireylerin ortamdan algıladıkları uyarıcılar (stimulus) ile karakterize edilir. Göreve özgü uyarıcı (task-associated stimulus)  $s$  bireyin ortamdan algıladığı bir koku ya da bir kimyasal konsantrasyon ya da herhangi bir im ile karakterize edilir. Örneğin, görev larvaları beslemek olduğunda, göreve özgü uyarıcı larvalar tarafından ortama bırakılan bir kimyasalın konsantrasyonu olabilir ve göreve özgü uyarıcıları ( $s$ ) yanıt eşiklerinden ( $\theta$ ) büyük olan bireyler larvaları besleme görevini üstlenirler. Böylece, yukarıdaki tanımlara dayanarak, bir bireyin herhangi bir görevi yerine getirme olasılığı, bu göreve ait uyarıcıya ( $s$ ) ve bireyin yanıt eşikine ( $\theta$ ) bağlı olacak şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir (BONABEAU, 1999):

$$T_{\theta}(s) = \frac{s^n}{s^n + \theta^n} \quad (1)$$

Burada,  $n > 1$  dir ve  $n$  eşik derinliğini (steepness) belirler.  $s \ll \theta$  için bireyin görevi yerine getirme olasılığı sıfıra yakındır,  $s \gg \theta$  için ise bu olasılık bire yakındır.  $s = \theta$  için bireyin görevi yerine getirme olasılığı tam olarak  $\frac{1}{2}$  dir.

Aşağıdaki bölümde, yukarıda anlatılan böcek kolonilerindeki görev paylaşımı prensipleri bilişsel radyo ağlarındaki tayf paylaşım modeli olarak uyarlanmaktadır.

## B. Bilişsel Radyo Ağları için Biyolojik Görev Paylaşımına Dayanan Tayf Paylaşım Modeli

Bilişsel radyo ağlarında tayf paylaşımı böcek kolonilerindeki görev paylaşımı ile büyük benzerlikler göstermektedir. Örneğin, bilişsel radyo mevcut tayf bantları için ortamı algılar ve paketlerini eş zamanlı olarak kendisi için en uygun olan tayf bantlarına iletir. Benzer olarak bir böcek kolonisinde bireyler mevcut görevler için ortamı algırlar ve kendileri için en uygun olan görevleri belirleyerek bu görevleri yerine getirirler. Biyolojik modelde, her bir görev bu görev için en uygun olan bireye, (1) de verilen görev gerçekleştirme olasılığı (task performing probability) sayesinde atanır. Benzer şekilde BRA da mevcut tayf bantları etkili bir şekilde paylaşılmalıdır. Burada bu benzerliğe göre (1) de verilen görev gerçekleştirme olasılığını uyarlayarak bilişsel radyoların kendileri için en uygun olan tayf bantlarını belirleyebilmesini sağlayacak *kanal seçim olasılığı* tanıtılmaktadır. Bunun için, Bölüm II-A'da verilen görev paylaşım modeli, BRA daki tayf paylaşımı ile aşağıdaki gibi eşleştirilmektedir.

- Böcek kolonisindeki bir böcek BRA daki bir bilişsel radyo olarak düşünülmektedir.
- Bir görev mevcut bir tayf bandı olarak düşünülmektedir.

- Göreve özgü uyarıcı ( $s$ ) kanal  $j$  için tahmini izin verilen iletim gücü ( $P_j$ ) (WILD, 2005) olarak düşünülmektedir.
- Yanıt eşiği  $\theta$  bilişsel radyo  $i$  için gerekli olan kanal  $j$  ye gönderdiği iletim gücü ( $p_{ij}$ ) olarak düşünülmektedir. Burada bilişsel radyo  $i$   $p_{ij}$  yi kabul edilebilir parazit seviyesi (interference level), yol kaybı (path loss) ve kanal hatası (channel error) gibi kullanıcının gerekliliklerine bakarak uygun bir tayf yönetim yöntemi ile belirleyebildiği farz edilmektedir.

Yukarıda verilen eşleştirmelere ve (1) de verilen görev gerçekleştirme olasılığına dayanarak, kanal seçim olasılığı  $T_{ij}^{csp}$  aşağıdaki gibi verilebilir.

$$T_{ij}^{csp} = \frac{P_j^n}{P_j^n + \alpha p_{ij}^n + \beta L_{ij}^n} \quad (2)$$

Burada,  $n > 1$  dir ve kanal seçim olasılığının derinliğini (steepness) belirler.  $\alpha$  ve  $\beta$ ,  $L_{ij}$  ve  $p_{ij}$  nin karşılıklı etkileşimini ayarlayan pozitif sabitlerdir.

$L_{ij}$  bilişsel radyo  $i$  nin kanal  $j$  yi öğrenip yada unutmasını sağlayan öğrenme faktörüdür. Eğer kanal  $j$  bilişsel radyo  $i$  nin gereksinimlerini karşılayabiliyorsa, kanal  $j$  bilişsel radyo  $i$  tarafından öğrenilir ve  $L_{ij}$ ,  $L_{ij} - \xi_0$  olarak güncellenir. Eğer kanal  $j$  bilişsel radyo  $i$  nin gereksinimlerini karşılayamıyorsa, kanal  $j$  bilişsel radyo  $i$  tarafından unutulur ve  $L_{ij}$   $L_{ij} + \xi_1$  olarak güncellenir. Burada  $\xi_0$  ve  $\xi_1$  sırası ile öğrenme ve unutma katsayılarıdır.

Mevcut tayf bantlarının paylaşımı için, her bir bilişsel radyo bütün mevcut kanallar için kanal seçim olasılıklarını hesaplar ( $T_{ij}^{csp}, \forall j$ ). Daha sonra etkili tayf paylaşımı için kanal seçim olasılıkları aşağıdaki gibi kullanılır.

- $P_j \gg p_{ij}$  olduğunda  $T_{ij}^{csp}$  bire yakındır. Bu durumda bilişsel radyo  $i$  nin kanal  $j$  ye iletim yapma olasılığı çok büyüktür.
- $P_j \ll p_{ij}$  olduğunda  $T_{ij}^{csp}$  sıfıra yakındır. Bu durumda bilişsel radyo  $i$  nin kanal  $j$  ye iletim yapma olasılığı hemen hemen yoktur.
- Sabit bir  $p_{ij}$  için, kanal  $j$  ye izin verilen iletim gücü ( $P_j$ ) arttıkça, bilişsel radyo  $i$  nin kanal  $j$  ye iletim yapma olasılığı artar.
- Sabit bir  $P_j$  için,  $p_{ij}$  arttıkça, bilişsel radyo  $i$  nin kanal  $j$  ye iletim yapma olasılığı azalır.
- Eğer  $P_j$  küçükse, kanal  $j$  nin küçük iletim gücüne ( $p_{ij}$ ) sahip olan bilişsel radyolar tarafından seçilmesi çok olasıdır. Bu durum küçük olan izin verilen güçlere sahip olan tayf kanallarının, küçük kullanıcı iletim talebi olan bilişsel radyolar tarafından seçilmesini sağlar.
- Eğer  $P_j$  büyükse, kanal  $j$  nin büyük yada küçük iletim gücüne ( $p_{ij}$ ) sahip olan bilişsel radyolar tarafından seçilmesi çok olasıdır. Bu durum büyük olan izin verilen güçlere sahip olan tayf kanallarının küçük yada büyük kullanıcı iletim talebi olan bilişsel radyolar tarafından seçilmesini sağlar.

- Eğer lisanslı kullanıcının görünmesi yada herhangi bir yer değişikliğinden dolayı tayf bırakma gerçekleşirse, bırakılan tayf için izin verilen iletim gücü ( $P_j$ ) sıfıra eşitlenir bu durumda (2) de verilen kanal seçim olasılığı bu tayf için sıfır olur böylece bilişsel radyoların bu kanala iletim yapma olasılıkları sıfır olur. Ayrıca bu durumda bu kanal için öğrenme katsayıları ( $L_{ij}$ ) başlangıçtaki değerlerine getirilir.

(2) de verilen kanal seçim olasılığı radyo ortamında herhangi bir değişiklik olduğunda tekrar hesaplanır. Böylece kanal seçim olasılığı bütün bilişsel radyoların küçük tutma zamanı, kullanıcı hareketleri ve lisanslı kullanıcının görünmesi gibi radyo ortamındaki değişikliklere kolayca uyum sağlayabilmesini ve bütün bu işlemlerin herhangi bir koordinasyona ihtiyaç duymadan başarabilmelerini sağlamaktadır.

### 2.3. BİYOLOJİK ESİNLİ TAYF PAYLAŞIM PROTOKOLÜ

Bölüm II-B de verilen modele göre, BETP protokolünün detaylı işlemleri burada verilmektedir. Aşağıdaki adımları izleyerek dağınık olarak tayf paylaşımını yönetmek için bilişsel radyo  $i$  :

1. uygun bir tayf algılama algoritması sayesinde mevcut olan bütün tayf bantlarını belirler
2. bütün kanallar için izin verilen iletim güçlerini ( $P_j, \forall j$ ) kestirir
3. bütün öğrenme faktörlerini ( $L_{ij}, \forall j$ ) aynı başlangıç değerine getirir ve öğrenme ve unutma katsayıları  $\xi_0$  ve  $\xi_1$  için uygun değerler seçer (örneğin benzetim deneylerinde öğrenme ve unutma katsayıları  $\xi_0 = \xi_1 = 10$  olarak seçilmiştir.)
4. kanal seçim olasılıklarını bütün mevcut kanallar için ( $T_{ij}^{csp}, \forall j$ ) hesaplar.
5. en büyük kanal seçim olasılığına sahip olan kanalı iletim yapmak için seçer. Benzer şekilde çoklu kanalları kullanmak için en büyük kanal seçim olasılığına sahip olan kanalları seçer. Eğer seçilen kanal sayısı kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayamıyorsa kanal sayısı artırılır. Seçilen herhangi bir kanal (kanal  $j$ ) servis kalitesini (Quality of Services) yakalayabiliyorsa bu kanal öğrenilir ve bu kanal için öğrenme faktörü  $L_{ij} - \xi_0$  olarak güncellenir. Eğer bu kanal servis kalitesini sağlayamıyorsa unutulur ve öğrenme faktörü  $L_{ij} + \xi_1$  olarak güncellenir.
6. herhangi bir kanalda lisanslı kullanıcının görülmesi yada herhangi bir yer değişikliği ile tayf bırakma gerçekleştiğinde, bu kanal için izin verilen iletim gücü sıfıra eşitlenir ( $P_j = 0$ ) ve bu kanal için bütün öğrenme faktörleri ( $L_{ij}, \forall i$ ) başlangıçtaki değerlerine getirilir.
7. tayf bırakmadan başka radyo ortamında herhangi bir değişiklik olduğunda bütün kanallar için kanal seçim olasılıkları bütün bilişsel radyolar tarafından ( $T_{ij}^{csp}, \forall i, j$ ) tekrar hesaplanır.

Böylece BETP bilişsel radyolar arasında herhangi bir koordinasyona ihtiyaç duymadan dağınık olarak mevcut tayf bantlarını paylaşır. Bu bilişsel radyolara dinamik radyo ortamındaki anlık değişikliklere kolayca uyum sağlayabilecekleri iyi bir adaptasyon yeteneği kazandırır. Ayrıca BETP bilişsel radyolara dikişsiz haberleşme yeteneği kazandırır ve yavaşça değişen dinamik radyo ortamını öğrenerek kolayca adapte olmalarını sağlar.

### 2.4. BENZETİM DENEYLERİ

Bu bölümde BETP protokolünün performansı için benzetim deneylerinin sonuçları verilmektedir. Performansı değerlendirebilmek için MATLAB ta bir benzetim ortamı geliştirilmiştir. İlk olarak benzetim ortamı için bazı varsayımlar verilerek daha sonra BETP nin performansı üzerine sonuçlar verilmektedir. İlk sonuçlar her bir bilişsel radyonun tek kanalı kullandığı varsayımını içermektedir. İkinci sonuç setinde bilişsel radyolar eş zamanlı olarak birden fazla kanalı kullanabilmektedirler.

#### A. Benzetim Ortamı

Lisanslı ve lisanssız kullanıcıların aynı ortamda bulunduğunu farz edilmektedir. Kullanıcı sayısı beşten elliye değişirken mevcut kanal sayısı beşten yirmi beşe değişmektedir. Her bir lisanslı kullanıcı herhangi bir kanala sabit bir probability ile ulaşırken, lisansız kullanıcılar bütün kanallara ulaşabilmektedirler. Ayrıca, lisanslı kullanıcıların kanallara sadece anlık ulaşarak lisanssız kullanıcıların iletimlerini kestikleri varsayılmaktadır.

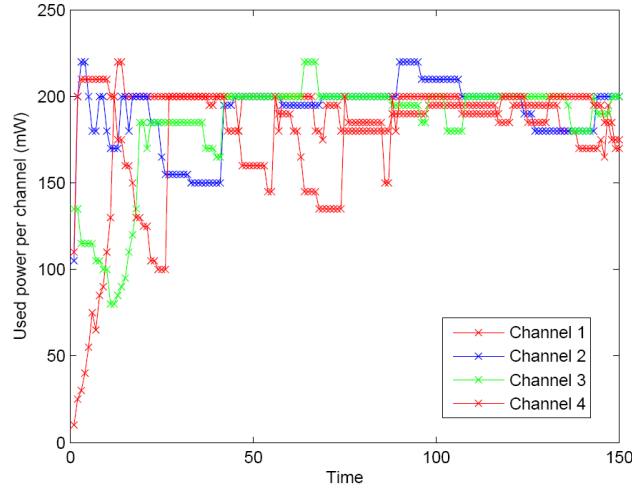
**TABLO I.**  
**Benzetim Parametreleri**

Kanal Sayısı	5-25
Bilişsel Radyo Sayısı	5-50
Başlangıçtaki izin verilen iletim gücü	0-400mW
İletim Gücü Aralığı	10-40mW
Başlangıçtaki Öğrenme Faktör Aralığı	10-40
Öğrenme Katsayısı	10
Unutma Katsayısı	10
$\alpha$	10
$\beta$	5

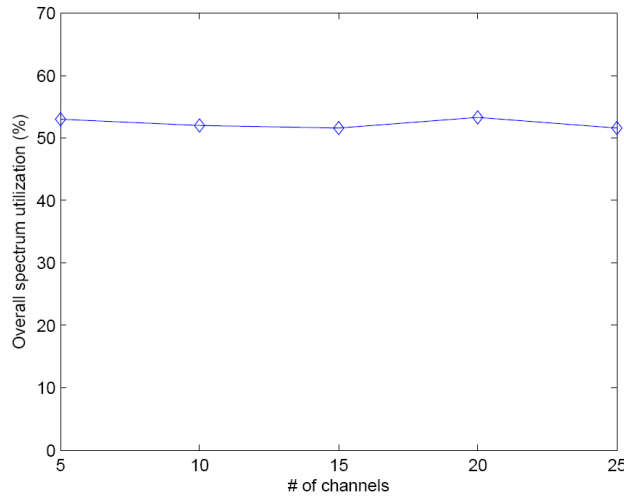
### B. Tek Kanal Seçimi İle Tayf Paylaşımı

Bu bölümde BETP'nin performans değerlendirmesi her kullanıcının sadece tek bir kanalı seçerek iletim yaptığı durum ile ilgilidir. Benzetim parametreleri Tablo I. de verilmektedir. İlk olarak benzetim deneyleri zaman göre kanallarda kullanılan iletim güçlerinin nasıl değiştiğini anlamak için yapılmaktadır. Şekil 1 de sıfır ile yirmi beş arasındaki zaman aralığında kullanılan iletim gücünün, mevcut kanalların bilişsel radyolar tarafından henüz seçilememesinden kaynaklı olarak salınım yaptığı gözlemlenmektedir. Bununla beraber zaman yirmi beşten sonra her bir bilişsel radyo kendisi için en uygun olan kanalı bulup öğrendiği için kanallardaki iletim gücü seviyeleri lisanslı kullanıcılar tarafından uyarıldıkları halde durağan özellik göstermektedirler.

Şekil 2 de kanal sayısının fonksiyonu olarak bütün tayf kullanımı (overall spectrum utilization) gösterilmektedir. Burada kanal sayısı beş ile yirmi beş arasında iken, bilişsel radyo sayısı on da sabit bırakılmıştır. Şekil 2 de görüldüğü gibi, bütün tayf kullanımı kanal sayısına bakılmaksızın %50 nin biraz üzerindedir. Bunun için temel sebep BETP'nin her bir bilişsel radyonun kendisi için en uygun olabilecek kanalı öğrenmesini sağlaması ve dolayısı ile kanal sayısındaki artışın bütün tayf kullanımı etkilememesidir.



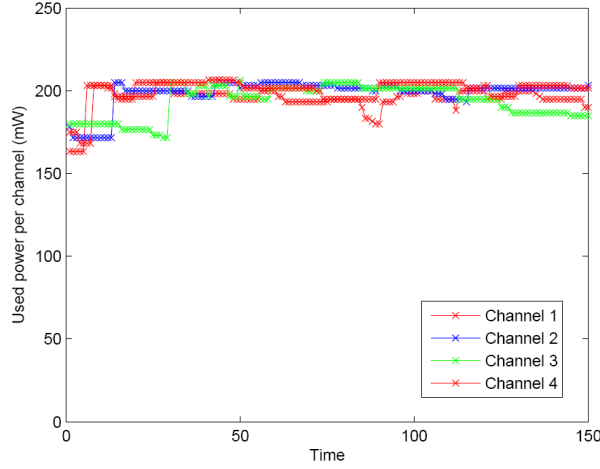
Şekil 1. Tek kanal seçim durumunda zamandaki değişime göre kanallardaki kullanılan iletim gücünün değişimi.



Şekil 2. Tek kanal seçim durumunda değişik kanal sayılarına göre kanal kullanımı.

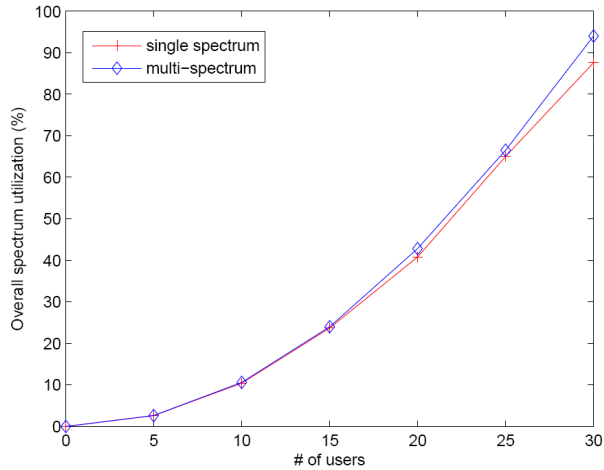
### C. Çoklu Kanal Seçiminde Tayf Paylaşımı

Bu bölümde, her bir bilişsel radyo çoklu kanal seçtiği durumda BETP'nin performans sonuçları verilmektedir. Tablo I. de verilen aynı benzetim deneyi parametrelerine göre, her bir bilişsel radyonun üçer tane kanal seçtiği ve bu seçilen kanallara aynı miktarlarda iletim gücü kullanarak iletim yaptıkları düşünülmektedir. Şekil 3 te sıfır ile on beş zaman aralığında, kanallarda kullanılan iletim gücünün, birçok tayf bırakmadan dolayı salınım yaptığı görülmektedir. Bu durum tek kanal seçim durumunda olduğu gibi bilişsel radyoların kendileri için en iyi olabilecek kanalları öğrenmeleri için geçen süre zarfında olmaktadır. Bununla beraber zaman on beşten sonra her bir bilişsel radyo kendisi için en uygun olabilecek kanalları bulup öğrendiği için kanallardaki iletim gücü seviyeleri lisanslı kullanıcılar tarafından uyarıldıkları halde durağan özellik göstermektedirler.

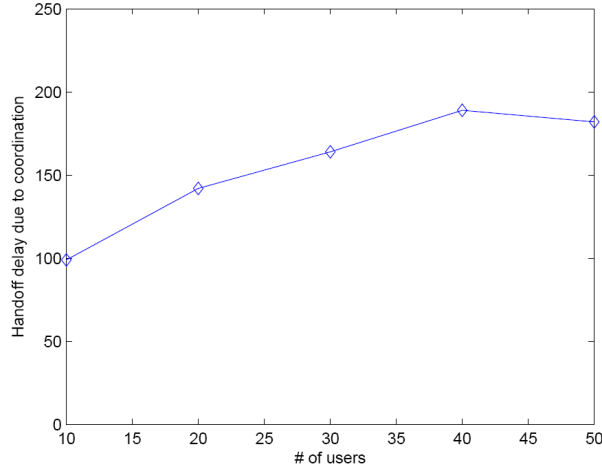


Şekil 3. Çoklu kanal seçiminde zamana göre kanallarda kullanılan iletim gücünün değişimi

Çoklu kanal seçiminde tek kanal seçimine göre lisanslı kullanıcıların etkisi daha azdır. Çünkü çoklu kanal seçiminde bir kanal boşaltılsa bile kalan diğer kanallarda bilişsel radyolar haberleşme yapmaya devam ederler. Ayrıca çoklu kanal seçiminde bilişsel radyolar durağan duruma daha çabuk geçerler. Bunun sebebi yine bilişsel radyoların birden fazla kanalı aynı anda toplam iletim güçlerini bölerek kullanmalarıdır. Kullanıcı sayısına göre bütün tayf kullanımı Şekil 4 te gösterilmektedir. Kullanıcı sayısı sıfırdan otuza arttıkça, kanal kullanımı %5 ten %95 e artmaktadır. Bununla beraber yine benzer sebeplerden ötürü çoklu tayf durumunda bütün tayf kullanımı tek tayf kullanımından biraz daha iyidir. Diğer taraftan Şekil 5 te farklı sayılardaki lisanssız kullanıcı arasındaki koordinasyondan kaynaklanan tayf bırakma gecikmesi görülmektedir. BETP'nin lisanssız kullanıcılar arasında herhangi bir koordinasyona ihtiyaç duymadığını hatırlayarak, Şekil 5 te varolan tayf bölüşüm algoritmalarının ne kadar gecikme ile karşı karşıya kaldıkları görülebilir. Burada her bir tayf bırakma teşebbüsünün bir birim gecikmeye sebep olduğu farz edilmektedir. Bu nedenle Şekil 5'te görüldüğü gibi kullanıcı sayısı arttıkça toplam gecikme yükünün de arttığı görülmektedir. Sonuç olarak BETP varolan tayf paylaşım metodlarından daha iyi sonuçlar vererek kullanıcılara dikişsiz haberleşme yapma şansı verebilmektedir.



Şekil 4. Tek ve çoklu kanal seçim durumlarında lisanssız kullanıcı sayısına göre kanal kullanımları.



Şekil 5. Tek kanal seçim durumunda lisanssız kullanıcı sayısına göre koordinasyondan kaynaklanan beklenen tayf bırakma gecikmesi.

## 2.5. SONUÇ

Etkili tayf paylaşımı bilişsel radyo ağlarında bütün tayf kullanımını en büyük yapmak için çözülmesi gereken önemli bir problemdir. Bu çalışmada böcek kolonilerindeki uyarlamalı görev paylaşımına dayanan Biyolojik Esinli Tayf Paylaşım (BETP) protokolü önerilmektedir.

BETP lisanssız kullanıcılar arasında herhangi bir koordinasyona ihtiyaç duymadan lisanssız kullanıcıların kendileri için en uygun olabilecek tayfı belirleyebilmesini sağlamaktadır. Benzetim deneyleri, BETP'nin etkili bir dinamik tayf paylaşımını lisanssız kullanıcılar arasında herhangi bir koordinasyona gerek duymadan yüksek tayf kullanımı ile başarabildiğini ve böylece bilişsel radyo ağında tayf bırakma gecikmesi yükü oluşturmadığını göstermiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] AKYILDIZ I. F. ,Lee W. Y. ,Vuran M. C. ,Mohanty S. , “NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey,” to appear in Computer Networks Journal (Elsevier), September 2006.
- [2] HAYKIN S. , “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 23 (2) (2005) 201-220.
- [3] BRIK V. ,Rozner E. ,Banarjee S. ,Bahl P. , “DSAP: a protocol for coordinated spectrum access,” IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 611-614.
- [4] BUDDHIKOT M.M. ,Kolody P. ,Miller S. ,Ryan K. ,Evans J. , “DIMSUMNet: new directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum access,” IEEE WoWMoM 2005, June 2005, pp. 78-85.
- [5] ZHAO J. ,Zheng H. ,Yang G.-H. , “Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks,” IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp.259-268.
- [6] HUANG J. , R.A. Berry, Honig M.L. , “Spectrum sharing with distributed interference compensation,” IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp.88-93.
- [7] BONABEAU E. , Dorigo M.,Theraulaz G. , “Swarm Intelligence, From Natural to Artificial System,” Oxford University Press, 1999.
- [8] WILD B.,Ramchandran K. , “Detecting primary receivers for cognitive radio applications,” IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 124-130.1.

### 3. KABLOSUZ ÇOKLUORTAM ALGILAYICI AĞLARINDA HOMEOSTAZİ TABANLI HABERLEŞME

Kablosuz çokluortam algılayıcı ağları (KÇAA) çokluortam gözetleme algılayıcı ağları, gelişmiş tıbbi servisler, trafik önleyiciler ve kişisel yer belirleyici servisler gibi yeni uygulamaları olası kılacaktır. Bu KÇAA uygulamaları oluşturmak için çokluortam haberleşmeye has özelliklerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Tespit edilen olayın özelliklerini çokluortam şeklinde iletmek yüksek miktarda bant genişliği gerektirmektedir. KÇAA'lar için özel olarak geliştirilmiş haberleşme protokolleri, bu yüksek bant genişliği talebinden doğacak olası sıkışıklık (congestion) problemini göz önünde bulundurmalıdır. Oysa ki var olan Kablosuz Algılama Ağ (KAA) protokolleri için temel hedef güvenilirlik ve enerji tasarrufu sağlamaktır. KÇAA'lardaki çokluortam haberleşme problemlerini göz önüne almamaktadırlar. Bunun yanında tamamı kısmen ya da tamamen alıcıya (sink) dayanmaktadır. Oysa alıcıdan gelen sinyal sıkışıklığı engelleyecek kadar erken gelmeyebilir. Ayrıca bu protokoller özellikle çokluortam kullanıldığı durumlarda olay sinyalinin özelliklerini göz önünde bulundurmamaktadırlar.

Pek çok biyolojik organizmanın temel işlerliği özerk bir şekilde hayati işlevleri için göreceli olarak kararlı bir dengeyi koruma yetisidir. Bu işlerliğe homeostazi denir ve bir organizmanın özerkliğini koruyabilmesi için gereken temel özelliktir. Bu çalışmada kendi kendine organize olabilen, uyum sağlayabilen, bu özerk biyolojik sistemden esinlenerek yeni bir haberleşme yöntemi, KAA'lar için homeostazi tabanlı çokluortam haberleşme (HÇH) protokolü, önerilmiştir. HÇH homeostazi tabanlı, çokluortam olayını alıcıda en az enerji harcayarak yeniden oluşturabilen yeni bir haberleşme protokolüdür. Alıcıdan geri beslemeye gerek kalmadan sıkışıklık kontrolü sağlamaktadır. Dahası, HÇH çokluortam sinyalinin tayf özelliklerine dayanmaktadır. Performans değerlendirmeleri göstermiştir ki HÇH yüksek ağ genişliği gerektiren çokluortam olay sinyalinin alıcıda en az enerji harcayarak ve en az paket kayıp oranı ile yeniden oluşturabilmektedir. Bunun yanı sıra HÇH kendi kendine organize olabileceği sayesinde algılayıcı düğümlerin (node) alıcı ile haberleşmelerine gerek kalmadan verimli bir şekilde çokluortam haberleşmesi yapabilmesine olanak sağlamaktadır.

#### 3.1. GİRİŞ

Kablosuz algılayıcı ağları (KAA) son on yılda araştırma toplumunun odak noktası olmuştur. Bu sürekli artan ilginin kaynağı buldukları çevreden bilgi toplayabilen, toplanan veriler üzerinde basit işlemler yapıp uzak bölgelere gönderebilen küçük ağ aygıtlarıdır.

Günümüzde kullanılan KAA uygulamalarının çoğunun yüksek bant genişliği talepleri yoktur ve genelde gecikmeye karşı hassas değildirler. Son yıllarda CMOS kameralarda ve mikrofonlardaki teknolojik gelişmeler Kablosuz Çokluortam Algılayıcı Ağlarının (KÇAA) (AKYILDIZ, 2006) doğmasına sebep olmuştur. KÇAA'lar durgun resimlerin yanı sıra hareketli görüntü ve sesi de alabilme yeteneğine sahiptir. Çokluortam gözetleme algılayıcı ağları, gelişmiş tıbbi servisler, trafik önleyiciler ve kişisel yer belirleyici servisler gibi yeni uygulamaları olası kılacaktır. Aynı zamanda çok sayıda kamera ve algılayıcılardan oluşan dağıtık sistemleri sayesinde geleneksel gözetleme sistemlerinin yeteneklerini de artıracaktırlar (AKYILDIZ, 2006).

Bu KÇAA uygulamaları oluşturmak için çokluortam haberleşmeye has ek özelliklerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Olay yerinden olay özelliklerinin güvenilir bir şekilde iletilmesinin gerekli olduğu alışlagelmiş veri haberleşmesinin aksine çokluortam trafiği %100 güvenilirlik gerektirmemektedir ancak sınırlandırılmış gecikme konusunda katı gereksinimleri vardır. Ayrıca çokluortam şeklinde çıkarılan olay özellikleri yüksek bant genişliği gerektirmektedir. KÇAA'lar için özel olarak geliştirilmiş haberleşme protokolleri, bu yüksek bant genişliği talebinden doğacak olası sıkışıklık problemini göz önünde bulundurmalıdır. Olay, olay yarıçapı dahilindeki düğümler tarafından algılandıktan sonra, bu düğümler tarafından ağa önemli bir miktarda çokluortam verisi aktarılacaktır, ve bu da çok rahat bir şekilde sıkışıklığa neden olabilir.

KAAlarda olay özelliklerini alıcıya aktarmayı amaçlayan haberleşme protokolleri üzerine pek çok araştırma bulunmaktadır (AKAN, 2005), (WAN, 2003), (STANN, 2004). Ancak bu protokollerin ana amacı güvenilirlik ve enerji tasarrufu sağlamaktır. KÇAA'lardaki çokluortam haberleşme problemlerini göz önüne almamaktadırlar. Bunun yanında tamamı kısmen ya da tamamen alıcıya dayanmaktadır. Oysa alıcıdan gelen sinyal sıkışıklığı engelleyecek kadar erken gelmeyebilir. Bu protokoller olay sinyalinin özelliklerini göz önünde bulundurmamaktadırlar. Bu yüzden bu protokollerdeki güvenilirlik mekanizmaları olay sinyalinin tayf özelliklerini göz önünde bulundurmamaktadır. Bu yüzden alıcıdan



bağımsız çalışabilen, çokluortam olay sinyalinin alıcıda minimum enerji ile oluşturulmasını destekleyen güvenilir bir protokolün geliştirilmesi oldukça önemlidir.

Pek çok biyolojik organizmanın temel işlevleri özerk bir şekilde hayati işlevleri için göreceli olarak kararlı bir dengeyi koruma yetisidir (NEAL,2005). Bu işlevlere homeostazi denir ve bir organizmanın özerkliğini koruyabilmesi için gereken temel özelliktir. Bu çalışmanın getirdiği yenilik ve önerilen KÇAA'lar için Homeostazi tabanlı Çokluortam Haberleşme (HÇH) protokolünün temeli Homeostazi den esinlenen haberleşme protokolüdür.

HÇH, çokluortam olay sinyalinin alıcıda yeniden oluşturulmasını olası kılarken KÇAA yı da kararlı bir durumda tutabilen, homeostazi tabanlı yeni bir haberleşme protokolüdür.

HÇH'nin belirgin özellikleri:

- Güvenilir haberleşme ve sıkışıklık kontrolü
- Alıcıdan bağımsızlık (alıcıdan geri beslemeye ihtiyacı yoktur.)
- Çokluortam olay sinyalinin minimum enerji harcanarak alıcıda yeniden oluşturulması
- Çokluortam olay sinyalinin tayf özelliklerine dayanmak
- KÇAA'lara kendi kendine organize olma yetisi kazandırmak

Bu çalışmanın kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir. II bölüm de önce homeostazi sunulmaktadır, ardından biyolojik homeostazi ile KÇAA'ları arasındaki bağıntılar verilmiştir. III. Bölümde, II bölümde verilen bağıntılar ışığında oluşturulan HÇH algoritması verilmiştir. V. Bölümde performans değerlendirmeleri sunulmuştur. Son olarak VI. Bölümde çıkarılan sonuçlar verilmiştir.

### 3.2. BİYOLOJİK HOMEOSTASİS VE KABLOSUZ ÇOKLUORTAM ALGILAYICI AĞLARI

#### A. Biyolojik Homeostazik Sistem

Pek çok biyolojik organizmanın hayati bir fonksiyonu, dış şartlar hızlı bir şekilde değişse bile kararlı bir iç durumu koruyabilme yetisidir (NEAL,2005). Bu işleve homeostazi denir ve özerkliğini koruyan bir organizmanın önde gelen özelliğidir. Homeostatik bir mekanizmada özerkliğin en direk gösterimi olan bilimsel yaklaşım dinamik sistem yaklaşımıdır. Bu yaklaşıma göre bir organizmanın durumu bir durum uzayı ile gösterilir, ve homeostazinin organizma için normal durumu temsil eden bir çekici nokta etrafındaki çembersel bir yol üzerinde olduğu varsayılır.

Homeostatik mekanizmalar sayesinde organizma kendi kendine büyümesini ve gelişmesini kontrol eder ve kendisini kararlı bir durumda tutar. Bir organizmada homeostatik kararlılığı koruyabilmek için sinir sistemi, endokrin sistem ve bağışıklık sistemi birleşik, büyük, ve karışık bir sistem gibi çalışır. Bu üç sistem arasındaki etkileşimler ve haberleşmeler hücrelerdeki özel alıcılar tarafından sağlanır (NEAL,2005).

Bir biyolojik organizma çeşitli dış uyarıcılara açıktır. Organizmanın sinir sistemi uyarıyı (Tat, koku, görüntü) duyarlı kısımları aracılığıyla alır, ve efektörlerde (doku ve kaslar) bir reaksiyon tetikler. Bu reaktif süreçte iki tür hücre görev alır; nöronlar ve nöroglia (NEAL,2005). Nöronlar gelen uyarıya tepki olarak elektrik sinyalleri üretirler ve nöroglia da nöronların besinini, gelişmesini ve bakımını sağlar. Sinir sistemi organizmanın iç durumunda bir değişim fark ettiğinde endokrin sistem hormonlar üreterek salgı hücreleri aracılığıyla salgılar. Bu yüzden sinir sistemi ile endokrin sistem arasındaki ilişki bir organizmanın iç durumunu kararlı tutmak için verdiği homeostatik tepkidir. Organizmanın işleyişini kötü şekilde etkileyecek herhangi bir bozuk davranış bağışıklık sistemi tarafından tespit edilir. Bağışıklık sistemi homeostatik kararlılık için savunma mekanizmasıdır. Bu sistem genellikle patojen olarak adlandırılan yabancı maddelere tepki verir. Tepki uyum sağlayan bağışıklık sisteminin B-hücreleri ve C-hücreleri aracılığıyla verilir. B-hücreleri ve T- hücreleri beyaz kan hücreleridir ve hücrelerdeki alıcılar aracılığıyla patojen maddelere tutunma yeteneğine sahiptirler (antijenler). Bir T-hücresi bir patojene başarılı bir şekilde tutunduğunda T-hücresi B-hücrelerini uyarır. B-hücreleri antijen ile bu etkileşim sayesinde uyarılır ve zararlı patojenlere karşı yüksek miktarlarda antikör salgılar.

Sonuç olarak her üç sistem de birbirleri ile sürekli etkileşim halindedirler ve sinir, bağışıklık ve endokrin sistemlerinin bu yardımlaşması kendi kendine organize olan, yüksek derecede fonksiyonel ve uyum sağlayabilen akıllı sistemler için uygun bir model oluşturmaktadır.

## **B. Homeostazi tabanlı Kablosuz Çokluortam Algılayıcı Ağları**

Doğada organizmaların kendilerini kararlı bir durumda tutmaları önemlidir, ve bunu homeostatik mekanizmalarla gerçekleştirirler. Benzer şekilde bir KÇAA ında başarılı bir şekilde işleyebilmesi için kendisini kararlı bir durumda tutması gerekmektedir. Bu durum KÇAA için çokluortam olay sinyalinin tayf özelliklerine göre değişen durumlar için minimum paket kaybı ve minimum enerji tüketimi sağlar.

Biyolojik homeostatik sistemlerde sinir sisteminin amacı dış ortamı algılamak ve aralarındaki etkileşime göre biyolojik olarak kararlı bir durumu sağlamak için endokrin ve bağışıklık sistemlerini yönetmektir. Benzer şekilde KÇAA'larda da bazı algılayıcı düğümler çokluortam olay sinyalinin özelliklerini algılayıp kaynak düğümleri ve ara düğümleri kararlı bir durumda tutarak paket kaybını ve enerji tüketimini en alt seviyeye çekmelidir.

KÇAA'larda olay sinyalinin çokluortam verisi şeklinde olması, Nyquist Örnekleme Teorisi'ne göre sinyalin sonradan doğru bir şekilde yeniden oluşturulabilmesi açısından örnekleme frekansına sınırlar getirmektedir (OPPENHEIM,2003). Olay sinyalinin tayf özellikleri ağda birim zamanda gönderilen örneklerin toplam sayısını, dolayısıyla da ileri yöndeki ağ yollarında trafiğin yoğunluğunu belirler. Ağ üzerindeki trafik yoğunluğu çok yüksek olduğunda, bu durum ileri yöndeki yollarda sıkışıklık, paket çarpışması ve kanal hatalarının olasılığını artırmaktadır. Bu yüzden algı düğümleri arasında verimli bir çokluortam iletimi için çokluortam sinyalinin tayf bant genişliğini kestirmek oldukça önemlidir. Bu benzerliğe dayanarak bazı algı düğümlerini sinir sistemindeki nöronlar olarak düşünürüz ve bunlara N-algılayıcılar adını veriyoruz. Sinir sistemindeki bir nöron gibi KÇAA'da da her bir N-algılayıcının amacı algılanan olay sinyalinin tayf bant genişliğini kestirmek ve kaynak düğüm ve kaynak düğüm ile alıcı düğüm arasındaki düğümleri yöneterek çokluortam sinyalinin alıcıda yeniden oluşturulmasını sağlamaktır.

Endokrin sistemin salgı hücreleri sinir ve endokrin sistem ile etkileşim içinde hormon salgılayarak organizmayı biyolojik olarak dengeli bir durumda tutarlar. Benzer şekilde KÇAA'larda da kaynak düğüm uygulamanın amacı olan olay sinyalini alıcıda başarılı bir şekilde yeniden oluşturulması için çokluortam olay sinyalini örnekleyip alıcı düğüme gönderir. Bu benzerliğe göre kaynak düğümleri salgı hücrelerine benzetiyor ve bunlara G-algılayıcılar diyoruz.

Bağışıklık sisteminde T-hücreleri organizmadaki bozuklukları algılayıp sinir ve endokrin sistemlerini tetikleyerek organizmanın kararlı biyolojik durumda kalmasını sağlarlar. Benzer şekilde KÇAA'larda olay sinyalini başarılı bir şekilde yeniden oluşturmak için bazı algılayıcı düğümler sıkışma, çarpışma ve kanal hatası gibi bozuklukları belirlemelidir. Bunu göz önünde bulundurarak kaynak ile alıcı düğümlerin arasında kalan düğümleri T-hücrelerine benzetiyor ve bunlara T-algılayıcıları diyoruz. Biyoloji ile KÇAA arasındaki bu geçişleri göz önünde bulundurarak sonraki bölümde Homeostazi-tabanlı Çokluortam Haberleşme (HÇH) sunuyoruz.

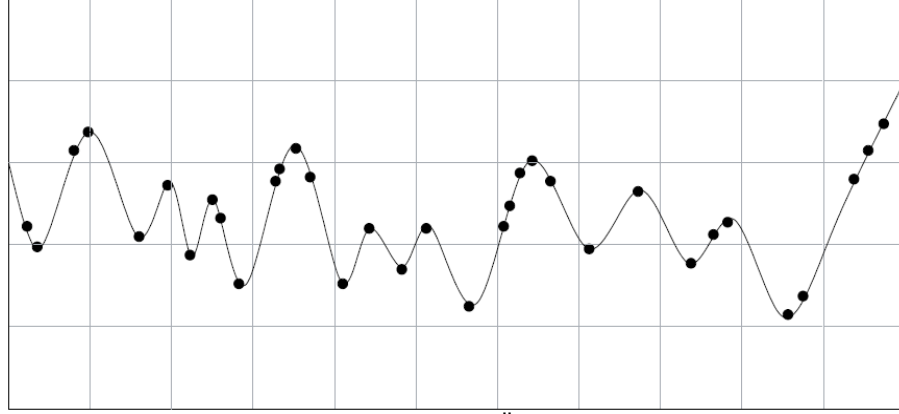
### **3.3. KABLOSUZ ÇOKLUORTAM ALGILAYICI AĞLARINDA HOMEOSTAZİ-TABANLI ÇOKLUORTAM HABERLEŞME**

Bu bölümde Homeostazi-tabanlı Çokluortam Haberleşme (HÇH) protokolünü sunuyoruz. HÇH biyolojik homeostazi prensiplerine dayanarak çokluortam olay sinyalini alıcı düğüme ulaştıracak birkaç birleştirilmiş özellik içermektedir. HÇH çokluortam olay sinyalinin tayf özelliklerine dayanmaktadır. Çokluortam olay sinyalinin tayf özelliklerine bağlı olarak HÇH önce alıcı düğümden başarılı bir yeniden oluşturma için algılayıcı düğümlere gönderilmesi gereken örnek sayısını belirler. Ek olarak alıcı ve algılayıcı düğümler arasında koordinasyona gerek kalmadan algılayıcı düğümlere kendi kendine organize olabilme yeteneği sağlar. Bu da algılayıcı düğümlerin sıkışmayı dağıtık bir şekilde kontrol etmesine olanak sağlar. Böylece ileri yöndeki yollarda gereken örnek sayısının iletilmesi için güvenli iletişimi sağlar.

HÇH aynı zamanda, düzensiz örnekleme (ATAKAN,2007) adı verilen verimli bir örnekleme yöntemi ile alıcı düğümlerde önemli miktarda enerji tasarrufunu olası kılar. Bu yöntemde her kaynak düğüm (G-

algılayıcı) çokluortam olayından örnekleri örnekleme olasılığı ( $\alpha$ ) denilen bir olasılık ile ve  $f$  frekansı ile alır. Örneğin G-algılayıcı  $i$   $\alpha_i$  olasılığı ile örnek alır ve  $f$  frekansı ile örnekler. Düzensiz örnekleme Şekil 1. de gösterilmiştir. Düzensiz örnekleme yöntemi ağ üzerinden gönderilen örnek sayısını azalttığından, paket kayıplarına sebep olan aşırı trafik yoğunluğunu azaltır ve dolayısıyla alıcı düğümde daha güvenilir bir şekilde, ve daha az enerji harcanarak yeniden oluşturmaya olanak verir (ATAKAN,2007). Şimdi alt bölümlerde detayları verilecek olan HÇH algoritmasını kısaca değiniyoruz.

- 4) **N-algılayıcı Seçim Prosedürü:** Bu prosedür kullanılarak olayı algılayan algılayıcı düğümler bir N-algılayıcı seçerler. Olay kaynağının yer bilgisi (HIGHTOWER,2001) kullanılarak algılayıcı düğümler işbirliği içinde olay kaynağına en yakın olan algılayıcı düğümü N-algılayıcı olarak seçerler. Olay kaynağına yakınlığın yanı sıra N-algılayıcı seçimi için önemli olan bir diğer kistas ise algılayıcı düğümün çoklu ortam olay sinyalinin komşularına oranla en yüksek sinyal gücü ile belirleyebilmesidir. Bu prosedür Bölüm III-A da verilmiştir.
- 5) **Tayf Kestirme Prosedürü:** N-algılayıcı alıcı düğümde tatminkar bir yeniden oluşum yapabilmek için gönderilmesi gereken örnek miktarını belirlemek için çokluortam olay sinyalinin tayf bant genişliğini kestirir. HÇH algoritması çokluortam olay sinyalinin bant genişliğini kestirmek için periodogram tabanlı Welch (WELCH,1967) algoritması kullanılmaktadır. Bu prosedürün detayları Bölüm III-B'de verilmiştir.
- 6) **G-algılayıcı Seçim Prosedürü:** G-algılayıcılar çokluortam olay sinyalinin örnekleyip ileten kaynak düğümlerdir. Bu prosedür kullanılarak N-algılayıcılar çokluortam olay sinyalinin tatmin edici bir şekilde yeniden oluşturulması için önce G-algılayıcı sayısını ve onların örnekleme olasılıklarını belirlerler. Ardından N-algılayıcılar en uygun algılayıcı düğümler olan olay kaynağına en yakın düğümleri G-algılayıcılar olarak seçerler. Olay kaynağına yakın düğümler olayı daha az zayıflama ile algılayacağından bu düğümlerin örnekleri alıcı düğümde daha başarılı yeniden oluşturmaya olanak verecektir. Detaylı G-algılayıcı seçim prosedürü Bölüm III-C de verilmiştir.
- 7) **Yol Belirleme Prosedürü:** Bu prosedürü kullanarak iletim yapmaya karar veren her bir algılayıcı düğüm alıcı düğüme yakın bir komşusunu sonraki hop olarak belirler. Böylece bu prosedür minimum-hop paket iletim sağlamaktadır, ki bu da kaynaktan alıcıya minimum gecikmeli gerektiren gerçek zamanlı çokluortam uygulamaları için oldukça önemlidir. Sonraki hop seçimlerinde her düğüm, sıkışmaya yol açmamak için, paket iletim sırasında en boş olan komşusunu seçmektedir. Böylece bu prosedür minimum-hop paket iletimini daha küçük sıkışma oranı ile sağlamaktadır. prosedürün detayları Bölüm III-D'de verilmiştir.
- 8) **Kayıp Paket Algılama Prosedürü:** Bu prosedürü kullanarak T-algılayıcılar ileri yolda sıkışma, çarpışma ve kanal hatalarını belirlerler. Ardından T-algılayıcıları G-algılayıcılarını kaybolan paketleri hakkında bilgilendirirler. Bu prosedür Bölüm III-E de detaylandırılmıştır.
- 9) **Örnekleme Olasılığı Günleme Prosedürü:** Bu prosedür kullanılarak her bir G-algılayıcı T-algılayıcılardan aldıkları paket kaybı bilgisine göre, eğer fazla miktarda paket kaybı olursa aşırı trafiği önlemek için örnekleme olasılıklarını azaltmak suretiyle örnekleme olasılıklarını düzenlerler. Detaylar Bölüm III-F'de verilmiştir.
- 10) **Yeni G-algılayıcı Atama Prosedürü:** G-algılayıcılar örnekleme olasılıklarındaki azalmalar hakkında N-algılayıcılara bilgi verirler. Bu azalma alıcı düğüme ulaşacak örnek sayısında bir azalma anlamına geldiğinden N-algılayıcı ne kadar ek G-algılayıcıya ihtiyaç olduğunu ve hangi algılayıcıların yeni G-algılayıcılar olarak seçilmeleri gerektiğini belirler. Ardından yeni algılayıcılarla birlikte 3. den 7. ye kadar olan prosedürler N-, G, ve T-algılayıcılar tarafından uygulanır.
- 11) **Sinyal Yeniden Oluşturma Prosedürü:** Bu prosedür alıcının kaynak düğümlerden (G-algılayıcılar) gönderilen örneklerden çokluortam olay sinyalinin yeniden oluşturması için kullanılır. Detayları Bölüm III-H'de verilmiştir.



