






Interference and molecule reception probability analysis in nano/micro scale communication systems using Fick's diffusion law

İbrahim Işık¹ , Mehmet Emin Tağluk¹ , Esme Işık^{2*} 

¹Inonu University, Engineering Faculty, Faculty of Engineering, Department of Electrical Electronics Engineering, 44280 Malatya, Turkey

²Malatya Turgut Ozal University, Department of Optician, 44280, Malatya, Turkey

Highlights:

- Fixed and mobile molecular communication models were used
- Interference and number of received molecule were analyzed
- Receiver models at different topologies were selected

Keywords:

- Molecular communication
- Fick's law
- receiver
- interference
- molecule reception rate

Graphical Abstract

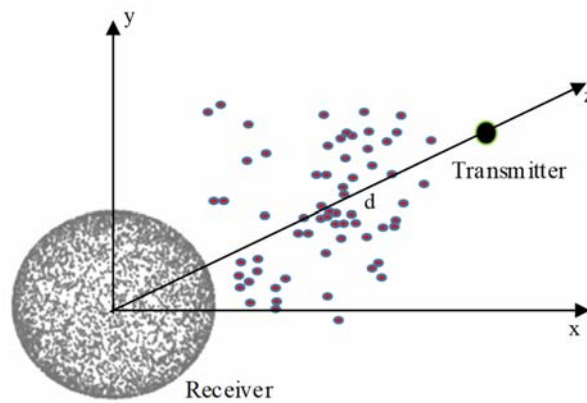


Figure A. The proposed model

Article Info:

Research Article
Received: 13.04.2021
Accepted: 29.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.915454

Correspondence:

Author: Esme Işık
e-mail:
esme.isik@ozal.edu.tr
phone: +90 422 377 4818

Purpose: The results obtained from the proposed nano/micro scale communication model encourages one to think that such receiver models might have the potential for Alzheimer and many illness which cause missing and/or wrong communication of the cells.

Theory and Methods:

Nano/micro scale communication (NMSC) systems in which chemical signals are used as carriers for transmission of information through fluid media. The information carrier particles used in such communication systems consist of biological components such as DNA and protein components. Studies regarding NMSC are considered to highly contribute to the developments in the field of nano-technology which can be used to detect and treatment of the some unsolved illness. Therefore, in this study, software based a new NMSC model that could potentially be used in nano-scale systems were developed and analysed in terms of communication performance. Firstly, Diffusion constant which affect the communication performance of the software based NMSC model is derived using some Physics laws such as Fick's. Secondly, different forms of receivers such as sphere, cube and rectangular prism topologies have been tried for increasing the rate of molecule reception and reducing the inter symbol interference of the receiver.

Results:

It was observed that the signal transmission rate increased and the interference decreased with the use of a cube receiver model.

Conclusion:

It is thought that the metric outputs obtained from this study will contribute to the literature on the development and implementation of nano-systems, including the development of new generation medical treatment and detect strategies and processes at nano-scale.



Fick difüzyon yasası kullanılarak nano/mikro ölçekli haberleşme sistemlerinde girişim ve molekül alım olasılığı analizi

İbrahim Işık¹, Mehmet Emin Tağluk¹, Esme Işık^{2*}

¹Inönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 44280 Malatya, Türkiye

²Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Optisyenlik Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Sabit ve hareketli moleküler haberleşme modeli kullanılmıştır
- Girişim ve alınan molekül sayısı ölçülmüştür
- Farklı şekillerde alıcı modelleri seçilmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 13.04.2021
Kabul: 29.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.915454

Anahtar Kelimeler:

Moleküler haberleşme,
Fick yasası,
alıcı,
girişim,
molekül alım oranı

ÖZ

Nano ve mikro ölçekteki sistemlerin iletişim mekanizmasını modellemek için canlıların kullandığı nano-ölçekteki elektro-kimyasal haberleşme sistemlerinden esinlenerek (biyolojik esinli) yeni haberleşme tekniklerinin geliştirilmesi üzerine son zamanlarda yoğun bir şekilde çalışma yapılmaktadır. Bilgi alışverişinde taşıyıcı olarak kimyasal sinyallerin kullanıldığı bu alan nano/mikro ölçekli haberleşme (NMÖH) olarak bilinmektedir. Moleküler haberleşme sistemlerinde iletim için kullanılan bilgi parçacıkları protein, DNA gibi biyolojik bileşenlerden oluşmaktadır. NMÖH konusu ile ilgili yapılacak çalışmaların, günümüzde henüz tedavisi olmayan bazı hastalıkların teşhis ve tedavinde kullanılan yeni nesil nano-teknoloji alandaki gelişmelere büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Bu sebeple, nano-ölçekli sistemlerde kullanılma potansiyeli olabilecek yeni bir NMÖH modeli yazılım tabanlı olarak Matlab ortamında geliştirilerek burada analiz edilmiştir. Yazılım tabanlı olarak tasarlanan NMÖH modelinde, ilk olarak moleküllerin iletildiği difüzyon ortamı ve bu ortamda iletişim performansını etkileyen faktörlerden biri olan difüzyon sabiti, Fick yasası gibi temel fizik kanunları kullanılarak yeniden türetilmiştir. Daha sonra ise alıcı topolojisi küre, küp ve dikdörtgen prizma gibi değişik formlarda denenecek alıcının sinyal iletim oranı artırılmaya ve iletim sırasında meydana gelen moleküller arası girişim düşürülmeye çalışılmıştır. Küp alıcı modelinin kullanılması ile sinyal iletim oranının arttığı ve girişimin düştüğü görülmüştür. Önerilen NMÖH modelinin, başta Alzaymır olmak üzere hücrelerin yanlış ve/veya eksik iletişiminden kaynaklı birçok hastalığın teşhis ve tedavisinde kullanılabilecek potansiyelde olduğu düşünülmektedir.

Interference and molecule reception probability analysis in nano/micro scale communication systems using Fick's diffusion law

H I G H L I G H T S

- Fixed and mobile molecular communication models were used
- Interference and number of received molecule were analyzed
- Receiver models at different topologies were selected

Article Info

Research Article
Received: 13.04.2021
Accepted: 29.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.915454

Keywords:

Molecular communication,
Fick's law,
receiver,
interference,
molecule reception rate

ABSTRACT

Recently, too much effort has been conducted toward development of novel communication techniques (biological inspired) for implementing in nano and micro scale systems inspired from electro-chemical communication systems that naturally used by living beings. One of these techniques is known as nano/micro scale communication (NMSC) in which chemical signals are used as carriers for transmission of information through fluid media. The information carrier particles used in such communication systems consist of biological components such as DNA and protein components. Studies regarding NMSC are considered to highly contribute to the developments in the field of nano-technology which can be used to detect and treatment of the some unsolved illness yet. Therefore, in this study, software based a new NMSC model that could potentially be used in nano-scale systems were developed and analysed in terms of communication performance. Firstly, Diffusion constant which affect the communication performance of the software based NMSC model is derived using some Physics laws such as Fick's. Secondly, different forms of receivers such as sphere, cube and rectangular prism topologies have been tried for increasing the rate of molecule reception and reducing the inter symbol interference of the receiver. It was observed that the signal transmission rate increased and the interference decreased with the use of a cube receiver model. The results obtained from the proposed NMSC model encourages one to think that such receiver models might have the potential for Alzheimer and many illness which cause missing and/or wrong communication of the cells.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : ibrahim.isik@inonu.edu.tr, mehmet.tagluk@inonu.edu.tr,