Şekil 1. Düzensiz Örnekleme

### A. N-algılayıcı Seçimi Prosedürü

Bölüm II-B'de verildiği gibi bir N-algılayıcının amacı G-algılayıcıların sayısını ve örnekleme olasılıklarını belirlemek için çokluortam olay sinyalinin tayf özelliklerini kestirmektir. Çokluortam olay sinyalinin bant genişliği Nyquist Örnekleme Teorem'ine göre sinyali yeniden oluşturabilmek için G-algılayıcılar tarafından alınması gereken örnek sayısını belirler. N-algılayıcılar G-algılayıcıların gerekli sayıda örneği alıcıya ulaştırmasını sağlamak durumundadırlar. Eğer G-algılayıcılar tarafından gerekli sayıda örnek iletilmezse N-algılayıcılar iletilen örnek sayısını artırmak için yeni algılayıcıları G-algılayıcılar olarak belirlerler. N-algılayıcılar G-algılayıcıların ortalama örnek sayısına bakarak mevcut G-algılayıcıların gerekli örnek miktarını iletmek için yeterli olup olmayacağını belirlerler.

N-algılayıcıların amacı çokluortam olay sinyalinin tayf bant genişliğini belirlemek olduğundan algılayıcı düğümler tarafından seçilecek olan N-algılayıcının konumu olay sinyalinin tayfunu etkili bir şekilde kestirebileceği bir yer olmalıdır. Bu yüzden N-sensor çokluortam olay sinyalini maksimum güç ile algılayabileceği yönde ve kaynağa en yakın olan algılayıcı olmalıdır.

Bu çalışmada tüm düğümlerin kendi konum bilgilerine ve olayın konum bilgisine çeşitli yerleştirme yöntemleri (HIGHTOWER,2001) aracılığı ile sahip olduklarını varsayıyoruz. Ayrıca her algılayıcı düğüm algıladığı sinyal gücünü ve konum bilgisini tüme gönderim (broadcast) aracılığı ile komşu düğümlere ilettiğinden, tüm düğümler komşularının da konum bilgilerine ve onların algıladıkları sinyal gücü bilgisine sahiptirler. Böylece yardımlaşarak kaynağa en yakın ve en fazla sinyal gücü alan düğümü N-algılayıcı olarak belirlerler. HÇH algoritması kaynağın konum bilgisinin ve sinyal kaynağı gücünün periyodik olarak hesaplanmasına olanak sağlar. Bu periyodik hesaplamalara göre HÇH N-algılayıcının periyodik olarak güncellenmesine olanak sağlar.

Bu çalışmada HÇH nin tüm periyodik işlemlerini bir karar aralığında ( $\tau$ ) yaptığını varsayıyoruz.  $\tau$ , HÇH'nin tüm periyodik işlemlerini tamamlayabileceği bir zaman aralığıdır. Örneğin  $\tau$  süresinde N-algılayıcı çokluortam olay sinyalinin bant genişliğini hesaplayabilmeli, ve bu süre aynı zamanda N-, G- ve T-algılayıcılarının kendi aralarındaki tüm koordinasyonlarını tamamlamalarına da yetmelidir.

### B. Tayf Kestirme Prosedürü

HÇH, N-algılayıcısının çokluortam olay sinyalinin tayf bant genişliğini periyodik olarak kestirmek suretiyle çokluortam olay sinyalinin Nyquist teoremine göre tatmin edici bir şekilde yeniden oluşturmak için alıcıya (sink) kaç tane örnek gönderilmesi gerektiğini belirlemesini sağlar. N- algılayıcısı tayf kestirimi için periyodogram tabanlı Welch Metodunu kullanır (WELCH,1967). Bu metoda göre, N-algılayıcısı çokluortam olay sinyali  $f_s(t)$  'nin tayf karakteristiklerini şu şekilde kestirir:

- N- algılayıcısı başlangıçta  $f_s(t)$  'yi algılar ve  $f_s(0), f_s(1), \dots, f_s(N-1)$  örnek setini oluşturur.
- N- algılayıcısı örnek setinden L uzunluğunda olan ve ortak örneklere sahip öyle kesimler alır ki her kesimde D adet eşsiz örnek olur.  $f_s^1(j)$  'nin ilk kesim olduğunu farz edelim. O zaman

$$f_S^1(j) = f_S(j), \quad j=0,1,\dots,L-1$$

$$f_S^2(j) = f_S(j+D), \quad j=0,1,\dots,L-1$$

⋮

$$f_S^K(j) = f_S(j+(K-1)D), \quad j=0,1,\dots,L-1$$

Burada  $K$  kesim sayısını temsil eder. Kesimlerdeki bütün örnekler bütün sinyali kaplarlar:  $(K-1)D + L = N$ .

- N-algılayıcısı bir veri penceresi seçer,  $W(j), j=0,\dots,L-1$ , ve  $f_S^1(j)W(j), \dots, f_S^K(j)W(j)$  dizisini oluşturur. Daha sonra bu dizilerin Fourier transformunu alır,  $A_1(n), \dots, A_K(n)$ :

$$A_K(n) = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} f_S^K(j)W(j)e^{-2Kijn/L}$$

- N-algılayıcısı  $K$  adet modifiye edilmiş periyodogram elde eder:

$$I_k(f_n) = \frac{L}{U} |A_k(n)|^2 \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$f_n = \frac{n}{L}, \quad n = 0, \dots, L/2$$

$$U = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} W(j)^2$$

- N-algılayıcısı  $f_s(t)$ 'nin güç tayfı yoğunluğunun kestirimini bu  $K$  adet periyodogramın ( $I_k(f_n)$ ) ortalaması olarak hesap eder:

$$\hat{P}(f_n) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K I_j(f_n) \quad (1)$$

- N-algılayıcısı  $f_s(t)$ 'nin  $f_{\max} < \frac{L}{2}$  şartını sağlayan maksimum frekans bileşenini,  $f_{\max}$ , tespit eder. Böylece,  $f_s(t)$ 'nin tayf bant genişliği  $B = 2f_{\max}$  olur.
- Çoklu ortam olay sinyalinin tayf bilgisini güncellemek için, N-algılayıcısı yukarıda anlatılan tayf kestirme prosedürünü her  $\tau$ 'da yineler.

### C. G-algılayıcı Seçim Prosedürü

G-algılayıcısının görevi olay sinyalinin  $\alpha$  örnekleme ihtimaliyle örnekleme yapmaktır.  $i$  numaralı G-algılayıcısı  $\alpha_i$  örnekleme ihtimalini kullanır. N-algılayıcısı tarafından seçilen G-algılayıcısı sayısı esasen olay sinyalinin bant genişliğine bağlıdır. Nyquist Örnekleme Teoremi'ne göre olay sinyalinin tekrar oluşturabilmek için G-algılayıcıları tarafından belli sayıda örnek alınmalıdır. Sinyalin bant genişliği  $B$  Hertz ise sinyal  $f > 2B$  şartını sağlayan  $f$  örnekleme frekansıyla örneklenebilir. Dolayısıyla, G-algılayıcılarının seçimi temelde  $f$ ,  $B$  ve  $\alpha_i \forall i$ 'ye bağlıdır. Diğer yandan, iletilen örnek sayısı ağdaki örnek kaybına da bağlıdır. Ağdaki toplam örnek kaybı hızı  $\lambda$  arttıkça iletilen örnek sayısı azalır.

Böylece,  $f$ ,  $B$ ,  $\alpha_i$  ve  $\lambda$  parametrelerini alıcıya iletilen ortalama farklı örnek sayısını bulmak için bir denklem katıyoruz:

$$(1 - \lambda) \left( 1 - \sum_{k=1}^M \binom{M}{k} \left( \frac{\sum_{i=1}^M \alpha_i}{M} \right)^k \right) \left( \sum_{i=1}^M \alpha_i \right) f > 2B \quad (2)$$

Burada  $M$ , G-algılayıcılarının sayısı;  $f$ , örnekleme frekansı;  $\lambda$ , toplam örnek kayıp ihtimali ve  $\alpha_i$   $i$  numaralı G-algılayıcısının örnekleme ihtimalidir. Burada  $\sum_{k=1}^M \binom{M}{k} \left( \frac{\sum_{i=1}^M \alpha_i}{M} \right)^k$  G-algılayıcılarının aynı örnekleri alma ihtimalidir.  $\lambda$  toplam örnek kaybı ihtimalini belirtmektedir.

KAA'da paket kayıpları önemli ölçüde alıcıya giden veri yolu üzerinde olan ve çarpışma ile sıkışıklığa sebep olan aşırı iletişim yoğunluğu sonucu artan rekabete (contention) bağlıdır. Bu sebeple, algılayıcı ağındaki toplam paket kayıp olasılığı, algılayıcı ağındaki iletişim yükünü etkileyen örnekleme ve iletişim parametreleriyle modellenabilir. Toplam paket kayıp olasılığının örnekleme ve iletişim parametrelerine bağlı olarak modellenmesi için NS-2 [14] ağ simülatörü kullanılarak çok çeşitli simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlarda kullanılan parametreler Tablo 1'de gösterilmektedir. Şekil 1'de verilen simülasyon sonuçları, toplam paket kayıp olasılığının ( $\lambda$ ) temel olarak kaynak düğüm sayısına ( $M$ ) ve kaynak düğümlerin örnekleme frekansına ( $f$ ) bağlı olduğunu göstermektedir. *OriginLab* [13] veri uyarlama aracı kullanılarak, toplam paket kayıp olasılığı  $\lambda$ , kaynak düğüm sayısının ve örnekleme frekansının analitik bir fonksiyonu olarak şöyle yazılabilir:

$$\lambda = 1 - e^{-0.01\alpha f / (150e^{-\frac{M}{15}} + 5)} \quad (3)$$

Burada,  $\alpha$  ortalama örnekleme ihtimalidir ve şöyle bulunur:

$$\alpha = \sum_{i=1}^M \alpha_i$$

Yeni atanan G-algılayıcıları için  $\alpha$  'nın başlangıç değerini belirlemek için HÇH algoritması  $\alpha$  'yı bilinmeyen bir parametre olarak alır.

Böylece, (2) ve (3)'ü kullanarak HÇH, N-algılayıcısının G-algılayıcılarını seçmesini şöyle sağlar:

- Çokluortam olay sinyalinin bant genişliğini ( $B$ ) kestirdikten sonra N-algılayıcısı örnekleme frekansı  $f$   $f > 2B$  şartını sağlayacak şekilde seçer. Mesela,  $f = 2B + 100$  örnekleme frekansı için uygun bir seçimdir.
- Başlangıçta, N-algılayıcısı G-algılayıcıları sayısını ( $M$ ) ve ortalama örnekleme ihtimalini ( $\alpha$ ), G-algılayıcılarının çokluortam olay sinyalini minimum enerji harcayarak ve ağda minimum trafik yükü yaratarak geri oluşturmasını sağlayacak minimum değerler olarak belirler. Örnek kaybı ve örnek örtüşmesi olmadığı durumlarda  $\alpha M f > 2B$  şartını sağlayan minimum  $M$  ve  $\alpha$  çokluortam olay sinyalinin tatmin edici bir biçimde geri oluşturulmasını sağlar. Bu yüzden, N-algılayıcısı başlangıçta G-algılayıcılarının ortalama örnekleme ihtimalini  $\alpha_i = \frac{2B}{Mf}$ ,  $\forall i$  olarak belirler.  $M$ 'nin başlangıç değerini belirlemek için N-algılayıcısı (2)'de verilen şartı kullanır.  $f$  ve  $B$  bilindiği için (2)'yi sağlayan minimum  $M$  bulunur. Böylece, seçilen N-algılayıcısı, G-algılayıcısı sayısını ve bunların örnekleme ihtimalini çokluortam olay sinyalinin geri oluşturulmasını sağlayacak şekilde belirler. Ancak, Bölüm III-G'de detaylı bir şekilde anlatılacağı üzere, HÇH algoritması N-algılayıcısının G-algılayıcılarıyla işbirliği yaparak G-algılayıcısı sayısını ve örnekleme ihtimallerini düzenlemesini sağlamaktadır.
- N-algılayıcısı, hem komşularının hem de olay yerini bildiği için komşularından olay yerine en yakın olanları G-algılayıcısı olarak seçer. Bölüm III-A'da anlatıldığı gibi, N-algılayıcısı olay

yerine en yakın düğümdür. Bu yüzden, N-algılayıcısının komşuları da olay yerine en yakın düğümlerdir. Bu seçimin nedeni, uzaklık arttıkça zayıflamanın (attenuation) da artmasıdır.

#### D. Yol Belirleme Prosedürü

Bu prosedürü kullanarak, her G-algılayıcısı paketlerini alıcıya doğru iletir. KÇAA'da çoklu ortam haberleşmesi gerçek-zamanlı haberleşmeyi desteklemesi gerektiği için her algılayıcı düğümü paketlerini alıcıya minimum atlama sağlayacak komşusuna iletmelidir. Ayrıca, paketlerin iletildiği komşu kuyruğundaki aşırı sayıda paket yüzünden paket kaybına neden olmamalıdır. Her algılayıcı düğümünün komşularının ve olayın yerini bildiğini farz ettiğimiz için her algılayıcı düğümü paketlerini ileteceği komşusunu olay yerine en yakın olan olarak seçebilir. Bu seçim şekli algılayıcı düğümlerinin minimum atlama haberleşmesi yapmasını sağlar. Üstelik algılayıcı düğümleri kuyruklarında bekleyen ortalama paket sayısını periyodik olarak yayımladıkları için algılayıcı düğümleri kuyruklarındaki paket sayısı kritik olan komşularını bilir. Böylece HÇH, algılayıcı düğümlerinin paketlerini iletecek komşularını minimum atlama olacak şekilde ve kuyruktaki aşırı paket sayısı yüzünden paket kaybı yaşanmasını önleyecek şekilde seçmesini sağlar.

#### E. Kayıp Belirleme Prosedürü

KAA'larda maliyet, güç ve haberleşme kısıtlamaları yüzünden paket kayıpları sıkça yaşanmaktadır. Doğal bağışıklık sisteminde T-hücrelerinin vücuda giren patojenleri ya da organizmadaki herhangi bir bozukluğu tespit etmesi gibi HÇH T-algılayıcılarının ağda paket kaybına neden olan sıkışıklık, çarpışma ve kanal hatası gibi bozuklukları tespit etmesini sağlar. G-algılayıcıları ve alıcı arasındaki algılayıcı düğümlerini T-algılayıcıları olarak düşünüyoruz. G-algılayıcıları alıcıya doğru yoldaki bozuklukları şöyle tespit eder:

- Bir algılayıcı kanalında sıkışıklık oluştuğunda alıcı T-algılayıcısı sıkışıklığı ve düşen paketleri tespit eder. Bu T-algılayıcısı paketi düşen her G-algılayıcısına periyodik olarak paket kaybı mesajı teke gönderir (unicast). Bu mesajla her G-algılayıcısına kaç tane paketinin düştüğü bilgisi iletilir.
- Bir algılayıcı kanalında çarpışma olduğunda ve paket düştüğünde, gönderici T-algılayıcısı ACK mekanizması sayesinde paket düşüşünü tespit eder. Bu T-algılayıcısı paketi düşen her G-algılayıcısına periyodik olarak paket kaybı mesajı teke gönderir. Bu mesajla her G-algılayıcısına kaç tane paketinin düştüğü bilgisi iletilir.
- Bir algılayıcı kanalında bir kanal hatası oluştuğunda alıcı T-algılayıcısı bu durumu ve hatalı paketin kime ait olduğunu tespit eder. Paket hata düzeltme mekanizmalarıyla düzeltilemeyecek durumdaysa bu paketi gönderen G-algılayıcısına periyodik olarak paket kaybı mesajı teke gönderir.
- Böylece, her G-algılayıcısı kaç paket kaybettiğini T-algılayıcıları tarafından gönderilen paket kayıp mesajları sayesinde öğrenir.

#### F. Örneklemeye İhtimali Güncelleme Prosedürü

Doğal homeostazide, organizmayı kararlı bir durumda tutabilmek için salgı hücreleri (G-algılayıcıları) hormon salgılamasını T-hücrelerinden (T-algılayıcıları) ve nöron hücrelerinden (N-algılayıcıları) aldıkları pozitif ve negatif geri beslemeye göre düzenlerler. Benzer bir şekilde, KAA'larda, sıkışıklığı kontrol etmek için G-algılayıcılarının gönderdiği örnek sayısı düzenlenir. Doğal homeostazideki pozitif ve negatif geri besleme gibi G-algılayıcıları bu düzenlemeyi T-algılayıcılarından gelen paket kayıp mesajlarıyla ve N-algılayıcıları tarafından yapılan yeni G-algılayıcısı ataması sayesinde başarırlar.

Bir G-algılayıcısı tarafından gönderilen örnek sayısı,  $\alpha_i f$ , esasen örneklemeye ihtimalinden ( $\alpha_i$ ) etkilenir. Zira bütün G-algılayıcıları aynı örneklemeye frekansını kullanır. Bir G-algılayıcısının örneklemeye ihtimali arttıkça daha fazla örnek gönderir. Bu yüzden gönderilen örnek sayısını değiştirmek için her G-algılayıcısı örneklemeye ihtimalini şöyle düzenler:

- $i$  numaralı G-algılayıcısının paketleri  $\frac{l_i}{T_i}$  paket kayıp oranıyla kaybolsun. Burada,  $T_i$   $i$  numaralı G-algılayıcısı tarafından  $\tau$  karar verme aralığında gönderilen bütün paketlerin sayısı ve  $l_i$  bu aralıkta kaybolan paket sayısıdır. G-algılayıcıları kaç paketlerinin kaybolduğunu bildikleri için bu oranı hesap edebilir.  $i$  numaralı G-algılayıcısı örnekleme ihtimali  $\alpha_i$  'yi şöyle günceller:

$$\alpha_i = \alpha_i \gamma \left(1 - \frac{l_i}{T_i}\right)$$

Burada  $\gamma$ ,  $\alpha_i$  'nin azalma hızını belirleyen bir sabittir. Buna göre, her G-algılayıcısı kendi paket kayıp oranına göre gönderilen örnek sayısını azaltıyor. Bu G-algılayıcılarına gönderilen örnek sayısını düzenleyerek alıcıya doğru olan yolda paket kaybı yaşanmasını engellemeyi sağlıyor.

- $i$  numaralı G-algılayıcısının paketleri kaybolmamışsa ( $l_i=0$ ) örnekleme ihtimalini değiştirmez.

### G. Yeni G-Algılayıcı Atama Prosedürü

Her karar verme aralığında,  $\tau$ , N-algılayıcısı G-algılayıcıları tarafından her birinin güncellenmiş örnekleme ihtimali bilgisi iletilir. N-algılayıcısı da (2)'de verilen şartı kontrol eder ve çokluortam olay sinyalinin tatmin edici bir şekilde geri oluşturulmasını sağlamak için yeni G-algılayıcılarına ihtiyaç olup olmadığına karar verir. Bunu şöyle yapar:

- Şayet (2)'de verilen şart sağlanmıyorsa N-algılayıcısı G-algılayıcılarının sayısını artırır ve M'yi M+1 olarak günceller. N-algılayıcısı yeni G-algılayıcısı Bölüm III-C'de verilen G-algılayıcısı Seçme Prosedürü'ne göre yapar. (2)'deki şart sağlanana kadar N-algılayıcısı G-algılayıcılarının sayısını arttırmaya devam eder.
- Yeni atanan G-algılayıcıları alıcıyla HÇH algoritmasının 3,4,5 ve 6 numaralı prosedürlerine göre iletişime geçer.
- (2)'deki şart sağlandığı sürece HÇH algoritması çokluortam sinyalinin alıcıda başarılı bir biçimde geri oluşturulmasını garanti eder.
- Çokluortam sinyalinin bant genişliği azalırorsa N-algılayıcısı G-algılayıcılarının sayısını (2)'deki şartın sağlanmaya devam etmesi kaydıyla azaltabilir. Bu KÇAA'da önemli enerji tasarrufu yapılmasını sağlar. Yeni atanan G-algılayıcıları gibi, düşürülen G-algılayıcısı olay yerinden en uzak olan olarak seçilir.

### H. Sinyal Geri Oluşturma Prosedürü

Bu prosedürü kullanarak HÇH alıcının çokluortam olay sinyalini geri oluşturmasını sağlar. Bu bölümde alıcıda başarılı olan bu sinyal geri oluşturma prosedürünü (ATAKAN,2007) detaylı bir şekilde inceleyeceğiz.

KAA uygulamalarında, noktasal bir kaynakça modellenen olay sinyalinin, varyansı  $\sigma_s^2$ , ortalaması  $\mu_s$  olan bir sürekli rastgele proses ürettiği varsayılır. Noktasal kaynağın koordinat eksenlerinin merkezinde olduğu varsayılırsa (VURAN,2006),  $(x,y)$  konumundaki bir algılayıcı düğümünün aldığı sinyal şöyle olur:

$$f(x, y, t) = f_s\left(t - \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{v}\right) e^{-\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\theta_s}} \quad (5)$$



Burada,  $v$   $f_s(t)$  'nin yayılım hızı ve  $\theta_s$  de zayıflama sabitidir.  $f(x, y, t)$  sinyali  $f_s(t)$  'nin gecikmiş ve zayıflamış versiyonu olduğundan,  $f(x, y, t)$  'nin varyans ve ortalaması şöyle ifade edilir:

$$\mu_E(x, y) = \mu_s e^{-\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{\theta_s}} \quad (6)$$

$$\sigma_E^2(x, y) = (\sigma_s e^{-\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{\theta_s}})^2 \quad (7)$$

Her algılayıcı düğümü, olay sinyalinin zayıflamış ve gecikmiş versiyonları olan gözlemleri kullanarak veri paketlerinin içine koyacağı örnek kümelerini (sample set) üretir.  $(x_i, y_i)$  konumundaki  $n_i$  algılayıcı düğümü tarafından alınan  $f(x_i, y_i, t)$  sinyalini örnekleyerek üretilen  $k$ . örnek kümesi şöyle tanımlanır:

$$S_{i,k} = [f(x_i, y_i, t_{kp}) f(x_i, y_i, t_{kp+1}) \dots f(x_i, y_i, t_{(k+1)p})] \quad (8)$$

Burada,  $S_{i,k}$   $p \times 1$  vektördür,  $p$  ve  $k$  sırasıyla örnek kümesini uzunluğunu ve sayısını belirtir.  $f(x_i, y_i, t_{kp})$  olay sinyali  $f(x_i, y_i, t)$  'nin  $t_{kp}$  'de alınan örneğidir.

KAA'larda, algılayıcı düğümleri olayı tespit ettikten sonra, olay sinyalini örnekler ve üretilen örnek kümelerini ( $S_{i,k}$ ) alıcıya yollar. Bu süreç sırasında, algılayıcı devreleri bu paketlere ( $S_{i,k}$ ) gürültü eklerler:

$$S'_{i,k} = S_{i,k} + N_{i,k} \quad (9)$$

$S'_{i,k}$ , algılayıcı örnek kümesi olan  $S_{i,k}$  'nin gürültülü hali ve  $N_{i,k}$  gözlemdeki gürültüdür ve  $N_{i,k} \sim N(0, \sigma_N^2)$  geçerlidir.

Toplama eklenen gürültüyle birlikte, KAA'daki maliyet, güç ve iletişim kısıtlamaları sebebiyle, algılayıcı düğümleriyle alıcı arasındaki iletişimde sıklıkla paket kayıpları oluşmaktadır. Paket kayıplarının modellenmesi için  $i$  numaralı algılayıcı düğümünün toplam paket kayıp olasılığının  $\lambda_i$  olduğu ve iletişim kanalına, çarpışma ve sıkışıklığa bağlı kayıpları içerdiği varsayılmıştır. Alıcının paket ID'lerini kullanarak her algılayıcı tarafından gönderilen toplam paket sayısını ve her algılayıcının kaybolan paket sayısını bildiği farz edilmektedir. Her paket ID'sinde paket numarası ve kaynak algılayıcı düğümü bilgisi vardır. Böylece, her algılayıcı düğümünün paket kayıp ihtimali ( $\lambda_i$ ) alıcı tarafından kaybolan paket sayısının toplam gönderilen paket sayısına bölünmesi suretiyle bulunur. Algılayıcı paketinin kayıplı ve gürültülü şekli olan  $X_{i,k}$  şöyle tanımlanmaktadır:

$$X_{i,k} = \begin{cases} 0, & \lambda \text{ ihtimalle} \\ S'_{i,k} & (1 - \lambda) \text{ ihtimalle} \end{cases}$$

Ölçülen fiziksel olay, önceden belirlenen bir bozulma seviyesine (GASTPAR,2003) göre yeniden oluşturulduğunda kodlanmamış iletim (uncoded transmission) bölüşüm paradigmasına dayalı herhangi bir yaklaşıma göre daha üstün olacağı için, algılayıcıların kodlanmamış iletim yaptığı varsayılmıştır. Algılayıcı düğümleri kodlanmamış gözlemleri gönderdiğinde, minimum ortalama karesel hata (minimum

mean square error, MMSE) kestirimi en iyi kod çözme tekniğidir. Bu sebeple, algılayıcı paketi  $S_{i,k}$  'nın çözülmüş hali olan  $Z_{i,k}$  şöyle yazılabilir:

$$Z_{i,k} = \frac{(\sigma_E^2(x_i, y_i) + \mu_E^2(x_i, y_i))(X_{i,k})}{(1 - \lambda)(\sigma_E^2(x_i, y_i) + \mu_E^2(x_i, y_i) + \sigma_N^2)} \quad (10)$$

Çözülen algılayıcı paketlerine ( $Z_{i,k}, \forall i, k$ ) göre alıcı geri oluşturulmuş sinyali,  $\hat{S}(\tau, f, M, p)$ , şöyle oluşturur:

$$\hat{S}(\tau, f, M, p) = \frac{1}{M} \left[ \sum_{i=1}^M Z_{i,1} \dots \sum_{i=1}^M Z_{i,(\frac{\tau f}{p})} \right] \quad (11)$$

Burada,  $\tau, M, f$  sırasıyla geri oluşturma aralığını, kaynak düğüm sayısını ve algılayıcı düğümlerinin örnekleme frekansını belirtir.

### 3.4. Bütün HÇH Operasyonu

Önceki bölümlerde, HÇH'in alt prosedürlerinin operasyonunu detaylı bir şekilde verildi. Bu bölümde, HÇH algoritması bir bütün olarak sunulacak. Bir olay sinyali tespit edildiğinde, her karar verme aralığında ( $\tau$ ), HÇH alt prosedürlerini şöyle kullanmaktadır:

4. HÇH önce **N-algılayıcı Seçim Prosedürü'nü** kullanır ve bir düğümü N-algılayıcısı olarak seçer.
5. HÇH **Tayf Kestirme Prosedürü'nü** kullanarak seçilen N-algılayıcısının çokluortam sinyalinin bant genişliğini ( $B$ ) kestirmesini sağlar
6. HÇH **G-algılayıcısı Seçim Prosedürü'nü** kullanır ve bu sayede N-algılayıcısı bazı düğümleri G-algılayıcısı olarak seçer ve (2)'yi kullanarak örnekleme ihtimallerini belirler.
7. HÇH **Yol Belirleme Prosedürü'nü** kullanarak G-algılayıcılarının alıcıya doğru yollarını belirlemelerini sağlar.
8. HÇH **Kayıp Belirleme Prosedürü'nü** kullanarak T-algılayıcılarının meydana gelen paket kayıplarını belirleyip G-algılayıcılarını kaç paket kaybettikleri konusunda haberdar etmelerini sağlar.
9. HÇH **Örnekleme İhtimali Güncelleme Prosedürü'nü** kullanarak G-algılayıcılarının (4)'ü kullanarak örnekleme ihtimallerini T-algılayıcılarından gelen geri beslemeye dayanarak güncellemelerini sağlar.
10. HÇH **Yeni G-Algılayıcı Atama Prosedürü'nü** kullanarak N-algılayıcılarının yeni G-algılayıcılarına ihtiyaç olup olmadığını belirlemesini sağlar. Şayet yeni G-algılayıcılarına gerek varsa N-algılayıcısı uygun düğümleri G-algılayıcısı olarak atar ve başlangıç örnekleme ihtimallerini belirler. Yeni atanan G-algılayıcıları için, HÇH yukarıdaki basamaklardan 4-5-6'yı her karar verme aralığında tekrar eder. Yeni G-algılayıcısına gerek yoksa HÇH bir değişiklik yapmaz.
11. HÇH **Sinyal Geri Oluşturma Prosedürü'nü** kullanarak alıcının her karar verme aralığında çokluortam olay sinyalinin,  $f_s(t)$ , geri oluşturulmasını sağlar.

### 3.5. PERFORMANS DEĞERLENDİRMELERİ

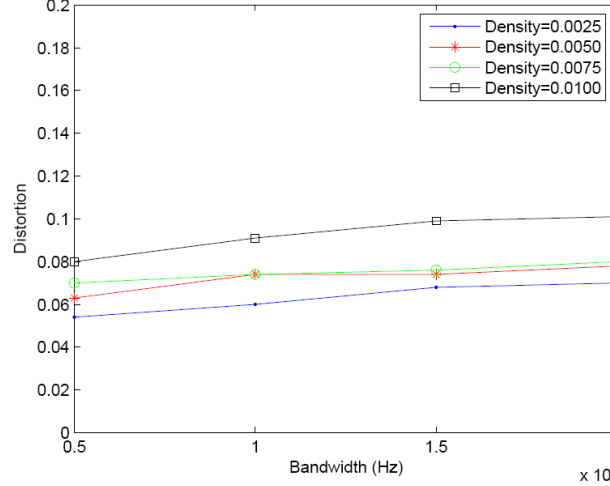
HÇH'nin performans ölçümleri MATLAB benzetimleri kullanılarak yapılmıştır. Benzetim senaryoları 100x100 metrelik bir alanda 25, 50, 75 ve 100 düğüm kullanılarak yapılmış ve alıcı alanda X=100 ve Y=100'de konumlandırılmıştır. G-algılayıcının *örnekleme hızı*, G-algılayıcının bir çokluortam olayını örnekleyip 800 baytlık veri paketleri oluşturma hızıdır. Tablo 1'de gösterildiği gibi örnekleme hızı benzetimleri 15000 - 50000 örnekleme/sn arasında değişmektedir. Çokluortam olay sinyalinin bant

genişliği değişken düğüm yoğunluklarında 5kHz'den 20kHz'e kadar artırılmış ve HÇH algoritması bozulma, paket kayıp oranı, ve enerji tüketimi cinsinden incelenmiştir.

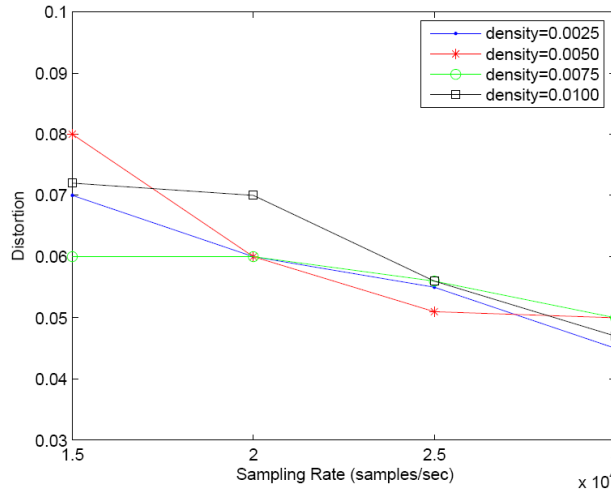
## A. Bozulma

Bozulma kestirilmiş sinyalin çokluortam sinyalinden sapmasının ölçüsüdür. HÇH'de *çokluortam olay sinyalinin tekrar oluşturması* Şekil 2 ve Şekil 3'de gösterilmiştir. Bozulmanın çokluortam sinyal bant genişliğinin artması ile değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir. Bant genişliğinin artması ile küçük bir miktar artış gözlenmektedir. Nyquist Örnekleme Teoremi'ne göre sinyalin bant genişliği ne kadar fazla ise kaynak tarafında o kadar fazla örnekleme alınmalı ki alıcı tarafında sinyal tekrar oluşturulabilsin. Ancak, örnekleme sayısının artması ağda yüksek trafik yüküne neden olur bu da ağ tıkanıklığı ve paket kaybının artması ile sonuçlanır. Dolayısıyla, bozulmada gözlemlenen küçük artış paket kayıplarıyla açıklanabilir. HÇH'nin homeostazi-tabanlı kontrol mekanizması ağda belirli bir derecede kararlılık sağlar ve tıkanıklık ve bozulma eş zamanlı kontrol eder. Öyle ki, çokluortam sinyalin bant genişliği dört misline çıktığında, bozulmadaki artış %2 düzeyindedir. Yüksek düğüm yoğunluğu ile ağda daha fazla paket iletilir, bundan dolayı düğümler daha yoğun yerleştirildiğinde ağ daha fazla tıkanır. Sonuç olarak, bozulmanın bant genişliğinin artması ile artması gibi düğüm yoğunluğunun artması ile de artar ama bu artış HÇH'de epey azdır.

Bozulmanın örnekleme hızı ile değişimi Şekil 3'de gösterilmiştir. Belirli bir boğüm yoğunluğu için örnekleme hızını artırmak alıcıya daha fazla örnek gönderme şansını artırır. Daha fazla örnek almak, alıcının çokluortam sinyalini tekrar oluşturmasını kolaylaştırır, dolayısıyla HÇH'nin tekrar oluşturma performansı daha iyidir ve zaten az değerdeki bölülüm daha da azalır.



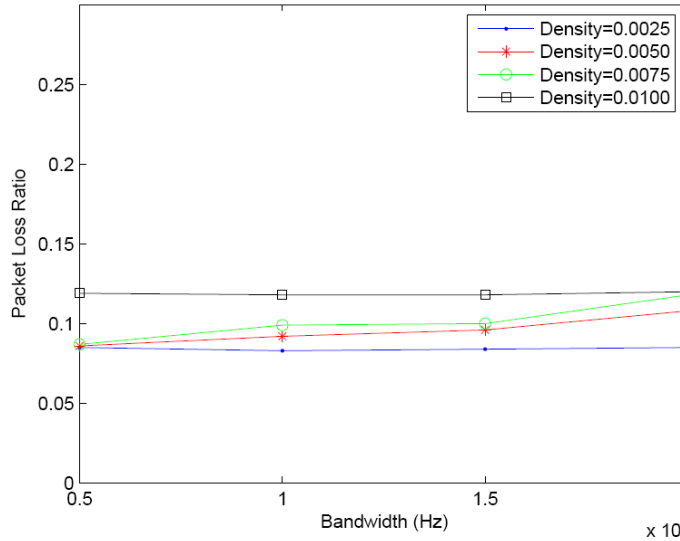
Şekil 2. Bozulmanın çokluortam sinyal bant genişliği ile değişimi.



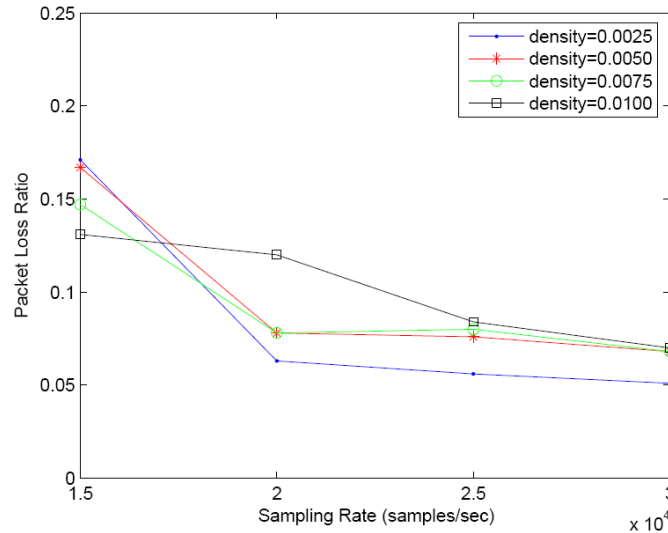
Şekil 3. Bozulmanın örnekleme hızı ile değişimi.

## B. Paket Kayıp Oranı

Paket kayıp oranı G-algılayıcılar tarafından iletilen toplam paket sayısının kayıp olan paket sayısına oranıdır. Çokluortam sinyalinin bant genişliği ve örnekleme hızı etkileri Şekil 4, 5'de gösterilmektedir. Çokluortam olay sinyalinin bant genişliği arttıkça, çokluortam olay sinyalini alıcıda başarılı bir şekilde yeniden oluşturabilmek için daha fazla örnek gerekmektedir. Bu nedenle daha fazla paket ağa iletilir. Bununla beraber HÇH ağı homeostazi gibi karalı bir durumda tutabilmektedir. Şekil 4'de görüldüğü gibi artan bant genişliğine rağmen paket kayıp oranları neredeyse sabittir. Şekil 5' de görüldüğü gibi benzer karalı durum örnekleme hızı arttığında da HÇH tarafından sağlanabilmektedir.



Şekil 4. Paket kayıp oranının çokluortam olay sinyalinin bant genişliği ile değişimi.

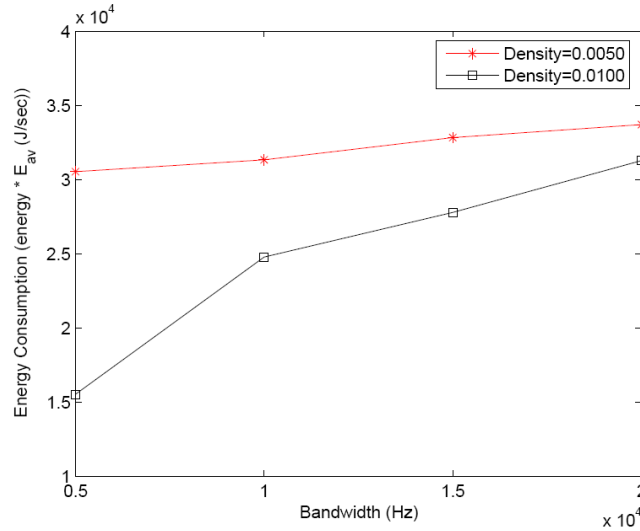


Şekil 5. Paket kayıp oranının örnekleme hızı ile değişimi.

## C. Enerji Tüketimi

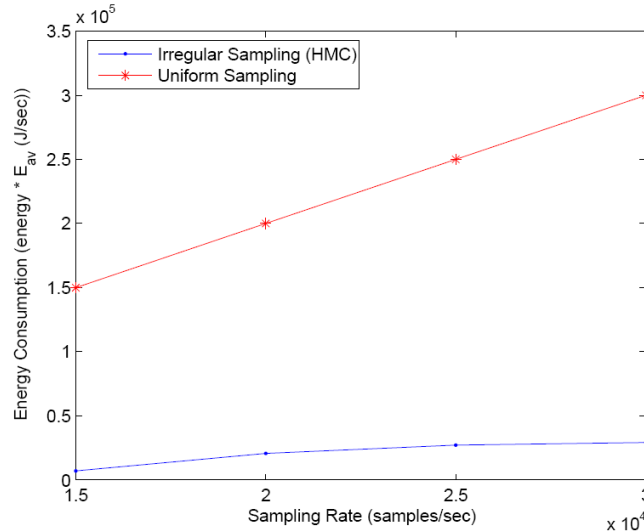
HÇH'nin bütün enerji tüketimi ana olarak örnekleme hızına ve örnekleme olasılığına bağlıdır. Ağdaki enerji tüketimi paketlerin oluşturulması ile artar. Eğer G-algılayıcı yüksek örnekleme hızına sahipse veya yüksek örnekleme olasılığına sahipse daha çok paket oluşur. Şekil 6'da çokluortam olay sinyalinin bant genişliğindeki artışa göre enerji tüketimindeki değişim gösterilmektedir. Bant genişliği arttıkça başarılı yeniden oluşturma için daha fazla örnek alınmaktadır. Bununla beraber HÇH bant

genişliğindeki artışın büyüklüğe rağmen enerji tüketiminin aşırı artmamasını sağlayabilmektedir, öyle ki bant genişliği dört katına çıktığı halde enerji tüketimi buna nazaran çok az artmaktadır. HÇH bu durumu homeostaziye dayanan kararlılık sayesinde başarabilmektedir.



Şekil 6. Enerji tüketiminin çokluortam olay sinyalinin bant genişliğine göre değişimi.

Ayrıca HÇH düzensiz örnekleme planını (irregular sampling scheme) kullanmak suretiyle tekdüze örnekleme (uniform sampling) gibi geleneksel örnekleme yöntemlerindeki enerji tüketimine nazaran çok fazlaca enerji kazancı sağlayabilmektedir. Şekil 7'de örnekleme hızındaki değişime göre düzensiz örnekleme ve tekdüze örnekleme için enerji tüketimleri verilmektedir. Şekilde 7'de görüldüğü gibi düzensiz örnekleme aşırı bir enerji kazancı sağlayabilmektedir. Ayrıca HÇH homeostaziye dayana kararlı durumda tutabilme özelliğinden dolayı örnekleme hızındaki artışı enerji tüketimine tekdüze örnekleme nazaran daha az yansıtmakta ve enerji tüketimi örnekleme hızı ile daha düzensiz örneklemede daha az artmaktadır.



Şekil 7. Örnekleme hızına göre düzensiz ve tekdüze örnekleme için enerji tüketimleri.

#### KAYNAKLAR

[1] AKYILDIZ I. F. ,Su W. ,Sankarasubramaniam Y. ,Cayirci E. , "Wireless Sensor Networks: a survey," Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, v.38 n.4, pp. 393-422, 2002

- [2] AKYILDIZ I. F. ,Melodia T. ,Chowdhury K. R. , “A survey on wireless multimedia sensor networks,” *Comput. Netw.*, (2006), in press; doi: 10.1016/j.comnet.2006.10.002.
- [3] AKAN O. B. and Akyildiz I. F. , “Event-to-Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 13, pp. 1003-1016, October 2005.
- [4] WAN C. , Eisenman S. B. , and Campbell A. T. , “CODA: Congestion Detection and Avoidance in Sensor Networks,” in *Proc. ACM Sensys 2003*, Los Angeles, USA, November 2003.
- [5] STANN F. and Heidemann J. , “RMST: Reliable Data Transport in Sensor Networks,” in *Proc. ACM MobiHoc 2004*, Roppongi, Japan, May 2004.
- [6] NEAL, M., and Timmis, J.: *Once More Unto the Breach: Towards Artificial Homeostasis*, Recent developments in biologically inspired computing, Idea Group Pub, 340, 2005
- [7] ATAKAN B. ,Akan O. B. , “On Event Signal Reconstruction in Wireless Sensor Networks,” In *proc. IFIP/TC6 NETWORKING 2007*, Atlanta, GA, May 2007.
- [8] HIGHTOWER J. , Borriello, “Location systems for ubiquitous computing”, *IEEE Computer*, Aug. 2001.
- [9] WELCH P. D. , “The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short modified periodogram”, *IEEE Transaction on Audio and Electroacoustics*, Vol. AU-15, No. 2, June 1967.
- [10] VURAN M. C. ,Akan O. B. , “Spatio-temporal Characteristics of Point and Field Sources in Wireless Sensor Networks”, In *Proc. IEEE ICC 2006*, Istanbul, June 2006.
- [11] GASTPAR M. ,Vetterli M. , “Source-Channel Communication in Sensor Networks”, In *Proc. IPSN 2003*, Palo Alto, USA, 2003.
- [12] OPPENHEIM A. V. ,Schafer R. W. ,Buck J. R. , “Discrete-Time Signal Processing” Prentice Hall, 1999.
- [13] <http://www.originlab.com/>
- [14] The Network Simulator, ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

#### 4. MOLEKÜLER HABERLEŞME İÇİN BİLGİ KURAMSAL BİR YAKLAŞIM

Moleküler haberleşme nano-makinaların (nanomachines) molekülleri taşıyıcı (carrier) olarak kullanarak haberleşmelerine imkan sağlayan yeni bir haberleşme paradigmasıdır. İki nano-makine arasındaki kontrollü molekül teslimatı (delivery) moleküler haberleşmenin en önemli problemlerinden bir tanesidir. Bu nedenle iki nano-makina arasındaki moleküler kanalın molekül teslimat kapasitesini bulabilecek bir bilgi kuramsal yaklaşım (information theoretical) geliştirmek moleküler haberleşme için çok önemlidir. Bu çalışmada iki nano-makina arasındaki moleküler kanalın kapasitesi için bilgi kuramsal bir yaklaşım geliştiriyoruz. Öncelikle bir moleküler haberleşme modelini tanıttıktan sonra kütle hareket kinetiğinin (mass action kinetics) prensiplerini kullanarak İletici Nano-makine (İN) ve Alıcı Nano-makine (AN) olarak isimlendirilen iki nano-makina arasındaki molekül teslimat (molecular delivery) modelini veriyoruz. Daha sonra İN ve AN arasındaki kanalın kapasitesi için kapalı form bir ifade (closed form expression) veriyoruz. Sayısal sonuçlar ortam sıcaklığı, yayılan moleküllerin (emitted molecules) yoğunluğu, nano-makinalar arasındaki uzaklık, ve molekül yayılma süresi gibi parametreleri uygun seçerek iki nano-makina arasında maksimum moleküler haberleşme kapasitesinin başarılabileceğini gösterdi.

##### 4.1. GİRİŞ

Moleküler haberleşme nanoteknoloji, biyoteknoloji, ve haberleşme teknolojilerini içeren disiplinler arası bir araştırma alanıdır (research area) [1]. Doğada moleküler haberleşme biyolojik fenomenlerin birbirleri ile haberleşmelerini sağlayan en önemli biyolojik fonksiyonlardan biridir. Örneğin, bir böcek kolonisinde böcekler birbirleri ile pheromone adı verilen bir kimyasal molekül sayesinde haberleşmektedirler. Bir böcek pheromone molekülünü yaydığı anda, yayılan moleküllerden bazıları kolonideki bazı böceklerin alıcılarına (receptor) yapışır ve bu böcekler alıcılarına yapışan pheromone moleküllerini biyolojik olarak anlamlı bilgiye (biologically meaningful information) çevirirler. Bu mekanizma koloni içindeki böceklerin birbirleri ile haberleşmelerini sağlamaktadır. Böceklere benzer olarak hemen hemen doğadaki bütün biyolojik sistemler kabarcık taşıması (vesicle transport) ve sinir taşıyıcıları (neurotransmitters) sayesinde hücreler arası haberleşme, ve hormon molekülleri sayesinde organlar arası haberleşme yapmaktadırlar [1].

Nanoteknoloji nano-makine olarak isimlendirilen nano boyuttaki makineleri olanaklı kılan en önemli gelecek teknolojilerinden bir tanesidir [2]. Nano-makinalar hareket etme ve algılama gibi basit görevleri yapabilme yeteneğine sahip moleküler boyuttaki nesnelere [1]. Nano-makinalar iki tipte kategorize edilebilir [2]. Birinci tip, var olan makinaları taklit ederken, diğer tip moleküler motorlar ve alıcılar gibi doğada var olan biyolojik mekanizmaları taklit eden nano-makinalardır [2]. Biyolojik sistemlerde biyolojik sistemi oluşturan hücreler arasındaki haberleşme hücrelerin görevlerini etkili bir şekilde yapabilmeleri için temel bir mekanizmadır. Örneğin, doğal bağışıklık sisteminde B-hücresi ve T-hücresi (B-cell and T-cell) olarak isimlendirilen beyaz kan hücreleri vücuda giren bir patojeni yok etmek için birbirleri ile haberleşirler. Biyolojik sistemlere benzer olarak nano-makinalar arasındaki haberleşme nano boyutlardaki bir ağ için etkili algılama ve hareket için çok önemlidir.

Nano-makinalar büyüklükleri ve yetenekleri açısından sınırlı olduklarından, elektromagnetik dalgalara dayanan geleneksel kablolu haberleşme ile iki nano-makinayı haberleştirmek olanaklı değildir [1]. Bununla beraber moleküler haberleşme molekülleri haberleşme taşıyıcısı olarak kullanarak nano-makinaları haberleştirebilecek bir haberleşme paradigmasıdır [1]. Bu nedenle ortam sıcaklığı, yayılan moleküllerin yoğunluğu, nano-makinalar arasındaki uzaklık, ve molekül yayılma süresi gibi parametrelere dayanarak iki nano-makina arasındaki moleküler kanalın molekül teslimat kapasitesini bulmak çok önemlidir.

Moleküler haberleşme ile ilgili olan birkaç araştırmayı literatürde bulmak mümkündür. [1]'de moleküler haberleşmenin araştırma zorlukları (research challenges) verilmektedir. [3]'de moleküler haberleşme konsepti ile beraber moleküler haberleşme sistemi için ilk dizayn çalışması verilmektedir. [4]'de moleküler haberleşme için bir motor haberleşme sistemi tanıtılıyor. [5]'de gelecek sağlık uygulamalarını mümkün kılacak bir moleküler haberleşme sistemi araştırıldı. [6]'da hücreler arası kalsiyum sinyal ağına dayanarak (intercellular calcium signaling networks) bir moleküler haberleşme sistemi dizaynı

tanıtıldı. [7]'de DNA melezleştirmesini (hybridization) ve biyomoleküler lineer motorları kullanarak bilgi moleküllerini taşımak için özerk (autonomous) bir moleküler haberleşme sistemi önerilmektedir. Moleküler haberleşme ile ilgili literatürde varolan çalışmalar moleküler haberleşmenin yapılabirliği ve dizaynı ile ilgilidir. Bununla beraber, bu çalışmalarının hiçbirinde bir moleküler kanalın kapasitesini ve bu kapasitenin hangi koşullar altında başarılabilirliği araştırılmamaktadır.

Bu çalışmada moleküler haberleşme sistemi için bir bilgi kuramsal yaklaşım verilmektedir. Kütle hareket kinetiğinin prensiplerini kullanarak İletici Nano-makina (İL) ve Alıcı Nano-makina (AN) olarak isimlendirilen iki Nano-makina arasındaki moleküler teslimat öncelikle modellenmektedir. Daha sonra bu moleküler teslimat modeline dayanarak İL ve AN arasındaki moleküler kanalın kapasitesi için kapalı formda bir ifade verilmektedir. Bu kapasite ifadesine göre ortam sıcaklığı, yayılan moleküllerin yoğunluğu, nano-makinalar arasındaki uzaklık, ve molekül yayma süresi gibi faktörlerin moleküler kanalın kapasitesini nasıl etkilediği incelenecektir. Daha sonra moleküler haberleşmenin hangi koşullar altında mümkün olabileceği ve hangi koşullar altında hangi kapasitelerin başarılabilirliği tartışılacaktır.

#### 4.2. MOLEKÜLER HABERLEŞME MODELİ

Nano-makinalar iki tipte sınıflandırılabilir [2]. Birinci tip varolan makineleri taklit eden nano-makinalar. İkinci tip ise hücre ve hücre bileşenleri gibi biyolojik mekanizmaları taklit eden nano-makinalardır. Bu çalışmada biyolojik mekanizmalara benzeyen nano-makinalar göz önünde bulundurulmaktadır. Doğada biyolojik mekanizmalar arasındaki moleküler haberleşme molekül-alıcı yapışma (ligand-receptor binding) mekanizmasına dayanmaktadır. Molekül-alıcı yapışma mekanizmasına göre moleküller bir biyolojik fenomen tarafından yayılır daha sonra yayılan moleküller ortamda difüzyona uğrarlar ve başka bir biyolojik fenomenin alıcılarına yapışırlar. Bu yapışma biyolojik fenomenin yapışan molekülü (bound molekül) hücre duvarındaki difüzyon sayesinde içeri almasını sağlar. Alınan moleküller alıcı olan biyolojik fenomenin biyolojik bilgiyi anlamasını sağlar. Örneğin biyolojik endokrin sisteminde salgı hücreleri (gland cells) hormon moleküllerini hücreler arası ortama yayarlar, hormon molekülleri difüzyona uğrar ve ortama saçılırlar ve ilgili hücreler tarafından alınırlar. Yayılan hormon molekülünün tipine göre alıcı hücreler hormon molekülünü biyolojik olarak anlamlı bilgiye çevirirler. Bu doğal mekanizma hemen hemen bütün biyolojik fenomenlerin moleküler haberleşme yapmalarını sağlar.

Bu çalışmada doğal molekül-alıcı yapışma mekanizmasını adapte ederek İletici Nano-makina (İN) (Transmitter Nanomachine (TN) ) ve Alıcı Nano-makina (AN) (Receiver Nanomachine (RN)) arasında Şekil 1'de görüldüğü gibi bir moleküler haberleşme modeli veriyoruz. Literatürde yapay molekül-alıcı yapışma (artificial ligand-receptor binding) modelleri bulunmaktadır [8], [9]. Bu çalışmada [8]'de geliştirilen bir yapay molekül-alıcı yapışma modeli kullanılmaktadır. Burada İN'nin molekül A olarak isimlendirilen bir çeşit molekül yayabilen bir nano-makina olduğu farz edilmektedir. Ayrıca İN'nin L(t) yoğunluğu ile kare dalga darbesine benzeyen (square pulse) aşağıdaki yayılma modeli (emission pattern) [9] ile A molekülünü yayabildiği farz edilmektedir.

$$L(t) = \begin{cases} L_{ex} & \text{for } jt_H \leq t \leq jt_H + t_H \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

Burada  $j=(0,1,\dots)$ ,  $t_H$  darbenin süresi,  $L_{ex}$  ise İN tarafından yayılan A molekülünün yoğunluğudur. Burada ayrıca AN nin üzerinde N tane R olarak isimlendirilen alıcı olan bir nano-makina olduğu düşünülmektedir. Alıcılar AN nin yüzeyine yapışan molekülleri almasını sağlamaktadır.

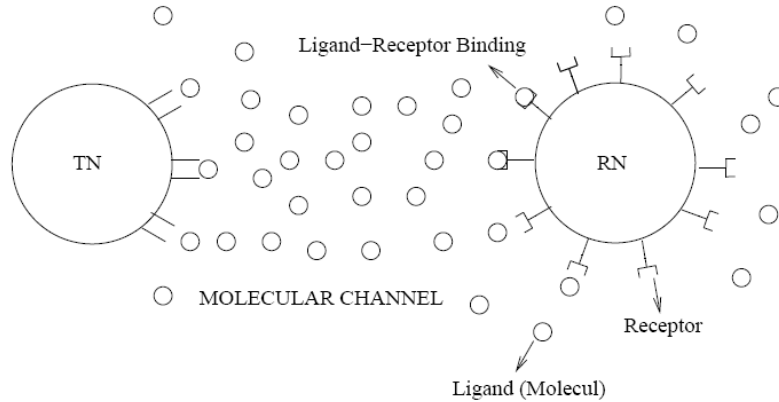
Geleneksel sayısal haberleşmede bilgi dizinleri (information sequences) lojik 0 ve lojik 1 olmak üzere iki bit tarafından iletilmektedir. Eğer bir alıcı kanalda belli bir voltaj değerinin üzerinde voltaj tespit edebilirse, ileticinin lojik 1 gönderdiğini düşünür. Eğer ölçülen voltaj değeri belli bir değerin altında ise alıcı bu sefer ileticinin lojik 0 gönderdiğini düşünür. Bu geleneksel fikri kullanarak, benzer bir moleküler haberleşme planı (moleküler communication scheme) düşünüyoruz. Bu plana göre,  $t_H$  zaman aralığı boyunca İN sayısal haberleşmedeki lojik1 e uygun olarak ya A molekülünü yayar yada sayısal haberleşmedeki lojik 0 a uygun olarak  $t_H$  zaman aralığı boyunca herhangi bir molekül göndermez.



Eğer İN A molekülünü göndermek isterse,  $t_H$  zaman aralığı boyunca  $L_{ex}$  yoğunluğu ile ortama A molekülünü yayar. Burada sayısal haberleşmedeki lojik 1 ve lojik 0 a benzer olarak İN'nin A moleküllerini yayma durumunu A ile ve herhangi bir molekül yaymama durumunu ise 0 ile gösteriyoruz. Böylece moleküler haberleşme için A ve 0 olarak adlandırılan iki tane moleküler haberleşme bitini tanımlıyoruz.

AN tarafında bu bitler A molekülünün yoğunluğu sayesinde anlaşılır. Eğer AN  $S(\mu mol/liter)$  olarak isimlendirilen bir değer üstünde bir yoğunluk algılasa İN'nin  $t_H$  zaman aralığı boyunca moleküler bit A gönderdiğini düşünür. Tersine  $S(\mu mol/liter)$  den daha düşük bir yoğunluk algılasa İN'nin  $t_H$  zaman aralığı boyunca moleküler bit 0 gönderdiğini düşünür.

Geleneksel sayısal haberleşmede gürültü seviyesi kanal hatalarına neden olmaktadır. İletici lojik 0 göndermeye çalıştığında kanaldaki gürültü seviyesi yüzünden alıcı gönderilen lojik 0'ı lojik 1 olarak algılayabilir. Yada tam tersine gönderilen lojik 1, lojik 0 olarak anlaşılabilir. Benzer şekilde moleküler haberleşmede AN tarafında hatalı moleküler bitlerle karşılaşılabilir. Moleküler haberleşme boyunca A molekülü İN tarafından ortama yayılır. Yayılan moleküller AN'nin de içinde bulunduğu ortamda sürekli difüzyona uğrarlar. Bu nedenle ortamda sürekli difüzyona uğrayan yayılan moleküllerden dolayı AN'nin İN tarafından gönderilen moleküler bitleri hatalı olarak alması mümkündür. Örneğin, İN'nin moleküler bit 0'ı gönderdiği durumda ortamda difüzyona uğrayan A moleküllerinin AN'nin moleküler bit A'yı almasını sağlaması olasıdır. Bu durumda İN ve AN arasındaki moleküler haberleşmede bir moleküler bit hatası oluşur. Ayrıca İN ve AN arasında moleküllerin yayılma gecikmesinden dolayı moleküler bit hataları oluşabilir. Aşırı gecikme durumunda İN'nin moleküler bit A'yı göndermesi AN tarafında moleküler bit 0 olarak anlaşılabilir. Ayrıca hatalı moleküler bitler ortam sıcaklığı, nano-makinalar arasındaki uzaklık molekül yayma süresi gibi faktörlerden de etkilenir.



Şekil 1. Moleküler Haberleşme Modeli

Böylece geleneksel sayısal haberleşme kanalına benzer olarak İN ve AN arasındaki moleküler haberleşme kanalının molekül teslimat kapasitesi belli bir zaman aralığında teslim edilebilen maksimum sayıdaki hatasız moleküler bit olarak tanımlanabilir.

Sonraki bölümde İN ve AN arasındaki moleküler haberleşme modeli için molekül teslimat modeli verilmektedir.

#### 4.3. MOLEKÜL TESLİMATI

İN ve AN arasındaki moleküler haberleşme için, A moleküllerinin AN den İN'e nasıl teslim edildiğinin anlaşılması çok önemlidir. Bu bölümde [8] de verilen molekül-alıcı yapışma modelini kullanarak İN ve AN arasındaki moleküler haberleşme için bir molekül teslimat modeli veriyoruz. Molekül-alıcı yapışma reaksiyonun kinetiğine göre İN tarafından yayılan A molekülü AN üzerindeki bir R alıcısı ile karşılaştığında, A molekülü R alıcısına yapışır. Bu yapışan A molekülleri ve R alıcıları aşağıdaki kimyasal reaksiyona göre C kompleks molekülünü oluşturur.



Burada  $k_1$  ( $\mu\text{ mol/liter/sec.}$ ) yapışma reaksiyonun hızı (rate of binding reaction). Yapışma reaksiyonuna benzer olarak, alıcılardan A moleküllerinin aşağıdaki kimyasal reaksiyona göre ayrılması da olasıdır.



Burada  $k_{-1}$  ( $1/\text{sec.}$ ) ayrılma reaksiyonun hızıdır (rate of release reaction). (1) de verildiği gibi İN genliği  $L_{ex}$  olan bir kare dalga şeklinde A moleküllerini  $t_H$  zaman aralığı boyunca yayar. Bu sürede kompleks moleküllerin yoğunluğu  $C(t)$  ( $\mu\text{ mol/liter}$ ) aşağıdaki gibi verilebilir [8].

$$C(t) = C_\infty (1 - e^{-t(k_{-1} + k_1 L_{ex})}) \quad (4)$$

Burada  $k_1$  ve  $k_{-1}$  sırasıyla yapışma ve ayrılma hızlarıdır (binding and release rate).  $L_{ex}$  ( $\mu\text{ mol/liter}$ ) İN tarafında yayılan A moleküllerinin yoğunluğudur.  $C_\infty$  kompleks moleküllerin durağan durum yoğunluğudur ve aşağıdaki gibi verilir [8].

$$C_\infty = \frac{k_1 L_{ex} N}{k_{-1} + k_1 L_{ex}} \quad (5)$$

Burada  $N$  ( $\mu\text{ mol/liter}$ ) , AN üzerindeki alıcı yoğunluğudur.

Darbe süresi  $t_H$  boyunca  $C(t)$  (4)'de verilen ifadeye göre artar.  $t_0$  'da darbe süresi bittiğinde  $C(t)$  aşağıdaki ifadeye göre azalmaya başlar [8].

$$C(t) = C_{t_0} e^{-k_{-1}(t-t_0)}, \quad t > t_0 \text{ için} \quad (6)$$

Molekül alıcı ilişkilerinin hızları  $k_1$  ve  $k_{-1}$  İN ve AN arasındaki moleküler difüzyona bağlıdır. Daha açık olarak, yapışma hızı  $k_1$  difüzyon katsayısı, ortam sıcaklığı, ve nano-makinalar arasındaki uzaklık gibi moleküler difüzyon katsayılarına bağlı iken [11], ayrılma hızı  $k_{-1}$  ilişki uzaklığı (interaction range) ve sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır [12]. Burada difüzyon parametrelerine göre  $k_1$  'i bulmak ile ilgilenmiyoruz, bu şu anki çalışmamızın kapsamının dışındadır. Bununla birlikte  $k_1$  'i sayısal bir ifade olarak bulabilmek olasıdır [15]. Burada sadece  $k_{-1}$  'in İN ve AN arasındaki uzaklıkla ( $\alpha$ ) ters orantılı olduğunu ve ortam sıcaklığı ( $T$ ) ile doğru orantılı olduğunu varsayıyoruz. Ayrılma hızı  $k_{-1}$  için ise aşağıdaki modeli kullanıyoruz [12].

$$k_{-1} = k_{-1}^0 e^{\alpha f / k_B T} \quad (7)$$

Burada  $k_{-1}^0$  sıfır-güç ayrılma hızıdır (zero-force release rate).  $\alpha$  , İN ve AN arasındaki uzaklıktır,  $k_B$  ve  $T$  sırası ile Boltzman sabiti ve mutlak sıcaklıktır.  $f$  yapışma başına harcanan güçtür.  $f$  yayılan molekülün enerjisi İN ve AN arasındaki uzaklık ve çevresel koşullara bağlıdır [14]. Burada  $f$  in sabit olduğunu ve  $k_{-1}^0$  in deneysel sonuçlardan çıkarıldığını ve AN nin molekül yakalayabilme kabiliyeti ile ilgili olduğunu varsayıyoruz [12].

Sonraki bölümde bu bölümde verilen molekül teslimat modeline göre moleküler haberleşme için bilgi kuramsal bir yaklaşım verilmektedir.

#### 4.4. MOLEKÜLER HABERLEŞME İÇİN BİLGİ TEORİK BİR YAKLAŞIM

Bölüm 2'de verildiği gibi, İN ve AN arasındaki moleküler haberleşme için iki tane moleküler bit vardır. İN bir moleküler bit ilettiğinde, bu moleküler bitin başarısı alınan moleküllerin yoğunluğu tarafından belirlenir. Eğer İN moleküler bit A gönderirse, en az S sayıda<sup>1</sup> A molekülü başarılı moleküler bit teslimatı için  $t_H$  zaman aralığı içinde AN'e teslim edilmek zorundadır. Eğer İN moleküler bit 0 gönderirse, S den az sayıda A molekülü başarılı moleküler bit teslimatı için  $t_H$  zaman aralığı içinde AN'e teslim edilmek zorundadır. Bu nedenle zaman aralığı  $t_H$  içerisinde teslim edilen molekül sayısının genel ifadesini bulmak yapılan moleküler bit iletiminin başarısını ölçmek için çok önemlidir. Burada (4), (5), (6), ve (7)'yi kullanarak zaman aralığı  $t_H$  içerisinde teslim edilen molekül sayısının kapalı form ifadesini veriyoruz.

İN'nin  $t_H$  zaman aralığı içerisinde moleküler bit A'yı gönderdiği durum için, teslim edilen A moleküllerinin sayısı yani  $N_A$  (4)'te verilen ifadenin integralını alarak aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$N_A = \int_0^{t_H} C(t) dt \quad (8)$$

$$N_A = \int_0^{t_H} \frac{k_1 L_{ex} N}{k_{-1} + k_1 L_{ex}} (1 - e^{-t(k_{-1} + k_1 L_{ex})}) dt \quad (9)$$

Moleküler difüzyon her  $t_H$  zaman aralığından sonra devam ettiği için, geçmiş moleküler bit iletimleri mevcut moleküler bit iletimini etkiler. Bu nedenle teslim edilen A moleküllerinin sayısı geçmiş iletimlere (6)'da verilen ifade ile bağlıdır. Burada teslim edilen molekül sayısı (6)'da verilen ifadeye göre üssel olarak azaldığı için mevcut moleküler bit iletiminin yalnızca bir önceki bit iletime bağlı olduğunu varsayıyoruz. İN'nin her  $t_H$  zaman aralığı içerisinde  $P_A$  olasılığı ile moleküler bit A'yı gönderdiğini düşünürsek,  $(1 - P_A)$  olasılığı ile moleküler bit 0'ı göndermektedir. Bu nedenle son yayılan moleküler bitin mevcut iletime etkisi önceki zaman aralığından gelen kompleks moleküllerin sayısı, yani  $N_p$  olarak düşünülebilir. (6)'yı kullanarak  $N_p$ , aşağıdaki gibi verilebilir.

$$N_p = \int_0^{t_H} (P_A \int_0^{t_H} C(t) dt) e^{(-k_{-1}t)} dt \quad (10)$$

$$N_p = \int_0^{t_H} (P_A \int_0^{t_H} \frac{k_1 L_{ex} N}{k_{-1} + k_1 L_{ex}} (1 - e^{-t(k_{-1} + k_1 L_{ex})}) dt) e^{(-k_{-1}t)} dt \quad (11)$$

(9) ve (11)'i birleştirerek İN'nin  $t_H$  boyunca moleküler bit A yaydığı durum için teslim edilen toplam A molekül sayısının beklenen değeri yani  $E[N_{TA}]$  aşağıdaki gibi verilebilir

$$E[N_{TA}] = N_A + N_p \quad (12)$$

<sup>1</sup> Molekül yoğunluğu ( $\mu mol/liter$ ) Avagadro sayısı ( $6.02 \times 10^{23}$ ) sayesinde molekül sayısına dönüştürülebildiğinden, bu çalışmada molekül yoğunluğu yerine kimi zaman molekül sayısı kullanılmaktadır.

AN tarafında, eğer AN en az  $S$  sayıda A molekülünü alabilirse, İN'nin moleküler bit A gönderdiğini düşünür. Böylece, Markov eşitsizliğini kullanarak İN'nin moleküler bit A'yı teslim edebilme olasılığı  $p_1$  aşağıdaki gibi verilebilir

$$p_1(N_{TA} \geq S) \leq \frac{E[N_{TA}]}{S} \quad (13)$$

Böylece, İN'nin moleküler bit A'nın teslimatını başarı ile gerçekleştirebilmesinin maksimum olasılığı  $p_1 = \frac{E[N_{TA}]}{S}$  olarak verilebilir. AN'nin moleküler bit A yerine moleküler bit 0 alma olasılığı ise  $(1 - p_1)$  ki; bu minimum hatalı moleküler bit A gönderme olasılığıdır. Moleküler bit 0'ın iletimi için, teslim edilen A moleküllerinin sayısı sadece en son aralıkta iletilen moleküler bite bağlıdır, çünkü moleküler bit 0'ın iletimi için  $t_H$  boyunca İN hiç molekül yaymaz. Bu nedenle (11) de verilen ifadeyi kullanarak, moleküler bit 0'ın iletimi sırasında teslim edilen A moleküllerinin toplam sayısının beklenen değerini yani  $E[N_{TO}]$ 'yi aşağıdaki gibi veriyoruz.

$$E[N_{TO}] = N_p \quad (14)$$

Moleküler bit 0'ın iletimi için, Markov eşitsizliğini kullanarak, İN'nin moleküler bit 0'ın iletimini başarabilmesinin maksimum olasılığı  $p_2$  aşağıdaki gibi verilebilir

$$p_2(N_{TO} \leq S) \leq \frac{S}{E[N_{TO}]} \quad (15)$$

Böylece, İN moleküler bit 0'ın maksimum probability  $p_2 = \frac{S}{E[N_{TO}]}$  ile iletmeyi başarır ve  $(1 - p_2)$  olasılığı ile moleküler bit 0 yerine A gönderir yani moleküler bit iletim işleminde hata oluşur.

İletim olasılıkları  $p_1$  ve  $p_2$  ye göre, İN ve AN arasındaki moleküler kanalı simetrik kanala benzer olarak modelliyoruz. Eğer İN'nin moleküler bit X'i yaydığını ve AN'nin moleküler bit Y'yi aldığını düşünürsek, bu moleküler kanalın geçiş matrisi (transition matrix) aşağıdaki gibi verilebilir.

$$P(Y/X) = \begin{pmatrix} P_A p_1 & P_A(1 - p_1) \\ (1 - P_A) p_2 & (1 - P_A)(1 - p_2) \end{pmatrix} \quad (16)$$

Geçiş matrisi  $P(Y/X)$  'e dayanarak, ayırt edilebilen bit sayısını açıklayan X ve Y arasındaki karşılıklı bilgi (mutual information)  $I(X;Y)$  yani M aşağıdaki gibi verilebilir.

$$M = (H(P_A p_1 + (1 - P_A)(1 - p_2), P_A(1 - p_1) + (1 - P_A) p_2) - (P_A H(p_1, 1 - p_1) + (1 - P_A) H(p_2, 1 - p_2))) \quad (17)$$

Burada H(.) entropiyi ifade etmektedir. (17) de verilen karşılıklı bilgi ifadesine göre moleküler kanalın kapasitesi yani  $C_M$ , (18)'deki gibi verilebilir. Ayrıca (17)' de verilen ifade daha detaylı olarak (19)' da verilmektedir.

$$C_M = \max(M) \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
M = & -\left(P_A \frac{E[N_{TA}]}{S} + (1 - P_A) \left(1 - \frac{S}{E[N_{T0}]}\right)\right) \log\left(P_A \frac{E[N_{TA}]}{S} + (1 - P_A) \left(1 - \frac{S}{E[N_{T0}]}\right)\right) - \\
& -\left(P_A \left(1 - \frac{E[N_{TA}]}{S}\right) + (1 - P_A) \frac{S}{E[N_{T0}]}\right) \log\left(P_A \left(1 - \frac{E[N_{TA}]}{S}\right) + (1 - P_A) \frac{S}{E[N_{T0}]}\right) - \\
& -P_A \left(\frac{E[N_{TA}]}{S} \log\left(\frac{E[N_{TA}]}{S}\right) - \left(1 - \frac{E[N_{TA}]}{S}\right) \log\left(1 - \frac{E[N_{TA}]}{S}\right)\right) - \\
& -\left(1 - P_A\right) \left(\frac{S}{E[N_{T0}]} \log\left(\frac{S}{E[N_{T0}]}\right) - \left(1 - \frac{S}{E[N_{T0}]}\right) \log\left(1 - \frac{S}{E[N_{T0}]}\right)\right)
\end{aligned} \tag{19}$$

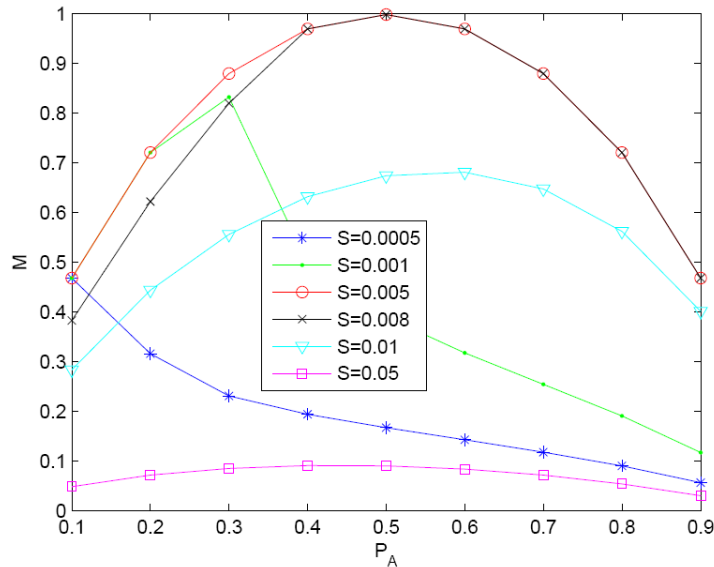
#### 4.5. SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde (18)'de verilen kapasite ifadesi üzerinde yapılan sayısal analizlerin sonuçları verilmektedir. Bu bölümdeki analizler MATLAB programı kullanılarak yapılmıştır. Bu analizler için kullanılan benzetim parametreleri Tablo 1. de verilmektedir.

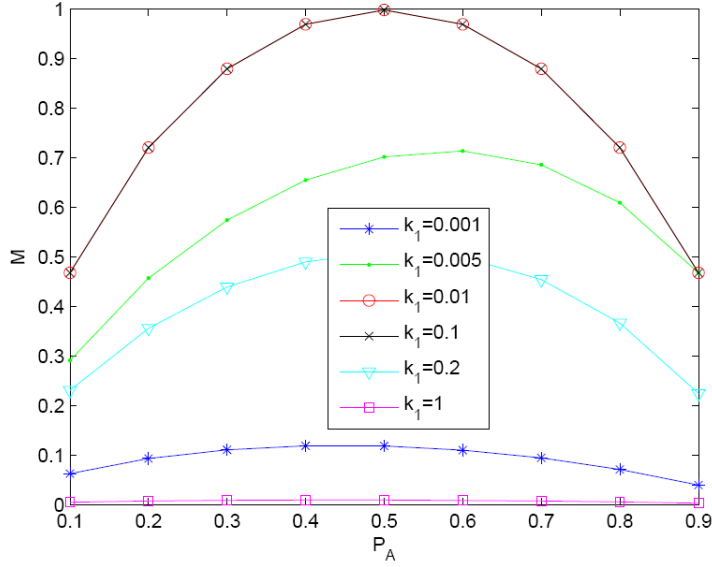
**Tablo 1. Benzetim Parametreleri**

Binding rate ( $k_1$ )	0.001-1 ( $\mu\text{mol/liter/s}$ )
Zero-force release rate ( $k_{-1}^0$ )	0.001-0.1 ( $s^{-1}$ )
Temperature ( $T$ )	300-1000 $K$
Distance between TN and RN ( $\alpha$ )	$5^{-10} - 4 \times 10^{-9} m$
Applied force per bound ( $f$ )	$10^{-12} (J/m)$
Concentration of molecules $A$ ( $L_{ex}$ )	0.05-1.5 ( $\mu\text{mol/liter/s}$ )
Duration of the pulses ( $t_H$ )	0.1-1 $s$
Number of receptors $R$ ( $N$ )	0.0001-0.005 ( $\mu\text{mol/liter}$ )
$S$	0.0005-0.05 ( $\mu\text{mol/liter/s}$ )

İlk analiz için Şekil 2'de  $M$  değişen  $P_A$  değerlerine göre çeşitli  $S$  değerleri için gösterilmiştir.  $S=0.0005-0.001$  için moleküler bit 0'ın gönderilmesi hatalı bitlere neden olduğu için  $M$  oldukça küçüktür. Bu analiz için  $k_1=0.05$  kullanılmaktadır.  $S$ ,  $k_1$ 'den çok küçük olduğu için, moleküler bit 0'ın iletiminde İN,  $S$  den küçük olabilecek bir yoğunluğu yakalayamamaktadır ve hatalar artar. Bu durum kapasiteyi düşürür. Bu nedenle kapasite  $S=0.0005-0.001$  için küçük iken,  $S=0.005-0.008$  kullanıldığında daha büyük kapasiteler elde edilebilmektedir.



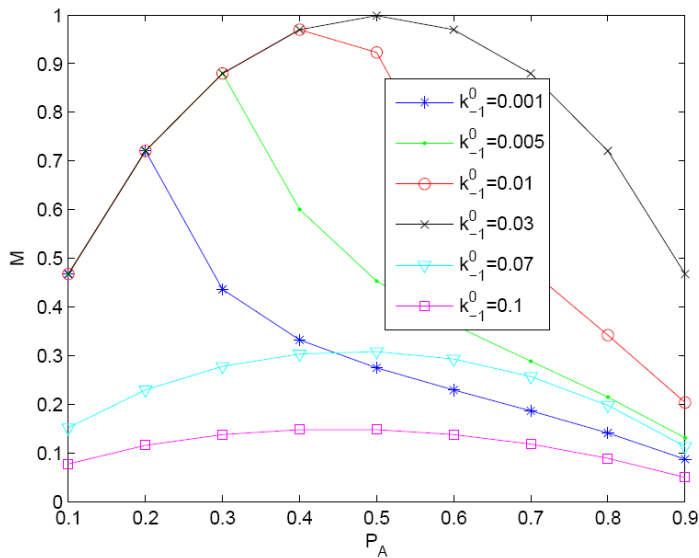
Şekil 2. Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli  $S$  için  $M$



Şekil 3. Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli  $k_1$  için M

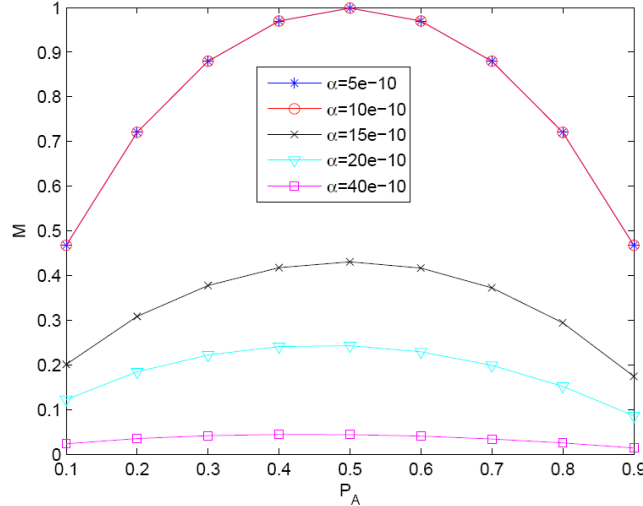
Şekil 3'de M değişen  $P_A$  değerlerine göre çeşitli  $k_1$  değerleri için gösterilmiştir.  $k_1$ 'in S'e yakın olduğu durumlar için ( $S=0.001-0.005$ ), kapasite çok küçüktür. Çünkü moleküler bit A'nın iletiminde küçük  $k_1$  ler iletimin başarılı olması için gereken yoğunluğu sağlayamamaktadır. Dolayısı ile kapasite düşmektedir. Bununla beraber  $k_1$  arttıkça daha yüksek kapasiteler mümkün olmaya başlamaktadır.

Şekil 4'de M değişen  $P_A$  değerlerine göre çeşitli  $k_{-1}^0$  değerleri için gösterilmiştir.  $k_{-1}^0$ ,  $k_1$  den küçük olduğunda, moleküler bit A'nın iletimi için, ihtiyaç duyulan yoğunluk kolaylıkla sağlanabilmektedir. Bununla beraber,  $P_A$  arttıkça, S den küçük olan yoğunluk başarılamamaktadır. Çünkü teslim edilen molekül yoğunluğu,  $P_A$  arttıkça artmaktadır.



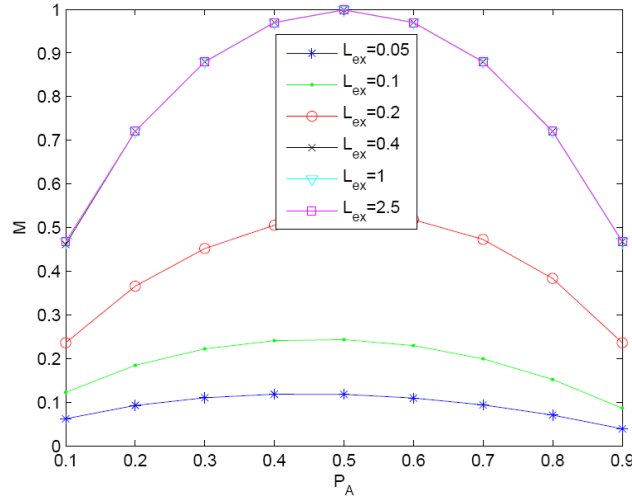
Şekil 4. Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli  $k_{-1}^0$  için M

Şekil 5'de M değişen  $P_A$  değerlerine göre çeşitli  $\alpha$  değerleri için gösterilmiştir.  $\alpha=5 \times 10^{-10} - 10 \times 10^{-10}$  aralığı için yüksek kapasite başarılabilir. Bununla beraber  $\alpha=15 \times 10^{-10} - 40 \times 10^{-10}$  aralığı için  $k_1$  azalır ve  $k_{-1}$  artar. Bu durumda moleküler bit A'nın gönderilmesi moleküler bit 0'ın alınmasına sebep olur ve hatalar artar. Böylece kapasite düşer.



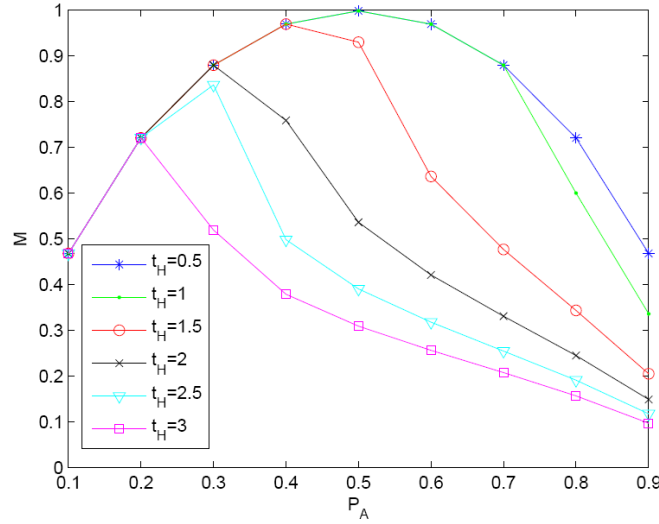
Şekil 5. Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli  $\alpha$  için M

Şekil 6'da M değişen  $P_A$  değerlerine göre çeşitli  $L_{ex}$  değerleri için gösterilmiştir.  $L_{ex}=0.4-2.5$  aralığı için  $L_{ex}$  moleküler bit A'yı başarılı bir şekilde teslim edebilmek için yeterince yeterince büyüktür. Bu durumda yüksek kapasiteler başarılabilir. Fakat  $L_{ex}=0.05-0.2$  aralığı için moleküler bit A kolayca teslim edilemez ve hatalar artar. Bu durum kapasiteyi düşürür.



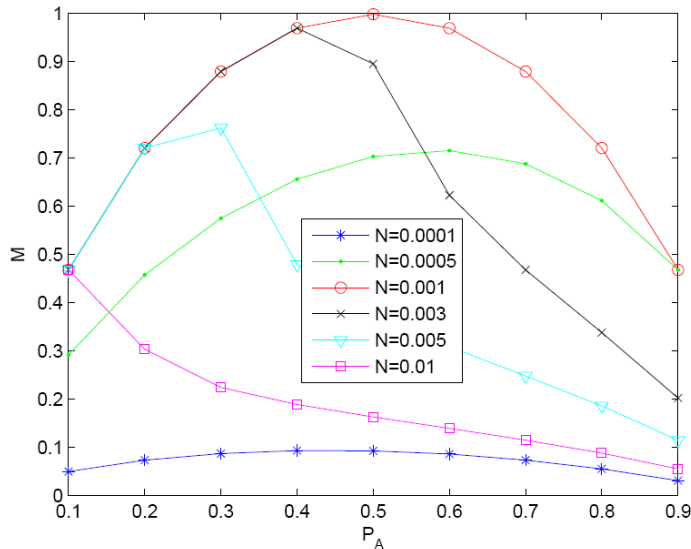
Şekil 6. Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli  $L_{ex}$  için M

Şekil 7'da M değişen  $P_A$  değerlerine göre çeşitli  $t_H$  değerleri için gösterilmiştir.  $t_H=0.5$  için yüksek kapasiteler başarılabilir. Bununla beraber  $t_H$  arttıkça kapasite  $P_A$  nın yüksek değerleri için düşer. Çünkü  $t_H$  ve  $P_A$  arttıkça, moleküler bit 0 gönderildiğinde çok sayıda molekül teslim edilir ve hatalar oluşur bu kapasiteyi düşürür.



Şekil 7. Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli  $t_H$  için M

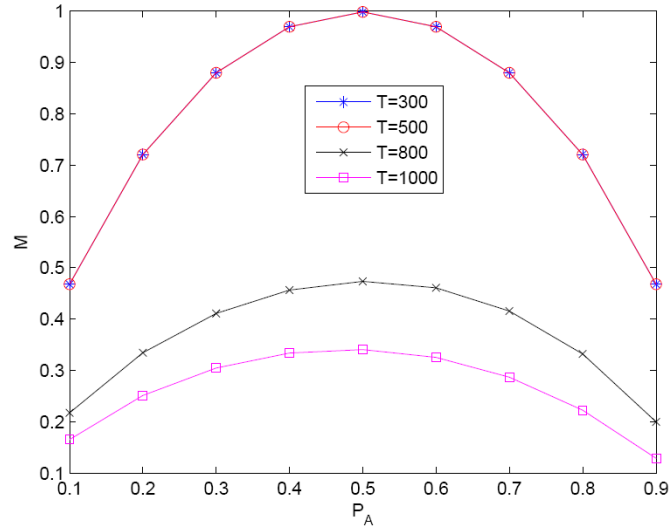
Şekil 8'de M değişen  $P_A$  değerlerine göre çeşitli N değerleri için gösterilmiştir.  $N=0.0001-0.0005$  için AN üzerindeki alıcı yoğunluğu az olduğu için moleküler bit A kolayca teslim edilemez ve hatalar oluşur. Bu durum kapasiteyi düşürür. Alıcı yoğunluğu arttıkça moleküler bit A'nın teslim edilmesinde sorun yaşanmazken bu sefer moleküler bit 0'ın teslimatı sırasında hatalar oluşur. Çünkü çok sayıda alıcı çok fazla molekülün teslim alınmasına neden olur.



Şekil 8. Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli N için M

Şekil 9'de M değişen  $P_A$  değerlerine göre çeşitli T değerleri için gösterilmiştir.  $T=300-500$  aralığı için, yüksek kapasiteler başarılabilir. Sıcaklık daha fazla arttıkça  $k_1$  artar ve  $k_{-1}$  azalır bu durumda daha fazla sayıda molekül teslim edilebilir ve moleküler bit 0'ın gönderilmesi hatalara neden olur çünkü gereğinden fazla molekül teslim edilir.





Şekil 9. Değişen  $P_A$  değerleri ile çeşitli T için M

#### 4.6. SONUÇLAR

Bu çalışmada iki nano-makina arasındaki moleküler kanalın kapasitesi için bilgi kuramsal bir yaklaşım geliştiriyoruz. Öncelikle bir moleküler haberleşme modelini tanıttıktan sonra kütle hareket kinetiğinin (mass action kinetics) prensiplerini kullanarak İletici Nano-makina (İN) ve Alıcı Nano-makina (AN) olarak isimlendirilen iki nano-makina arasındaki moleküler teslimat (t (molecular delivery) modelini veriyoruz. Daha sonra İN ve AN arasındaki kanalın kapasitesi için kapalı form bir ifade (closed form expression) veriyoruz. Sayısal sonuçlar ortam sıcaklığı, yayılan moleküllerin (emitted molecules) yoğunluğu, nano-makinalar arasındaki uzaklık, ve moleküler yayılma süresi gibi parametreleri uygun seçerek iki nano-makina arasında maksimum moleküler haberleşme kapasitesinin başarılabileceğini gösterdi.

Bu çalışmanın devamı olarak moleküler haberleşme için uyarlamalı kodlama ve hata düzeltme planları geliştirilecektir. Bu planlar sayesinde değişen ortam koşullarına nazaran yüksek moleküler haberleşme kapasitesi başarılabilecektir. Ayrıca devam eden çalışmalarımız çok atlamalı moleküler haberleşmeyi olanaklı kılarak nano-makinalardan oluşan nano boyuttaki bir ağı mümkün kılmayı amaçlamaktadır.

#### KAYNAKLAR

- [1] HIYAMA S., Y. Moritani, T. Suda, R. Egashira, A. Enomoto, M. Moore and T. Nakano, "Molecular Communication", In Proc. of NSTI Nanotech 2005, Anaheim, California, USA.
- [2] WHITESIDES G. M., "The Once and Future Nanomachine", Scientific American, September, 2001.
- [3] SUDA T., M. Moore, T. Nakano, R. Egashira, A. Enomoto, "Exploratory Research on Molecular Communication between Nanomachines", In Proc. of GECCO 2005, June 25-29, 2005, Washington, DC, USA.
- [4] MOORE M., A. Enomoto, T. Nakano, R. Egashira, T. Suda, A. Kayasuga, H. Kojima, H. Sakakibara, K. Oiwa, "A Design of a Molecular Communication System for Nanomachines Using Molecular Motors", In Proc. of IEEE PERCOMW 2006, Italy, 2006.
- [5] MORITANI Y., S. Hiyama, T. Suda, "Molecular Communication for Health Care Applications", In Proc. of IEEE PERCOMW 2006, Italy, 2006.
- [6] NAKANO T., T. Suda, M. Moore, R. Egashira, A. Enomoto, K. Arima, "Molecular Communication for Nanomachines Using Intercellular Calcium Signaling", In Proc. of IEEE Conference on Nanotechnology 2005, Nagoya, Japan, July 2005.
- [7] HIYAMA S., Y. Isogawa, T. Suda, Y. Moritani, K. Sutoh, "A Design of an Autonomous Molecule Loading/Transporting/Unloading System Using DNA Hybridization and Biomolecular Linear Motors", In Proc. of European Nano Systems 2005, Paris, France, December 2005.
- [8] ROSPARS J. P., V. Krivan, P. Lansky "Perireceptor and receptor events in olfaction. Comparison of concentration and flux detectors: a modeling study.", Chem. Sens., vol. 25, pp. 293-311, 2000.
- [9] KRIVAN V., P. Lansky, J. P. Rospars, "Coding of periodic pulse stimulation in chemoreceptors", Elsevier Biosystem, vol. 67, pp. 121-128, 2002.

- [10] LAUFFENBURGER D. A., J. Linderman, "Receptors, Models for Binding, Trafficking and Signaling", Oxford University Press, Oxford, 1993.
- [11] SAXTON M. J. "Anomalous Diffusion Due to Binding: A Monte Carlo Study", Biophysical Journal, vol. 70, pp.1250-1262, March 1996.
- [12] LONG M., S. L'u, G. Sun, "Kinetics of Receptor-Ligand Interactions in Immune Responses", Cell. & Mol. Immuno. vol. 3, no. 2, pp. 79-86, 2006.
- [13] HARDER H., S. Havlin, A. Bunde, "Diffusion on fractals with singular waiting-time distribution", Phys. Rev. B vol. 36, issue 7, pp. 3874-3879, 1987.
- [14] BELL G. I., "Models for the specific adhesion of cells to cells", Sciences vol. 200, pp. 618-627, 1978.
- [15] CAMACHO C. J., S. R. Kimura, C. DeLisi, S. Vajda "Kinetics of Desolvation-Mediated Protein Binding", Biophysical Journal vol. 78, pp. 1094-1105, March 2000.
- [16] COVER T. M., J. A. Thomas, "Elements of information theory", John Wiley-Sons, 2006.