*esme.isik@ozal.edu.tr / Tel: +90 422 377 4818

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Moleküler haberleşme konusu bilim insanları tarafından ilk olarak yirminci yüzyılın başlarında araştırılmaya başlanmış ve bu yöndeki çalışmalar, fizikçi Richard Feynman'ın 1959'da bilim insanlarına "Aşağıda Bir Sürü Yer Var" konulu bir sunum yapması ile ivme kazanmıştır. Yapılan sunumda, küçük (nano, mikro) ölçekli cihazların kontrolüne ve yönetimine yönelik çözüm yöntemlerinin araştırılması ve geliştirilmesi gereğine değinilmiş ve bu konu ile ilgili tartışmalar yapılmıştır. Feynman'ın, 24 ciltlik meşhur Britannica ansiklopedisinin bir toplu inen ucuna sığdırılacak kadar küçültülebileceğini söylemesi o dönemde büyük yankı uyandırmıştır [1]. Günümüzde nano/mikro ölçekli sistemler, molekül veya hücre haberleşmesinde yaşanan problemlerden dolayı ortaya çıkan çeşitli hastalıklara çözüm üretebilecek potansiyele sahip olduğu düşünülerek birçok araştırmacı tarafından yoğun bir şekilde çalışılmaktadır [2-4]. Araştırmacılar nano-teknoloji içeren sistemlerde haberleşme ve koordinasyon problemlerine çözüm geliştirme adına moleküler düzeyde çalışabilecek haberleşme sistemlerinin tasarımına yönelmişlerdir [5-7]. Moleküler bazlı çalışan bu sistemleri modellemek ve doğrulamak için araştırmacılar doğada zaten var olan biyolojik canlıların kullandığı nano/mikro ölçekli haberleşme (NMÖH) sistemlerinden esinlenmektedirler. MH sistemlerinde bilgi transferi için kimyasal sinyaller (moleküller) taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde bilgi transferi bilinen modern sayısal veri transferinden farklılık göstermektedir.

Birçok araştırmacı nano-teknoloji biliminin medikal ve nano-robot gibi çeşitli alanlarda daha etkin bir şekilde kullanılabilmesi için yeni yöntem ve teknikler önermektedirler. Bu yöntemler, günümüzde daha çok hücreler arası haberleşme problemlerini çözmeye yönelik olarak yapılmaktadır. Örneğin, Dijital haberleşme sistemlerinde, bilginin vericiden alıcıya daha verimli bir şekilde iletimi için donanım tabanlı antenler kullanılırken Moleküler haberleşme sistemlerinde molekül tabanlı antenler kullanılmaktadır. Literatürde, Dijital sistemler için geliştirilmiş çeşitli anten modelleri [8] bulunduğu gibi molekül tabanlı anten modellerinin de çalışıldığı bazı çalışmalar bulunmaktadır [9-11]. Moleküllerin alıcıya başarılı ulaşma olasılığı üzerine yapılan [9] çalışmada, benzetim tabanlı analitik bir çalışma yapılarak önerilen sistem test ve analiz edilmiştir. Biyolojik canlılarda alıcı üzerinde bulunan reseptörler bu çalışmada moleküler anten olarak düşünülmüş ve reseptörlerin boyutu ve alıcı üzerindeki yoğunluğu değiştirilerek vericiden salınan moleküllerin alıcıya başarılı ulaşma olasılığı analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda alıcı üzerinde aynı yoğunluğa sahip daha küçük boyuttaki reseptörlerin salınan molekülleri daha yüksek bir başarı olasılığı ile aldığı görülmüştür. [10] çalışmada araştırmacılar tarafından Ligand reseptör modeli önerilmiş ve önerilen bu modelin kapasite artırımı Markov zincir modeli kullanılarak elde edilmeye çalışılmıştır. [11] çalışmada Dijital haberleşme sistemlerindeki antenlerin Moleküler haberleşme sistemlerindeki karşılığı olarak bahsedilen yönlendirilmiş