## 5. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARINDA HOMEOSTAZİ TABANLI OLAY HABERLEŞMESİ

Bu çalışmada kablosuz algılayıcı ağları için geliştirilen ve algılayıcıların alıcı düğüm ile herhangi bir koordinasyona gerek duymadan, enerji tüketimi ve paket teslimatı açısından çok etkili haberleşme yapmasını sağlayabilen **Homeostazi'ye Dayanan Olay Haberleşmesi** protokolü (HEC) (iyileştirilmiş mekanizmaları ve genişletilmiş başarımlarını deney sonuçları) sunulmaktadır.

Doğada organizmaların kendilerini kararlı bir durumda tutmaları önemlidir, ve bunu homeostatik mekanizmalarla gerçekleştirirler. Benzer şekilde bir Kablosuz Algılayıcı Ağı' nın (KAA) başarılı bir şekilde işleyebilmesi için kendisini kararlı bir durumda tutması gerekmektedir. Bu durum KAA için olay sinyalinin tayf özelliklerine göre minimum paket kaybının ve minimum enerji tüketiminin sağlanabildiği durumdur. Biyolojik homeostatik sistemlerde sinir sisteminin amacı dış ortamı algılamak ve organizmanın kararlı durumunun sağlanabilmesi için endokrin ve bağışıklık sistemlerini yönetmektir. Benzer şekilde KAA' larda da bazı algılayıcı düğümler olay sinyalinin özelliklerini algılayıp kaynak düğümleri ve ara düğümleri kararlı bir durumda tutarak paket kaybını ve enerji tüketimini en alt seviyeye çekmelidir. Olay sinyalinin tayf özellikleri ağda birim zamanda gönderilen örneklerin toplam sayısını, dolayısıyla da ileri yöndeki ağ yollarında trafiğin yoğunluğunu belirler. Ağ üzerindeki trafik yoğunluğu çok yüksek olduğunda, bu durum ileri yöndeki yollarda sıkışıklık, paket çarpışması ve kanal hatalarının olasılığını artırmaktadır. Bu yüzden algı düğümleri arasında verimli bir iletim için olay sinyalinin tayf bant genişliğini kestirmek oldukça önemlidir. Bu benzerliğe dayanarak bir algı düğümünü sinir sistemindeki nöronlar (neuron cells) olarak düşünüyoruz ve buna N-algılayıcı (N-Sensor) adını veriyoruz. Sinir sistemindeki nöronların görevlerine benzer şekilde, KAA'da N-algılayıcının amacı algılanan olay sinyalinin tayf bant genişliğini kestirmek ve kaynak düğüm ile alıcı düğüm arasındaki düğümleri yöneterek olay sinyalinin alıcıda yeniden oluşturulmasını sağlamaktır.

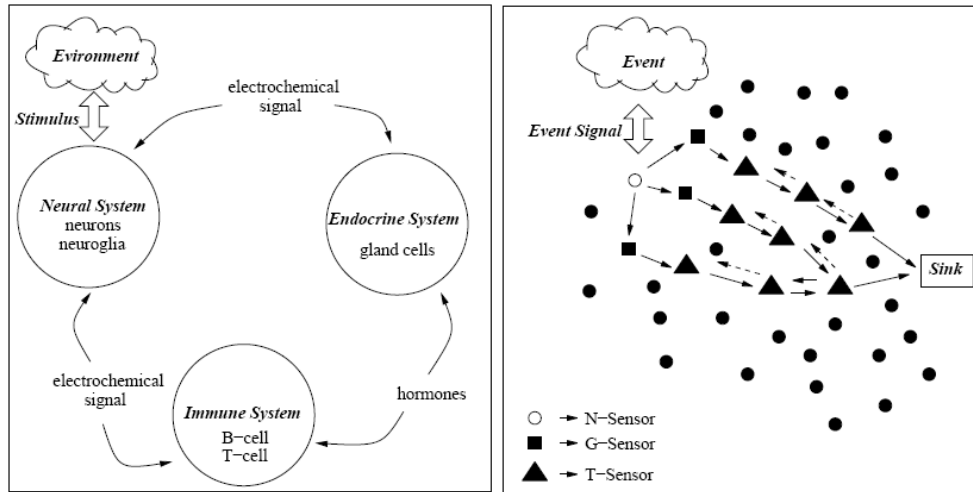
Endokrin sistemin salgı hücreleri sinir ve endokrin sistem ile etkileşim içinde hormon salgılayarak organizmayı biyolojik olarak dengeli bir durumda tutarlar. Benzer şekilde KAA'larda kaynak düğüm uygulamanın amacı olan olay sinyalini alıcıda başarılı bir şekilde yeniden oluşturulması için olay sinyalini örnekleyip alıcı düğüme gönderir. Bu benzerliğe göre kaynak düğümleri salgı hücrelerine (gland cells) benzetiyor ve bunlara G-algılayıcılar (G-Sensors) diyoruz.

Bağışıklık sisteminde T-hücreleri organizmadaki bozuklukları algılayıp sinir ve endokrin sistemlerini tetikleyerek organizmanın kararlı biyolojik durumda kalmasını sağlarlar. Benzer şekilde KAA'larda olay sinyalini başarılı bir şekilde yeniden oluşturmak için bazı algılayıcı düğümler sıkışma, çarpışma ve kanal hatası gibi bozuklukları belirlemelidir. Bunu göz önünde bulundurarak kaynak ile alıcı düğümlerin arasında kalan düğümleri T-hücrelerine (T-cells) benzetiyor ve bunlara T-algılayıcıları (T-Sensors) diyoruz. Biyolojik Homeostazi ve KAA arasındaki bu benzerlikler ayrıca Tablo 1'de özetlenmekte ve Şekil 1' de resmedilmektedir. Bu çalışmada biyolojik homeostazi ile KAA arasındaki bu geçişler göz önünde bulundurularak **Homeostaziye Dayanan Olay Haberleşmesi** protokolü HEC sunulmaktadır. HEC'in en belirgin özellikleri:

1. Güvenilir haberleşme ve sıkışma savunması (congestion avoidance)
2. Alıcıdan bağımsızlık (alıcıdan geri beslemeye ihtiyacı yoktur.)
3. Olay sinyalinin minimum enerji harcanarak alıcıda yeniden oluşturulması
4. Olay sinyalinin tayf özelliklerine dayanmak
5. KAA'lara kendi kendine organize olma yetisi kazandırmak

<i>HOMEOSTASIS</i>	<i>WSN</i>
<i>Neuron cells</i> sense external stimuli and trigger gland cells for hormone secretion	<i>N-Sensor</i> estimates the spectral bandwidth and triggers G-Sensors for data transmission
<i>Gland cells</i> secrete hormone to inform the organism about the external stimuli	<i>G-Sensor</i> makes data transmission to inform the sink about the event
<i>T-cells</i> detect and eliminate pathogen entering the organism	<i>T-Sensors</i> detect and prevent congestions on the forward paths

**Tablo 1. Biyolojik homeostazinin bileşenleri ile KAA arasındaki benzerlikler.**



<i>Homeostasis</i>	<i>WSN</i>
Neuron	N-Sensor
Gland Cell	G-Sensor
T-Cell	T-Sensor

**Şekil 1. Biyolojik Homeostazi ve KAA arasındaki benzerlikler.**

Bu çalışmada makalenin ilk versiyonuna ek olarak yapılan çalışmalardan ilki geliştirilen tıkanıklık kontrol mekanizmasıdır. İlk versiyonda kaynak düğüm olarak görev yapan G-algılayıcılar olay sinyalinin frekansı ile örneklerken  $\alpha$  olasılığı ile örnek olarak algılayıcı düğümüne göndermekteydiler. Herhangi bir G-algılayıcısının paketleri düştüğünde bu durum yol üstünde bulunan T-algılayıcılar tarafından belirlenerek bu G-algılayıcıya bildirilmekte ve bu algılayıcı örnekleme olasılığını düşürmekteydi. Gönderilen toplam örnek sayısı T- ve G-algılayıcılar tarafından belirlenerek N-algılayıcıya gönderilmekte ve N-algılayıcısının G-algılayıcıların toplam sayısını belirlemesini sağlanmaktaydı. Nyquist

örnekleme teorisine göre eğer gönderilen toplam örnek sayısı yetersiz ise G-algılayıcıların sayısı N-algılayıcı tarafından artırılmaktaydı. Bu tarz haberleşme etkili bir olay haberleşmesi sağlayabilmesinin yanında algılayıcı düğümlere aşırı bir koordinasyon yükü getirmektedir. Gerçek zamanlı haberleşmenin esas olduğu kablosuz algılayıcı ağlarında en az gecikmeli haberleşme çok önemlidir. Dolayısıyla bu koordinasyon yükü ağdaki haberleşmeyi geciktirmektedir.

Bu çalışmada bu koordinasyonu en aza indirebilecek bir tıkanıklık kontrol yöntemi önerilmektedir. Bu yöntem rota bulma yöntemi ile paralel çalışmaktadır. Bu yöntemde göre her G-algılayıcı kendi ürettiği paketlere kendi tanımlama numarasını (ID) eklemektedir. Böylece her algılayıcı üzerinden kaç farklı G-algılayıcının paketi geçtiğini bilmektedir. G-algılayıcılarının olay sinyalinin  $f$  frekansı ile örneklerken  $\alpha$  olasılığı ile örnek aldığı ve her paketin  $l$  tane örnek içerdiğini düşünürsek, her bir G-algılayıcı ortalama  $f * \alpha l$  rapor frekansına sahiptir. Dolayısıyla eğer bir algılayıcı düğüm üzerinden sadece bir G-algılayıcının paketi geçiyorsa bu algılayıcıya her saniyede  $f * \alpha l$  tane paket gelecektir. Eğer bu algılayıcı düğüm  $f * \alpha l$ ' dan büyük bir rapor frekansı kullanırsa bu algılayıcı üzerinde herhangi bir tıkanıklık olmayacaktır. Bu çalışmada önerilen tıkanıklık kontrol mekanizmasına göre her bir algılayıcı düğümün üzerinden saniyede en fazla  $thr$  sayıda paket geçmesine izin verilmektedir.  $thr$  G-algılayıcıların toplam sayısına ( $M$ ) göre N-algılayıcı tarafından belirlenmektedir. Böylece eğer her bir algılayıcı düğüm kendi rapor frekanslarını  $thr'$  a eşit olarak seçtiğinde hiçbir düğümde tıkanıklık olmayacaktır. Herhangi bir algılayıcı düğüm sonraki sıçrama düğümünü (next hop node) seçerken bu düğümün üzerinden saniyede  $thr'$  den az G-algılayıcı paketinin geçtiğinden emin olması gerekir. Dolayısıyla eğer bir algılayıcı düğümün üzerinden  $thr$  sayıda G-algılayıcı paketi geçiyorsa bu algılayıcı başka algılayıcılar tarafından sonraki sıçrama düğümü olarak seçilmemek için periyodik olarak bir bilgilendirme mesajı yayınlamaktadır. Bu mesaj sayesinde bu düğüm diğer algılayıcılar tarafından sonraki sıçrama düğümü olarak seçilmeyecektir. Bu tıkanıklık kontrol yöntemi algılayıcı düğümlerden alıcı düğümüne kadar yollardaki bütün tıkanıklıkları engelleyerek tıkanıklıktan kaynaklanan paket düşmelerini sıfıra indirmektedir.

Dergi versiyonunda ilk versiyondan farklı olarak N-algılayıcı için yeni bir ifade geliştirilmektedir. N-algılayıcı bu ifadeyi kullanarak olay sinyalinin tayf genişliğine göre G-algılayıcıların sayısını ve örnekleme frekanslarını etkili bir şekilde belirleyebilmektedir. Bu ifade aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$N_d = (1 - \lambda \sum_{i=0}^M i \binom{M}{i} \alpha^i (1-\alpha)^{M-i}) f (1 - (1 - \alpha)^M) \quad (1)$$

$$N_d > B \quad (2)$$

Burada  $M$  G-algılayıcıların sayısını,  $\alpha$  G-algılayıcıların örnekleme olasılığını,  $f$  G-algılayıcıların örnekleme frekansını ve  $B$  olay sinyalinin tayf genişliğini göstermektedir.  $\lambda$  en kötü durumdaki ortalama paket kayıp olasılığıdır (worse case packet loss probability). Yukarıda ifade edilen tıkanıklık kontrol yöntemi tıkanıklıklardan kaynaklanan paket kayıplarını sıfıra indirdiği için ağdaki paket kayıplarının algılayıcı kanallarındaki olası çarpışmalardan ve kanallardaki gürültüden kaynaklandığını düşünüyoruz. Dolayısıyla  $\lambda'$  yı bulmak mümkündür.  $\lambda'$  yı bulmak için önce bir sıçramadaki paket kayıp olasılığını buluyoruz. Bu analizde algılayıcı düğümlerinin CSMA/CA ortam erişim planını kullandığını ve bu kanalda her bir algılayıcının her bir zaman diliminde (time slot)  $p$  olasılığı ile kanala iletim yaptığını düşünüyoruz. Kanal iletim olasılığı yaklaşımı CSMA/CA ortam erişim kanalını modellemek için kullanılan en belirgin yöntemlerden bir tanesidir [2]. Kanal iletim olasılığının yanında kanaldaki gürültüden dolayı her bir paketin  $P_f$  olasılığı ile hatalı gönderildiğini düşünüyoruz.  $P_f$  kanaldaki sinyal gürültü oranına göre aşağıdaki gibi modellenabilir [3].

$$P_f = 1 - (1 - 0.5e^{-\frac{\gamma}{1.28}})^{8lb} \quad (3)$$

Burada  $\gamma$  kanaldaki sinyal gürültü oranını  $lb$  ise byte olarak her bir paketin büyüklüğünü göstermektedir.  $p'$  ye ve  $P_f$  ye bağlı olarak herhangi bir sıçramada bir paketin düşme olasılığı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$pl = (1 - (1 - P_f)(1 - p)^{n-1})^{z+1} \quad (4)$$

Burada  $n$  bir algılayıcı kanalındaki çekişen (contending) algılayıcı sayısını,  $z$  ise bir paketin düşmesi için öngörülen maksimum sayıdaki başarısız iletim sayısını göstermektedir ve protokol tarafından bir değere sabitlenir, genel olarak 7 seçilir. Böylece  $p'$  yi ve  $n'$  i maksimum yaparak  $pl'$  yi maksimum yapmak mümkündür. CSMA/CA protokolünde  $p$  aşağıdaki gibi modellenebilir.

$$p = \frac{2}{E[CW] - 1} \quad (5)$$

Burada  $E[CW]$  çekişme penceresinin beklenen değeridir ve kanaldaki ortalama başarısız iletimlerin sayısı ile bulunabilir [2].  $p'$  yi maksimum yapmak için  $E[CW]$ 'yi mini yapıyoruz ve  $CW$  nin protokol tarafından belirlenen minimum değerini alıyoruz bu değer genel olarak protokol tarafından  $CW_{min}=32$  olarak sabitlenir. Burada  $n$ ,  $\lceil \frac{0.5\pi r^2 D}{A} \rceil$  olarak verilebilir,  $r$  her bir algılayıcının iletim yarıçapını,  $D$  ağda bulunan toplam algılayıcı sayısını ve  $A$  ise ağın büyüklüğünü göstermektedir. Böylece  $pl'$  nin maksimum değeri  $pl_m$  aşağıdaki gibi verilebilir.

$$pl_m = \left( 1 - \left( 1 - 0.5e^{\frac{-\gamma}{1.28}} \right)^{8lb} \left( 1 - \frac{2}{CW_{min} - 1} \right)^{\lceil \frac{0.5\pi r^2 D}{A} \rceil - 1} \right)^{z+1} \quad (6)$$

Ağdaki her bir paketin olaydan alıcıya ortalama  $h$  tane hop ile karşılaştığını düşünürsek ve bir paket olaydan alıcıya herhangi bir atlamada düşebileceği için en kötü durumdaki paket kayıp olasılığı  $\lambda$  aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\lambda = \sum_{i=1}^h pl_m (1 - pl_m)^{h-i} \quad (7)$$

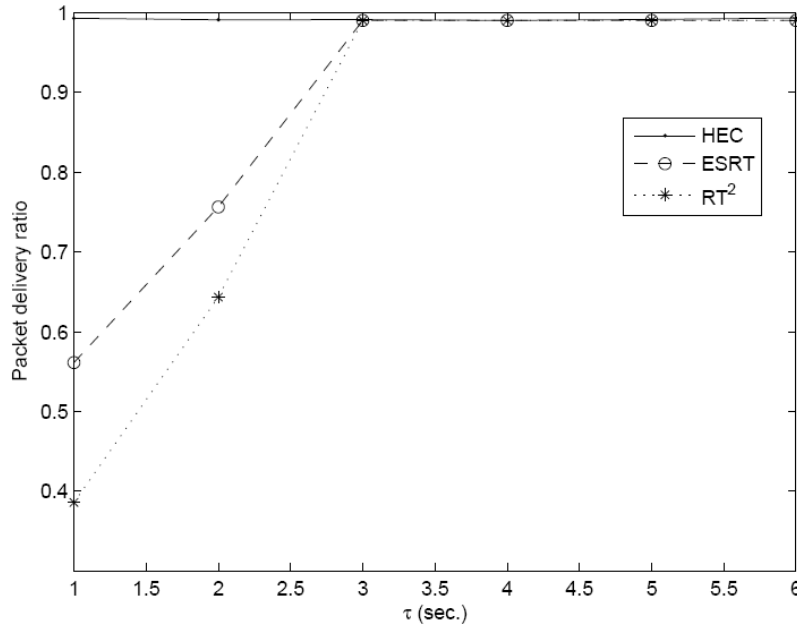
Böylece N-algılayıcı (2) ve (3)'ü kullanarak olay sinyalinin alıcı düğümde yeniden oluşturabilmek için uygun sayıda G-algılayıcıyı, örnekleme frekanslarını ve olasılıklarını bulabilir.

Makalenin dergi versiyonunda yapılan iyileştirmelerden biride performans değerlendirmeleri bölümünde yapılan performans karşılaştırmalarıdır. Bu karşılaştırmalar dergi versiyonunda önerilen protokol operasyonu ile bazı kabul görmüş protokoller arasında yapılmaktadır. Bu karşılaştırmalar için yapılan benzetim deneylerinin parametreleri Tablo 2' de verilmektedir.

<i>Number of Nodes</i>	100
<i>Field</i>	$100 \times 100m^2$
<i>Sampling Rate</i>	10-50 kHz
<i>Signal Bandwidth</i>	10-50 kHz
<i>Location of The Sink</i>	(100, 100)
<i>Transmission Range (<math>r</math>)</i>	30m
<i>Sensing Range (<math>r_s</math>)</i>	10m
<i>Packet Size</i>	100 samples
<i>Sample Size</i>	8 Bits
<i>Variance of the source noise (<math>\sigma_N^2</math>)</i>	$1 \times 10^{-4}$
<i>SNR on sensor channels (<math>\gamma</math>)</i>	9.15 dB

**Tablo 2. Benzetim Deneş Parametreleri**

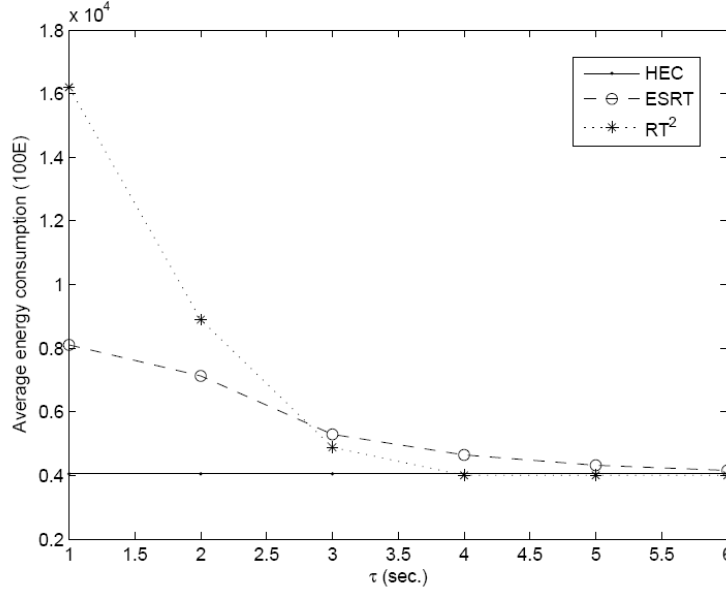
Şekil 2' de, HEC protokolü literatürde kablosuz algılayıcı ağları için geliştirilen en yaygın çözümlerden olan ESRT [1] ve  $RT^2$  [4] protokolleri ile paket teslimat oranları ve enerji sarfiyatı açısından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sırasında ESRT ve  $RT^2$ 'nin simülasyon kurgusu ile uyumluluk için HEC protokolünün simülasyon kurgusu değiştirilmiştir. ESRT ve  $RT^2$  protokolleri yüksek paket teslimat oranlarına erişebilmek için bazı iterasyonlara gerek duymakta ve bu iterasyonların her biri karar aralığı  $\tau$  (decision interval) adı verilen zaman aralıkları içinde tamamlanmaktadır. Ayrıca ESRT ve  $RT^2$  her bir karar aralığında yüksek paket teslimat oranlarına ulaşabilmek için güncellenmektedir. Bu güncellemeler sırasıyla ESRT ve  $RT^2$  için şöyledir (10, 8.799, 6.529, 5.734, 5.332, 5.128) ve (20, 10.98, 6.03, 4.938, 4.938, 4.938). Burada karar aralığı 10 saniye olarak seçilmiştir. HEC yüksek paket teslimat oranlarına ulaşabilmek için rapor düğümlerinde herhangi bir rapor frekansı güncelenilmesine ihtiyaç duymadığı için G-Sensorlerin rapor frekansları 5 (paket/saniye) olarak seçilmiştir. Şekil 2' de görüldüğü gibi HEC protokolü ESRT ve  $RT^2$  protokolüne göre çok yüksek paket teslimat oranları sağlayabilmektedir. Ayrıca HEC bu protokollere göre çok daha çabuk yüksek paket teslimat oranlarına çıkabilmektedir.



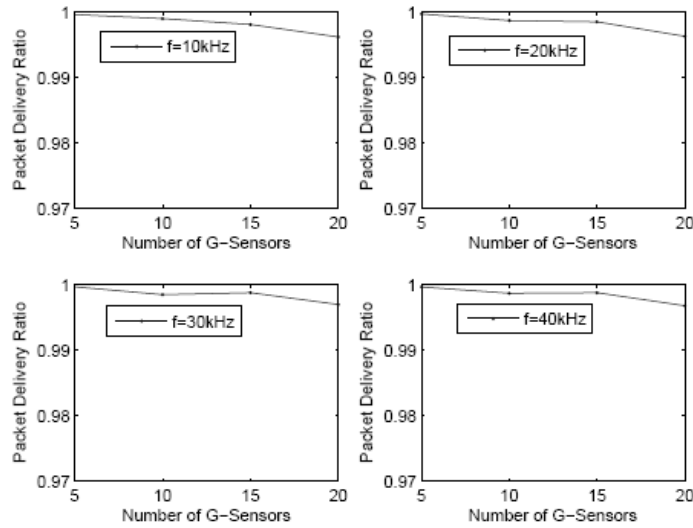
**Şekil 2. HEC ile ESRT ve  $RT^2$ 'nin paket teslimat oranları açısından karşılaştırılması**

Şekil 3'de HEC enerji tüketimi açısından ESRT ve  $RT^2$  ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırmalar Şekil 2'de verilen rapor frekansı güncellemelerine göre yapılmaktadır. HEC olay sinyalinin karakteristiklerine

göre minimum enerji tüketimi için kendi haberleşme parametrelerini ayarlayabildiği için ESRT ve  $RT^2$  ye göre daha düşük enerji harcamaktadır. Burada her iki protokolünde bir paketi kaynak düğümlerden alıcı düğüme iletmesi için ortalama 100E birimlik bir enerjiye ihtiyaç duydukları varsayılmaktadır.



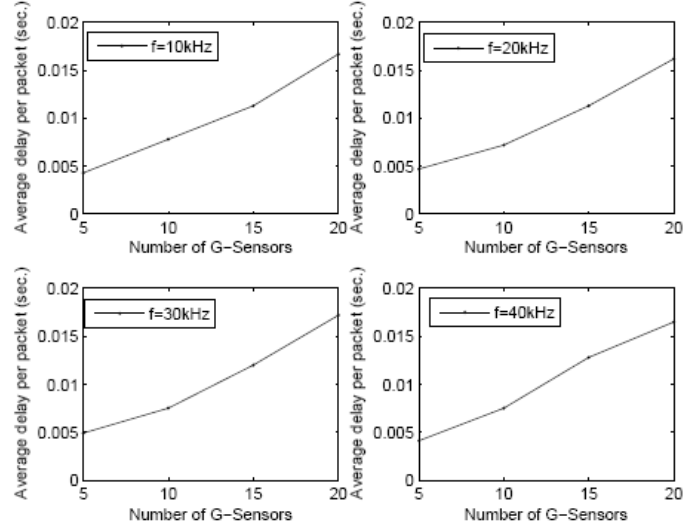
Şekil 3. HEC ile ESRT ve  $RT^2$ 'nin enerji tüketimleri açısından karşılaştırılması



Şekil 4. HEC' in değişen G-algılayıcı sayısı ve örnekleme frekanslarına göre paket teslimat oranları.

HEC etkili tıkanıklık savunması mekanizması sayesinde ileri yollardaki bütün tıkanıklıkları engelleyerek tıkanıklıklardan kaynaklanan paket kayıplarını çok yüksek örnekleme ve raporlama frekanslarında bile ortadan kaldırabilmektedir. Şekil 4' de görüldüğü gibi HEC çok yüksek örnekleme frekanslarında ve bu frekansların oluşturabileceği çok yüksek veri trafikleri karşısında bile çok yüksek paket teslimat oranları sağlayabilmektedir. Benzer şekilde HEC olay kaynağı ile alıcı arasındaki düğümlerin raporlama frekanslarını ayarlayarak tıkanıklıkları engellediği için, G-algılayıcılar tarafından gönderilen paketler Şekil 5'de görüldüğü gibi çok düşük gecikmeler maruz kalırlar.





**Şekil 5. HEC' in değişen G-algılayıcı sayısı ve örnekleme frekanslarına göre paketlerin karşılaştığı ortalama baştan sona gecikme (end-to-end delay).**

HEC'in detaylı performans analizleri rapora eklenen "Homeostasis-based Event Communication" isimli makalede bulunabilir.

#### KAYNAKLAR

- [1] AKAN O. B., I. F. Akyildiz " Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 13, pp.1003-1016.
- [2] BIANCHI G., "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function", *IEEE Journal on Selected Area in Communications*, vol. 18, no. 3, March 2000.
- [3] VELKOV Z. H., B. Spasenovski, "Saturation throughput - delay analysis of IEEE 802.11 DCF in fading channel", *In Proc. IEEE ICC 2003*, pp. 121-126, May 2003.
- [4] GUNGOR V. C., O. B. Akan, I. F. Akyildiz, "A Real-Time and Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor and Actor Networks", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 16, no. 2, April 2008.

## 6. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI İÇİN BİYOLOJİK ESİNLİ DİNAMİK TAYF ERİŞİMİ

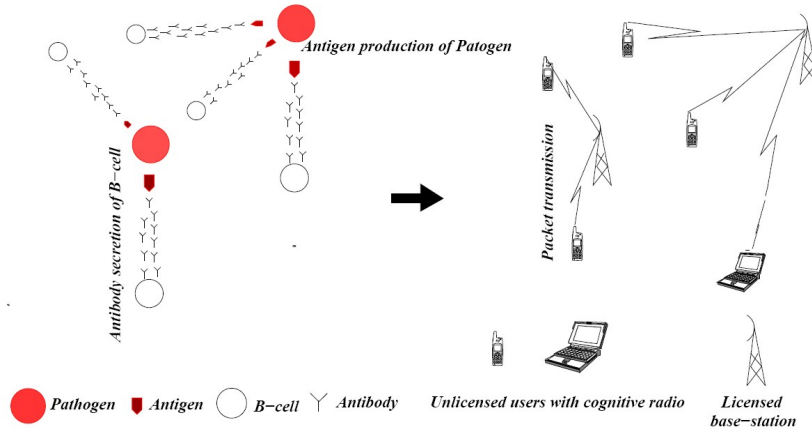
Bu çalışmada ilk raporda sunduğumuz biyolojik esinli tayf paylaşım yöntemine benzer olarak bilişsel radyo ağlarının başka ihtiyaçlarına cevap verebilecek ve biyolojik esinli dinamik tayf erişim yöntemleri için yol haritası olabilecek benzetimler ve yaklaşımlar araştırılmıştır. Bu yaklaşımlar sırası ile bağışıklık sistemine dayanan tayf yönetim (spectrum management) yaklaşımı, yine bağışıklık sistemine dayanan tayf algılama (spectrum sensing) yaklaşımı, ve son olarak biyolojik anahtarlamaya dayanan tayf hareketini kontrol yöntemidir.

### 6.1. Biyolojik Bağışıklık Sistemine Dayanan Bilişsel Radyo Ağları

Bilişsel radyo ağları ve doğal bağışıklık sistemleri çok farklı görüldüğü halde, işlem prensiplerini düşündüğümüzde aslında çok büyük benzerliklere sahip olduklarını görebiliriz. Bağışıklık sistemi bir patojen ile karşılaştığında B-hücreleri iş birliği ile kendi antikor yoğunluklarını ayarlayarak antijen konsantrasyonunu istenen düşük bir seviyede tutmayı başararak vücudu hastalıklara karşı korurlar [1, 2]. Benzer şekilde bir bilişsel radyo ağında bilişsel radyolar tayf algılama mekanizması tarafından tespit edilen mevcut bir tayf kanalı ile karşılaştığında, bilişsel radyolar iletim güçlerini (transmission power) ayarlayarak ve bu sayede bu kanal üzerinde oluşabilecek karışma seviyesini (interference level) en düşük seviyede tutarak bu tayf kanalı üzerinde maksimum performanslı haberleşmeyi gerçekleştirmektedirler. Bağışıklık sisteminde tespit edilen bir patojene karşı antikor oluşturacak B-hücreleri tespit edilirken bu B-hücresinin diğer B-hücreleri tarafından ne kadar bastırıldığı (suppressing) ve ne kadar uyarıldığı (stimulating) çok önemlidir. Eğer B-hücresi tespit edilen patojene antikor üreten B-hücreleri tarafından yoğunlukla bastırılıyorsa B-hücresi bu patojen için antikor üretmez. Tersine B-hücreleri tarafından yoğunlukla uyarılıyorsa B-hücresi patojen için antikor üretmeye başlar ve ürettiği antikorun seviyesini bu patojen için antikor üreten diğer B-hücrelerinin salgıladığı antikor seviyesine göre kontrol eder. Benzer şekilde bilişsel radyo ağlarında bilişsel radyolar mevcut bir tayf kanalı ile karşılaştığında herhangi bir bilişsel radyonun bu kanala iletim yapması diğer bilişsel radyoların bu bilişsel radyoya ne kadar karıştığı ile ilgilidir. Eğer bir bilişsel radyo bir tayf kanalı için komşusu olan bilişsel radyolar tarafından yoğunlukla karışmaya uğruyorsa bu bilişsel radyo bu kanalı seçmez. Eğer komşularının karışma seviyesi düşükse bu bilişsel radyo bu kanala iletim yapabilmektedir. Doğal bağışıklık sistemi ile bilişsel radyo ağları arasındaki bu benzerlik Tablo 1'de özetlenerek Figür 1'de gösterilmektedir.

**Tablo 1. Doğal bağışıklık sistemi ve bilişsel radyo ağları arasındaki benzerlik.**

<b>Bağışıklık Sistemi</b>	<b>Bilişsel Radyo Ağları</b>
B-hücresi	Bilişsel radyo
Antikor yoğunluğu	Bilişsel radyonun iletim gücü
Patojen	Mevcut kanal
Uyarıcı komşu	Karışmayan komşu (non-interfering neighbors)
Bastırıcı komşu	Karışan komşu (interfering neighbors)
Antijen konsantrasyonu	Mevcut kanaldaki karışma seviyesi
Doğal antikor kayıpları	Paket kayıpları



**Figür 1. Doğal bağışıklık sistemi ve bilişsel radyo ağları arasındaki benzerlik.**

## 6.2. Bağışıklık sistemine dayanan tayf yönetimi

Doğal bağışıklık sistemi ve bilişsel radyo ağları arasındaki benzerlikler etkili bir tayf yönetim mekanizması geliştirilirken kullanılabilir. Doğal bağışıklık sistemindeki B-hücrelerinin yukarıda verilen antikor salgılama mekanizmaları için literatürde matematiksel modeller bulmak mümkündür [1]. Bu mekanizmalar bilişsel radyo ağları için uyarlanarak etkili tayf yönetim planları üretilebilir. Aşağıda bu uyarlamalara bir örnek verilmiştir.

$$\frac{dS_{ij}}{dt} = \left( \frac{1}{K} \sum_k^K p_k - \frac{1}{M} \sum_m^M p_m - \alpha I_j + \beta l_i \right) p_i \quad (1)$$

Burada  $\alpha$  ve  $\beta$  pozitif sabitler,  $K$  ve  $M$  bilişsel radyo  $i$ 'nin sırası ile karışan ve karışmayan komşularının sayısıdır.  $p_k$  bilişsel radyo  $i$ 'ye karışan  $k$ . komşusunun iletim gücünü ve  $p_m$  bilişsel radyo  $i$ 'ye karışmayan  $m$ . komşusunun iletim gücünü,  $p_i$  ise bilişsel radyo  $i$ 'nin iletim gücünü göstermektedir.  $I_j$   $j$ . kanaldaki karışma seviyesini,  $l_i$  ise  $i$ . bilişsel radyonun paket kayıp oranını göstermektedir. (1)'de

verilen ifadede  $\frac{dS_{ij}}{dt}$  bilişsel radyo  $i$ 'ye komşuları ve kanal  $j$  tarafından empoze edilen iletim gücü

hakkında bilgi vermektedir öyle ki  $\frac{dS_{ij}}{dt}$  belli bir değerin üstünde ise kanal  $j$  bilişsel radyo  $i$  için uygun

bir kanaldır tersine altında ise uygun değildir. Bu mekanizma bilişsel radyo ağları için etkili bir tayf yönetim mekanizmasına dönüştürülebilir. Geleneksel çözümlerin aksine bu yöntem mevcut kanallar hakkında çok sınırlı bilgiye sahiptir. Örneğin geleneksel çözümler kanallardaki kazanç (channel gain) değerlerinin bilindiği varsayımına dayanır, oysa kanal kazanç değerlerini bilmek tamamen lisanssız ve alt yapısız haberleşme yapan bilişsel radyo ağları için çok olanaklı değildir. Bu nedenle böyle doğal çözümlerden esinlenen mekanizmalar bilişsel radyo ağlarının problemleri için çok uygun yaklaşımlar getirmektedir.

## 6.3. Bağışıklık sistemine dayanan tayf algılama

Tayf algılama bilişsel radyoların kullanılmayan mevcut tayf kanallarını belirleyebilmesini sağlayan en önemli fonksiyonlarından biridir. Bu işlem bilişsel radyoların kendi çevrelerindeki gürültü seviyelerini algılayarak mevcut kanaldaki gürültü seviyesinin olası bir iletme izin verip vermediğini algılamalarını sağlamaktadır. Benzer şekilde bağışıklık sistemi vücuda giren yabancı molekülleri tespit etmek zorundadır. Bağışıklık sisteminde T-hücreleri vücuda giren moleküllerin vücudun kendi molekülleri mi yoksa

patojen mi olduklarını anlayan hücrelerdir. Patojenler hakkında herhangi bir ön bilgiye sahip olmadan T-hücreleri vücudun kendi moleküllerinin normal davranışlarını öğrenerek vücuda giren patojenleri öğrenilenlere uymayan davranışları sayesinde tespit ederler. Bu doğal mekanizmaya dayanarak bazı saldırı belirleme (intrusion detection) problemleri için çeşitli yapay bağışıklık sistemi modelleri geliştirilmiştir [1, 2]. Bu saldırı belirleme yöntemlerine benzer olarak, bağışıklık sisteminin bu doğal mekanizması bilişsel radyo ağları için dağıtılmış zararlı karışma belirleme (distributed harmful interference detection) mekanizması geliştirmek için potansiyel bir model olabilir. Bilişsel radyo ağlarında tayf algılama (spectrum sensing) zararlı karışmaya (harmful interference) neden olabilecek anormal gürültü seviyelerinin belirlenmesine dayanmaktadır. Bununla beraber bilişsel radyolar konumlarından dolayı her biri farklı gürültü seviyesini tespit edecektir ve gürültü seviyesinin asıl büyüklüğü her bir bilişsel radyo tarafından aynı kanal için farklı seviyelerde algılanacaktır. Bu nedenle gürültünün bilinmeyen güç karakteristikleri bilişsel radyolar için büyük bir handikaptır. Literatürde bu konu ile yapılan araştırmalar gürültü için sabit bir eşik değer belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Bununla beraber bu tarz bir belirleme hem güvenilir değildir hemde gürültünün gerçek seviyesi bilinmediği için gürültü seviyesi için sabit bir eşik değer belirlenmesi etkili değildir. Onun yerine bağışıklık seviyesine benzer şekilde her bir bilişsel radyonun kendi çevresindeki gürültünün normal seviyesini öğrenerek gürültünün anormal seviyesinin bilişsel radyolar tarafından iş birliği ile belirlenmesi çok daha etkilidir. Bu yüzden doğal bağışıklık sistemi etkili bir tayf algılama yöntemi için potansiyel bir esin kaynağı oluşturmaktadır.

#### 6.4. Biyolojik anahtarlama dayanan tayf hareket kontrolü (Bio-inspired spectrum mobility control)

Bilişsel radyo ağlarında mevcut lisanslı tayf bandı bilişsel radyoların iletimine izin vermediği zaman, bu bant üzerinde haberleşme yapan bilişsel radyoların mevcut başka bir tayf bandına geçmeleri gerekmektedir. Bu durum tayf hareketliliği (spectrum mobility) isminde yeni bir hareketlilik kavramını ortaya çıkarmıştır ve bu kavram bilişsel radyolara tayf atlamalarının belli bir gecikme (latency) ile yapılmasını dayatmaktadır. Ayrıca bu gecikme tayflar arası dikişsiz haberleşmenin sağlanabilmesi için bilişsel radyolar tarafından belli bir aralıkta tutulmalıdır.

Biyolojik anahtarlama biyolojik mekanizmaların biyolojik yada kimyasal iki durum arasındaki geçişini etkili bir şekilde kontrol eden doğal bir mekanizmadır. Bu mekanizma sayesinde biyolojik fonksiyonlar etkili bir şekilde tamamlanabilmektedir. Biyolojik anahtarlama iki durumdan oluşmaktadır. Birinci durumda bir kimyasal maddenin sentezi yapılırken diğer bir kimyasalın sentezi yapılmamakta ikinci durumda ise ikinci kimyasal sentezlenirken birincisinin sentezi durdurulmaktadır. Bu doğal mekanizma öyle ayarlanmaktadır ki iki kimyasalında sistemdeki konsantrasyonu sistemi hep kararlı bir durumda tutmayı başarabilmektedir. Yani biyolojik anahtarlama sayesinde biyolojik sistem çevresel faktörlere göre hangi kimyasaldan ne zaman ne kadar sentezlemesi gerektiğini ayarlayarak sistemi hep kararlı bir durumda tutmayı başarabilmektedir.

Biyolojik anahtarlama mekanizmasına benzer şekilde bilişsel radyo ağlarındaki herhangi bir bilişsel radyo için hep iki tane durumdan söz edebiliriz. Bu durumlardan ilki mevcut spektrum bandındaki kanalın koşulları (channel condition) diğeri ise tayf bırakma (spectrum handoff) sırasında geçeceği tayf bandındaki kanalın koşullarıdır. Dikişsiz haberleşmenin sağlanabilmesi için bu iki durum arasındaki geçişin çok yumuşak bir şekilde olması gerekmektedir. Sentez edilen kimyasalların konsantrasyonlarına benzer olarak geçilecek iki tayf kanalı için kullanılacak iletim güçlerinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu kontrolün iki geçişte de sisteminde hali hazırda devam eden iletişime zarar vermeden dikişsiz bir şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu yüzden biyolojik anahtarlama mekanizmaları bilişsel radyo ağları için geliştirilecek bir tayf hareketliliği kontrol mekanizması için etkili bir esin kaynağıdır.

#### KAYNAKLAR

- [1] FORREST S., A. S. Perelson, L. Allen, R. Cherukuri, "Self-Nonsel Self Discrimination in a Computer," IEEE Symposium on Security and Privacy, 202-212 (1994).
- [2] JERNE N.K., "Idiotypic Network and Other Preconceived Ideas," Immunological Rev., 79, 5-24 (1984).

## 7. MOLEKÜLER HABERLEŞMEDE KANAL KAPASİTESİ VE HATA TELAFİSİ

Bu çalışmada makalenin ilk versiyonuna ek olarak moleküler haberleşme için Moleküler Hata Telafi (MET) yöntemi verilmektedir. MET İletici Nano-makina (İN) ve Alıcı Nano-makina (RN) arasında nano-makinalara çok az işlemsel yük getirebilmekte ve moleküler haberleşme kapasitesini çok fazla artırabilmektedir. Ayrıca MET moleküler haberleşme için geliştirilen literatürdeki ilk hata telafi yöntemidir. MET yönteminin detayları aşağıda sunulmaktadır.

### 7.1. Moleküler Haberleşmede Uyarlamalı Hata Telafisi

Geleneksel sayısal haberleşmede kanaldaki gürültüden dolayı hatalı bitler sıklıkla görülmektedir. Bu hatalı bitleri telafi edebilmek için çok çeşitli kanal kodlama yöntemleri literatürde bulunmaktadır. Bu hata telafi yöntemlerinin çoğu yüksek hesaplama gücü gerektiren işlemcilerle ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmanın ilk versiyonunda belirtildiği gibi moleküler haberleşmede de geleneksel sayısal haberleşmeye benzer olarak moleküler bitlerin iletimi sırasında hatalar ortaya çıkabilmektedir. Aslında moleküler haberleşme geleneksel sayısal haberleşme gibi iki farklı bitden oluşmaktadır. Sayısal haberleşmedeki 1 ve 0 ile gösterilen bitlere karşılık olarak moleküler haberleşmede A ve 0 ile gösterilen iki farklı moleküler haberleşme biti mevcuttur. Dolayısı ile sayısal haberleşme için geliştirilen kanal kodlama ve hata bulma ve düzeltme yöntemleri moleküler haberleşme için de uygundur. Bununla birlikte bu yöntemlerin gereksinim duyduğu yüksek hesaplama ve depolama yeteneği çok düşük yetenekli ancak çok küçük hesaplamalar yapabilen nano-makinalar için uygun değildir. Bu nedenle moleküler haberleşme paradigması moleküler kanaldaki hataları tespit edip düzeltebilen bir mekanizmadan ziyade hataları ortamın fiziksel özelliklerine göre olmadan telafi edebilecek bir mekanizmaya ihtiyaç duymaktadır.

Teorik olarak makalenin ilk versiyonunda da verilen (1) numaralı denklemin  $P_A$  'ya göre optimize edilmesi ve elde edilen  $P_A$  'ya göre moleküler haberleşmenin kodlanması mümkün olduğu halde bu optimizasyonun nano-makinalar tarafından gerçekleştirilmesi nano-makinaların hesaplama yetenekleri açısından imkansızdır. Bu nedenle moleküler haberleşme çok daha basit işlemlere dayanan hata telafi yöntemlerine ihtiyaç duyar.

$$\begin{aligned}
 M = & - \left[ P_A \frac{E[N_{TA}]}{S} + (1-P_A) \left( 1 - \frac{S}{E[N_{T0}]} \right) \right] \log \left[ P_A \frac{E[N_{TA}]}{S} + (1-P_A) \left( 1 - \frac{S}{E[N_{T0}]} \right) \right] - \\
 & - \left[ P_A \left( 1 - \frac{E[N_{TA}]}{S} \right) + (1-P_A) \frac{S}{E[N_{T0}]} \right] \log \left[ P_A \left( 1 - \frac{E[N_{TA}]}{S} \right) + (1-P_A) \frac{S}{E[N_{T0}]} \right] - \\
 & - P_A \left[ \frac{E[N_{TA}]}{S} \log \left( \frac{E[N_{TA}]}{S} \right) - \left( 1 - \frac{E[N_{TA}]}{S} \right) \log \left( 1 - \frac{E[N_{TA}]}{S} \right) \right] - \\
 & - (1-P_A) \left[ \frac{S}{E[N_{T0}]} \log \left( \frac{S}{E[N_{T0}]} \right) - \left( 1 - \frac{S}{E[N_{T0}]} \right) \log \left( 1 - \frac{S}{E[N_{T0}]} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

İlk versiyonda da değinildiği gibi, İN'nin moleküler A bitini teslim edebilmesi için en az S tane A molekülünü AN'ye teslim edebilmesi gerekmektedir. Bu nedenle aşağıdaki koşulun moleküler A bitinin başarılı bir şekilde iletilmesi için sağlanması gerekmektedir.

$$E[N_{TA}] = N_A + N_p > S \tag{2}$$

Burada  $N_A$  İN tarafından teslim edilen molekül sayısını  $N_p$  ise önceki iletim aralığından gelen molekülleri göstermektedir.  $N_A$  ve  $N_p$  yerine daha önceki versiyonda elde edilen ifadelerini yazarak aşağıdaki koşulu elde edebiliriz.

$$N_A + P_A N_A \int_0^{t_H} e^{(-k-1)t} dt > S \quad (3)$$

(3) numaralı koşulu kullanarak  $P_A$  için aşağıdaki gibi bir alt sınır ( $LB$ ) verebiliriz.

$$P_A > \frac{S - N_A}{N_A \int_0^{t_H} e^{(-k-1)t} dt} = LB \quad (4)$$

Burada  $N_A \int_0^{t_H} e^{(-k-1)t} dt$  'nin bir moleküler A bitini göndermesinin ardından gelen üstel azalma fazındaki (exponential decaying phase) teslim edilen molekül sayısını ifade etmektedir. Burada  $N_A \int_0^{t_H} e^{(-k-1)t} dt$  'i  $N_{ex}$  ile ifade ediyoruz. Böylece  $LB$  aşağıdaki gibi verilebilir.

$$LB = \frac{S - N_A}{N_{ex}} \quad (5)$$

Benzer şekilde ilk versiyonda da değinildiği gibi,  $I_N$ 'nin moleküler 0 bitini teslim edebilmesi için maksimum  $S$  tane  $A$  molekülünü  $AN$ ' ye teslim edebilmesi gerekmektedir. Bu nedenle aşağıdaki koşulun moleküler 0 bitinin başarılı bir şekilde iletilmesi için sağlanması gerekmektedir.

$$E[N_{T0}] = N_p \leq S \quad (6)$$

Burada  $N_p$  önceki aralıktan gelen molekül sayısını ifade etmektedir ve makalenin ilk versiyonunda değinildiği üzere aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$P_A N_A \int_0^{t_H} e^{(-k-1)t} dt \leq S \quad (7)$$

(7) numaralı denklemi kullanarak alt sınıra ( $LB$ ) benzer şekilde  $P_A$  için aşağıdaki gibi bir üst sınır yazılabilir.

$$P_A \leq \frac{S}{N_A \int_0^{t_H} e^{(-k-1)t} dt} = UB \quad (8)$$

$$UB = \frac{S}{N_{ex}}$$

$LB$  ve  $UB$ 'yi kullanarak  $P_A$  için aşağıdaki koşul verilebilir öyle ki bu koşulun sağlandığı aralıklar için moleküler bit  $A$  ve  $0$  en az hata ile iletilebileceklerdir.

$$\frac{S - N_A}{N_{ex}} < P_A \leq \frac{S}{N_{ex}} \quad (9)$$

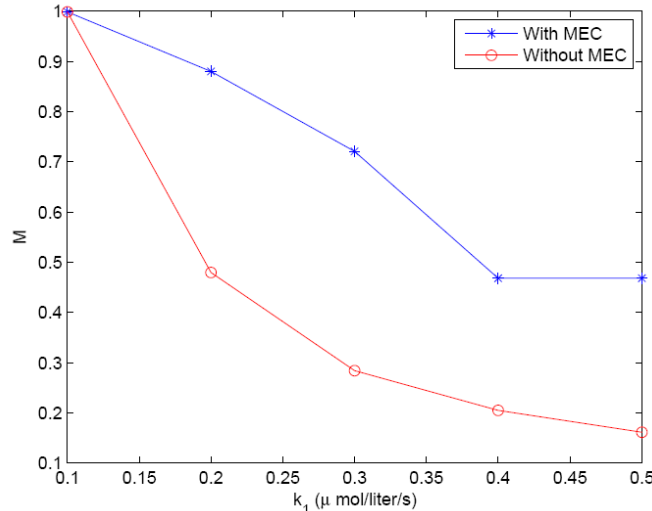
$$LB < P_A \leq UB$$

(9) numaralı denklemde verilen koşul  $P_A'$  nın seçileceği aralığı belirleyebildiği halde  $P_A'$  nın nasıl seçileceği çok önemlidir. Moleküler A bitinin başarılı iletimi için  $P_A'$  nın  $LB'$  den büyük olması gerekmektedir. Yani  $P_A$  ne kadar büyükse moleküler A bitinin başarılı bir şekilde iletilme olasılığı da o kadar fazladır. Bununla beraber moleküler 0 bitinin başarılı bir şekilde iletilmesi için  $P_A'$  nın  $UB'$  den küçük olması gerekmektedir bu nedenle  $P_A'$  nın en uygun değeri  $P_A \simeq UB$  olacaktır. MET yöntemi  $UB'$ yi hesaplayabilmek için aşağıdaki adımları uygular.

1. En başta, İN  $P_A$  için bir ilk değer seçer.
2. Hata oranı arttığında AN artan hata oranını tespit eder.
3. AN devam eden moleküler haberleşmeyi durdurmak ve moleküler hata telafisini başlatmak için  $BS_1$  ile gösterilen özel bir moleküler bit akımı (molecular bit stream) salgılar.
4. İN  $BS_1$ 'i algıladığında AN'nin  $N_{ex}$ ' i hesaplayabilmesi için  $BS_2$  ile gösterilen özel bir moleküler akım salgılar.  $N_{ex}$  İN moleküler bit A salgıladıktan sonra üstel azalan fazda teslim edilen molekül sayısını ifade ettiği için,  $BS_2$  A00000A00000 gibi bir moleküler akım olabilir.  $BS_2$ 'yi kullanarak AN  $N_{ex}$ ' i ve arkasından  $UB'$ yi hesaplar ve  $UB'$  yi kullanarak  $P_A$  'yı  $P_A \simeq UB$  olarak seçer.
5. AN seçilen  $P_A$  'yı İN'e gönderir. Burada gönderilen  $P_A$  değeri kayan noktalı bir sayı değildir.  $P_A$  için belirlenen bazı konsantrasyon seviyeleri AN tarafından İN' e gönderilir ve gönderilen bu seviye sayesinde İN  $P_A$  daki değişikliği fark edebilir.
6. İN yeni  $P_A$  değeri ile moleküler haberleşmeyi başlatmak için  $BS_3$  olarak adlandırılan özel bir moleküler bit akımı salgılar ve moleküler haberleşmeyi tekrar başlatır.

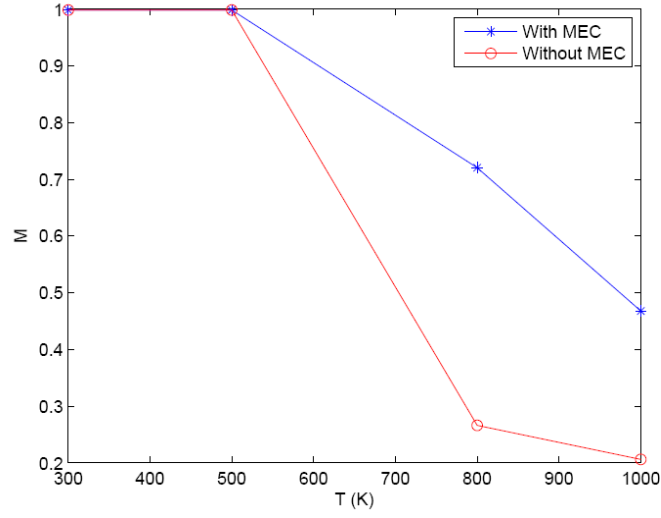
## 7.2. Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde MET yöntemi ile ilgili olarak sayısal sonuçlar verilmektedir. Şekil 1' de ileri hızın değişimine göre MET yönteminin moleküler haberleşme kapasitesini nasıl değiştirdiği görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi ileri hızın ( $k_1$ ) değişiminin kapasiteyi nasıl etkilediği gösterilmektedir. MET yöntemi  $P_A'$  nın rastgele seçildiği herhangi bir yöntemle göre bu durumda moleküler haberleşme kapasitesini %100 mertebesinde arttırabilmektedir.



Şekil.1 İleri hızın değişimine göre kapasitedeki değişim.

Şekil 2' de MET yönteminin moleküler haberleşme kapasitesini artıran sıcaklık değerlerine rağmen hala yüksek değerlerde tutabildiği gösterilmektedir. Bu durumda da MET yine %100 den daha fazla kapasite iyileştirmesi sağlayabilmektedir.



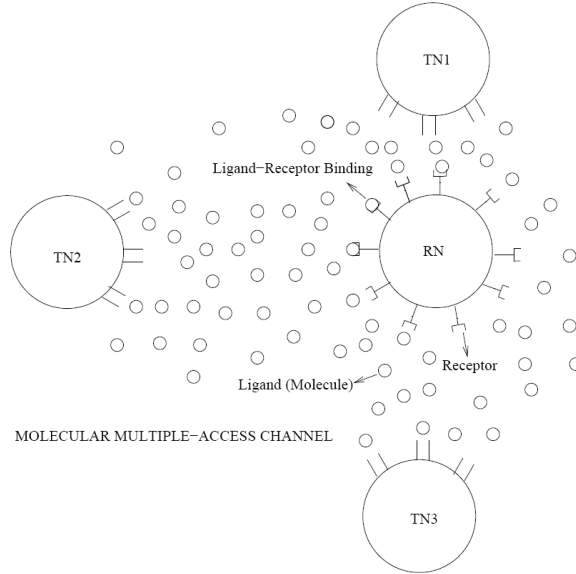
**Şekil 2. Ortam sıcaklığının değişimine göre kapasitedeki değişim.**

Şekil 3'de MET yönteminin sıcaklık ve ileri hızdaki durum gibi nano-makinalar arasındaki uzaklık değişimlerinde de yüksek moleküler haberleşme kapasitesi sağlayabildiği gösterilmektedir.



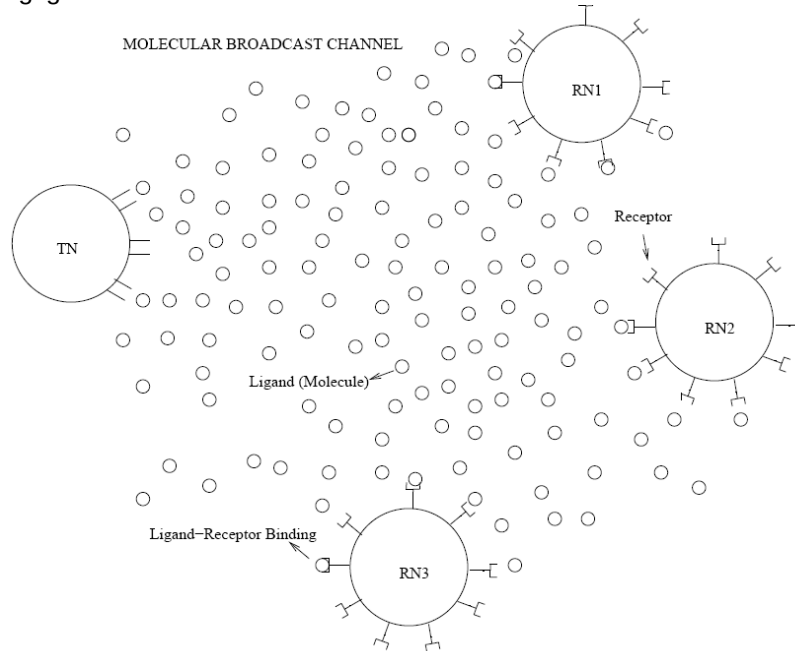
## 8. NANOAĞLARDA MOLEKÜLER ÇOKLU ERİŞİM, YAYIN VE AKTARIM KANALLARI ÜZERİNE

Bu çalışmada projenin ikinci raporunda detayları verilen “An Information Theoretical Approach For Molecular Communication” isimli makalede geliştirilen moleküler haberleşme modeli kullanılarak bir nano-ağdaki moleküler çoklu erişim, yayın ve aktarım kanalları tanımlanarak, haberleşme kapasiteleri araştırılmıştır. Bir nano-ağdaki moleküler çoklu erişim kanalı Şekil 1’de görüldüğü gibi birçok iletilen Nano-makinanın (İN) tek bir Alıcı nano-makinaya (AN) moleküler bilgi göndermesini sağlayan moleküler haberleşme kanalı olarak tanımlanmaktadır.



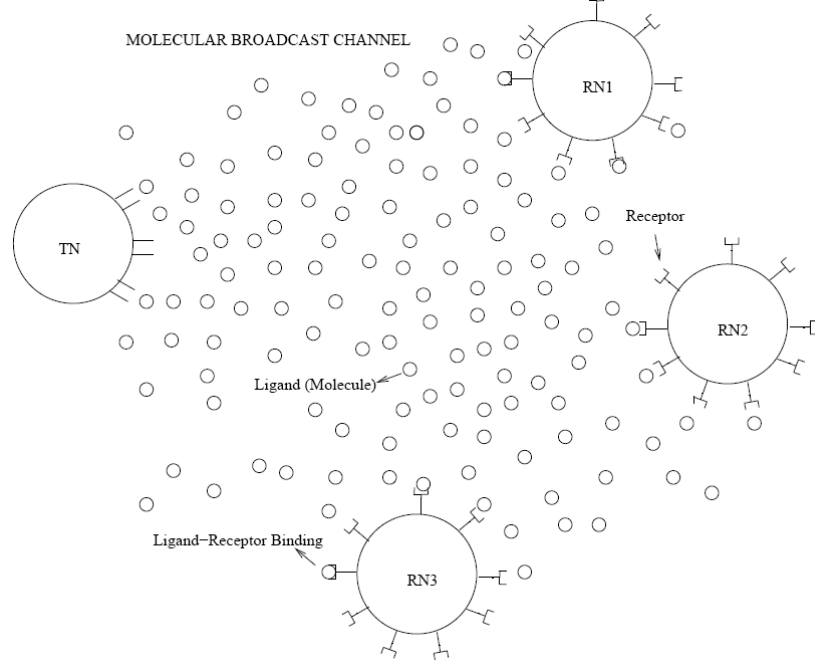
**Şekil 1. Moleküler Çoklu erişim Kanalı**

Çoklu erişim kanalının tersine Şekil 2’de görüldüğü gibi moleküler yayın kanalında bir tane İN birçok AN’e moleküler bilgi göndermektedir.



**Şekil 2. Moleküler Yayın Kanalı**

Moleküler çoklu erişim ve yayın kanallarının birleşimi olarak Şekil 3' de görüldüğü gibi moleküler aktarım kanalında hem molekül alma (molekül reception) hemde molekül salgılama (molekül emission) yeteneği olan bir nano-makina İN ve AN arasındaki moleküler haberleşmeye yardım etmektedir.



**Şekil 3. Moleküler Aktarım Kanalı**

Daha önceki çalışmamıza benzer şekilde, bir nano-ağdaki moleküler çoklu erişim, yayın ve aktarım kanallarında moleküler haberleşme yapan nano-makinalar için iki tane moleküler haberleşme biti olduğunu düşünüyoruz. Bunlardan bir tanesi moleküler A biti diğeri ise moleküler 0 biti. Bu nano-ağdaki herhangi bir İN moleküler A bitini AN'e teslim (deliver) edebilmek için en az S tane moleküllü  $t_H$  zaman aralığı içinde teslim etmesi gerekmektedir. Moleküler 0 bitini teslim edebilmek için ise S'den az moleküllü teslim etmesi gerekmektedir. Daha önce de verildiği gibi moleküler A bitini iletmek istediğinde İN  $t_H$  zaman aralığı içerisinde  $L_{ex}$  konsantrasyonunda A moleküllü salgılamakta ve moleküler 0 bitini iletmek istediğinde ise  $t_H$  zaman aralığı içerisinde molekül salgılamaktadır. Ayrıca burada İN'nin  $P_A$  olasılığı ile moleküler A biti ( $1-P_A$ ) olasılığı ile de moleküler 0 biti gönderdiğini varsayıyoruz.

Böylece İN'nin moleküler bit A salgıladığı durum için AN'e teslim edilen moleküllerin ortalama değeri  $E[S_A]$  aşağıdaki gibi verilebilir.

$$E[S_A] = NA + NP. \quad (1)$$

Burada, NA ve NP aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$NA = \int_0^{t_H} \frac{k_1 L_{ex} N}{k_{-1} + k_1 L_{ex}} (1 - e^{-t(k_{-1} + k_1 L_{ex})}) dt. \quad (2)$$

$$NP = P_A NA \int_0^{t_H} e^{(-k_{-1}t)} dt \quad (3)$$

$N$  AN üzerindeki alıcı konsantrasyonunu,  $k_1$  ve  $k_{-1}$  sırasıyla yapışma ve salınma hızlarını (binding and release rates) göstermektedir. İN moleküler bit 0 göndermek istediğinde ise teslim edilen molekül konsantrasyonunun ortalama değeri  $E[S_0]$  aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$E[S_0] = NP \quad (4)$$

Burada  $S_A$  ve  $S_0$  için normal dağılım varsayımı yapıldığında İN'nin moleküler bit A'yı başarılı gönderme olasılığı  $p_1$  ve moleküler bit 0'ı başarılı gönderme olasılığı  $p_2$  aşağıdaki gibi verilebilir.

$$p_1(S_A \geq S) = \int_S^\infty \frac{1}{\sigma_A 2\pi} e^{-\frac{(x-\mu_A)^2}{\sigma_A^2}} dx \quad (5)$$

$$p_2(S_0 \leq S) = \int_0^S \frac{1}{\sigma_0 2\pi} e^{-\frac{(x-\mu_0)^2}{\sigma_0^2}} dx \quad (6)$$

Burada  $\mu_A$  ve  $\sigma_A^2$   $S_A$ 'nın beklenen değeri ve varyansı,  $\mu_0$  ve  $\sigma_0^2$  ise  $S_0$ 'ın beklenen değeri ve varyansıdır.  $S_A$  ve  $S_0$  normal dağılıma sahip konsantrasyon değerleri oldukları için negatif değerler alamayacaklarından  $S_A$  ve  $S_0$ 'ın beklenen değerleri ve standart sapmaları arasında aşağıdaki ilişkiler bulunmaktadır.

$$\sigma_A = \frac{\mu_A}{3} \quad (7)$$

$$\sigma_0 = \frac{\mu_0}{3} \quad (8)$$

Böylece,  $p_1$ ,  $p_2$ , ve  $P_A$ 'yı kullanarak İN ve AN arasındaki kanalın kapasitesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$SC = \max(I(X; Y)).$$

$$I(X; Y) = \left( H \left( p_1 P_A + (1-p_2)(1-P_A), (1-p_1)P_A + p_2(1-P_A) \right) \right) - \left( P_A H(p_1, 1-p_1) + (1-P_A) H(p_2, 1-p_2) \right) \quad (9)$$

(9)' da verilen ifade İN ve AN arasındaki kanalın kapasitesini vermektedir. Oysa birçok İN'nin tek bir AN'e moleküler bilgi gönderdiği moleküler çoklu erişim kanalında her bir İN'nin gönderdiği molekül konsantrasyonları AN'nin alıcılarını paylaşmaları için teslim edilen molekül sayıları çoklu erişim kanalında değişime uğramaktadır. İN<sub>i</sub> moleküler bit A gönderdiğinde teslim edilen molekül konsantrasyonu  $M_A$  diğer İN'lerin gönderdikleri moleküllerin ortalama değerlerine bağlı olarak aşağıdaki gibi verilebilir [1]

$$M_A^i = K S_A^i \quad (10)$$

Burada  $S_A^i$  sadece İN<sub>i</sub>'nin moleküler bit A gönderdiği durumdaki teslim edilen molekül konsantrasyonudur ve (1) ile bulunabilir.  $K$  ise AN' nin alıcıları üzerindeki paylaşımından dolayı İN<sub>i</sub>'nin teslim edebileceği molekül oranındaki düşmeyi göstermektedir ve aşağıdaki gibi verilebilir.

$$K = \frac{N}{N + \sum_{j \neq i}^n \left( P_{A_j} E[S_A^j] + (1 - P_{A_j}) E[S_0^j] \right)} \quad (11)$$

Burada  $\sum_{j \neq i}^n \left( P_{A_j} E[S_A^j] + (1 - P_{A_j}) E[S_0^j] \right)$  diğer İN'ler tarafından teslim edilen molekül konsantrasyonunu ifade etmektedir. Benzer şekilde İN<sub>i</sub> moleküler bit 0 gönderdiğinde teslim edilen molekül konsantrasyonu  $M_0^i$  aşağıdaki gibi verilebilir.

$$M_0^i = K S_0^i \quad (12)$$

Burada  $K$  sabit olduğu için ve  $S_A^i$  ve  $S_0^i$  normal dağılıma sahip oldukları için  $M_A^i$  ve  $M_0^i$ 'da normal dağılıma sahiptir.  $M_A^i$  ve  $M_0^i$ 'nin ortalama değerleri ve varyansları sırasıyla  $K\mu_A$ ,  $(K\sigma_A)^2$  ve  $K\mu_0$ ,  $(K\sigma_0)^2$ . Bu standart sapma ve varyans değerleri kullanılarak İN<sub>i</sub> ve AN arasındaki kanalın kapasitesi  $CM_i$  (5)-(9) kullanılarak bulunabilir. Böylece  $n$  tane İN'nin ve bir AN'nin bulunduğu moleküler çoklu erişim kanalının kapasitesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$MC_i = \max(I^i(X; Y)) \quad (13)$$

Burada  $I^i(X; Y)$  İN<sub>i</sub> ve AN arasındaki kanalın karşılıklı bilgisidir (mutual information) ve (9) kullanılarak bulunabilir.

Moleküler yayın kanalında TN tarafından ortama salınan moleküller tek biçimli olarak her yöne yayıldıkları (uniform diffusion of emitted molecules to all directions) her bir RN'e teslim edilen molekül konsantrasyonu sadece o RN'e ortam tarafından empoze edilen yapışma ve salınma hızları  $k_1$  ve  $k_{-1}$  tarafından belirlenir. Burada RN'lerin birbirlerine karışmadıkları (interfering) düşünülmektedir. Bu nedenle TN ile RN<sub>i</sub> arasındaki moleküler kanalın kapasitesi  $BC_i$  (5)-(9) kullanılarak ve  $n$  RN'nin bulunduğu yayın kanalında başarılan toplam kapasite aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$BC_i = \max(I^i(X; Y)) \quad (14)$$

$$BC = \sum_{i=1}^n BC_i. \quad (15)$$

$H$  ile gösterilen bir tane aktarım düğümünün bulunduğu İN ve AN arasındaki moleküler aktarım kanalı İN'den  $H$  ve AN'e bir yayın kanalı ve  $H$  ve İN'den AN'e bir çoklu erişim kanalından oluşmaktadır. Geleneksel olarak aktarım kanallarının kapasiteleri maksimum akım minimum kesim (maximum flow minimum cut) teorisi [2], [3] sayesinde bulunabilmektedir. Moleküler aktarım kanalı da benzer şekilde bu teori kullanılarak modellendiğinde iki tane kesim kümesinden (cut set) bahsetmek mümkündür.

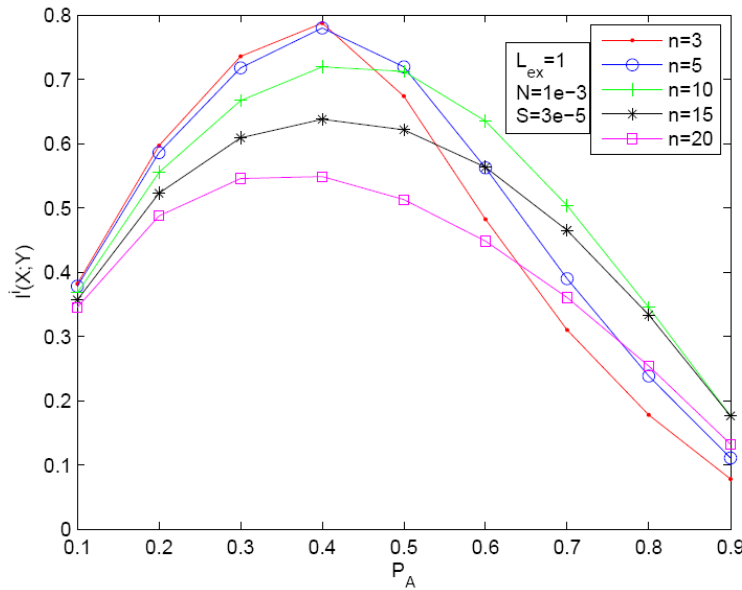
Bunlardan bir tanesi moleküler yayın kanalını kaplayan  $(\dot{I}N,H)$  ve  $(\dot{I}N,AN)$  diğeri ise çoklu erişim kanalını kaplayan  $(H, AN)$  ve  $(\dot{I}N,AN)$  kümeleridir. Maksimum akım minimum kesim teorisine göre moleküler aktarım kanalının kapasitesi  $RC$  aşağıdaki gibi verilebilir.

$$RC = \min(\max(BC_h, BC_r), \overline{MC}) \quad (16)$$

Burada  $BC_h$   $\dot{I}N$  ile  $H$  arasındaki yayın kanalının kapasitesini,  $BC_r$  ise  $\dot{I}N$  ile  $AN$  arasındaki yayın kanalının kapasitesini göstermektedir ve bu kapasiteler yukarıda anlatıldığı gibi bulunabilir.  $\overline{MC}$  ise  $\dot{I}N$  ve  $H$  den  $AN$ ' e moleküler çoklu erişim kanalının kapasitesini göstermektedir. Bu kapasite yukarıda anlatıldığı şekli ile bulunabilmesinin yanında  $H$ ' nin  $\dot{I}N$  ile her  $t_H$  zaman aralığında aynı moleküler biti göndermesinden dolayı teslim edilen molekül konsantrasyonu yukarıda anlatılandan biraz farklıdır. Bu farkların detayları rapora eklediğimiz makalede bulunabilir.

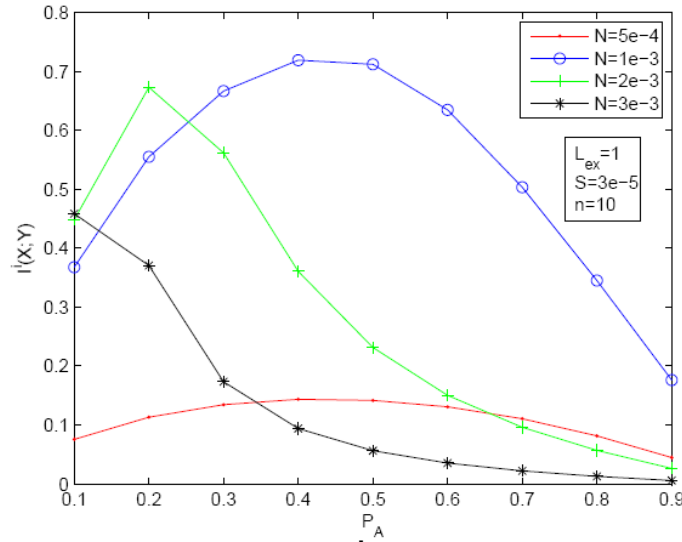
### Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde yukarıda geliştirilen moleküler çoklu erişim, yayın ve aktarım kanallarının kapasite ifadeleri sayısal olarak incelenmektedir. Şekil 4'de moleküler çoklu erişim kanalındaki değişen  $\dot{I}N$  sayısına ( $n$ ) göre her bir  $\dot{I}N$ 'nin başarabildiği karşılıklı bilgi gösterilmektedir. Görüldüğü gibi,  $n$  arttıkça kapasite azalmaktadır. Bu durum  $n$  arttıkça  $AN$  alıcılarına teslim edilebilen molekül konsantrasyonunun azalmasından kaynaklanmaktadır.



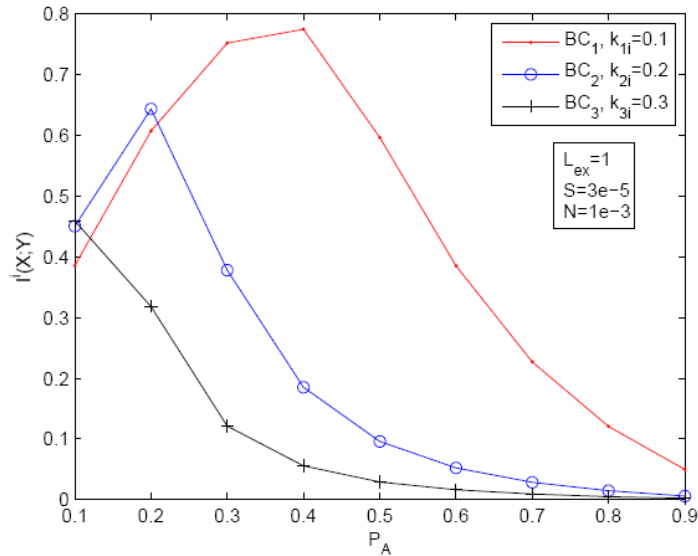
Şekil 4. Farklı  $n$  değerleri için her bir  $\dot{I}N$  tarafından başarılan karşılıklı bilgi.

Şekil 5' de her bir  $\dot{I}N$  tarafından başarılan karşılıklı bilgi değişik alıcı konsantrasyonları ( $N$ ) ile gösterilmektedir. Alıcı konsantrasyonun en büyük değeri için kapasitenin en küçük çıktığı görülmektedir. Bunun temel sebebi yüksek alıcı konsantrasyonundan kaynaklanan aşırı molekül teslimatı yüzünden moleküler bit 0' ın hatalı gönderilmesinden kaynaklanmaktadır. Bununla beraber alıcı konsantrasyonunun uygun değerinin seçilmesi ile yüksek kapasite değerlerinin başarılabilmesi olanaklıdır. Alıcı konsantrasyonunun en büyük değerine benzer şekilde alıcı konsantrasyonları düştükçe kapasite değerleri düşmektedir. Bu durum moleküler A biti için gerekli olan molekül konsantrasyonunun teslim edilememesinden kaynaklanmaktadır.



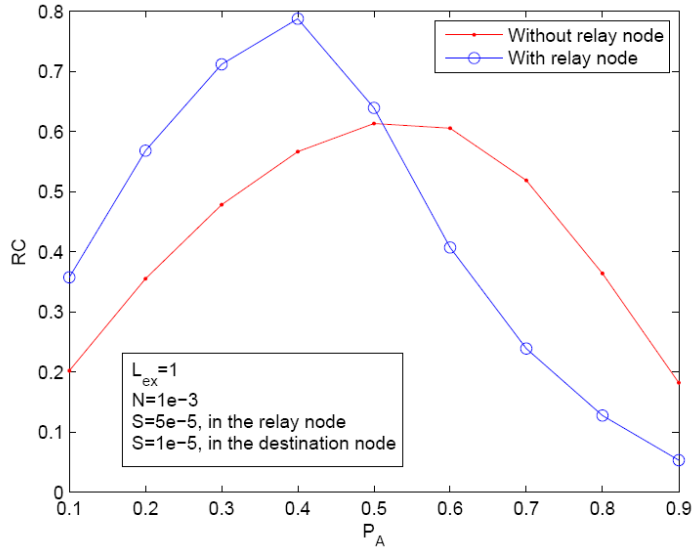
Şekil 5. Farklı  $N$  değerleri için her bir İN tarafından başarılan karşılıklı bilgi.

Şekil 6' de üç tane RN' nin bulunduğu bir yayın kanalında her bir RN ve TN arasındaki karşılıklı bilgi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi her bir RN farklı yapışma hızlarına sahip olduğu için her bir RN farklı karşılıklı bilgiyi başarabilmektedir. Yapışma hızları arttıkça her zaman aralığında daha fazla molekül teslim edilebildiği için moleküler bit 0'ın gönderiminde hatalar oluşmakta ve kapasiteler yapışma hızları arttıkça düşmektedir.



Şekil 6. Üç RN'nin bulunduğu bir yayın kanalında her bir RN tarafından başarılan karşılıklı bilgi.

Şekil 7' te moleküler aktarım kanalının kapasitesi aktarım düğümünün bulunduğu ve bulunmadığı durumlar için gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi aktarım düğümü  $P_A$ ' nın bazı değerleri için karşılıklı bilgiyi artırabildiği halde  $P_A$  arttıkça karşılıklı bilgi azalmaktadır. Bununla beraber  $P_A$  uygun bir şekilde seçildiğinde aktarım kanalı İN ve AN arasındaki kapasiteyi artırabilmektedir.



**Şekil 7. Aktarım düğümünün olduğu ve olmadığı durumlar için İN ve AN arasındaki karşılıklı bilgi.**

#### KAYNAKLAR

- [1] MALAKA R., T. Ragg, and M. Hammer, "Kinetic models of odor transduction implemented as artificial neural networks", *Biological Cybernetics*, vol. 73, pp. 195-207, 1995.
- [2] COVER T. M., J. A. Thomas, "Elements of information theory", *John Wiley-Sons*, 2006.
- [3] FORD L. R., D. R. Fulkerson, "Flows in Networks", *Princeton University Press*, 1974.

## 9. NANO-AĞLARDA MOLEKÜLER TEKLİ VE ÇOKLU-ERİŞİM KANALLARININ KAPASİTESİ

Bu çalışmada, biyolojideki doğal ligand-alıcı yapışma mekanizmalarının temel özellikleri kullanılarak, öncelikle tek bir İletici Nano-makinenin (İN) tek bir Alıcı Nano-makineyle (AN) haberleştiği tekli moleküler kanalın kapasitesi elde ediliyor. Ardından çok sayıda İN' nin tek bir AN ile haberleştiği moleküler çoklu-erişim kanalının kapasitesi elde ediliyor.

### 9.1. GİRİŞ

Moleküler haberleşme nano-makinaların birbirleriyle haberleşmelerini çevrelerine molekül salgılama sayesinde olanaklı kılan yeni bir nano-ölçek haberleşme paradigmasıdır [1]. Koku, tat, ışık veya herhangi bir kimyasal durum gibi moleküler bilgiyi paylaşmak için bir bölgeye dağılmış ve moleküler haberleşme içinde olan belli sayıda nano-makina nano-ağ olarak öngörülebilir. Nano-makinalardan oluşan ağın nükleer, biyolojik ve kimyasal saldırı seziminden su ve yemek kalite kontrolüne kadar değişik görevleri olabilir [2]. Moleküler tekli ve çoklu-erişim kanalları şöyle tanımlanabilir:

6. *Moleküler tekli kanal* tek bir İletici Nano-makina (İN) ile tek bir Alıcı Nano-makine (AN) arasındaki moleküler haberleşme kanaludur.
7. *Moleküler çoklu-erişim kanal* çok sayıda İN' nin tek bir AN' ye moleküler bilgi gönderdiği moleküler bir haberleşme kanaludur.

Moleküler haberleşme ile ilgili var olan çalışmalar moleküler haberleşme kanal kapasitesini incelememektedir. Önceki çalışmamızda moleküler tekli ve çoklu-erişim kanallarını İN' den AN' ye iletilen belirli molekül konsantrasyonu ile ilgili ikili bakışimli kanal olarak modellememize rağmen, bu kanallar sonsuz konsantrasyon düzeyleri temin edebilir ve kapasiteleri gerçek ifadeler bulmak için tekrar araştırılmalıdır.

### 9.2. Moleküler Tekli Haberleşme Kanalı

Ligand-alıcı yapışma mekanizmasına göre, biyolojik varlıklar arasındaki biyolojik moleküler kanal bir *konsantrasyon kanalı* olarak düşünülebilir. Bu makalede İN ve AN arasında moleküler haberleşme sağlamak için doğal ligand-alıcı yapışma mekanizmasına sadık kalınıyor ve bu moleküler haberleşme kanalını *konsantrasyon kanalı* olarak modelliyoruz. Bu çalışmada [8] de tanımlanan yapay ligand-alıcı yapışma modelini var sayıyoruz.

İN' nin  $A$  isimli  $X$  ( $\mu\text{mol/liter}$ ) konsantrasyonlu ( $X$   $\mu_x$  ortalamalı ve  $\sigma_x^2$  varyanslı bir rastgele değişken) bir çeşit molekül yaydığı, AN' nin yüzeyinde  $R$  isimli sabit  $N$  ( $\mu\text{mol/liter}$ ) konsantrasyonlu ve yüzeyine bağlanan molekülleri almasını sağlayan alıcıları olduğunu var sayıyoruz. Ligand-alıcı yapışma modelini kullanarak AN alıcılarına bağlanan moleküllerin konsantrasyonu  $B$  aşağıdaki gibidir:

$$B = \frac{k_1 N X}{k_{-1}} \quad (1)$$

Burada  $k_1$  ve  $k_{-1}$  sırasıyla sabit yapışma ve salınma hızlarıdır.  $k_{-1}$ ' nin AN' nin fiziksel özellikleri değişmedikçe sabit kaldığı farz edilmektedir.  $k_1$  çevresel faktörlerden etkilenir ve [9]' daki modele göre belirlenir:

$$k_1 = \frac{4\pi D r_0 \beta}{1 - (1 - \beta) \frac{r_0}{r_\infty}} \quad (2)$$



Burada D salınan moleküllerin difüzyon katsayısı,  $r_o$  ( $A^\circ$ ) AN' nin çapı,  $r_\infty$  ( $A^\circ$ ) İN ve AN' nin haberleştiği küresel şekilli çevrenin çapı ve  $\beta$  İN 'den salınan moleküllerin AN alıcılara yapışmasına izin veren molekül yörüngelerinin kesimidir. Bağlanan molekül konsantrasyonu B' nin Z isimli belli bir gürültüye maruz kaldığını var sayıyoruz ve İN' den AN' ye iletilen molekül konsantrasyonunu Y ile isimlendirirsek, Y aşağıdaki gibidir:

$$Y = B + Z = \frac{k_1 N X}{k_{-1}} + Z \quad (3)$$

Burada Z' yi normal dağılımlı ( $N(\mu_z, \sigma_z^2)$ ) rastgele değişken olarak alıyoruz. İN ve AN arasındaki karşılıklı bilgi miktarı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$I(X; Y) = H(Y) - H\left(\frac{k_1 N X}{k_{-1}} + Z/X\right) = H(Y) - H(Z) \quad (4)$$

Karşılıklı bilginin en yüksek düzeyde olması için H(Y) en yüksek düzeyde tutulmalı. Y, X ve Z değişkenlerinden etkilenmekte ve normal dağılım gerçel değerli dağılımlar arasında belli bir ortalamaya ve standart sapmaya göre en yüksek entropiye sahiptir. Bu yüzden X normal dağılımlı bir rastgele değişken olursa Y de normal dağılımlı bir sabit değişken olur ve H(Y) en yüksek düzeyi başarılabilir. Buna göre Y' nin ortalama ve standart sapmaları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\mu_y = \frac{k_1 N}{k_{-1}} \mu_x + \mu_z, \quad \sigma_y^2 = \left(\frac{k_1 N}{k_{-1}} \sigma_x\right)^2 + \sigma_z^2 \quad (5)$$

Böylece Y' nin entropisi aşağıdaki gibidir [13]:

$$H(Y) = \ln(\sigma_y \sqrt{2\pi e}) = \ln\left(\sqrt{2\pi e \left(\left(\frac{k_1 N}{k_{-1}} \sigma_x\right)^2 + \sigma_z^2\right)}\right) \quad (6)$$

Sonuçta İN ve AN arasındaki tekli moleküler kanalın kapasitesi aşağıdaki gibi bulunur:

$$C_s = \max\left(I(X; Y)\right) = H(Y) - H(Z) = \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{\left(\frac{k_1 N}{k_{-1}} \sigma_x\right)^2}{\sigma_z^2}\right) \quad (7)$$

### 9.3. Moleküler Çoklu-erişim Kanalı Kapasitesi

Belli sayıda İN' nin ( $IN_1, IN_2, \dots, IN_n$ ) tek bir AN ile haberleştiğini,  $IN_i$  nin AN' den  $\alpha_i$  uzaklıkta olduğunu, A moleküllerini  $X_i$  konsantrasyonu ile ilettiğini,  $k_{1i}$  yapışma ve  $k_{-1}$  salınma hızı kullandığını, AN' nin İN' lerden gelen molekülleri her İN' nin sahip olduğu ve salgıladığı moleküllere eklediği etiketler sayesinde ayırdığını farz ediyoruz. [8]' deki modeli kullanarak  $IN_i$  tarafından salgılanan ve AN alıcılara bağlanan molekül konsantrasyonu  $B_i$  aşağıdaki gibi bulunur:

$$B_i = \frac{\frac{X_i N k_{1i}}{k-1}}{1 + \sum_{j \neq i}^n \frac{\mu_{xj} k_{1j}}{k-1}} \quad (8)$$

Tekli kanala benzer biçimde  $B_i$ ,  $Z_i$  gürültü seviyesine maruz kalır.  $\dot{N}_i$  tarafından iletilen, bağlanmış (bound) molekül konsantrasyonu  $Y_i$  aşağıdaki gibidir:

$$Y_i = B_i + Z_i = \frac{\frac{X_i N k_{1i}}{k-1}}{1 + \sum_{j \neq i}^n \frac{\mu_{xj} k_{1j}}{k-1}} + Z_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

Entropi en üst seviyesi bulunmasında tekli kanalla benzer varsayımlar sonucu  $Y_i$  ye ait ortalama ve standart sapma aşağıdaki gibi bulunur:

$$\mu_{y_i} = \frac{\frac{N k_{1i}}{k-1} \mu_{x_i}}{1 + \sum_{j \neq i}^n \frac{\mu_{xj} k_{1j}}{k-1}} + \mu_{z_i}, \quad \sigma_{y_i}^2 = \left( \frac{\frac{N k_{1i}}{k-1} \sigma_{x_i}}{1 + \sum_{j \neq i}^n \frac{\mu_{xj} k_{1j}}{k-1}} \right)^2 + \sigma_{z_i}^2 \quad (10)$$

Standart sapmayı kullanarak,  $H(Y_i)$  aşağıdaki gibi bulunur [13]:

$$H(Y_i) = \ln(\sigma_{y_i} \sqrt{2\pi e}) = \ln \left( \sqrt{2\pi e \left( \frac{\frac{N k_{1i}}{k-1} \sigma_{x_i}}{1 + \sum_{j \neq i}^n \frac{\mu_{xj} k_{1j}}{k-1}} \right)^2 + \sigma_{z_i}^2} \right) \quad (11)$$

Sonuç olarak  $\dot{N}_i$  ve AN arasındaki çoklu-erişim kanal kapasitesi  $C_{mi}$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$C_{mi} = \max \left( I(X_i; Y_i) \right) = H(Y_i) - H(Z_i) \quad (12)$$

$$C_{mi} = \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{\left( \frac{\frac{N k_{1i}}{k-1} \sigma_{x_i}}{1 + \sum_{j \neq i}^n \frac{\mu_{xj} k_{1j}}{k-1}} \right)^2}{\sigma_{z_i}^2} \right) \quad (13)$$

Her  $\dot{N}_i$  'nin yarattığı kapasite toplanarak Moleküler çoklu-erişim kanal toplam kapasitesi  $C_m$  şudur:

#### 9.4. Sayısal Sonuçlar

$$C_m = \sum_{i=1}^n C_{mi} \quad (14)$$

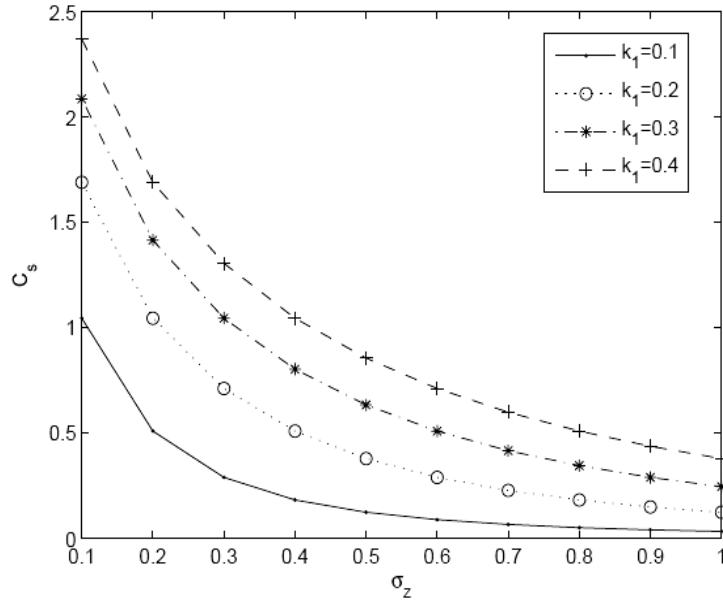
Amacı tekli ve çoklu-erişimde moleküler kanal karakteristiğini belirlemek ve nano-makina sayısı, alıcı konsantrasyonu R, yapışma hızı  $k_1$  ve gürültünün standart sapması gibi moleküler haberleşme parametrelerine göre bu kanal karakteristiklerindeki değişimi izlemek olan sayısal analiz, Matlab ortamında yapılmıştır. İN'lerin ve AN'nin küresel şekilli çevrede rastgele konumlandığını ve bu çevrenin farklı difüzyon katsayıları olabileceğini ve bu sayede İN'lerin farklı yapışma hızlarına ( $k_1$ ) ulaşabildiğini farz ediyoruz. Deneysel benzetim parametreleri Tablo-1 de verilmektedir:

TABLO-1 Deneysel Benzetim Parametreleri

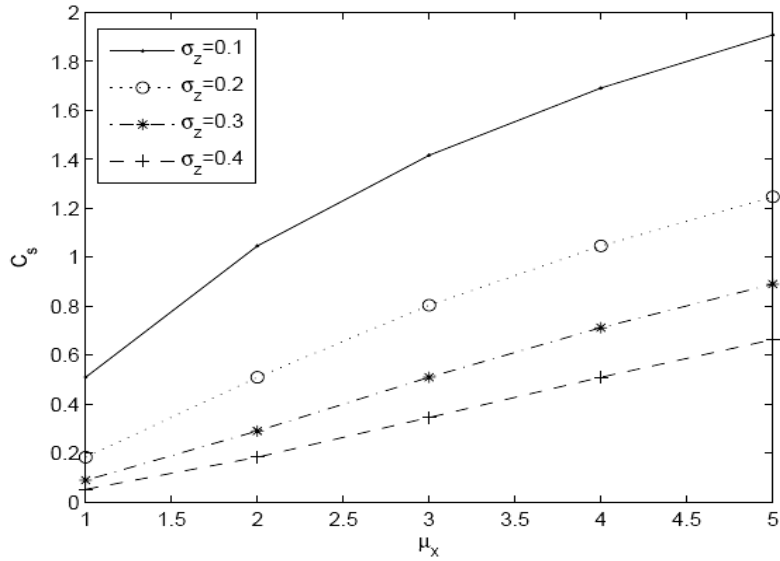
Yapışma hızı ( $k_1$ )	0.1-0.4
Salınma hızı ( $k_{-1}$ )	0.08
Nano-makina sayısı (n)	1-20
Alıcı konsantrasyonu (N)	0.01-1 ( $\mu\text{mol/liter}$ )
Molekül konsantrasyonu ortalaması ( $\mu_x$ )	1-5 ( $\mu\text{mol/liter}$ )
Gürültü standart sapması ( $\sigma_z$ )	0.1-1

#### A. Tekli Moleküler Kanal

Gürültü standart sapmasının (7) no'lu denklemde verilen moleküler kanal kapasitesine etkisi Şekil. 1 'de görülebilir. Burada değişik yapışma hızları  $k_1$  için değişen gürültü standart sapma değerleri kullanılmıştır. Kablosuz haberleşme kanallarındaki benzer bir biçimde, gürültünün standart sapması arttıkça tekli moleküler kanalın kapasitesinin azaldığı gözlemlenmektedir. Fakat kapasite daha yüksek yapışma hızıyla artırılabilir. İN yapışma hızını her zaman artıramayabilir, çünkü yapışma hızı çevrenin fiziksel özelliklerine veya ağın topolojisine özeldir. Yine de İN tekli moleküler kanal kapasitesini artırmak için salgılanan ortalama molekül konsantrasyonunu artırabilir. Şekil 2' de değişik gürültü standart sapmaları için, değişen ortalama molekül konsantrasyonuna göre kapasite gösterilmektedir. Kapasite artan gürültü seviyesine rağmen artırılabilir.