alıcı modelleri çalışılmıştır. Alıcıdan belli bir mesafede kılıf adı verilen küre ve silindir şeklindeki yapılar alıcı üzerine yerleştirilerek alıcının molekül alma olasılığı arttırılmaya çalışılmıştır. Vericiden gönderilen molekül eğer alıcının içine girmemiş fakat alıcının üzerinde bulunan kılıfın içerisine girmişse o molekül tekrar vericiden gönderilerek alıcının o molekülü alma olasılığı arttırılmaktadır. Yazarlar, alıcı üzerinde tanımlanan silindir ve küre şeklindeki yapıların farklı boyut ve açılar ile alıcı üzerine yerleştirildiğini varsayarak alıcının molekül alma olasılığını analiz etmişlerdir. Sonuçta, alıcıdan altı kat daha büyük hacme sahip silindir şeklindeki kılıf modelinin alıcının molekül alma olasılığını en çok arttıran model olduğu görülmüştür. Kanal transfer yönteminin önerildiği [12] çalışmada noktasal verici ve küresel alıcı modeli kullanılarak üç boyutlu (3-D) bir düzlemde girişim ve iletim gecikme paradigmaları elde edilmiştir. Ayrıca, vericiden salındığı varsayılan moleküllerin alıcı tarafından alınma olasılığını temsil eden zaman-molekül alma olasılığı, yapılan benzetim çalışması ile grafiksel olarak elde edilmiştir. Verilen grafik, alıcı ve verici arasındaki uzaklığa bağlı olarak analiz edilmiş ve aradaki uzaklık arttıkça molekül alma olasılığının düştüğü hem analitik hem de benzetim yolu ile yapılan çalışmalarda görülmüştür. Analizi yapılan diğer bir modelde ise ters çevrilebilir adsorption ve desorption alıcı modelleri yoğunluk kaydırmalı anahtarlama metodu ile analiz edilmiştir [13]. Difüzyon yolu ile iletişimin kullanıldığı bu sistemde, NMÖH'deki en büyük problemlerden biri olan Semboller Arası Girişimin (intersymbol interference-ISI) azaltılmasına yönelik bazı analitik çalışmalar yapılmıştır. Sembol süresi boyunca alıcıya çarpan moleküllerin adsorb edildiği önceki sembol süresinden kalan moleküllerin ise desorb edildiği modelde, Bit Hata Oranı (BER) değerleri Skellam dağılım metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Adsorption ve desorption alıcı modelinin kullanıldığı diğer bir çalışmada ise farklı adsorption ve desorption oranları için sistem 3-D uzayda numerik olarak analiz edilmiştir [14]. Yapılan analizler sonucunda, adsorption edilen moleküllerin alıcıdaki beklenen sayısının adsorption oranının artması ve desorption oranının azalması ile arttığı gözlemlenmiştir.

Gelecekte hayatımızda yer alacağı düşünülen nano-ölçekli cihazların haberleşme sistemlerinin yazılım ve donanım modelleri üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu modellerden birisi biyolojik canlıların nöronal ağda kullandıkları elektro-kimyasal iletişimden esinlenerek ortaya atılan NMÖH sistemidir. Bu alanda yapılan çalışmalar genellikle sistemin haberleşme performansını arttırmaya yöneliktir. Bu bağlamda burada NMÖH sistemleri için daha iyi bir alıcı modelini geliştirmek amaç edinilmiş ve dolayısıyla alıcının molekül alma olasılığını artırma ve semboller arası girişimini azaltma hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Nano-ölçekli sistemlerde verici ile alıcı arasındaki haberleşme ve koordinasyon, bilinen modern elektro-manyetik tabanlı sayısal teknikler kullanılarak yapılabildiği