Şekil 1. Değişik yapışma hızları  $k_1$  için değişen gürültü standart sapma değerlerine  $\sigma_z$  göre kapasite  $C_s$ .

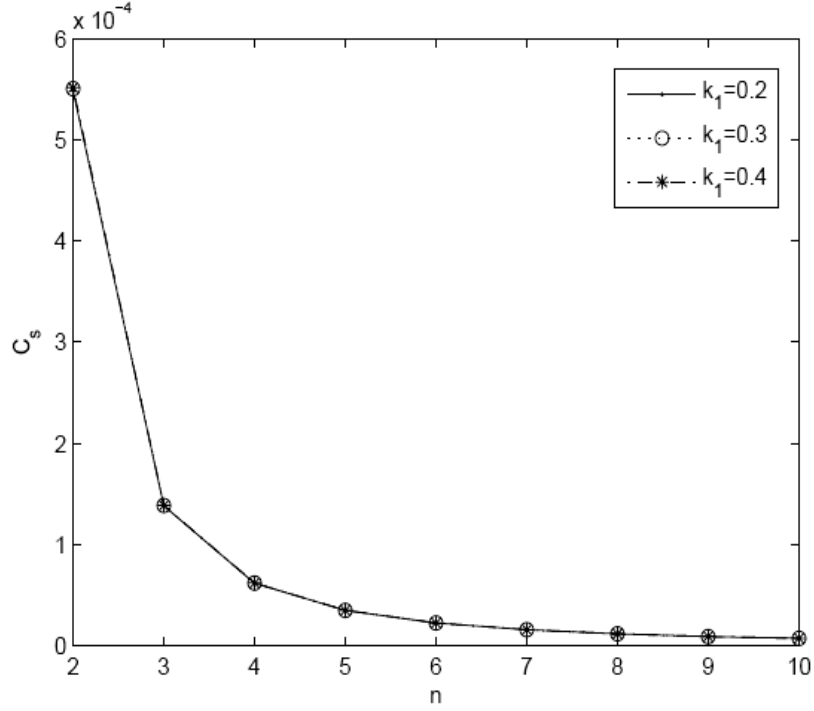


Şekil 2. Değişik gürültü standart sapmaları  $\sigma_z$  için, değişen ortalama molekül Konsantrasyonuna ( $\mu_x$ ) göre kapasite  $C_s$ .

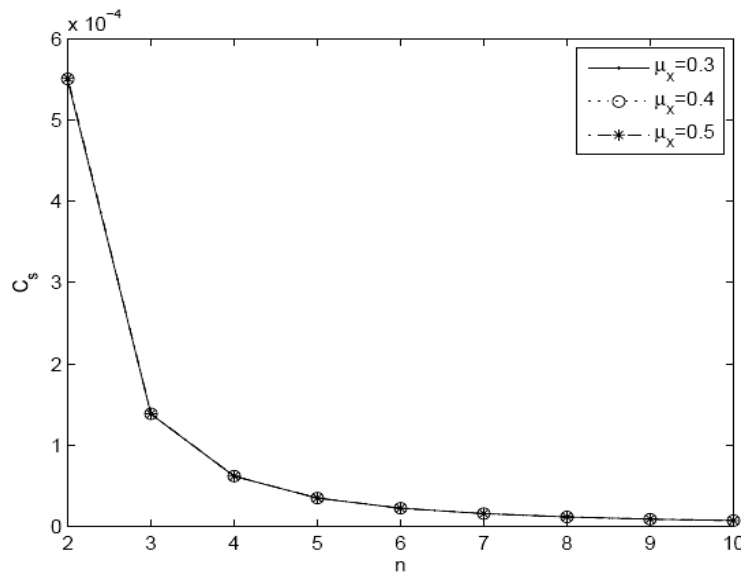
### B. Moleküler Çoklu-erişim Kanalı

İN' lerin sayısının ( $n$ ) (13) numaralı denklemde verilen kapasiteye ( $C_{mi}$ ) etkisini gözlemledik. Belli bir sayıda İN' nin AN etrafında konumlandığını, hepsinin aynı yapışma ve salınma hızına sahip olduğunu, salgılanan ortalama molekül konsantrasyonunun hepsi için aynı olduğunu varsayıyoruz. Şekil 3. bir İN tarafından başarılan çoklu-erişim kapasitesini  $C_{mi}$  farklı yapışma hızları için, değişen İN sayısına göre göstermektedir. AN alıcıları üstündeki çekişme dolayısıyla, İN sayısı arttıkça  $C_{mi}$  düşmektedir. Tekli moleküler kanalın aksine Şekil 4' de, bu

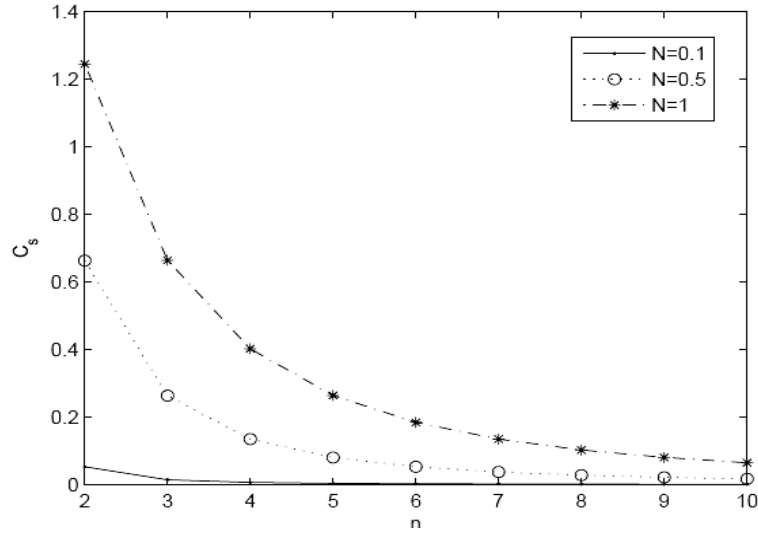
çekişmenin yapışma hızındaki artışa ve salgılanan ortalama molekül konsantrasyonundaki artışa rağmen kapasitede artışa izin vermediği gözlemlenmektedir. Moleküler kanal için çekişmenin etkisi alıcı konsantrasyonunu ( $N$ ) artırarak azaltılabilir ve bu sayede kapasite artırılabilir. Şekil 5' de kapasite  $C_{mi}$  değişen İN sayısına ( $n$ ) göre farklı alıcı konsantrasyonları için gösterilmektedir.  $C_{mi}$  alıcı konsantrasyonu artırılarak iyileştirilebilir. Bu yüzden istenilen yüksek düzeyde kapasite için, İN sayısına göre alıcı konsantrasyonu seçilmelidir.



Şekil 3.  $C_{mi}$  farklı  $k_1$  değerleri için İN sayısına ( $n$ ) göre gösterilmektedir.



Şekil 4.  $C_{mi}$  farklı  $\mu_x$  değerleri için İN sayısına ( $n$ ) göre gösterilmektedir.



Şekil 5.  $C_{mi}$  farklı N değerleri için İN sayısına (n) göre gösterilmektedir.

#### 9.5. Sonuç

Bu çalışmada, biyolojideki doğal ligand-yapışma mekanizmaları kullanılarak, tekli ve çoklu-erişim moleküler kanalların kapasiteleri incelenmiştir. Sayısal sonuçlar gösteriyor ki daha yüksek kapasiteler elde etmek için moleküler haberleşme parametrelerini yeterli ve etkili bir biçimde ayarlamak bir zorunluluktur. Bu yüzden bu ayarlamayı sağlayacak yeterli moleküler haberleşme algoritmaları da nano-makinaların bir nano-ağda güvenilir biçimde moleküler bilgi paylaşmaları açısından zorunludur.

#### KAYNAKLAR

- [1] HIYAMA S. , Y. Moritani, T. Suda, R. Egashira, A. Enomoto, M. Moore and T. Nakano, "Molecular Communication", In Proc. of NSTI Nanotech 2005, Anaheim, California, USA.
- [2] AKYILDIZ I. F. , F. Brunetti, C. Blazquez, "NanoNetworking: A New Communication Paradigm", Computer Networks Journal (Elsevier), June 2008.
- [3] MOORE M. , A. Enomoto, T. Nakano, R. Egashira, T. Suda, A. Kayasuga, H. Kojima, H. Sakakibara, K. Oiwa, "A Design of a Molecular Communication System for Nanomachines Using Molecular Motors", In Proc. of IEEE PERCOMW 2006, Italy, 2006.
- [4] ATAKAN B. , O. B. Akan, "On Channel Capacity and Error Compensation in Molecular Communication", to appear in Springer Trans. on Computational System Biology.
- [5] ATAKAN B. , O. B. Akan, "On Molecular Multiple-Access, Broadcast and Relay Channels in Nanonetworks", to appear in ACM BIONETICS 2008, Hyogo, Japan, December, 2008.
- [6] ROSPARS J. P. , V. Krivan, P. Lansky "Perireceptor and receptor events in olfaction. Comparison of concentration and flux detectors: a modeling study.", Chem. Sens., vol. 25, pp. 293-311, 2000.
- [7] KRIVAN V. , P. Lansky, J. P. Rospars, "Coding of periodic pulse stimulation in chemoreceptors", Elsevier Biosystem, vol. 67, pp. 121-128, 2002.
- [8] MALAKA R. , T. Ragg, and M. Hammer, "Kinetic models of odor transduction implemented as artificial neural networks", Biological Cybernetics, vol. 73, pp. 195-207, 1995.
- [9] NORTHRUP S. H. , S. A. Allison, J. A. McCammon, "Brownian dynamics simulation of diffusion-influenced bimolecular reactions", Journal of Chemical Physics, vol. 80, pp. 1517-1524, 1984.
- [10] BERG H. C. and E. M. Purcell , "Physics of chemoreception", Biophysical Journal, vol. 20, pp. 193-219, 1977.

- [11] CHANG K. C. , D. A. Hammer, "The Forward Rate of Binding of Surface-Tethered Reactants: Effect of Relative Motion between Two Surfaces", *Biophysical Journal*, vol. 76, no. 3, pp. 1280-1292, 1999.
- [12] COOPER M. A. , "Label-free screening of bio-molecular interactions", *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 377, pp. 834-842, 2003.
- [13] COVER T. M. , J. A. Thomas, "Elements of information theory", John Wiley-Sons, 2006.
- [12] M. A. Cooper, "Label-free screening of bio-molecular interactions", *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 377, pp. 834-842, 2003.
- [13] T. M. Cover, J. A. Thomas, "Elements of information theory", *John Wiley-Sons*, 2006.

## 10. BİYOLOJİK ESİNLİ AĞ OLUŞTURMA ÜSTÜNE BİR TARAMA

### 10.1. Giriş

Haberleşme ve ağ oluşturma teknolojileri varolan ve öngörölmüş çok sayıda bilgi ağı yapılarına yol açtı. Bu ağlara örnek olarak bilişsel radyo ağları, sensör ve aktör ağları, kuantum haberleşme ağları, karasal yeni nesil İnternet, ve İPN (Gezegenerler arası) İnternet sayılabilir. Fakat, geniş ölçekle birlikte artan karmaşıklık, bu ağların dinamik doğası, kaynak kısıntısı, çok-türel mimarileri, merkezi kontrol eksikliği ya da elverişsizliği, kalımlılık ihtiyacı, potansiyel hataların gözetimsiz çözümü gibi bu ağların pratikte gerçekleşmesi için odaklanması gereken bir çok bilinen önemli güçlük mevcuttur. Bu güçlükler doğa tarafından başarılı biçimde alt edildi ve milyonlarca yıllık evrim sonucunda yaradılıştan çekici karakteristik özelliklere sahip biyolojik sistemler ve süreçler oluştu. Bu karakteristik özelliklere örnek olarak değişen çevre koşullarına uyum sağlama, hata ve zararlara karşı doğasından gelen dayanıklılık, bir takım kurallara dayanarak işbirliği içinde ve bireylerin toplamından daha geniş olan global zeka ile operasyon, kendini örgütlenme, hayatta kalma, ve evrimleşme verilebilir. Bu çalışmada biyolojik esinli ağ oluşturmada en son teknoloji anlatılmaktadır. Biyolojiyi bir ilham kaynağı olarak alan, ve bu sistemlerin kural ve dinamiklerini taklit ederek oluşturulan biyolojik esinli varolan ağ oluşturma ve haberleşme protokolleri ve algoritmaları biyolojik esinli ağ oluşturma açısından açık araştırma alanlarıyla birlikte sunulmaktadır. Ayrıca biyolojik esinli ağ oluşturma alanı nano-ağların gelecek araştırma alanlarıyla ilintilendirilmektedir. Bu çalışmada amaç geniş bir alan olan biyolojik esinli ağ oluşturma hakkındaki en son teknolojinin ve araştırma konularının daha iyi anlaşılmasını sağlamak ve araştırmacı camiasına bu uygun zamanlı ve heyecan verici konuda gelecekteki keşfedici faaliyetlerinde cazip ipuçları bulmaları için yardımcı olmaktır. Aşağıda kısaca çalışmanın genel şeması ve bu şemaya ait yapılanlar özet olarak verilmiştir.

### 10.2. Ağ Oluşturma Güçlükleri

Öncelikle, ağ oluşturmada en çok güçlük yaratan temel konulara göz atılıyor, karşıtlarıyla benzerlikleri kuruluyor, ve biyolojik sistemlerde zaten varolan uygun çözümler vurgulanıyor.

#### 10.2.1. Güçlük yaratan konular

Varolan ve yeni nesil ağlara ait ve haberleşme teknolojilerindeki evrim sonucu gelmiş ana genel güçlüklerle ve bunlara verilmiş artan öneme göz atılıyor.

##### 10.2.1.1 Geniş ölçekli ağlar

Ana güçlüklerden biri, büyük sayılarda kullanıcı ve aletleri tek ve tümüyle kapsamlı ve tercihen her zaman açık bir ağda bağlayan ağ sistemleri tarafından gösterilen büyük genişlikle ilgilidir.

Böyle geniş ölçeklerin ilk sonucu ağ üstünde oluşan büyük trafik miktarıdır. Büyük ölçekte bir ağ üzerinde büyük miktar bilgi dağıtılması sırasında oluşan fazladan yükü kabul edilebilir seviyelerde tutmak için mümkünse optimum yönlendirmeyi bulmak daha önemli bir hal alır.

Ağ oluşturma mekanizmaları ölçeklenebilir ve ağ boyutundaki değişikliklere uyumlu olmalıdır. Şans eseri, geniş ölçekli ağlara haberleşme çözümleri dizaynı için ilham alan bir çok sayıda biyolojik sistem mevcuttur. Karınca Kolonisi Optimizasyonu ve salgın yönlendirme karşılaşılan problemlerin olası çözümleri arasındadır. Geniş ölçekli ağlarda karşılaşılan potansiyel ters etkilerle biyolojik esinli mekanizmalarla baş edilebilir.

##### 10.2.1.2. Dinamik doğa

Varolan ve planlanmış ağ mimarileri düğüm noktası davranışları, trafik ve bant genişliği gereksinim motifleri, kanal ve ağ koşulları açısından oldukça dinamiktir. Haberleşme teknikleri özel ağ ortamının dinamiklerine uyumlu olmalıdır. Bu durumda, biyolojik sistemler ve süreçlerin hayatta kalmak için kendilerini değişen şartlara uyumlu hale getirme yetenekleri olduğunu biliyoruz. Örnek olarak memeli bağışıklık sisteminin süreçleri ve ilkelerinden esinlenmiş Yapay Bağışıklık Sistemi (YBS), canlandırıcı-engelleyici sistemler, ve biyolojik sistemlerdeki reaksiyon-difüzyon mekanizmalarının analizleri verilebilir.

##### 10.2.1.3. Kaynak kısıntıları

Haberleşme teknolojileri geliştikçe, ağlar üzerindeki gereksinimler de yüksek düzeyde artar. Gereksinimin arttığı alanlar olarak elde bulunan servisler seti ve bant genişliği ve kapasiteyi içeren servis kalitesini örnek olarak verebiliriz. Yine, biyolojik sistemler araştırmacılara yüksek gereksinim ve kısıtlı kaynaklar arasındaki ödünleşimi gösteren mekanizma ve çözümler sunarak yardım etmektedir.



Karınca kolonilerinin yiyecek ararken gösterdikleri davranışları bir çok kaynak-yeterlikli ağ oluşturma tekniğine ilham kaynağı olmuştur. Ayrıca, hücrel sinyal ağları ve yapay karşılıkları yaşayan bir hücrenin fonksiyonlarına katkıda bulunan etkileşimlerin dinamiklerini temsil eder.

#### 10.2.1.4. Altyapısız ve otonom operasyon ihtiyacı

Varolan ve yeni nesil bilgi ağları kendini örgütlenme, kendini evriltme ve hayatta kalma yeteneğine sahip olmalıdırlar. Bir çok biyolojik sistemin doğasında varolan özellikler bu güçlükler için vaat eder nitelikte çözümler taşımaktadır. Örneğin, salgın yayılma mekanizması, merkezi bir yapının kontrolü olmadan global görevler yerine getiren karınca ve böcek kolonileri, ateş böceklerinin senkronizasyon ilkeleri, canlandırıcı-engelleyici sistemler ve yapay bağışıklık sisteminin otonom davranışları örnek olarak gösterilebilir.

#### 10.2.1.5. Çok-türel mimariler

Varolan ve planlanan haberleşme ağlarının diğer bir kritik tarafı onların çok-türel mimarileri ve bunun sonucu olarak çeşitli ağ elemanlarından ve çok çeşitli etkileşimlerinden oluşan oldukça komplike global davranışlarıdır. Çeşitli düzeylerde çok-türel yapılar biyolojik sistemlerde de gözlemlenir. Dış rahatsızlık etmenlerine rağmen bir çok biyolojik organizma sabit bir içsel durumu korur. Bunu çok-türel alt sistemlerin ve mekanizmaların ortaklaşa bir çabası sonucu olarak başarır. Örneğin sinir sistemi, endokrin sistemi ve bağışıklık sistemleri çok-türel yapının bileşenlerine örnek olarak verilebilir. Bu fonksiyon "homeostazi" olarak adlandırılır.

#### 10.2.2. Mikro düzeyde haberleşme

Haberleşme ve ağ gereklilikleri nano-ağ ölçek düzeyinde de fonksiyonel bir bakış açısıyla aynı görünse de, geleneksel ve nano/mikro düzeylerde haberleşme arasında büyük farklar vardır. Nano-ağ düzeyinde haberleşmede karşılaşılan güçlüklerin çözümü varolan biyolojik yapılardan ve haberleşme mekanizmalarından esinlenerek çözülebilir. Organizmalardaki bir çok biyolojik birim nano-makinelerle aynı yapıya sahiptir, örneğin yaşayan hücreler ve moleküler iletim ve alım mekanizmaları sayılabilir. Hücrel sinyalleşme ağlarından ve moleküler haberleşmeden elde edilen esinler araştırma sürecinde önemli yönlendirme görevi üstlenebilir.

### 10.3. Haberleşme Ağ Mimarlarına (Mimarilerine) İlham Kaynağı Olan Biyolojik Modeller

Bu bölümde biyolojik esinli ağlara genel bakış açısı verilmektedir. Bu, biyolojik yapıların belirlenmesinin, haberleşme ağlarına uygun tekniklerin, sistem modellemenin, sistem özelliklerinin, ve optimum teknik çözümlerin çıkarımının tartışılmasıyla başarıyor. İkinci olarak biyolojik esinli ağ yaklaşımları sınıflandırılıyor.

#### 10.3.1 Modelleme yaklaşımları

Etkisi büyük olan biyolojik esinli metotları gerçekleştirmek için 3 ayrı adım belirlenebilir:

1. Benzerliklerin belirlenmesi, hangi yapılar ve metotlar benzer görünüyor.
2. Anlama, gerçek biyolojik davranışın detaylı modellenmesinin anlaşılması.
3. Mühendislik, model basitleştirilmesi ve teknik uygulamalar için gerekli ayarın verilmesi.

#### 10.3.2 Sınıflandırma ve kategorize etme

Hesaplama ve haberleşme alanıyla ilgili problemlerin biyolojik esinli çözümleri 3 uygulama alanına ayrılabilir: Biyolojik esinli hesaplama, biyolojik esinli sistemler, biyolojik esinli ağlar. Biyolojik ilkeler açısından bakınca, ağ oluşturmada bazı uygulama alanları sınıflanabilir:

8. Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO)
9. Ateş böceği Senkronizasyonu
10. Canlandırıcı-Engelleyici Sistemler
11. Salgın Yayılım
12. Hücrel Sinyalleşme Ağları

### 10.4. Biyolojik Esinli Ağlara Yaklaşımlar

Çeşitli ağ oluşturma paradigmaları hakkındaki örneklere dayanarak, biyolojik esinli sistemlerdeki varolan en son teknolojiyi tanıtıyoruz. Haberleşme ağlarındaki avantajları daha açıkça gösteren daha

detaylı bir sunum için belli sayıda teknik ve metotları seçtik. Konuyu tartışırken, biyolojik olayın ve ilkelerin gerekli modellenmesi ve ağ oluşturmada uygulanması konularına özellikle ışık tuttuk.

#### 10.4.1. Karınca Kolonisi Optimizasyonu

Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) topluluk zekası alanının belki en iyi incelenen dalıdır. KKO'nun temel kavramlarına dayanarak seçili bazı uygulamalar aşağıda tartışılmaktadır.

##### 10.4.1.1. Yönlendirme

KKO'nun ağ oluşturma alanında bilinen en iyi örnekleri belki Antnet (DI CARO, 1998) ve AntHocNet (DI CARO, 2005) yönlendirme protokolleridir. Her iki protokol de karınca yönlendirmesinin temel kavramlarını takip eder. Yönlendirme alanında bahsedilmesi gereken bir diğer çalışma bindirmeli ağlarda öz-uyarlamalı çoklu-izli yönlendirmedir (LEIBNITZ, 2006),(LEIBNITZ, 2006).

##### 10.4.1.2. Görev Dağıtımı

Aynı kavramlara dayanarak SANET'lerde birleşik görev dağıtımı ve yönlendirme incelendi (LABELLA, 2004), (LABELLA, 2007). Öngörülen mimari tamamen olasılıksal kararlara tabidir.

##### 10.4.1.3. Görevdeş ağlarda arama

Görevdeş (P2P) ağlarda arama genellikle merkezi veya dağıtılmış arama tablolarına bakarak yapılır. Karınca temelli bakış açılarının kullanılmasının bu alanda karşılaşılan bazı tipik problemleri çözeceği beklenmektedir. Karınca esinli bir görevdeş sistem olan Antares, saklama ve kopyalama işlemini KKO kavramlarıyla yöneten üstlenicileri kullanır.

#### 10.4.2. Ateşböceği Senkronizasyonu

Ateşböceklerinin senkronizasyon ilkelerine dayalı yeni saat senkronizasyonu modelleri ileri sürüldü. Bu saat senkronizasyonunun kablosuz ağlar için genel uygulaması (TYRRELL, 2007)'de tartışılmaktadır. Sensör ağlarda senkronizasyon tabanlı data toplama (WAKAMIYA, 2005)'de sunuldu. Bindirmeli ağlar için benzer bir senkronizasyon şeması (BABA OGLU, 2007)'de sunuldu.

#### 10.4.3. Canlandırıcı-Engelleyici Sistemler

Canlandırıcı-engelleyici sistemlerin karakteristiklerini keşfetmek için temel yapılması gereken reaksiyon-difüzyon mekanizmalarının analizidir. Reaksiyon-difüzyon motif oluşumu akıllı sensör ağlarında yüksek düzey görevleri desteklemek için kullanılır. Sensör koordinasyonu canlandırıcı-engelleyici sistemleri görevlendirmek için başlıca alanlardan biridir. (NEGLIA, 2007)'de motif oluşturma modelleri sensör düğüm noktalarının açık-kapalı çevrimlerini koordine etmek için kullanılmaktadır.

#### 10.4.4. Yapay Bağışıklık Sistemi

Yapay Bağışıklık Sistemi (YBS), problem çözümü amacıyla teorik ve deneysel bağışıklık biliminden esinlenen uyarlamalı sistemlere değinen bir terminolojiye atfeder (CASTRO, 2002). YPS ilk kez Kephart tarafından geliştirildi (KEPHART, 1994). Bilgisayar ve haberleşme sistemlerindeki başarılı uygulamalarını konu alan ilk yaklaşımlar (HOFMEYR, 2000),(HOFMEYR, 1999)'de sunulmaktadır. Aynı zamanda konuyla ilgili bir takım sistemik çerçeveler de mevcuttur. YPS'nin dizayn aşamasına odaklanan Castro ve Timmis (CASTRO, 2002) bağışıklık mühendisliği çerçevesi sundular. Ağ oluşturmada cinsine özgü bir uygulama için benzer bir kavramsal çerçeve (STEPNEY, 2005)'de sunuldu. Data analizi ve ayrıklık yakalanması tipik uygulama alanını temsil eder (CASTRO, 2002). Sensör ağlarda bağışıklık sistemi tabanlı dağıtımli düğüm ve hız seçim uygulaması (ATAKAN, 2006)'de sunulur. MANET'lerde ters hareket yakalamaya YBS tabanlı yaklaşım (LE BOUDEC, 2004)'de sunulur.

#### 10.4.5. Salgın Yayılımı

Salgın yayılımı kablosuz ve özel amaçlı ağlarda bilgi dağılımını anlamak sıklıkla bir benzetim olarak kullanılır. Salgın haberleşmenin bilgisayar ağlarında geniş bir uygulama alanı vardır. Öncelikle odak konusu, mobil ve özel amaçlı ağlarda yönlendirmedir, fakat fırsatçı yönlendirmeye de artan bir ilgi vardır (SHAH, 2005). Oldukça bölüntülenmiş mobil ağlarda salgın yayılımının anlaşılması (CARRERAS, 2006)'de çalışıldı. İçsel karakteristikleri incelemek için salgın bilgi dağılımının özellikleri dikkatlice incelendi (HAYASHI, 2006). Geniş ölçekli ağlarda salgın yayılımının dayanıklı haberleşme için gücü değişik açılardan (VOGELS, 2003), (TSUCHIYA, 2004), (OKUYAMA, 2006)'de incelendi. Doğru bilgi toplama yapısına karar verme problemi ağ dizayn etme probleminin bir varyasyonu olarak

görülebilmektedir. Bu soruna, memeli dolaşım sistemini temel alan buluşsal bir çözüm sunulur (PAPPAS, 2008).

#### 10.4.6. Hüresel Sinyalleşme Ağları

Temel olarak, sinyalleşme tek sinyalci moleküller arasındaki etkileşimi ifade eder (WENG, 1999). Sinyal erişim yolu (ALBERTS, 1994),(PAWSON, 1995) olarak da bilinen böylece haberleşme çok yeterli ve özel bir haberleşmenin örneğidir. Bu alanda hücre-içi ve hücreler arası sinyalleşme iki farklı tekniktir. Yapay sinyal ağlarını kullanan birkaç yaklaşımdan bahsedildi, fakat bunların çoğu sensör ağları gibi yoğun dağıtılmış sistemler için programlama şematiklerini hedef alır.

##### 10.4.6.1. Kural Tabanlı Sensör Ağı

Kural tabanlı sensör ağı 'SANET' ler için hafif bir programlama şemasıdır (DRESSLER, 2007), (DRESSLER, 2008).

##### 10.4.6.2. Fraglets

Haberleşme protokolleri için metabolik bir işletim modeline Fraglets ismi verildi (TSCHUDIN, 2003). Kural tabanlı sensör ağına benzer biçimde bu model de data merkezli haberleşme kavramını temel alır.

#### 10.5. Nano-ölçek ve Moleküler Haberleşme

Haberleşme ve ağ fonksiyonel gerekliliklerinin benzerliklerine rağmen, geleneksel ağlardan farklı olarak nano-ölçek ağlar bazı özel güçlükler getirir. Genellikle, nano-makinalar ya varolan elektro-mekanik makineleri taklit ederler, ya da moleküler motor ve alıcılar gibi doğadan gelen nano-makineleri taklit ederler. Kullanılabilir hafıza ve işlem yeteneği oldukça sınırlıdır. Haberleşme ortamı ve kanal karakteristikleri bu ölçeklerdeki fiziksel kanunlar yüzünden geleneksel durumlardan oldukça saparlar. Nano-makinalar ve nano-ölçek haberleşme ve ağların ardındaki motivasyon, esin ve başlangıç fikri biyolojik sistem ve süreçlerden gelir. Hüresel sinyalleşme ağları nano-ağlar için temel esin kaynağıdır. Bu yüzden, haberleşme ve ağ problemleri için çözüm yaklaşımları benzer biyolojik süreçlerden esinlenebilir. Doğada, biyolojik birimler arasındaki moleküler haberleşme ligand alıcı yapışma mekanizmasına göre oluşur. Moleküler haberleşmeyi temel alan nano-ölçek haberleşme ağları hakkında belli sayıda çalışma yapıldı. Bu sayede nano-makinalar birbirleriyle iletişimde molekülleri bilgi taşıyıcısı olarak kullandılar, ve nano-ağlar için en çok vaat eden haberleşme paradigması olarak günümüzde yerini aldı.

#### 10.6. Sonuç

Bilişsel radyo ağları, sensör ve aktör ağları, kuantum haberleşme ağları, karasal yeni nesil İnternet, IPN (Gezegenler arası) İnternet, ve taşıtlar arası haberleşme ağları, gerçekleştirmelerinde geniş ölçekli ağlarda artan karışıklık, çok-türel mimariler, merkezi kontrol eksikliği, hayatta kalma ihtiyacı ve potansiyel hataların gözetimsiz çözümünü büyük engellerle karşılaşıyorlar. Aynı zamanda, değişen ortamlara uyum sağlama, hata ve zararlara karşı doğasından gelen dayanıklılık, başarılı, işbirliği içinde, pratik ve basit operasyon, kendini örgütlenme, hayatta kalma, ve evrimleşme gibi yaradılıştan gelen çekici özelliklere sahip bir çok biyolojik sistem ve süreç mevcuttur. Bu çalışmada genel temel ağ oluşturma güçlükleri, biyolojik esinli ağ oluşturma perspektifinden bakan şu anki araştırma çabalarının durumu anlatılmaktadır. Biyolojiden esinlenme gerçekten yenilikçi ağ tasarımı oldukça güçlü olan bir kaynaktır. Bu alandaki yabana atılmayacak sayıda devam eden araştırmaya rağmen, biyolojik esinli ağ oluşturma araştırma topluluğu hala çok gençtir, ve hala varolan ve gelecekteki ağ mimarilerini oluşturmada temel güçlükleri ifade eden bir çok zor görev mevcuttur.

#### KAYNAKLAR

- [1] CIRAC J. I. , S. J. van Enk, P. Zoller, H. J. Kimble, H. Mabuchi, Quantum Communication in a Quantum Network, Physica Scripta T76 (1998) 223–232.
- [2] AKYILDIZ I. F. , O. B. Akan, C. Chen, J. Fang, W. Su, The state of the art in interplanetary İnternet, IEEE Communications Magazine 42 (7) (2004) 108–118.
- [3] DOBSON S. , S. Denazis, A. Fernandez, D. Gaiti, E. Gelenbe, F. Massacci, P. Nixon, F. Sare, N. Schmidt, F. Zambonelli, A Survey of Autonomic Communications, ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS) 1 (2) (2006) 223–259.
- [4] ASHOK R. L. , D. P. Agrawal, Next-Generation Wearable Networks, IEEE Computer 36 (11) (2003) 31–39.

- [5] ATAKAN B. , O. B. Akan, An Information Theoretical Approach for Molecular Communication, in: 2nd IEEE/ACM International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (IEEE/ACM BIONETICS 2007), Budapest, Hungary, 2007.
- [6] AKYILDIZ I. F. , D. Pompili, T. Melodia, Underwater acoustic sensor networks: research challenges, Elsevier Ad Hoc Networks 3 (3) (2005) 257–279.
- [7] AKYILDIZ I. F. , I. H. Kasimoglu, Wireless Sensor and Actor Networks: Research Challenges, Elsevier Ad Hoc Networks 2 (2004) 351–367.
- [8] DRESSLER F. , A Study of Self-Organization Mechanisms in Ad Hoc and Sensor Networks, Elsevier Computer Communications 31 (13) (2008) 3018–3029.
- [9] AKYILDIZ I. F. , W.-Y. Lee, M. C. Vuran, S. Mohanty, NeXt generation /dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey, Elsevier Computer Networks 50 (13) (2006) 2127–2159.
- [10] DRESSLER F. , Self-Organization in Sensor and Actor Networks, John Wiley & Sons, 2007.
- [11] TIMMIS J. , M. Neal, J. Hunt, An Artificial Immune System for Data Analysis, Biosystems 55 (2000) 143–150.
- [12] CAMAZINE S., J.-L. Deneubourg, N. R. Franks, J. Sneyd, G. Theraula, E. Bonabeau, Self-Organization in Biological Systems, Princeton University Press, 2003.
- [13] BONABEAU E. , M. Dorigo, G. Theraulaz, Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems, Oxford University Press, 1999.
- [14] AKYILDIZ I. F. ,W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci,Wireless sensor networks: a survey, Elsevier Computer Networks 38 (2002) 393–422.
- [15] AKYILDIZ I. F., X. Wang, W. Wang, Wireless mesh networks: a survey, Elsevier Computer Networks 47 (4) (2005) 445-487.
- [16] AKAN O. B., I. F. Akyildiz, Event-to-Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks, IEEE/ACM Transactions on Networking (TON) 13 (5) (2005) 1003–1016.
- [17] ATAKAN B. , O. B. Akan, Immune System Based Distributed Node and Rate Selection in Wireless Sensor Networks, in: 1st IEEE/ACM International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (IEEE/ACM BIONETICS 2006), IEEE, Cavalese, Italy, 2006.
- [18] DORIGO M. , V. Maniezzo, A. Coloni, The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 26 (1) (1996) 1–13.
- [19] DI CARO G. , F. Ducatelle, L. M. Gambardella, AntHocNet: An adaptive nature-inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks, European Transactions on Telecommunications, Special Issue on Selforganization in Mobile Networking 16 (2005) 443–455.
- [20] VOGELS W. , R. van Renesse, K. Briman, The Power of Epidemics: Robust Communication for Large-Scale Distributed Systems, ACM SIGCOMM Computer Communication Review 33 (1) (2003) 131–135.
- [21] TSUCHIYA T. , T. Kikuno, An Adaptive Mechanism for Epidemic Communication,in: 1st International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (Bio-ADIT2004), Vol.LNCS 3141, Springer, Lausanne, Switzerland, 2004.
- [22] CARRERAS I. , D. Miorandi, G. S. Carright, K. Engo-Monsen, Understanding the Spread of Epidemics in Highly Mobile Networks, in: 1st IEEE/ACM International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (IEEE/ACM BIONETICS 2006), IEEE, Cavalese, Italy, 2006.
- [23] CHLAMTAC I. , M. Conti, J. J. Liu, Mobile ad hoc networking: imperatives and challenges, Elsevier Ad Hoc Networks 1 (1) (2003) 13–64.
- [24] HOFMEYR S. A. , S. Forrest, Architecture for an Artificial Immune System, Evolutionary Computation 8 (4) (2000) 443–473.
- [25] HENDERSON T. C. , R. Venkataraman, G. Choikim, G. Choikim, Reaction-Difusion Patterns in Smart Sensor Networks, in: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004), IEEE, New Orleans, LA, 2004, pp. 654–658.
- [26] YOSHIDA A. , K. Aoki, S. Araki, Cooperative control based on reaction-difusion equation for surveillance system, in: 9th International Conference on Knowledge-Based & Intelligent Information & Engineering Systems (KES 2005), Vol. LNCS 3684, Melbourne, Australia, 2005.
- [27] ATAKAN B. , O. B. Akan, Immune System-based Energy Ecient and Reliable Communication inWireless Sensor Networks, in: F. Dressler, I. Carreras (Eds.), Advances in Biologically Inspired Information Systems - Models, Methods, and Tools, Vol. 69 of Studies in Computational Intelligence (SCI), Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007, pp. 187–208.
- [28] METCALFE B. , The next-generation Internet, IEEE Internet Computing 4 (1) (2000) 58–59.

- [29] DORIGO M. , G. Di Caro, L. M. Gambardella, Ant Algorithms for Discrete Optimization, *Artificial Life* 5 (2) (1999) 137-172.
- [30] ATAKAN B. , O. B. Akan, Biologically-inspired Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks, in: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC 2007)*, Hong Kong, China, 2007.
- [31] RICHMOND C. A. , Fireflies Flashing in Unison, *Science* 71 (1847) (1930) 537–538.
- [32] DRESSLER F. , Self-Organized Event Detection in Sensor Networks using Bio-inspired Promoters and Inhibitors, in: *3rd ACM/ICST International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (Bionetics 2008)*, ACM, Hyogo, Japan, 2008.
- [33] DRESSLER F. , Bio-inspired Feedback Loops for Self-Organized Event Detection in SANETs, in: *3rd IEEE/IFIP International Workshop on Self-Organizing Systems (IWSOS 2008)*, Vol. LNCS 5343, Springer, Vienna, Austria, 2008, pp. 256–261, to appear.
- [34] BOUKERCHE A. , H. Oliveira, E. Nakamura, A. Loureiro, Vehicular Ad Hoc Networks: A New Challenge for Localization-Based Systems, *Elsevier Computer Communications* 31 (12) (2008) 2838–2849.
- [35] NEAL M. , J. Timmis, Once More Unto the Breach: Towards Artificial Homeostasis?, in: L. N. De Castro, F. J. Von Zuben (Eds.), *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*, Idea Group, 2005, pp. 340–365.
- [36] LABELLA T. H. , M. Dorigo, J.-L. Deneubourg, Self-Organised Task Allocation in a Group of Robots, in: *7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS04)*, Toulouse, France, 2004.
- [37] LABELLA T. H. , F. Dressler, A Bio-Inspired Architecture for Division of Labour in SANETs, in: F. Dressler, I. Carreras (Eds.), *Advances in Biologically Inspired Information Systems - Models, Methods, and Tools*, Vol. 69 of *Studies in Computational Intelligence (SCI)*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007, pp. 209–228.
- [38] LEIBNITZ K. , N. Wakamiya, M. Murata, Resilient Multi-Path Routing Based on a Biological Attractor Selection Scheme, in: *2nd International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (Bio-ADIT 2006)*, Vol. LNCS 3853, Springer, Osaka, Japan, 2006, pp. 48–63.
- [39] LEIBNITZ K. , N. Wakamiya, M. Murata, Biologically-Inspired Self-Adaptive Multi-Path Routing in Overlay Networks, *Communications of the ACM, Special Issue on Self-Managed Systems and Services* 49 (3) (2006) 63–67.
- [40] AKYILDIZ I. F. , F. Brunetti, C. Blázquez, Nanonetworks: A New Communication Paradigm, *Elsevier Computer Networks* 52 (2008) 2260–2279.
- [41] ALBERTS B. , D. Bray, J. Lewis, M. Ra, K. Roberts, J. D. Watson, *Molecular Biology of the Cell*, 3rd Edition, Garland Publishing, Inc., 1994.
- [42] NAKANO T. , T. Suda, M. Moore, R. Egashira, A. Enomoto, K. Arima, Molecular Communication for Nanomachines Using Intercellular Calcium Signaling, in: *5th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE NANO 2005)*, Nagoya, Japan, 2005, pp. 478–481.
- [43] EIGEN M. , P. Schuster, *The Hypercycle: A Principle of Natural Self Organization*, Springer, 1979.
- [44] ASHBY W. R. , Principles of the Self-Organizing System, in: H. von Foerster, G. W. Zopf (Eds.), *Principles of Self-Organization*, Pergamon Press, 1962, pp. 255–278.
- [45] WANG M. , T. Suda, The Bio-Networking Architecture: A Biologically Inspired Approach to the Design of Scalable, Adaptive, and Survivable /Available Network Applications, in: *1st IEEE Symposium on Applications and the Internet (SAINT)*, San Diego, CA, 2001.
- [46] SUZUKI J. , T. Suda, Adaptive Behavior Selection of Autonomous Objects in the Bio-Networking Architecture, in: *1st Annual Symposium on Autonomous Intelligent Networks and Systems*, Los Angeles, CA, 2002.
- [47] LEE C. , H. Wada, J. Suzuki, Towards a Biologically-inspired Architecture for Self-Regulatory and Evolvable Network Applications, in: F. Dressler, I. Carreras (Eds.), *Advances in Biologically Inspired Information Systems - Models, Methods, and Tools*, Vol. 69 of *Studies in Computational Intelligence (SCI)*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007, pp. 21–46.
- [48] WEBB B. , What does robotics oer animal behaviour?, *Animal Behavior* 60 (5) (2000) 545–558.
- [49] DRESSLER F. , Bio-Inspired Networking - Self-organizing Networked Embedded Systems, in: R. P. Wurtz (Ed.), *Organic Computing*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2008, pp. 285–302.
- [50] LEIBNITZ K. , N. Wakamiya, M. Murata, Biologically Inspired Networking, in: Q. Mahmoud (Ed.), *Cognitive Networks: Towards Self-Aware Networks*, John Wiley & Sons, 2007, pp. 1–21.

- [51] DRESSLER F. , I. Carreras (Eds.), *Advances in Biologically Inspired Information Systems - Models, Methods, and Tools*, Vol. 69 of *Studies in Computational Intelligence (SCI)*, Springer, 2007.
- [52] LEE U. , E. Magistretti, M. Gerla, P. Bellavista, P. Li'ò, K.-W. Lee, *Bio-inspired Multi-Agent Data Harvesting in a Proactive Urban Monitoring Environment*, Elsevier *Ad Hoc Networks* Available online: 10.1016/j.adhoc.2008.03.009.
- [53] DI CARO G. , M. Dorigo, *AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communication Networks*, *Journal of Artificial Intelligence Research* 9 (1998) 317–365.
- [54] WANG J., E. Osagie, P. Thulasiraman, R. K. Thulasiram, *HOPNET: A Hybrid ant colony OPTimization routing algorithm for Mobile ad hoc NETWORK*, Elsevier *Ad Hoc Networks* Available online: 10.1016/j.adhoc.2008.06.001.
- [55] MICHELMAYR E. , *Self-Organization for Search in Peer-to-Peer Networks*, in: F. Dressler, I. Carreras (Eds.), *Advances in Biologically Inspired Information Systems - Models, Methods, and Tools*, Vol. 69 of *Studies in Computational Intelligence (SCI)*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007, pp. 247–266.
- [56] FORESTIERO A. , C. Mastroianni, G. Spezzano, *Antares: an Ant-Inspired P2P Information System for a Self-Structured Grid*, in: *2nd IEEE/ACM International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (IEEE/ACM BIONETICS 2007)*, Budapest, Hungary, 2007.
- [57] MIROLLO R. E. , S. H. Strogatz, *Synchronization of Pulse-Coupled Biological Oscillators*, *SIAM Journal on Applied Mathematics* 50 (6) (1990) 1645–1662.
- [58] TYRRELL A. , G. Auer, C. Bettstetter, *Fireflies as Role Models for Synchronization in Ad Hoc Networks*, in: *1st IEEE/ACM International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (IEEE/ACM BIONETICS 2006)*, IEEE, Cavalese, Italy, 2006.
- [59] TYRRELL A. , G. Auer, C. Bettstetter, *Biologically Inspired Synchronization for Wireless Networks*, in: F. Dressler, I. Carreras (Eds.), *Advances in Biologically Inspired Information Systems - Models, Methods, and Tools*, Vol. 69 of *Studies in Computational Intelligence (SCI)*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007, pp. 47–62.
- [60] TYRRELL A. , G. Auer, *Imposing a Reference Timing onto Firefly Synchronization in Wireless Networks*, in: *65th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2007-Spring)*, IEEE, Dublin, Ireland, 2007, pp. 222–226.
- [61] WAKAMIYA N. , M. Murata, *Synchronization-Based Data Gathering Scheme for Sensor Networks*, *IEICE Transactions on Communications, Special Issue on Ubiquitous Networks E88-B (3) (2005)* 873–881.
- [62] BABAUGLU O. , T. Binci, M. Jelasity, A. Montresor, *Firefly-inspired Heartbeat Synchronization in Overlay Networks*, in: *1st IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO 2007)*, IEEE, Boston, MA, 2007, pp. 77- 86.
- [63] TURING A. M. , *The Chemical Basis for Morphogenesis*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 237 (641) (1952) 37–72.
- [64] HYODO K. , N. Wakamiya, E. Nakaguchi, M. Murata, Y. Kubo, K. Yanagihara, *Experiments and Considerations on Reaction-Difusion based Pattern Generation in a Wireless Sensor Network*, in: *IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (IEEE WoWMoM 2007)*, IEEE, Helsinki, Finland, 2007, pp. 1–6.
- [65] DIETRICH I. , F. Dressler, *On the Lifetime of Wireless Sensor Networks*, *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 5 (1), to appear.
- [66] NEGLIA G. , G. Reina, *Evaluating Activator-Inhibitor Mechanisms for Sensors Coordination*, in: *2nd IEEE/ACM International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (IEEE/ACM BIONETICS 2007)*, Budapest, Hungary, 2007.
- [67] DRESSLER F. , I. Dietrich, R. German, B. Krüger, *Efficient Operation in Sensor and Actor Networks Inspired by Cellular Signaling Cascades*, in: *1st ACM/ICST International Conference on Autonomic Computing and Communication Systems (Autonomics 2007)*, ACM, Rome, Italy, 2007.
- [68] CASTRO L. N. de , J. Timmis, *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach*, Springer, 2002.
- [69] KEPHART J. O. , *A Biologically Inspired Immune System for Computers*, in: *4th International Workshop on Synthesis and Simulation of Living Systems*, MIT Press, Cambridge, MA, 1994, pp. 130–139.
- [70] HOFMEYR S. A. , *An Immunological Model of Distributed Detection and Its Application to Computer Security*, Ph.d thesis, University of New Mexico (1999).

- [71] STEPNEY S. , R. E. Smith, J. Timmis, A. M. Tyrrell, M. J. Neal, A. N. W. Hone, Conceptual Frameworks for Artificial Immune Systems, *International Journal of Unconventional Computing* 1 (3) (2005) 315–338.
- [72] LE BOUDEC J.-Y. , S. Sarafijanovic, An Artificial Immune System Approach to Misbehavior Detection in Mobile Ad-Hoc Networks, in: 1st International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (Bio-ADIT2004), Vol. LNCS 3141, Springer, Lausanne, Switzerland, 2004, pp. 96–111.
- [73] KLEINBERG J. , Computing: The wireless epidemic, *Nature* 449 (2007) 287–288.
- [74] KHELIL A. , C. Becker, J. Tian, K. Rothermel, An Epidemic Model for Information Diffusion in MANETS, in: 5th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (ACM MSWiM 2002), ACM, Atlanta, GA, 2002, pp. 54–60.
- [75] SHAH R. C. , S. Wiethölder, A. Wolisz, When does opportunistic routing make sense?, in: 1st International Workshop on Sensor Networks and Systems for Pervasive Computing (PerSeNS 2005), Kauai Island, HI, 2005.
- [76] HAYASHI H. , T. Hara, S. Nishio, On Updated Data Dissemination Exploiting an Epidemic Model in Ad Hoc Networks, in: 2nd International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (Bio-ADIT 2006), Vol. LNCS 3853, Springer, Osaka, Japan, 2006, pp. 306–321.
- [77] AHI E. , M. Caglar, O. Ozkasap, Stepwise Probabilistic Bussing for Epidemic Information Dissemination, in: 1st IEEE/ACM International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (IEEE/ACM BIONETICS 2006), IEEE, Cavalese, Italy, 2006.
- [78] OKUYAMA T. , T. Tsuchiya, T. Kikuno, Improving the Robustness of Epidemic Communication in Scale-Free Networks, in: 2nd International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (Bio-ADIT 2006), Vol. LNCS 3853, Springer, Osaka, Japan, 2006, pp. 294–305.
- [79] PAPPAS V. , D. Verma, B.-J. Ko, A. Swami, A Circulatory System Approach for Wireless Sensor Networks, Elsevier Ad Hoc Networks Available online: 10.1016/j.adhoc.2008.04.009.
- [80] WENG G. , U. S. Bhalla, R. Iyengar, Complexity in Biological Signaling Systems, *Science* 284 (5411) (1999) 92–96.
- [81] PAWSON T. , Protein modules and signalling networks, *Nature* 373 (6515) (1995) 573–80.
- [82] KRÜGER B. , F. Dressler, Molecular Processes as a Basis for Autonomous Networking, *IPSI Transactions on Advances Research: Issues in Computer Science and Engineering* 1 (1) (2005) 43–50.
- [83] MILO R. , S. Shen-Orr, S. Itzkovitz, N. Kashtan, D. Chklovskii, U. Alon, Network Motifs: Simple Building Blocks of Complex Networks, *Nature* 298 (2002) 824–827.
- [84] DECRAENE J. , G. Mitchell, B. McMullin, Evolving Artificial Cell Signaling Networks using Molecular Classifier Systems, in: 1st IEEE/ACM International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (IEEE/ACM BIONETICS 2006), IEEE, Cavalese, Italy, 2006.
- [85] DRESSLER F. , I. Dietrich, R. German, B. Krüger, A Rule-based System for Programming Self-Organized Sensor and Actor Networks, Elsevier Computer Networks Available online: 10.1016/j.comnet.2008.09.007.
- [86] TSCHUDIN C., Fraglets - a Metabolic Execution Model for Communication Protocols, in: 2nd Symposium on Autonomous Intelligent Networks and Systems (AINS), Menlo Park, CA, 2003.
- [87] TSCHUDIN C. , L. Yamamoto, A Metabolic Approach to Protocol Resilience, in: 1st IFIP International Workshop on Autonomic Communication (WAC 2004), Vol. LNCS 3457, Springer, Berlin, Germany, 2004, pp. 191–206.
- [88] YAMAMOTO L. , D. Schreckling, T. Meyer, Self-Replicating and Self-Modifying Programs in Fraglets, in: 2nd IEEE/ACM International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (IEEE/ACM BIONETICS 2007), Budapest, Hungary, 2007.
- [89] PETROCCHI M. , Crypto-fraglets: networking, biology and security, in: 1st IEEE/ACM International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (IEEE/ACM BIONETICS 2006), IEEE, Cavalese, Italy, 2006.
- [90] BUSTAMANTE C. , Y. Chelma, N. Forde, D. Izhaky, Mechanical processes in biochemistry, *Annual Review of Biochemistry* 73 (2004) 705–748.
- [91] SUDA T. , M. Moore, T. Nakano, R. Egashira, A. Enomoto, Exploratory Research on Molecular Communication between Nanomachines, in: Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO 2005), ACM, 2005.

- [92] HIYAMA S. , Y. Moritani, T. Suda, R. Egashira, A. Enomoto, M. Moore, T. Nakano, Molecular Communication, in: NSTI Nanotech 2005, NSTI, 2005.
- [93] MOORE M. , A. Enomoto, T. Nakano, R. Egashira, T. Suda, A. Kayasuga, H. Kojima, H. Sakakibara, K. Oiwa, A Design of a Molecular Communication System for Nanomachines Using Molecular Motors, in: 4th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'06), IEEE, Washington, DC, USA, 2006, p. 554.
- [94] ATAKAN B. , O. B. Akan, On Channel Capacity and Error Compensation in Molecular Communication, Springer Transactions on Computational Systems Biology (TCSB) LNBI 5410, to appear.
- [95] ATAKAN B. , O. B. Akan, On Molecular Multiple-Access, Broadcast, and Relay Channel in Nanonetworks, in: 3rd ACM/ICST International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (Bionetics 2008), ACM, Hyogo, Japan, 2008.
- [96] MORITANI Y. , S. Hiyama, T. Suda, R. Egashira, A. Enomoto, M. Moore, T. Nakano, Molecular Communications between Nanomachines, in: 24th IEEE Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM 2005), Miami, FL, 2005.
- [97] MORITANI Y. , S. Hiyama, S. Nomura, K. Akiyoshi, T. Suda, A Communication interface using vesicles embedded with channel forming proteins in molecular communication, in: 2nd IEEE/ACM International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (IEEE/ACM BIONETICS 2007), Budapest, Hungary, 2007, pp. 147–149.
- [98] MORITANI Y. , S. x. S. Hiyama, T. Suda, Molecular Communication for Health Care Applications, in: 4th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'06), IEEE, Washington, DC, USA, 2006, p. 549.



## 11. BİLİŞSEL PLANSIZ RADYO AĞLARINDA BAĞIŞIKLIK SİSTEMİ TABANLI EVRİMSEL FIRSATÇI SPEKTRUM ERİŞİMİ

Lisanslı spektrumun eksik kullanımı bu lisanssız kullanıcıları algılamak ve böylece genel spektrum kullanımını geliştirmek için geçici olarak kullanılmayan spektrum bantlarına erişim sağlamak hedefini güden fırsatçı spektrum erişim (FSE) paradigmasını uyarır. Ancak, bu paradigmanın gerçekleşmesi lisanssız kullanıcıların kendi kendini örgütlemesi, iletişim parametrelerin öz-düzenlemesi ve zamanla değişen radyo ortamına öz-uyum gibi bazı zorluklar içerir.

Doğada, biyolojik sistemler, doğal olarak, fırsatçı spektrum erişim tarafından teşkil edilen zorlukların üstesinden gelmek için bu büyük yeteneklere sahiptir ve bu yetenekler model olarak alınabilir ve benimsenebilir. Bu yazıda, yeni bir bağışıklık sistemi tabanlı Evrimsel Fırsatçı Spektrum Erişimi (ESE) protokolü tanıtılmaktadır. Kendi-diğeri algılama ve bağışıklık sisteminde klonal seçim ilkelerine göre, ESE lisanssız kullanıcılarına lisanslı kullanıcıları engellemeden mevcut spektrum bantlarını ayrı ayrı algılama, paylaşma ve bu bantlara erişimi sağlar. Genel ESE işlemleri lisanslı kullanıcı erişim istatistikleri hakkında herhangi bir önsel bilgi gerektirmez, ayrıca ağ düğümleri arasında bir koordinasyon ve mesaj alışverişine gerek yoktur. Ayrıca, mevcut çalışmaların aksine, ESE tüm ağda herhangi bir özel kontrol kanalı gerektirmez. ESE ayrıca eğer varsa düğümler arasındaki ihtilafı ve hareketliliklerini sistem içindeki evrimi hızlandırmaya doğru kullanır ve dolayısıyla daha yüksek genel spektrum kullanımını getirir. Performans değerlendirme sonuçları gösterir ki ESE çeşitli ağ koşullarında yüksek akışa ulaşır.

### 11.1. GİRİŞ

Kablosuz teknolojilerin hızlı gelişmesi altyapısız bir ortamda kendi kendini örgütleyen kablosuz plansız ağları etkinleştirdi. Kablosuz spektrumun eksik kullanımı, lisanssız plansız kullanıcıların, fırsatçı biçimde lisanssız kullanılmayan bantları kullanan bilişsel plansız radyo ağlarını uyarır (AKYILDIZ, 2009). Fırsatçı Spektrum Erişimi (FSE) terimi genellikle böyle bir tür bindirmeli spektrum erişimini tanımlamak için kullanılır, şöyle ki lisanssız kullanıcılar, yani ikincil kullanıcılar (İK), meşru birincil kullanıcılara (BK) lisanslı olan, geçici olarak kullanılmayan spektrum bantlarını tespit eder ve erişim sağlarlar. FSE başlıca üç işlem içerir:

- *Spektrum fırsat tanıma*, bir spektrum bandının geçici olarak erişilebilir olup olmadığına karar vermek için her İK'ya izin vermek amacıyla kullanılmayan spektrum bantlarını tespit etmeyi ve akıllıca takibi amaçlamaktadır.
- *Spektrum paylaşımı*, spektrum fırsatları kullanımını en üst düzeye çıkarmayı sağlayacak biçimde algılanan girişim düzeyini en aza indirmek için ikincil kullanıcıların akıllıca spektrum fırsatlarını tahsis etmesini sağlar.
- *Spektrum erişimi*, ikincil kullanıcılar tarafından elde edilen akışın maksimize edilmesi için ikincil kullanıcılara tespit edilen spektrum fırsatlarına erişimi sağlar.

Umut vaat eden yeteneklerinin yanında, FSE geleneksel erişim teknolojilerinde bir çok ek sorunlara yol açar. Spektrum fırsat tespiti bir kanalın erişilebilir olup olmadığını anlamak için varolan kanalları tarama ve algılamayı içerir. Fakat bu işlem tüketilen zaman ve enerji açısından ikincil haberleşmeye büyük bir ek yük getirir. Ayrıca, spektrum fırsat tespiti kanalın uygunluğu konusunda ikincil kullanıcıların yanlış gözlemlerine eğilimlidir. Bu yanlış gözlemler lisanslı haberleşme üstünde aşırı etkileşime sebep olabilir. Paylaşılmayan spektrum fırsatları ikincil kullanıcılar arasında yüksek etkileşime sebep olabilir ve böylece genel spektrum kullanımı kaçınılmaz olarak azalır. Böylece, verimli spektrum fırsat tanıma, spektrum paylaşımı ve spektrum erişim mekanizmaları ikincil kullanıcılara geçici olarak kullanılmayan spektrum bantları üzerinden etkin bir şekilde iletişim kurmaya izin vermek için zorunludur.

Doğal olarak, biyolojik sistemler kesinlikle rastgele ve sürekli değişen ortamlarda normal operasyonlarını sürdürmeyi kendi kendine örgütlenme, öz-uyum ve öz-düzenleme yetenekleriyle devam ettirirler. Örneğin, bağışıklık sistemi patojenlere karşı organizmayı korumak için doğal bir savunma mekanizmasıdır. Bağışıklık sisteminin amacı patojenleri tespit ve ortadan kaldırmaktır. Bu işlem birkaç büyüleyici adım içerir. Bağışıklık sistemi ilk olarak güvenilir biçimde patojenleri tespit eder ve diğer kan hücreleri veya faydalı vitamin ve mineraller gibi vücudun kendi moleküllerinden ayrımını yapar. Bu operasyonlar doğal olarak çok sayıda algılama ve ayırmacılık hatalarına da maruz bulunmaktadır. Ancak, bağışıklık sistemi *kendi-diğeri tespit mekanizması* sayesinde inanılmaz biçimde algılama ve ayırmacılık hatalarına tolere edebilir.

Bağışıklık sistemi ayrıca *klonal seçim mekanizması* denilen evrimsel bir araca sahiptir ve bu araç kendi hücreleri olan B-hücreleri ve T-hücrelerinin dinamik olarak genetik seklini değiştirir ve patojenleri elimine eder. Klonal seçim mekanizması aynı zamanda genetik algılama yeteneğini artırır, örneğin enfeksiyonların çeşitliliği gibi, organizma yeni enfeksiyonlara karşı daha fazla güçlü olur. Bu durum, bağışıklık sistemini daha çok çeşit enfeksiyonlara karşı sağlam hale getirir.

Açıkçası, bağışıklık sisteminin yetenekleri ağ işgal algılama (KIM, 2001), çok amaçlı fonksiyon optimizasyonu (CASTRO, 2002), (CORTES, 2003) ve arıza teşhisi (BRADLEY, 2000) gibi bir çok yeterli evrimsel algoritma için büyük bir ilham kaynağıdır. Ayrıca, doğal bağışıklık sistemi ilkelerine dayalı (ATAKAN, 2006), dağınık düğüm ve frekans oranı seçimi (DDOS) algoritması kablosuz algılayıcı ağlarında enerji yeterliliğine sahip ve güvenilir haberleşme için sunulur. Bu yazıda bağışıklık sisteminin büyük doğal yeteneklerini özümsemek için evrimsel fırsatçı bir spektrum erişimi algoritması (ESE) geliştiriyoruz .

#### A. İlgili Çalışmalar

Mevcut literatürde çeşitli fırsatçı spektrum erişim protokolleri vardır. Bu protokoller genellikle kendi kontrol bilgi alışverişi stratejilerine göre kategorize edilir. Bu mevcut FSE algoritmalarında baslıca iki farklı kontrol bilgisi alışverişi stratejisi vardır. (MA,2005), (SANKARANARAYANAN,2005), (CORDEIRO,2007) ve (JIA, 2008)' de, özel bir kontrol kanalı fırsatçı spektrum erişimini amacıyla kontrol bilgi alışverişi için kullanılır. Ancak, tek bir özel kontrol kanalı birincil kullanıcıların sık sık bu kanalı kullanmaları durumunda tıkanıklık yaratabilir. (ZHAO,2008), (MA,2007)' de, zaman dilimleri kontrol ve veri aşamalarına ayrılır. Kontrol aşamasında, kontrol bilgileri tek bir özel kanal kullanarak iletilirler. Ancak, veri aşamasında, veri iletimi kanalları kontrol aşamasında müzakere de bulunarak belirlenen kanallar kullanarak yapılır. Bu yaklaşımla, bir tek özel kanala azalır, çünkü kontrol bilgi alışverişi tek kontrol kanalda yapılmaktadır. Ayrıca bilgi alışverişi stratejilerine ek olarak, mevcut spektrum fırsat erişim protokolleri spektrum fırsat belirleme stratejileri açısından farklıdır. Aslında, bazı protokoller spektrum fırsatlarını saptayabilirken (MA, 2005), (SANKARANARAYANAN, 2005), (CORDEIRO,2007), (ZHAO, 2008) diğerleri spektrum fırsat bilgisini dış bir birimden alırlar.

Mevcut FSE algoritmaları yanında, bazı biyolojik ilham kaynaklı mekanizmalar da bilişsel radyo tabanlı fırsatçı erişim senaryolarında bazı spektrum paylaşımı ve yönetimi sorunları için geliştirilmiştir. Önceki çalışmalarımızda, bazı biyolojik sistemler bilişsel radyo şebekelerde verimli algoritmalar geliştirmek için kullanılabilen umut verici özellikleri keşfetmek için incelenir (ATAKAN, 2008). Bir böcek kolonisinde görev dağılımı olgusuna dayalı olarak, spektrum kullanımını artırmak için bir spektrum paylaşım mekanizması önerilir (ATAKAN, 2007). (RENK, 2008)' de, aynı şekilde, böcek kolonilerinden benimsenen bazı kaynak tahsisi mekanizmaları bilişsel kablosuz ağlar için kaynak tahsisi algoritmaları geliştirmek için kullanılır.

Bildiğimiz kadarıyla, mevcut FSE protokollerinin hiçbiri aynı anda spektrumu fırsat tanıma, spektrum paylaşımı ve erişimi sağlamıyor. Spektrum mekanizması paylaşımı eksikliği ciddi bir biçimde spektrum kullanımını azaltır. Bu protokoller de ek kontrol kanalda olası tıkanıklığa tabidir.

#### B. Katkılar

Bu yazıda, bağışıklık sistemi tabanlı Evrimsel Fırsatçı Spektrum Erişimi (ESE) protokolünü tanıtırız. Kendi-diğeri tanıma ve bağışıklık sistemindeki klonal seçim mekanizması ilkelerine dayalı olarak, ESE, bilişsel radyo ağlarında, İK'ler için aynı anda spektrum fırsatı tanıma, spektrum paylaşımı ve erişimi sağlar. ESE' nin en belirgin özellikleri olarak şunlar sıralanabilir:

- Tüm İK haberleşmesini zora sokan tek adanmış kontrol kanalı kullanan bütün FSE mekanizmalarının tersine, ESE İK' lara kontrol bilgi alışverişi için mevcut tüm kanalları kullandırmayı sağlar.
- ESE hatalı spektrum algılama ölçümlerine rağmen, tüm spektrum fırsatları için esnek tanımlama sağlamak için hoşgörülüdür.
- ESE, İK' lara genel spektrum kullanımını en üst düzeye çıkarmak için en uygun spektrum paylaşımı ve erişim stratejilerinin istihdamını sağlar.

- ESE düğüm hareketliliği veya yeni düğüm gelmesi gibi değişiklikleri hızlıca dahil eden uyarlanabilir bir algoritmadır.
- ESE, İK'lar arasında etkileşim ve tartışma artışıyla, şaşırtıcı biçimde performansını artıran bir evrimsel algoritmadır.
- ESE, spektrum fırsat tanıma ve spektrum paylaşımı için ağ düğümleri arasında bir koordinasyon ihtiyacı olmayan ve ana kullanıcıların kanal erişim istatistikleri hakkında önsel bilgiye ihtiyacı olmayan özerk bir algoritmadır.

Bu çalışmanın geri kalanı aşağıdaki gibidir. Bölüm II' de, bağışıklık sistemi ve FSE arasındaki analogiler ve benzerlikler tartışılır. Bu benzerliklere göre, Bölüm III' de, bir evrimsel fırsatçı spektrum erişim modeli ve ESE protokol işlemleri tanıtılır. Bölüm IV' de, performans değerlendirme sonuçları sunulur. Bölüm V.' de, sonuçlayıcı sorumlular verilir.

## 11.2. BAĞIŞIKLIK SİSTEMİ VE FIRSATÇI SPEKTRUM ERİŞİMİ

Burada, önce özetle bağışıklık sistemi ve temel çalışma ilkeleri tanıtılır. Daha sonra, bağışıklık sistemi ve fırsatçı spektrum erişim arasındaki benzerlikler ve ilişki tartışılır.

### A. Biyolojik Bağışıklık Sistemi

Doğal bağışıklık sistemi organizmayı zararlı moleküllerden veya mikro-organizmalardan koruyan karmaşık bir savunma mekanizmasıdır. Bu karmaşık görev bağışıklık sistemindeki B-hücreleri ve T-hücreleri denilen özel kan hücreleri ile yapılabilir. Bir organizma antijen moleküllerine maruz kaldığında, B-hücreleri ve T-hücreleri işbirliği antijenleri algılar ve yok eder. Algılama ve antijen kaldırılması kendi-diğeri algılama ve klonal seçim mekanizmaları sayesinde başarılabilir (CASTRO, 2002).

Kendi-diğeri algılama mekanizması, B-hücrelerinin kandaki organizma üzerinden yayılan küçük bağımsız detektörler olarak dağıtık algılama mekanizması olarak görülebilir (FORREST, 1994). Antijenlerin tespiti bir B-hücresinin genetik şekli kimyasal olarak bir antijenin şekliyle eşleşirse başarılabilir.

Bu kendi-diğeri algılama mekanizması, organizmanın kendi moleküllerini antijenlerden ayırırken, klonal seçim mekanizması aynı B-hücrelerinin, yakınlık olgunlaşması ve hiper-mutasyon olgusu ile antijenlerin genetik şeklini tanımasını sağlar. Patojenlerle en iyi eşleşmeyi sağlayan B-hücre genetik şekli *seçkinci genetik şekli* olarak düşünülebilir ve bu şekil artık mutasyona uğratılmaz ve ezberlenir. *Seçkinci seçim mekanizması organizmaya büyük dayanıklılık sağlar.* Ayrıca, bu mekanizma bağışıklık sistem tabanlı çok-amaçlı fonksiyon optimizasyonu algoritmalarının geliştirilmesi için büyük ilham kaynağı olmuştur.

### B. Bağışıklık Sistemi ve Fırsatçı Spektrum Erişimi

Ne zaman bağışıklık sistemi bir molekülle karşılaşır, bu molekülün zararlı bir diğer patojen olup olmadığına kendi-diğeri tanımlama mekanizması sayesinde karar verir. Eğer molekül bir patojen olarak belirlenirse, bağışıklık sistemi tanır ve patojen klonal seçim mekanizması kullanarak ortadan kaldırılır.

Operasyon analogilerinin yani sıra, bağışıklık sistemi ve FSE arasında bazı atfedilen analogiler aşağıdaki gibidir:

- Bağışıklık sistemi, çeşitli ve hataya dayanıklı olduğu için son derece güçlü bir sistemdir.
- Bağışıklık sistemi yeni enfeksiyonları öğrenmek ve tanımak için uyarlanabilir.
- Bağışıklık sistemi büyüleyici adımları gerçekleştirmek için herhangi bir merkezi kontrol ihtiyacı olmayan, tam özerk bir sistemdir.

Bağışıklık sisteminin operasyon ve niteleyici avantajlarından yararlanmak için, bağışıklık sistemi ve fırsatçı spektrum erişim arasında aşağıdaki analogileri kuruyoruz.

- Her *ikincil kullanıcı (İK)* bir *B-hücre*dir.
- Her İK' nın *frekans atlama dizisi* *B-hücresinin genetik şeklidir.*

- *Spektrum fırsatları patojen* olarak düşünülebilir.
- Kendi-diğeri tanımlamasını spektrum fırsat tanımlaması olarak düşünürüz.
- Spektrum paylaşım ve erişim operasyonlarını somatik hipermutasyon ve yakınlık olgunlaşması ile klonal seçim olarak görebiliriz.

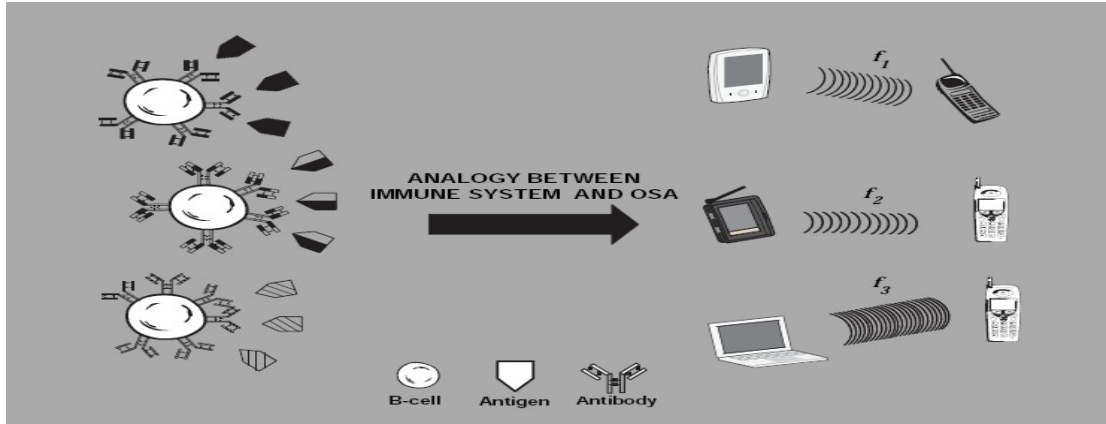
Bu ilişkiler Şekil 1.' de görülebilir.

### 11.3. BAĞIŞIKLIK SİSTEMİ TABANLI EVRİMSEL FIRSATÇI SPEKTRUM ERİŞİMİ

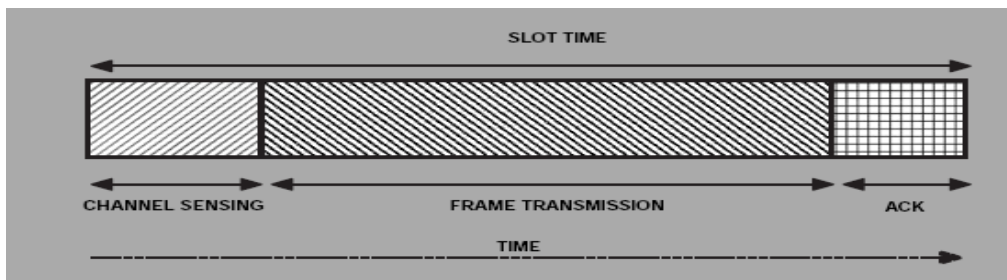
Bu bölümde, bağışıklık sistemi ve FSE arasındaki analogilere dayalı Bağışıklık Sistemi Tabanlı Evrimsel Fırsatçı Spektrum Erişimi (ESE) protokolü sunulur.

#### A. Ağ Modeli ve Varsayımlar

Tüm spektrumun  $N$  tane örtüşmeyen aynı bant genişliğine sahip birbirine dik kanallara bölündüğü bir ağ modeli düşünülmektedir.  $M$  tane hareketli İK, İK' lar arasında ihtilafa gerek olmaksızın gelişigüzel gelip gidebilir. Bekleme zaman dilimi tüm İK' lara ana sistem tarafından yayın yapılır. ESE bir zaman dilimini Şekil 2. 'de görüldüğü gibi üç faza böler.



Şekil 1. Bağışıklık sistemi ve fırsatçı spektrum sistemi arasındaki benzerlik.



Şekil 2. İkincil kullanıcının zaman dilimi yapısı.

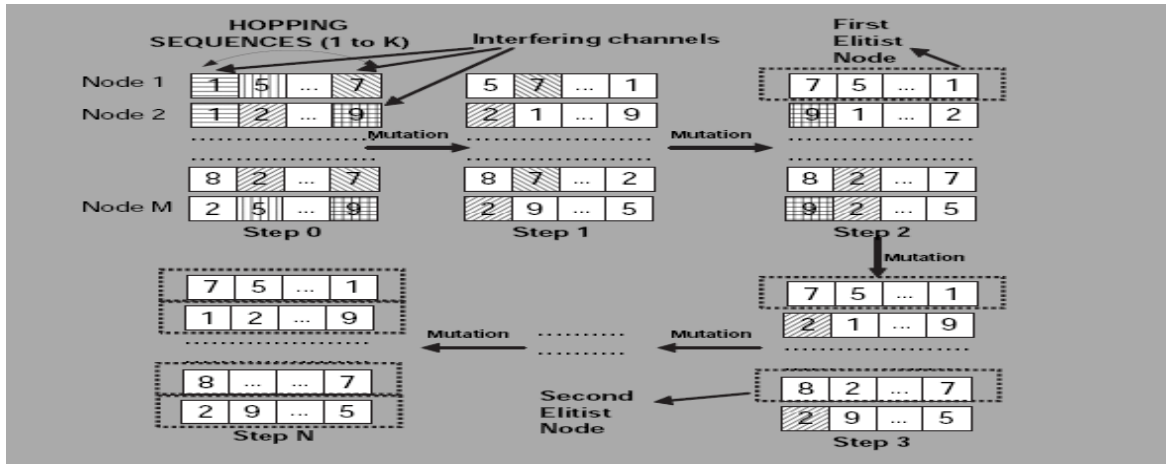
Tüm İK'lar sabit uzunlukta frekans atlama dizisi (FAD) kullanırlar. Her İK için FAD, 6 tane farklı frekans kanalından oluşur.

#### B. ESE'ye Genel Bakış

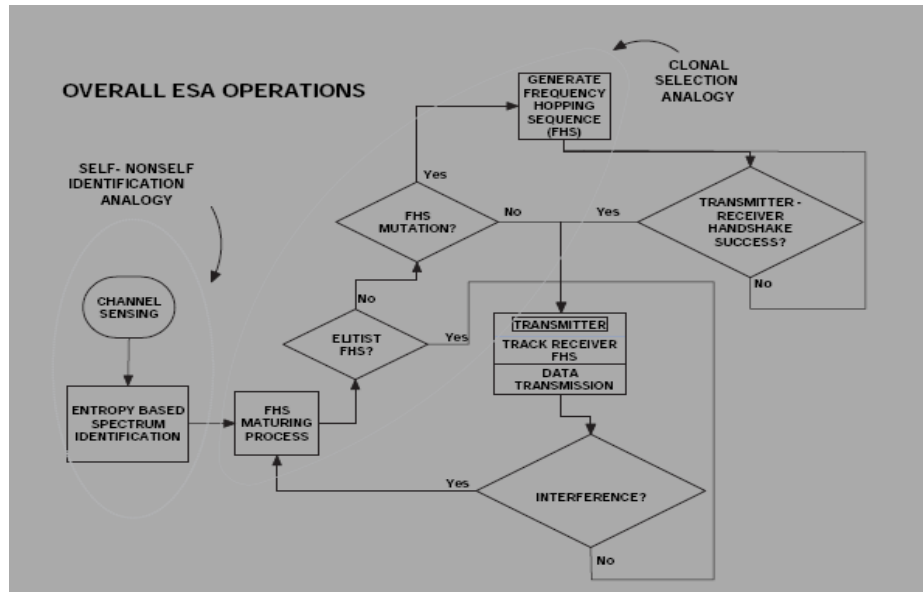
ESE, spektrum paylaşımı, spektrum fırsat tanıma, ve spektrum erişim operasyonlarını birlikte gerçekleştirir. Her İK için, kanal algılamaya dayalı entropi tabanlı kanal uygunluğu bilgisini kullanan

spektrum fırsat tanımlama özelliği doğar. Kanal uygunluk bilgisine göre, her İK kendi BK' larının aktivitelerinin az olduğu kanalları içeren FAD' ni üretir. Bu seçimin amacı genel spektrum kullanımını maksimize etmektir.

Spektrum paylaşımı ve erişimi için, ESE, uygun spektrum paylaşımı ve erişim performansı üretmek için her İK' ya FHS mutasyonu sağlar. Bu optimizasyon süreci her İK tarafından dağıtık bağımsızlık algoritması temelli bir klonal seçime dayalı olarak ayrıca gerçekleştirilir. ESE operasyonları ayrıntılı olarak Şekil 4.' den izlenebilir.



Şekil 3. Mutasyon ve seçkinci seçim metotları kullanarak FAD üretimi yoluyla spektrum erişim ve paylaşımı.



Şekil 4. Spektrum fırsat tanımlaması, paylaşımı ve erişimini gösteren genel ESE operasyonu. Tüm protokol adımları kolaylıkla takip edilebilir ve ESE operasyonunun hangi kısımlarının bağımsızlık sisteminden esinlendiği görülebilir.

### C. Spektrum Fırsat Tanımlama

ESE' nde spektrum fırsat tanımlaması bağımsızlık sistemindeki kendi-diğeri tanımlamasına dayanır. Bağımsızlık sistemi, her B-hücrenin ayrı ayrı zararlı patojenleri organizmanın kendi hücrelerinden ayırmasını sağlar. Bu ayrımcılık doğal olgunlaşma sürecine dayanmaktadır. Bağımsızlık sistemine

benzer biçimde, ESE her İK' ya ayrı ayrı spektrum kanalının kullanışlı olup olmadığını çıkarsama olanağı sunar. Bu *spektrum fırsat olgunlaşma süreciyle* başlar. Bu süreç her

$\dot{I}K_i$  'yi herhangi bir kanal  $j$  hakkında uygunluk bilgisini güçlendirmek için aşağıdaki gibi daha kuvvetli kılar.

- Ne zaman  $\dot{I}K_i$  kanal  $j$  'yi algılasa, kanal uygunluk bilgisini boşa ve meşgul sayaçlarında,  $\dot{I}_i^j$  ve  $B_i^j$  'de tutar.
- Eğer  $\dot{I}K_i$  kanal  $j$  'yi boşa algılasa, boşa sayaç sayısını 1 artırarak günceller,  $\dot{I}_i^j = \dot{I}_i^j + 1$  .
- Eğer  $\dot{I}K_i$  kanal  $j$  'yi meşgul algılasa, meşgul sayaç sayısını 1 artırarak günceller,  $B_i^j = B_i^j + 1$  .
- Güncellenen  $\dot{I}_i^j$  ve  $B_i^j$  bilgisine dayanarak,  $\dot{I}K_i$  kanal  $j$  nin uygun olma olasılığını,  $P_i^j$  'yi aşağıdaki gibi hesaplar,

$$P_i^j = \frac{\dot{I}_i^j}{\dot{I}_i^j + B_i^j} \quad (1)$$

- Kanaldaki belirsizliği ifade etmek için, kanal  $j$  ve  $\dot{I}K_i$  için kanal tanımlama entropisi aşağıdaki gibi hesaplanır,

$$H_i^j = - \left( p_i^j \log_2(p_i^j) + (1 - p_i^j) \log_2(1 - p_i^j) \right) \quad (2)$$

- $\dot{I}K_i$  entropiyi tüm kanallar için hesaplar ve düşükten büyüğe sıralar, bu sıralama sonucunda kanal no'larından set  $T_i$  'yi oluşturur.  $T_i(1)$  , en erişilebilir ve uygun kanalın no' sunu içerir.

#### D. Spektrum Paylaşım ve Erişim

Bağıklık sisteminde klonal seçim mekanizmasının ilkelerine göre, ESE her İK' ya ayrı ayrı spektrum fırsat paylaşım ve erişimi sağlar ve bu spektrum fırsat kimliği yukarıda tanımlanmıştır. ESE her İK' ya B-hücrelerinin genetik şekli gibi bir frekans atlama dizini (FAD) oluşturma olanağı sağlar.

Yeterli spektrum paylaşımı sağlamak için her alıcı İK kendi FAD' ni olası etkileşimlerden kaçınmak için mutasyona uğratır. Şekil 3.'de M tane alıcı İK için mutasyonlar gözlemlenebilmektedir. Aslında bu mutasyonlar bir optimizasyon problemi olarak modellenilebilir,  $\dot{I}K_i$  'nin FAD' nin elemanını  $FHS_i(l)$  olarak gösterirsek, aşağıdaki optimizasyon gerçekleştirilebilir,

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^M \sum_{i \neq j}^M \sum_{l=1}^K \left[ 1 - \text{sgn}(|FHS_i(l) - FHS_j(l)|) \right] \quad (3)$$

FAD' nin etkileşim alıp almadığına göre sürecin sonunda seçkin set olma özelliği doğmaktadır. Tüm setler seçkin set olana kadar mutasyonlar devam eder. Seçkin set seçim algoritması spektrum paylaşım algoritmasının yakınsamasına yol açar.

Algoritmanın yakınsama olasılığı  $P_c$  , şöyle hesaplanabilir (CUTELLO, 2007),

$$P_c = \frac{c!}{K(K^2 - 94K)^c} \quad (4)$$

Spektrum erişimi için, her verici İK ayrıca BK' ların yoğun olmadığı kanalları içeren FAD oluşturur. Verici, alıcıya ait FAD' ni takip eder, tüm alıcılar seçkinci olduktan sonra takip etmedeki zorluk ortadan kalkar.

#### 11.4. PERFORMANS DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, ESE algoritma performansı incelenmektedir. İlk olarak, mevcut literatürde mevcut fırsatçı spektrum erişim teknikleri hakkında genel bir bakış sunulur ve ESE' ye göre avantajları tartışılır. Sonra, geniş ölçekte performans metrikleri açısından, ESE protokolünün simülasyon deneme sonuçları sunulur. Son olarak, spektrum tanımlama sürecindeki belirsizliğe nazaran ESE sayısal hata tolerans analizi yapılır.

##### A. Mevcut FSE Mekanizmalarına Genel Bakış

Performans analizi diğer FSE protokolleri ile karşılaştırılmak için yapılır. Tablo II' de, mevcut FSE algoritmaları ile ESE, adanmış kanal tipi ve radyo sayısı gibi özelliklerine göre karşılaştırılır. ESE'nin avantajlarından biri, spektrum fırsat tanımlama ve paylaşımını aynı anda yapabilmesidir. Ayrıca, kontrol bilgisi değiştirme stratejisi farklıdır, şöyle ki, tüm uygun kanallar kullanılabilir, diğer bir deyişle (MRCC) metodu kullanılır (PAWELCZAK, 2009). Ek olarak, ESE sadece bir radyo ön ünitesine gereksinim duyar, çünkü kanal algılama ve data iletim fazları zamanda ayrıdır. Sonuç olarak ESE göze çarpan bir çok özelliği bünyesinde barındırır.

Protocol	Spec. ID.	Spec. Sharing	CC Type	Scan	# of RFE	MRCC
<i>DOSS</i> [9]	Yes	No	Dedicated	Yes	3	No
<i>SCA-MAC</i> [24]	No	No	Dedicated	Yes	2	No
<i>C-MAC</i> [11]	Yes	No	Dedicated	Yes	1	No
<i>AS-MAC</i> [10]	Yes	No	Dedicated	Yes	1	No
<i>ESCAPE</i> [25]	No	No	Dedicated	Yes	1	No
<i>DC MAC</i> [26]	No	No	Dedicated	Yes	1	No
<i>HC-MAC</i> [12]	No	No	Dedicated	Yes	1	No
<i>BB-OSA</i> [27]	No	No	Dedicated	No	1	No
<i>OS-MAC</i> [28]	No	No	Dedicated	No	1	No
<i>HD-MAC</i> [13]	Yes	No	Split Phase	Yes	1	No
<i>SRAC</i> [14]	No	No	Split Phase	No	1	No
<i>Evolutionary Spectrum Access (ESA)</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>MRCC</i>	<i>Yes</i>	<i>1</i>	<i>Yes</i>

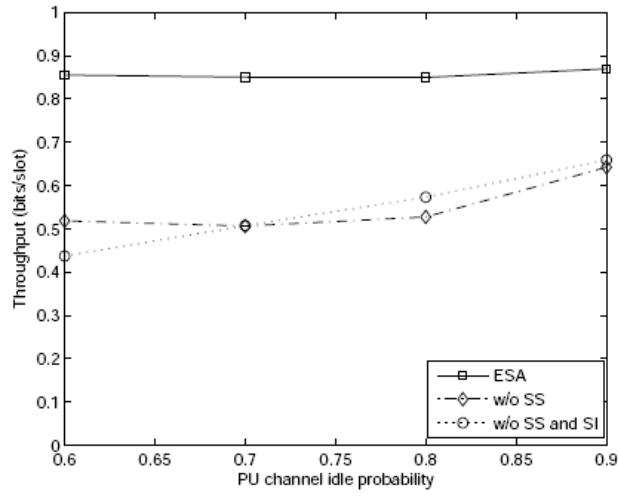
TABLO II. DAĞINIK FSE MAC PROTOKOLLERİNİN ÖZELLİKLERİNE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI (PAWELCZAK, 2009)

##### B. Simülasyon Deneyler

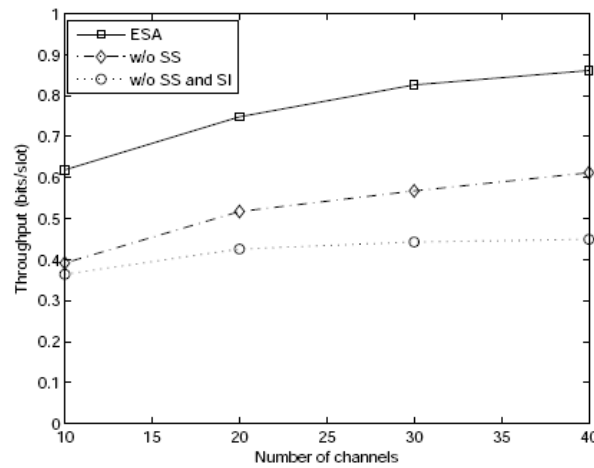
Burada simülasyon denemeleri MATLAB ile gerçekleştirilir ve ESE performansı gösterilir. Aksi açıkça belirtildikçe, toplam  $N = 10$  kanal ve 10 düğüm arasında kullanılır, bunların yarısı plansız fırsatçı vericilerdir. Düğümler FAD içinde 6 atlama yaparlar, ve 6 entropi bilgisi toplamak için 6 kanal dinlerler. Kanallar birbirinden bağımsız ve bant genişliği  $B = 1$  seçilir.

- 1) *Akış, BK kanal kullanımına karşı:* BK kanal erişim olasılıkları değiştirilir ve akış üzerindeki etkisi gözlemlenir. Şekil 5.'de görüldüğü gibi ESA, uygun kanalları akıllıca kullanmayan

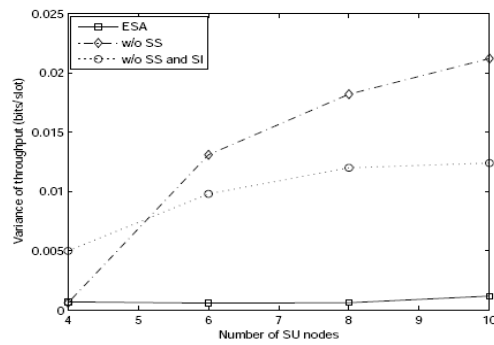
metotlardan daha yüksek akış sağlar. Ayrıca evrimsel mekanizma dolayısıyla BK kanal erişim olasılığında etkilenmez.



Şekil 5. ESE algoritmasının akışının değişken BK kanal boşa olasılıklarına göre sadece spektrum tanımlama ve hem tanımlama hem paylaşım yapan algoritmalarla karşılaştırılması.

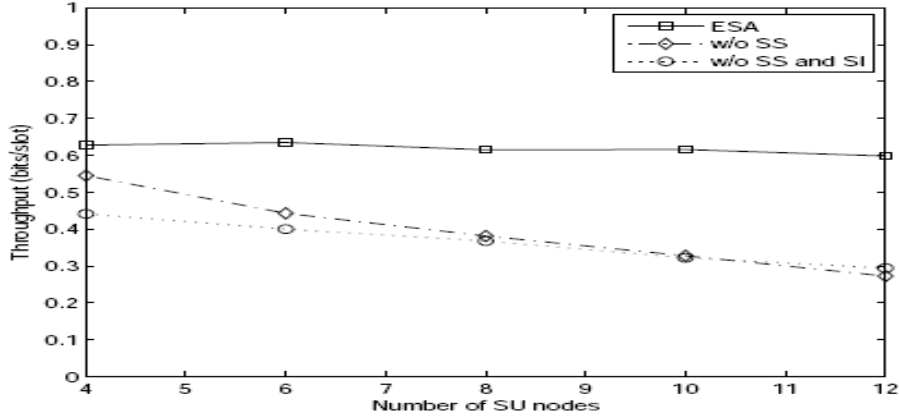


Şekil 6. ESE algoritmasının akışının değişken kanal sayısına göre sadece spektrum tanımlama ve hem tanımlama hem paylaşım yapan algoritmalarla karşılaştırılması



Şekil 7. ESE algoritmasının akışının değişken düğüm sayısına göre sadece spektrum tanımlama ve hem tanımlama hem paylaşım yapan algoritmalarla karşılaştırılması.





Şekil 8. ESE algoritmasının adilliğinin değişken düğüm sayısına göre sadece spektrum tanımlama ve hem tanımlama hem paylaşım yapan algoritmalarla karşılaştırılması.

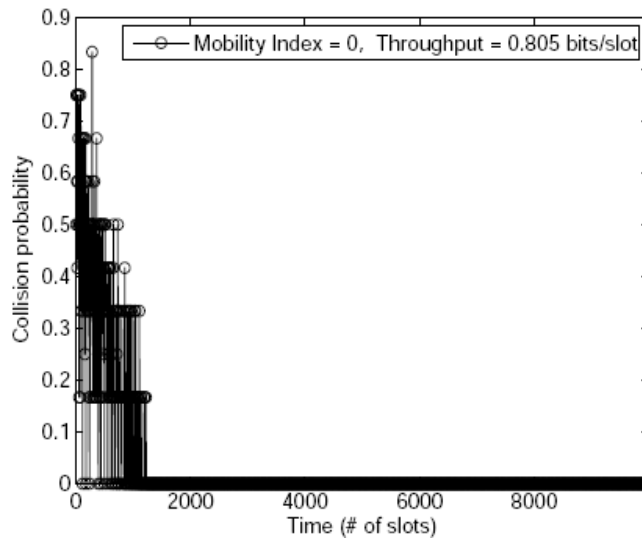
2) Akış, mevcut kanal sayısına karşı: İkinci olarak, kanal sayısı değiştirilir ve akış üzerindeki etkileri gözlenir. Şekil 6.'da görüldüğü gibi artan kanal sayısının en uygun kullanımı ESA tarafından sağlanır.

3) Akış, İK sayısına göre: ESA'nın evrimsel ve biyolojik esinli doğası, İK sayısı artırılıp sonuçlar gözlemlenerek incelenir.

Şekil 7.'de görüldüğü gibi, spektrum paylaşım ve tanımlama olmadan ESA birbirleriyle yarışan İK'lerden kötü biçimde etkilenir.

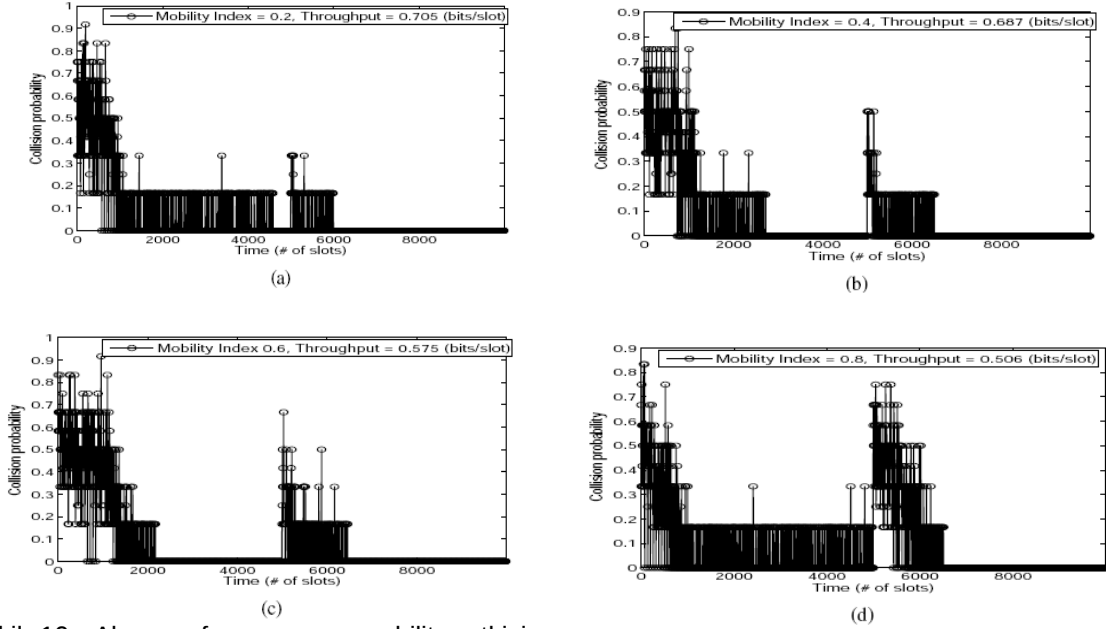
4) Adillik: Burada spektrum kaynaklarının fırsatçı dağıtım açısından ESE protokolünün adil dağılım performansı araştırılır. Şekil 8.'de görüldüğü gibi eğer spektrum paylaşım ve tanımlama kullanılmazsa, akış varyansı İK sayısı arttıkça oldukça yükselmektedir.

5) Çarpışma olasılığı: Şekil 9'da, ESA operasyon boyunca çarpışma olasılığı görünmektedir. ESA tüm çarpışmalardan kaçınır ve en uygun noktaya ulaşır, bu sayede herhangi bir İK çarpışma hissetmez.



Şekil 9. Çarpışma olasılığı ve ESE algoritmasının zamanla yakınsaması.

6) *Düğüm Hareketliliği*: Burada bilişsel radyo plansız ağlarında mobilite etkilerinin ESE protokol performansına etkileri araştırılır. Bu amaçla hareketlilik endeksi tanımlanır, endeks arttıkça hareketlilik artar. Şekil 10. (a), (b), (c) ve (d) 'de çarpışma olasılığının değişik mobilite endekslerine göre değişimi görülmektedir. Hareketliliğe rağmen, ESA çok düşük çarpışma olasılığına yakınsar. ESA hareketlilik ve etkileşime karşı evrimsel özellikleriyle dayanıklılık sağlar.



Şekil 10. Akış performansının mobilite etkisine göre zamanla performansı. (a) Mobilite endeksi = 0.2 (b) Mobilite endeksi = 0.4 (c) Mobilite endeksi = 0.6 (d) Mobilite endeksi = 0.8.

### C. Spektrum Tanımlamadaki Yanlışlığa Karşı Hata-Toleransı

ESA her İK' nın ayrı ayrı, hatalara tolerans geliştirmesini sağlar. Gauss kanal modeli analitik olarak incelenmiştir.

Bir İK kanalı algıladığında, alınan sinyal şöyle ifade edilebilir,

$$x(t) = \begin{cases} n(t), & H_0 \\ s(t) + n(t), & H_1 \end{cases} \quad (5)$$

Burada  $H_0$  ve  $H_1$  boşa ve meşgul kanal durumlarının hipotezleridir,  $s(t)$  haberleşme sinyali ve  $n(t)$  sıfır-ortalama Gauss gürültüsüdür. Enerji algılayıcısının çıktısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir ( DIGHAM, 2003), (HSU, 2007),

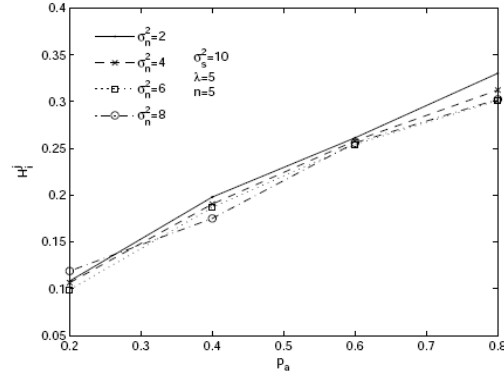
$$Y \approx \begin{cases} \mathcal{N}(n\sigma_n^2, 2n\sigma_n^4), & H_0 \\ \mathcal{N}(n(\sigma_n^2 + \sigma_s^2), 2n(\sigma_n^2 + \sigma_s^2)^2), & H_1 \end{cases} \quad (6)$$

Burada  $N$  örnek sayısı,  $\sigma_s^2$  ve  $\sigma_n^2$  sinyal ve gürültünün varyanslarını göstermektedir. Eğer BK algılanan kanala  $p_a$  olasılığıyla ulaşırsa, yanlış alarm ve yanlış algılama olasılıkları aşağıdaki gibi bulunur,

$$p_f = p_a \left( 1 - Q \left( \frac{\lambda - n(\sigma_n^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2n(\sigma_n^2 + \sigma_s^2)^2}} \right) \right) \quad (7)$$

$$p_m = (1 - p_a) Q \left( \frac{\lambda - n\sigma_n^2}{\sqrt{2n\sigma_n^4}} \right) \quad (8)$$

Burada  $Q(\cdot)$  -fonksiyonu ve  $\lambda$  enerji algılayıcısının algılama eşik değeridir.



Şekil 11. ESE'nin hata tolerans yeteneğini gösteren,  $H_i^j$  değerinin farklı  $\sigma_n^2$  değerleri için değişken  $p_a$  'ya göre değişimi.

Şekil. 11.'de bir kanal için spektrum tanımlama entropisinin BK'nın kanala erişim olasılığına göre değişimi gösterilmektedir. ESA gürültü ve artan BK erişimine rağmen spektrum fırsat tanımlamasında dayanıklılık sağlar.

#### 11.5. SONUÇ

Bu makalede, yeni bir biyolojik esinli fırsatçı spektrum erişim mekanizması olan bağışıklık sistemi tabanlı evrimsel spektrum erişim mekanizması (ESE) bilişsel plansız radyo ağları için tanımlandı. Bağışıklık sistemi tabanlı fırsatçı erişim doğal sistem özelliği olarak bir çok avantaj içermektedir. Esinlenilmiş kendi-diğeri algılaması ve klonal seçim mekanizmaları sayesinde ESE, kaynakların yeterli, adil ve yüksek düzeyde kullanımını sağlamaktadır. Bu doğal metotlar sistemi, kendi kendine organize olabilen, öz-uyumlu ve öz-düzenlenebilir kılacaktır. Ayrıca, varolan fırsatçı spektrum erişim sistemlerinden farklı olarak, ESE bir tane özel kontrol kanalı gerektirmez. Performans analiz sonuçları gösteriyor ki ESE, İK'ların BK'yı rahatsız etmeden bilişsel biçimde kullanmaya çalıştığı haberleşme kanallarının daha adil ve etkili kullanımını sağlamaktadır. Buna ek olarak, ESE performansı yüksek trafik yükünden etkilenmez, bunun yerine, çekişme yükseğe sistem daha hızlı evrimleşir ve en uygun duruma daha erken yakınsar, özellikle yüksek hareketlilik olduğu zaman.

#### KAYNAKLAR

[1] AKYILDIZ I. F., Lee W. Y., Chowdhury K. R., "CRAHNS: Cognitive radio ad hoc networks," to appear in Ad Hoc Journal (Elsevier), vol. 7, no. 5, pp. 810-836, July 2009.

[2] ATAKAN B., Akan O. B., "Biologically-inspired Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks," to appear in Bio-inspired Computing and Communication Networks, Edited by Y. Xiao and F. Hu, Auerbach Publications, CRC Press, 2008.

[3] ATAKAN B., Akan O. B., "BIologically-inspired Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks," in Proc. of IEEE WCNC 2007, pp. 43-48, Hong Kong, March 2007.

[4] ATAKAN B., Akan O. B., "Immune System Based Distributed Node and Rate Selection in Wireless Sensor Networks," in: Proc. IEEE/ACM BIONETICS 2006, Cavalese, Italy, December, 2006.

- [5] AUER G., Haas H., Omiyi P. , "Interference aware medium access for dynamic spectrum sharing" IEEE DySPAN 2007, Dublin, Ireland, April 2007.
- [6] BRADLEY D. , Tyrrell A. M. , "Hardware fault tolerance: An immunological solution," in Proc. IEEE System, Man, and Cybernetics, pp.107-112, Oct. 2000.
- [7] CABRIC D., Mishra M. S., Brodersen R. W., "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios" in Proc. of 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, pp. 772-776, November 2004.
- [8] CASTRO L. N. , Zuben F. J. Von , "Learning and optimization using the clonal selection principle," IEEE Transaction on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 3, 2002.
- [9] CORDEIRO C. , Challapali K. , "C-MAC: A Cognitive MAC Protocol for Multi-Channel Wireless Networks" in: Proc. IEEE DySPAN'07, Dublin, Ireland, April, 2007.
- [10] CORTES N. C. , Coello C. A. C. , "Multiobjective Optimization Using Ideas from the Clonal Selection Principle," Lecture Notes in Computer Science, vol. 2723/2003, pp.200, 2003.
- [11] CUTELLO V., Alouini M. S., Simon M. K., Oliveto P. S., "On the Convergence of Immune Algorithms" in Proc. of IEEE FOCI 2007, pp. 409-415, April 2007.
- [12] DIGHAM F. F., Alouini M. S., Simon M. K., "On the energy detection of unknown signals over fading channels" in Proc. of IEEE ICC'03, pp. 3575-3579, May 2003.
- [13] DIGHAM F. F., Alouini M. S., Simon M. K., "Some physical layer issues of wide-band cognitive radio system" in Proc. of IEEE DySPAN 2005, pp. 151-159, November 2005.
- [14] FORREST S., Perelson A. S. , Allen L. , Cherukuri R. , "Self-Nonself Discrimination in a Computer," in Proc. of IEEE Symposium on Security and Privacy, pp. 202-212, 1994.
- [15] HAMD AOUI B., Shin K. G., "OS-MAC: An efficient MAC protocol for spectrum agile wireless networks" IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 7, no. 8, pp.915-930, August 2008.
- [16] HSU A. C. C., Wei D. S. L., Kuo C.-C. J., "A cognitive MAC protocol using statistical channel allocation for wireless ad-hoc networks" IEEE WCNC 2007, pp. 105-110, March 2007.
- [17] JIA J. , Zhang Q. , Shen X., "HC-MAC: A hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management" IEEE Journal on Selected Area in Communications, vol. 26, no. 1, pp. 106-117, January 2008.
- [18] KIM J. , Bentley P. , "Towards an artificial immune system for network intrusion detection: An investigation of clonal selection with negative selection operator," in Proc. IEEE Evolutionary Computation, pp.1244- 1252, Seoul, Korea, May 2001.
- [19] LEE Y. W., Akyildiz I. F., "Optimal Spectrum Sensing Framework for Cognitive Radio Networks" IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 7, no. 10, pp. 3845-3875, October 2008.
- [20] LIU X., Ding Z., "ESCAPE: A channel evacuation protocol for spectrum agile networks" IEEE DySPAN 2007, Dublin, Ireland, April 2007.
- [21] MA L., Shen C. C., Ryu B., "Single-radio adaptive channel algorithm for spectrum agile wireless ad hoc networks" in Proc. of IEEE DySPAN'07, Dublin, Ireland, April, 2007.
- [22] MA L. , Han X. , Shen C. C. , "Dynamic open spectrum sharing MAC protocol for wireless ad hoc networks" in Proc. of IEEE DySPAN'05, Baltimore, USA, November 2005.

- [23] PAWELCZAK P., Pollin S. , So H. W., Bahai A. , Prasad R. V., Hetmat R., "Performance Analysis of Multichannel Medium Access Control Algorithms for Opportunistic Spectrum Access" to appear in IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009.
- [24] RENK T., Kloock C., Burgkhrdt D., Jondral F. K., Grandblaise D., Gault S., Dunat J. C., "Bio-Inspired Algorithms for Dynamic Resource Allocation in Cognitive Wireless Networks," Mobile Networks and Applications, vol. 13, no. 5, pp. 431-441, October 2008.
- [25] SANKARANARAYANAN S. , Papadimitratos P. , "A bandwidth sharing approach to improve licensed spectrum utilization" IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 12, pp. supl.10-supl.14, 2005.
- [26] ZHAO Qing, Sadler B. M. , "A Survey of Dynamic Spectrum Access," in Proc. IEEE Signal Processing Magazine, vol. 24, no. 3, pp. 79-89, May 2007.
- [27] ZHAO J., Zheng H., Yang G. H., "Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks" IEEE DySPAN 2005, Baltimore, USA, November 2005.
- [28] ZHAO Q., Tong L., Swami A., Chen Y., "Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework" IEEE Journal on Selected Area in Communications, vol. 25, no. 3, pp. 589-600, April 2008.

## 12. KABLOSUZ SENSÖR VE AKTÖR AĞLARI İÇİN BİYOLOJİK ESİNLİ ÇAPRAZ KATMAN PROTOKOLÜ

Kablosuz sensör ağlarında, sensörler içinde buldukları ortamdan bilgi toplarlarken aktörler toplanan bu bilgiler doğrultusunda gerekli tedbirleri almakla görevlidirler. Sensörlerin ve aktörlerin verimli enerji tüketimiyle iletişim sağlaması kablosuz sensör aktör ağlarının temel ihtiyaçlarından biridir. Doğada yaşamsal ihtiyaçlarını karşılamak için böcek kolonileri içsel olarak, merkezi bir yönetici olmadan koordinasyon içinde gerekli tedbirleri almaktadırlar. İçsel olan bu yetenekler kablosuz sensör ve aktör ağları için kullanılabilir. Bu makalede, bir böcek kolonisindeki görev paylaşımından esinlenilerek geliştirilmiş, kablosuz sensör ve aktör ağları için biyolojik esinli çapraz katman protokolü(BEÇK) anlatılmaktadır. BEÇK ortam erişim, yönlendirme ve taşıma katmanları işlevlerini birleştirerek, güvenilir ve en aza indirgenip eşit olarak dağıtık enerji tüketimi sunmaktadır. En önemlisi ise BEÇK sensörler ve aktörler arasında direk olarak herhangi bir koordinasyona gerek duymamaktadır. Performans analizlerinin açıkça gösterdiği üzere BEÇK ağ ömrünü önemli derecede uzatırken aynı zamanda hiç bir geri besleme olmadan yüksek derecede güvenilir sensör aktör iletişimi sağlamaktadır.

### 12.1. Giriş

Kablosuz sensör ve aktör ağları (KSAA) iletişim kuran sensör ve aktör düğümlerden oluşur, gerekli hissetmeleri ve operasyonları gerçekleştirir ( hedef takibi, izleme, özel alan güvenliği, biyolojik ve kimyasal saldırı tespiti gibi). Sensör düğümlerin genel olarak yetenekleri limitlidir( batarya, hissetme, işlem gücü ve kablosuz iletişim kabiliyeti). Aktörler ise daha gelişmiş kaynaklara sahip, daha yetenekli ve ihtiyaç duyulan önlemleri alabilecek düğümlerdir[1].

Enerji verimliliği, güvenilir ve zamanında iletişim KSAA için en büyük gerekliliktir. Pek çok protokol önerilmiştir şu ana kadar bu gereksinimleri karşılamak için [2], [3], [4], [5], [6]. Fakat bu önerilen protokollerin hepsi sensör ve aktörlerin koordinasyonunu esas almaktadır ve bu koordinasyon iletişime önemli bir gecikme eklemektedir. Aynı zamanda bu önerilen protokoller geri besleme mesajlarının sensörlerle aktörler arasında kusursuz aktarıldığını varsayılmaktadır, fakat bu varsayım açıkça görülmektedir ki gerçekçi değildir. Bu mesajlar ağın ölçeklenebilirliğini ortadan kaldırmaktadır. Yine bu protokoller enerji verimli oldukları iddia edilmelerine karşın enerji kullanımını düzgün bir şekilde yayamamaktadır. Önerilen hiç bir protokol katmanlar arası etkileşimleri göz önünde bulundurmamaktadır.

[7]'de KSAA yaşam ömrünü arttırmak için çapraz katman tasarımlar önerilmiştir. Fakat ağ durağan ve tamamen bir birine bağlı var sayılmıştır, katmanlar arası en uygun şekle sokma alıcı düğüm tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu durum çok uzun zaman almakta ve bu karmaşık yapı ağın tepki süresini arttırarak, kötü yönde etkilemektedir. [8]'de biyolojik olarak esinlenilmiş bir yaklaşım önerilmektedir sensör ve aktör ağları için. Bu çalışmada ise etkili tedbirlerin alınması için sensör ve aktör iletişimine odaklanılmıştır fakat enerji verimliliği ve iletişim güvenilirliği göz ardı edilmiştir.

Kablosuz sensör ve aktör ağlarına benzer olarak, biyolojik sistemlerde enerji verimli ve güvenilir biyolojik operasyonlara ihtiyaç duymaktadırlar, hayatsal işlevlerini yerine getirmek için. Örneğin böcek kolonileri içsel olarak yeterli hissetme ve davranma yeteneklerine sahiptirler ve bu şekilde avlanma, yuva inşaatı yavru besleme gibi faaliyetleri yerine getirirler. Kaynak kullanımı ve yönetimi açısından bakıldığında, ihtiyaç duyulan operasyonlar otonom olarak gerçekleştirilmektedir. Böcek kolonilerine benzer olarak, KSAA' DA, bir olay gerçekleştiğinde, olay bilgisi güvenilir biçimde aktörlere iletilmelidir ve bu işlem en az kaynak kullanımı ile gerçekleştirilmelidir. Açıkça görülmektedir ki böcek kolonileri ile KSAA arasındaki analogi muhteşem bir bakış açısı sağlamaktadır.

Bu makalede, böcek kolonilerindeki görev paylaşımı esas alınarak kablosuz sensör aktör ağları için geliştirilen biyolojik esinli çapraz katman (BEÇK) protokolü anlatılmaktadır. BEÇK protokolü ortam erişimi, yönlendirme ve taşıma katmanları arası çapraz katman bir yapı sağlayıp, zamanında, güvenilir ve eşit olarak dağıtık enerji tüketimi sunmaktadır. Dahası, BEÇK herhangi bir direk koordinasyona gerek duymamakta otonom olarak çalışabilmektedir.

Bu makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm II' de, BEÇK tasarım prensipleri anlatılmaktadır. İlk olarak ağ modeli ve problem formulasyonu sonrasında ise böcek kolonilerindeki

görev paylaşımı izah edilmektedir. Bölüm III' de, biyolojik esinli çapraz katman protokolü çıkarılmaktadır. Bölüm IV' de, BEÇK detaylarıyla anlatılmaktadır. Bölüm V'de, performans analizleri sunulmakta ve son olarak sonuçlandırıcı görüşler bölüm VI' da verilmektedir.

## 12. 2. BEÇK Dizayn Prensipleri

Bu bölümde BEÇK protokolünün temel tasarım prensipleri sunulmaktadır. Öncelikle ağ modeli tanıtılarak çapraz katman en uygun şekle sokma problemi formüle edilmektedir. Daha sonra böcek kolonilerindeki görev paylaşım fenomenine dayanılarak KSAA için biyolojik esinli çapraz katmanlı haberleşme modeli geliştirilmektedir.

### A. Ağ Modeli ve Problem Formülasyonu

Burada belli sayıdaki sensör düğümünün bir bölgeye yayılarak dağınık olarak belli sayıdaki hareketli aktör düğümüne veri ilettikleri bir ağ senaryosu düşünülmektedir. BEÇK algoritması otonom olarak her bir sensör düğüm tarafından periyodik olarak çağırılmaktadır.

*1. Ağ Yaşam Süresi:* Bu makalede ağ yaşam süresi ağdaki aktif düğümlerin kalan enerji seviyelerinin toplamının aktif düğümler tarafından tüketilen toplam enerjiye oranı olarak düşünülmektedir.

*1. Çapraz Katman Optimizasyon Problemi:* Çapraz katman en uygun şekle sokma problemi KSAA'nin minimum ve dengeli enerji tüketim ihtiyacı ve bunun yanında güvenilir haberleşme için gerekli olan haberleşme hızlarını yakalayabilmesi gibi ihtiyaçları düşünülerek şu şekilde modellenmektedir.

- Yaşam süresi optimizasyonu için aktif olan düğümlerin kalan enerjilerini maksimum yaparken tükettikleri enerjiyi minimumda tutmaları gerekmektedir.
- Her bir düğümün kendisine yapılan iletimleri geri yönlendirebilmek için yeterli sayıdaki zaman aralığını (time slot) kendisine tahsis edebilmesi gerekmektedir. Bu kabiliyet ağdaki olası sıkışmaları en aza indirerek güvenilir haberleşme sağlayabilecektir.

Yukarıda belirtilen çapraz katman gereklilikleri göz önüne alınarak çapraz katman problemi matematiksel olarak aşağıdaki gibi modellenmektedir.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \frac{\sum_{i \in A} E_i}{\sum_{i \in A} H_{iz_i}} \\ & \text{subject to} && c_i + \sum_{j \in I_i} n_j \leq n_i, \forall i \end{aligned}$$

### B. Böcek Kolonilerindeki Görev Paylaşım Fenomeni

Böcek kolonileri binlerce göreceli olarak çok düşük zekâya sahip bireyden oluşmaktadır. Bununla beraber bireylerin koordinasyona dolayı görev paylaşımı sayesinde, koloniler inanılmaz işleri üstün bir şekilde başarabilmektedirler. Bu üstün görev paylaşım yeteneği matematiksel olarak aşağıdaki gibi modellenmektedir [9]

$$T_{\theta}(s) = \frac{s_i^n}{s_i^n + \theta_i^n},$$

Burada  $s_i$  herhangi bir görev için  $i^{\text{th}}$  bireyin uyarıcısı  $\theta_i$   $i^{\text{th}}$  bireyin tepki eşliğidir.

### 12. 3. Biyolojik Esinli Çapraz Katmanlı Haberleşme Modeli

Biyolojik esinli çapraz katmanlı haberleşme modeli için biyolojik esinli görev bölüşüm olasılığı etkili sensör-aktör haberleşmesi için aşağıdaki gibi kullanılmaktadır.

$$P_{ij}(m) = \frac{\eta_i(m)s_{ij}}{s_{ij} + \sum_{k \neq i, k \in O_i} s_{ik}} = \frac{\eta_i(m)s_{ij}}{\sum_{k \in O_i} s_{ik}}$$

Burada  $s_{ij}$  i. sensör düğümün j. sensör düğümünden dolayı uyarılma miktarıdır. Aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$s_{ij} = \frac{e_{ij}}{d_{ij}} + \frac{E_j}{E_i}$$

$e_{ij}$  ve  $d_{ij}$  sırasıyla sensör düğüm  $i$  ile sensör düğüm  $j$  arasındaki etkin ve direk uzaklık.  $E_j$  ve  $E_i$  sırasıyla sensör düğüm  $i$  ve sensör düğüm  $j$ 'nin kalan enerjileridir.

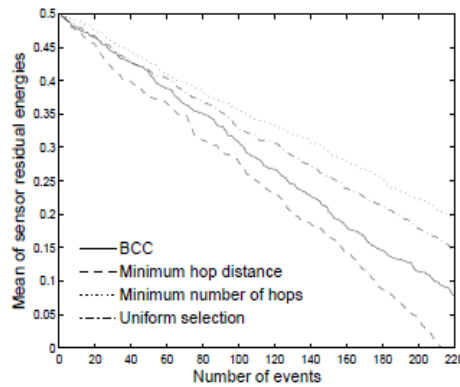
**Ön kuram:** Eğer protokolün periyodu ağdaki bütün düğümlerin veri hızı ihtiyacından büyük seçilirse, BEÇK protokolü biyolojik esinli atlama ve zaman aralığı bulma olasılığını kullanarak bütün algılayıcı düğümlerin veri hızı ihtiyaçlarını karşılayabilmektedir. (Ön kuramın ispatı rapora eklenen makalenin asıl kopyasında bulunabilir.)

**Kuram:** Biyolojik esinli atlama ve zaman aralığı seçme olasılığı her daim ağın yaşam süresini maksimuma çekmektedir. (Kuramın ispatı rapora eklenen makalenin asıl kopyasında bulunabilir.)

### 12.4. Performans Değerlendirmeleri

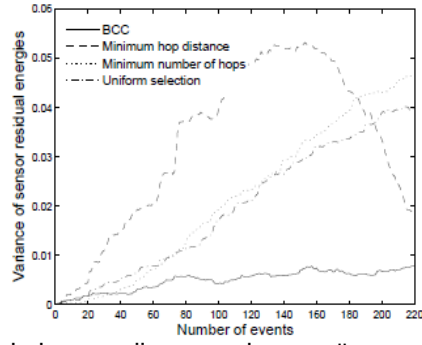
Bu bölümde BEÇK protokolünün performans değerlendirmeleri verilmektedir. İlk bölümde BEÇK'in enerji koruma performansı verilmektedir. Daha sonraki bölümlerde ise BEÇK'in zamanlı ve güvenilir haberleşme sağlayabilme performansı değerlendirilmektedir.

#### A. Enerji Koruma

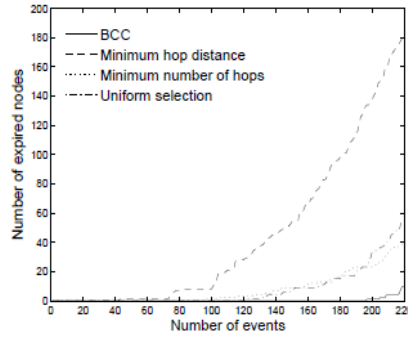


Şekil. 12.1 BEÇK'in tüketilen ortalama enerjiye göre enerji koruma performansı





Şekil. 12.2 BEÇK'in kalan enerji varyanslarına göre enerji performansı

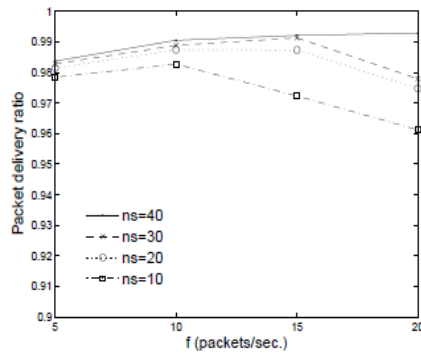


Şekil 12.3. BEÇK'in zamanla enerjisi tükenen düğüm sayısına göre performansı

Figür 1, 2, ve 3'de gösterildiği üzere BEÇK birçok iyi bilinen yönlendirme yaklaşımına göre %100'den daha fazla yaşam süresi artırımı sağlayabilmektedir.

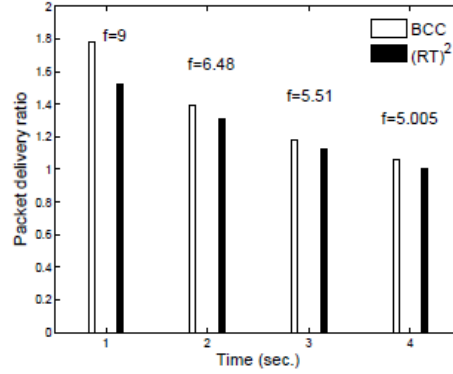
### B. Zamanlı ve Güvenilir Haberleşme

Figür 4'de görüldüğü gibi BEÇK çok yüksek gönderim başarısı sağlayabilmektedir.



Şekil. 12. 4. BEÇK'in değişik sayıdaki kaynak düğümlere göre paket gönderim performansı

### C. Performans Karşılaştırılması



Şekil. 12.5. BEÇK'in zamana göre (RT)<sup>2</sup> protokolü ile karşılaştırması

### 12.5. Sonuç

Bu çalışmada, biyolojik esinli çapraz katman (BEÇK) protokolü anlatıldı. BEÇK ortam erişim, yönlendirme ve taşıma katmanlarının işlevlerini bir arada gerçekleştirerek dağıtık ve geri beslemeye ihtiyaç duyulmayan bir sensör aktör ağı oluşturulmasını sağlar. Bu özellikleriyle BEÇK sensör aktör ağları için son derece dayanıklı, ölçeklenebilir ve enerji verimli bir protokoldür.

### KAYNAKLAR

- [1] I. F. Akyildiz, I. H. Kasimoglu, "Wireless sensor and actor networks: research challenges", Elsevier, Ad Hoc Networks, pp. 351-367, 2004.
- [2] C. Y. Wan, A. T. Campbell, L. Krishnamurthy, "PSFQ: a reliable transport protocol for wireless sensor networks", in Proc. ACM WSNA 2002, pp. 1-11, Atlanta, Georgia, USA, 2002.
- [3] Y. Sankarasubramaniam, O. B. Akan, I. F. Akyildiz, "ESRT: event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks", in Proc. ACM MOBIHOC 2003, pp. 177-188, Annapolis, Maryland, USA, 2003.
- [4] C. Y. Wan, S. B. Eisenman, A. T. Campbell "CODA: congestion detection and avoidance in sensor networks", in Proc. ACM SENSYS 2003, pp. 266-279, Los Angeles, California, USA, 2003.
- [5] T. Melodia, D. Pompili, C. V. Gungor, I. F. Akyildiz, "A Distributed Coordination Framework for Wireless Sensor and Actor Networks", in Proc. ACM, MOBIHOC 2005, pp. 99-110, Urbana-Champaign, IL, USA, 2005.
- [6] V. C. Gungor, O. B. Akan, and I. F. Akyildiz, "A Real-Time and Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor and Actor Networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 16, no. 2, pp. 359-370, April 2008.
- [7] R. Madan, S. Cui, S. Lall, A. Goldsmith, "Cross-Layer Design for Lifetime Maximization in Interference-Limited Wireless Sensor Networks", IEEE Trans. Wireless Comm., vol. 5, no. 11, pp. 1964-1975, 2006.
- [8] T. H. Labella, F. Dressler, "A Bio-Inspired Architecture for Division of Labour in SANETs", Advances in Biologically Inspired Information Systems, vol. 69, pp. 211-230, Springer, 2007.
- [9] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz, "Swarm Intelligence, From Natural to Artificial System", Oxford University Press, 1999.

# Tartışma ve Sonuç

Bu bölümde, proje kapsamında yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlardan bahsedilecektir.

## 1. Bağışıklık Sistemi Temelli Kablosuz Algılayıcı Ağlar

Bu çalışmada bağışıklık sisteminden esinlenilerek geliştirilen iletişim modeli ve temsilci algılayıcı belirleme ve raporlama frekansı hesaplama tekniği, bir merkezi kontrol ediciye ihtiyaç duymadan temsilci algılayıcıları seçip rapor frekanslarını kontrol ederek, kablosuz algılayıcı ağlar için etkili taşıma ve ortam erişim katmanı (transport and medium access layer) protokollerinin geliştirilmesine yönelik önemli bir başlangıç çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarından yararlanan pek çok yayın başka araştırmacılar tarafından da literatüre daha sonradan dahil edilmiştir.

## 2. Bilişsel Radyo Ağlarında Biyolojik Esinli Tayf Paylaşımı

Etkili tayf paylaşımı bilişsel radyo ağlarında bütün tayf kullanımını en büyük yapmak için çözülmesi gereken önemli bir problemidir. Bu çalışmada böcek kolonilerindeki uyarlamalı görev paylaşımına dayanan Biyolojik Esinli Tayf Paylaşım (BETP) protokolü geliştirilmiştir.

BETP lisanssız kullanıcılar arasında herhangi bir koordinasyona ihtiyaç duymadan lisanssız kullanıcıların kendileri için en uygun olabilecek tayfı belirleyebilmesini sağlamaktadır. Benzetim deneyleri, BETP'nin etkili bir dinamik tayf paylaşımını lisanssız kullanıcılar arasında herhangi bir koordinasyona gerek duymadan yüksek tayf kullanımı ile başarabildiğini ve böylece bilişsel radyo ağında tayf bırakma gecikmesi yükü oluşturmadığını göstermiştir.

## 3. Kablosuz Çokluortam Algılayıcı Ağlarında Homeostazi Tabanlı Haberleşme

HÇH, çokluortam olay sinyalinin alıcıda yeniden oluşturulmasını olası kılarak KÇAA'yı da kararlı bir durumda tutabilen, homeostazi tabanlı yeni bir haberleşme protokolüdür.

HÇH'nin sahip olduğu en belirgin özellikler

- Güvenilir haberleşme ve sıkışıklık kontrolü
- Alıcıdan bağımsızlık (alıcıdan geri beslemeye ihtiyacı yoktur.)
- Çokluortam olay sinyalinin minimum enerji harcanarak alıcıda yeniden oluşturulması
- Çokluortam olay sinyalinin tayf özelliklerine dayanmak
- KÇAA'lara kendi kendine organize olma yetisi kazandırmak

olarak sıralanabilir. Bu özellikler sayesinde düşük enerji kullanımı ile kablosuz çokluortam ağlarında veri iletimi biyolojik-esinli bir yöntemle ilk defa gerçekleştirilmiştir.

## 4. Moleküler Haberleşme İçin Bilgi Kuramsal Bir Yaklaşım

Bu çalışmada iki nano-makina arasındaki moleküler kanalın kapasitesi için bilgi kuramsal bir yaklaşım geliştirildi. Öncelikle bir moleküler haberleşme modelini tanıttıktan sonra kütle hareket kinetiğinin (mass action kinetics) prensiplerini kullanarak İletici Nano-makina (İN) ve Alıcı Nano-makina (AN) olarak isimlendirilen iki nano-makina arasındaki molekül teslimat (molecular delivery) modeli elde edildi. Daha sonra İN ve AN arasındaki kanalın kapasitesi için kapalı form bir ifadeye (closed form expression) ulaşıldı. Sayısal sonuçlar ortam sıcaklığı, yayılan moleküllerin (emitted molecules) yoğunluğu, nano-makinalar arasındaki uzaklık, ve molekül yayılma süresi gibi parametreleri uygun seçerek iki nano-makina arasında maksimum moleküler haberleşme kapasitesinin başarılabileceğini gösterdi.

Bu çalışmanın devamı olarak moleküler haberleşme için uyarlamalı kodlama ve hata düzeltme planları geliştirilecektir. Bu planlar sayesinde değişen ortam koşullarına nazaran yüksek moleküler haberleşme kapasitesi başarılabilecektir. Ayrıca devam eden çalışmalarımız çok atlamalı moleküler haberleşmeyi olanaklı kılarak nano-makinalardan oluşan nano boyuttaki bir ağı mümkün kılmayı amaçlamaktadır.

## 5.Kablosuz Sensör Ağlarda Homeostazi-Tabanlı Olay İletim Protokolü

Bu çalışmada kablosuz algılayıcı ağları için geliştirilen ve algılayıcıların alıcı düğüm ile herhangi bir koordinasyona gerek duymadan, enerji tüketimi ve paket teslimatı açısından çok etkili haberleşme yapmasını sağlayabilen Homeostazi'ye Dayanan Olay Haberleşmesi protokolü (HEC) (iyileştirilmiş mekanizmaları ve genişletilmiş başarımlar deney sonuçları) sunuldu. Bu çalışmada biyolojik homeostazi ile KAA arasındaki bu geçişler göz önünde bulundurularak *Homeostaziye Dayanan Olay Haberleşmesi* protokolü HEC sunulmaktadır. Bu çalışmanın bir öncekinden temel olarak farkı, yalnızca çokluortam için değil genel olarak KAA için yapılmış olmasıdır.

## 6.Bilişsel Ağlar İçin Biyolojik-Esinli Haberleşme

Bu çalışmada ilk raporda sunduğumuz biyolojik esinli tayf paylaşım yöntemine benzer olarak bilişsel radyo ağlarının başka ihtiyaçlarına cevap verebilecek ve biyolojik esinli dinamik tayf erişim yöntemleri için yol haritası olabilecek benzetimler ve yaklaşımlar araştırılmıştır. Bu yaklaşımlar sırası ile bağışıklık sistemine dayanan tayf yönetim (spectrum management) yaklaşımı, yine bağışıklık sistemine dayanan tayf algılama (spectrum sensing) yaklaşımı, ve son olarak biyolojik anahtarlamaya dayanan tayf hareketini kontrol yöntemidir.

## 7.Moleküler Haberleşme İçin Hata Telafi Yöntemi

Bu çalışmada makalenin ilk versiyonuna ek olarak moleküler haberleşme için Moleküler Hata Telafi (MET) yöntemi verilmektedir. MET İletici Nano-makina (İN) ve Alıcı Nano-makina (RN) arasında nano-makinalara çok az işlemsel yük getirebilmekte ve moleküler haberleşme kapasitesini çok fazla artırabilmektedir. Ayrıca MET moleküler haberleşme için geliştirilen literatürdeki ilk hata telafi yöntemidir. MET yönteminin detayları aşağıda sunulmaktadır.

## 8.Nano-Ağlarda Çoklu-Erişim, Yayım, Ve Aktarım Kanallarının İncelenmesi

Bu çalışmada projenin ikinci raporunda detayları verilen "An Information Theoretical Approach For Molecular Communication" isimli makalede geliştirilen moleküler haberleşme modeli kullanılarak bir nano-ağdaki moleküler çoklu erişim, yayım ve aktarım kanalları tanımlanarak, haberleşme kapasiteleri araştırılmıştır.

## 9.Moleküler Nano Ağlarda Tekli Ve Çoklu Kanal Kapasiteleri

Bu çalışmada, biyolojideki doğal ligand-yapışma mekanizmaları kullanılarak, tekli ve çoklu- erişim moleküler kanalların kapasiteleri incelenmiştir. Sayısal sonuçlar gösteriyor ki daha yüksek kapasiteler elde etmek için moleküler haberleşme parametrelerini yeterli ve etkili bir biçimde ayarlamak bir zorunluluktur. Bu yüzden bu ayarlamayı sağlayacak yeterli moleküler haberleşme algoritmaları da nano-makinaların bir nano-ağda güvenilir biçimde moleküler bilgi paylaşmaları açısından zorunludur. Bu çalışmamızın devamı olarak gelecek dönemde burada incelediğimiz moleküler kanal kapasite ifadelerinden faydalanarak moleküler nano-ağlar için ortam erişim ve yönlendirme algoritmaları geliştirmeyi ve geliştirilen algoritmalar ile beraber buradaki teorik analizleri de içeren bir dergi makalesi hazırlanmıştır.

## 10.Biyolojik Esinli Ağlar Üzerine Geniş Literatür Tarama Makalesi:

Bilişsel radyo ağları, sensör ve aktör ağları, kuantum haberleşme ağları, karasal yeni nesil İnternet, İPN (Gezegenler arası) İnternet, ve taşıtlar arası haberleşme ağları, gerçekleştirmelerinde geniş ölçekli ağlarda artan karışıklık, çok-türel mimariler, merkezi kontrol eksikliği, hayatta kalma ihtiyacı ve potansiyel hataların gözetimsiz çözümü gibi büyük engellerle karşılaşılıyorlar. Aynı zamanda, değişen ortamlara uyum sağlama, hata ve zararlara karşı doğasından gelen dayanıklılık, başarılı, işbirliği içinde, pratik ve basit operasyon, kendini örgütlenme, hayatta kalma, ve evrimleşme gibi yaradılıştan gelen çekici özelliklere sahip bir çok biyolojik sistem ve süreç mevcuttur. Bu çalışmada genel temel ağ oluşturma güçlükleri, biyolojik esinli ağ oluşturma perspektifinden bakan şu anki araştırma çabalarının

durumu anlatılmaktadır. Biyolojiden esinlenme gerçekten yenilikçi ağ tasarımı oldukça güçlü olan bir kaynaktır. Bu alandaki yabana atılmayacak sayıdaki devam eden araştırmaya rağmen, biyolojik esinli ağ oluşturma araştırma topluluğu hala çok gençtir, ve hala varolan ve gelecekteki ağ mimarilerini oluşturmada temel güçlükleri ifade eden bir çok zor görev mevcuttur.

### **11. Bilişsel Plansız Radyo Ağlarında Bağışıklık Sistemi Tabanlı Evrimsel Fırsatçı Spektrum Erişimi**

Bu çalışmada, yeni bir biyolojik esinli fırsatçı spektrum erişim mekanizması olan bağışıklık sistemi tabanlı evrimsel spektrum erişim mekanizması (ESE) bilişsel plansız radyo ağları için tanıtıldı. Bağışıklık sistemi tabanlı fırsatçı erişim doğal sistem özelliği olarak bir çok avantaj içermektedir. Esinlenilmiş kendi-diğeri algılaması ve klonal seçim mekanizmaları sayesinde ESE, kaynakların yeterli, adil ve yüksek düzeyde kullanımını sağlamaktadır. Bu doğal metotlar sistemi, kendi kendine organize olabilen, öz-uyumlu ve öz-düzenlenebilir kılmaktadır. Ayrıca, varolan fırsatçı spektrum erişim sistemlerinden farklı olarak, ESE bir tane özel kontrol kanalı gerektirmez. Performans analiz sonuçları gösteriyor ki ESE, İK'ların BK'yı rahatsız etmeden bilişsel biçimde kullanmaya çalıştığı haberleşme kanallarının daha adil ve etkili kullanımını sağlamaktadır. Buna ek olarak, ESE performansı yüksek trafik yükünden etkilenmez, bunun yerine, özellikle yüksek hareketlilik olduğu durumlarda, çekişme yüksekse sistem daha hızlı evrimleşir ve en uygun duruma daha erken yakınsar.

### **12. Biyolojik Esinli Çapraz Katmanlı Haberleşme**

Bu çalışmada, biyolojik esinli çapraz katman (BEÇK) protokolü geliştirildi. BEÇK ortam erişim, yönlendirme ve taşıma katmanlarının işlevlerini bir arada gerçekleştirerek dağıtık ve geri beslemeye ihtiyaç duyulmayan bir sensör aktör ağı oluşturulmasını sağlar. Bu özellikleriyle BEÇK sensör aktör ağları için son derece dayanıklı, ölçeklenebilir ve enerji verimli bir protokoldür. BEÇK ortam erişim, yönlendirme ve taşıma katmanları işlevlerini birleştirerek, güvenilir ve en aza indirgenip eşit olarak dağıtık enerji tüketimi sunmaktadır. En önemlisi ise BEÇK sensörler ve aktörler arasında direk olarak herhangi bir koordinasyona gerek duymamaktadır. Performans analizlerinin açıkça gösterdiği üzere BEÇK ağ ömrünü önemli derecede uzatırken aynı zamanda hiç bir geri besleme olmadan yüksek derecede güvenilir sensör aktör iletişimi sağlamaktadır.

# TÜBİTAK PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

<b>Proje No:</b> 106E179
<b>Proje Başlığı:</b> Gelecek Nesil İletişim Ağları İçin Biyolojik-Esinli İletişim Teknikleri
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> Doç. Dr. Özgür Barış Akan (Yürütücü)
<b>Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:</b> Gelecek Nesil Kablosuz Haberleşme Laboratuvarı Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Çankaya/ANKARA
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b> Proje başka kuruluş tarafından desteklenmemiştir.
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 01 Şubat 2007 - 01 Ağustos 2009
<b>Öz (en çok 70 kelime)</b>  Gelecekteki ağ uygulamaları ölçeklendirilebilme, kendi kendine organize olabilme, kendi kendini adapte edebilme ve hayatta kalabilme yeteneklerine sahip olmak zorundadır. Doğada biyolojik sistemlerin bu kabiliyetlere sahip olduğunu kolayca gözlemleyebiliriz. Bu nedenle, doğal biyolojik sistemler araştırmacılara geleceğin nesil ağ yapılarına iletişim ağı modeli geliştirmek için büyük esin kaynağı olmaktadır. Bu projenin amacı doğal biyolojik sistemlerden esinlenerek, gelecekteki ağ yapıları için ölçeklendirilebilen, kendi kendine organize olabilen, kendi kendini adapte edebilen, hayatta kalabilen iletişim modelleri ve teknikleri geliştirmektir.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Biyoloji-esinli iletişim teknikleri, gelecek nesil iletişim ağları, biyolojik sistemler, bağışıklık sistemi, kablosuz algılayıcı ve aktör ağları, çöktürel ağlar, dinamik tayf erişimi, bilişsel radyo ağları, moleküler haberleşme, nano-ağlar.
<b>Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu?</b> Evet <u>Gerekli Değil</u> Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.
<b>Projeden Yapılan Yayınlar:</b>  1. Barış Atakan, Özgür. B. Akan, "Immune System Based Energy Efficient and Reliable Communication in Wireless Sensor Networks," in <i>Advances in Biologically Inspired Information Systems</i> , Edited by F. Dressler and I. Carreras, Springer, 2007. (Book Chapter) 2. Barış Atakan, Özgür. B. Akan, "Bio-inspired Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks," in <i>Bio-inspired Computing and Communication Networks</i> , Edited by Y. Xiao and F. Hu, Auerbach Publications, CRC Press, 2008. (Book Chapter) 3. Barış Atakan, Tuna Tuğcu, Özgür B. Akan, "Bio-inspired Communications in Wireless Sensor Networks", in <i>Guide to Wireless Sensor Networks</i> by Sudip Misra, Isaac Woungang, and Subhas C. Misra, Springer (London),2009. (Book Chapter) 4. Barış Atakan, Özgür B. Akan, "On Channel Capacity and Error Compensation in Molecular

Communication", *Springer Trans. on Computational System Biology*, Vol. 10, pp. 59-80, Springer, 2008.

5. Falko Dressler, Özgür B. Akan, "A Survey on Bio-inspired Networking", to appear in *Computer Networks Journal (Elsevier)*, 2009.
6. Barış Atakan, Özgür B. Akan, "The Capacity of Molecular Single and Multiple-Access Channels in Nanonetworks", to appear in *LNCS*, 2009.
7. Barış Atakan, Özgür B. Akan, "Homeostasis-based Event Communication in Wireless Sensor Networks," submitted to *IEEE Transactions Mobile Computing*, 2008.
8. Barış Atakan, Özgür B. Akan, "Biologically inspired Cross-layer Communication in Wireless Sensor and Actor Networks", submitted to *Ad Hoc Networks Journal (Elsevier)*, July 2009.
9. Barış Atakan, Burhan Gulbahar, Özgür B. Akan, "Immune System Based Adaptive Spectrum Sharing and Management in Cognitive Radio Networks", submitted to *IEEE Journal on Selected Areas in Communication Special Issue on Bio-inspired Networking*, 2009.
10. Barış Atakan, Özgür B. Akan, "BIologically-inspired Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks," in *Proc. IEEE WCNC 2007*, Hong Kong, March 2007.
11. Barış Atakan, Alper Bereketli, and Özgür B. Akan, "Homeostasis-based Multimedia Communications in Wireless Sensor Networks," Workshop on advances in Wireless Networking (WOW-NET), *IFIP Networking 2007*, Atlanta, USA, May 2007.
12. Barış Atakan, Özgür B. Akan, , "Immune System Based Distributed Node and Rate Selection in Wireless Sensor Networks," in *Proc. IEEE/ACM First International Conference on Bio-inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS 2006)*, Cavalese, Italy, December, 2006.
13. Barış Atakan, Özgür. B. Akan, "An Information Theoretical Approach for Molecular Communications," in *Proc. IEEE/ACM BIONETICS 2007*, Hungary/Budapest, December 2007.
14. Barış Atakan, Özgür B. Akan, "On molecular multiple-access, broadcast, and relay channels in nanonetworks," in *Proc. IEEE/ACM BIONETICS 2008*, Hyogo, Japan, December 2008.