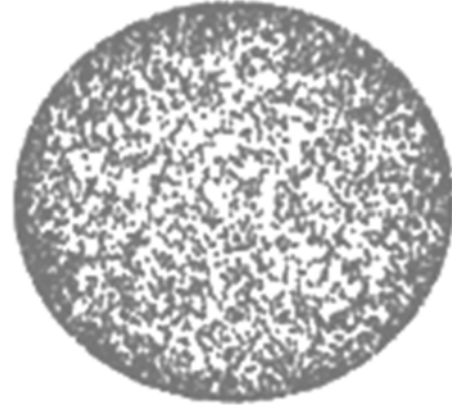
gibi doğada bulunan biyolojik canlıların kullandıkları elektro-kimyasal iletişim şekli kullanılarak da yapılabilmektedir. Elektromanyetik tabanlı tekniklerde mevcut iletişim esasları nano-ölçekteki sistemlere uyarlanarak haberleşme gerçekleştirilmektedir. Elektro-kimyasal tabanlı teknik ise nöron ve nöronlar-arası elektriksel ve moleküler haberleşme esaslarına dayanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde kullanılan iletim tekniği, haberleşme mühendisleri tarafından henüz tam olarak keşfedilemeye de biyolojik canlıların hücreleri tarafından veri iletişimi yüzyıllardır kullanılmaktadır. Bu iletim yönteminde, bir hücrede bulunan elektrik potansiyel, moleküler yapılar ve verici ile alıcı arasındaki uzaklık gibi kavramları dikkate alan daha çok istatistiksel yöntemler kullanılmaktadır. Elektromanyetik tabanlı yöntemler yüzyıllardır bilinen ve haberleşme sistemlerinde verimli bir şekilde kullanılan yöntem olmasına rağmen, Moleküler haberleşme sistemlerinin medikal alanda kullanılabilme potansiyelinden dolayı elektro-kimyasal tabanlı yöntem tercih edilmektedir. Çünkü iletimde kullanılan elektromanyetik dalgalar canlılara zarar verebilir ve ayrıca nano-ölçekteki haberleşme sistemlerini modellemek günümüz teknolojisi ile oldukça maliyetli bir işlemdir. Ayrıca Moleküler haberleşme sistemlerinin dışarıdan elektrik akımı verilmesine ihtiyaç olmadan mesaj iletimi yapması da bu yöntemin üstün olduğunu göstermekte ve bu yüzden de tercih edilmektedir. Bu sebeplerden ötürü bu çalışmada biyolojik esinli (elektro-kimyasal tabanlı) NMÖH yöntemi seçilmiştir. Ayrıca NMÖH sürecinde moleküllerin vericiden alıcıya taşınması süreci difüzyon yasaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Difüzyon yolu ile iletişim için moleküllerin iletim ortamında rastgele yayılımını modelleyen *Brownian Motion* paradigmaları kullanılmıştır.

Moleküler haberleşme sistemlerinin medikal/biyomedikal alanlara uygulanabilmesi için öncelikle laboratuvar ya da bilgisayar yardımı ile benzetimi yapılarak test edilmesi gerekmektedir. Böylesi sistemleri laboratuvar ortamında test edebilmek için dünyada çok az araştırma kurumunda bulunan ve yapılan analizlerin oldukça pahalı olduğu ıslak laboratuvarların kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden günümüzde araştırmacılar Moleküler haberleşme sistemlerinin analiz işlemleri için daha çok benzetim yolunu seçmektedirler. Dijital haberleşme sistemlerinde olduğu gibi moleküler haberleşme sistemlerinde de vericiden gönderilen bilginin alıcıya minimum hata ile ulaştırılması büyük önem arz etmektedir. Fakat semboller arası girişim, gürültü vb. gibi sebeplerden ötürü bilgi alıcı tarafına belirli oranda hata ile iletilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için verici-kanal-alıcı birimlerinin iyi bir şekilde modellenmesi ve senkronize edilmesi gerekmektedir.

2.1. Verici ve Alıcı Birimi (Transmitter and Receiver Parts)

Bu çalışmada, MUCIN simülöründen [15] yararlanılarak Matlab'da yeni bir algoritma geliştirilmiş ve benzetim yöntemi ile alıcıya ulaşan moleküllerin alıcı üzerinde bulunan reseptörlerden alıcı içine alınma olasılığı baz alınarak NMÖH sisteminin analizi yapılmıştır. Sistemin,

Şekil 1'de görüldüğü gibi, yarıçapı çok küçük kabul edilen noktasal bir verici, farklı topolojideki alıcı ve alıcı üzerinde bulunan reseptörlerden oluştuğu kabul edilerek çeşitli analizler yapılmıştır. Moleküllerin alıcıya başarılı bir şekilde ulaşma olasılığının hesaplanması tek boyutlu sistemler kullanılarak yapılabildiği gibi üç boyutlu sistemler kullanılarak da artık yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında da yapılan analizler için yüksek kapasiteli işlem gücüne sahip bilgisayar kullanarak üç boyutlu bir NMÖH modeli tasarlanarak hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 1'de 3-D olarak tasarlanan sisteminin şekli gösterilmiştir [16]. Moleküler düzeydeki iletişim modelinde en önemli kısmın alıcı kısmı olduğu düşünülmektedir ve dolayısıyla bugün daha çok alıcı modellemesi ve vericiden gönderilen molekülün alıcıya başarılı bir şekilde ulaşma olasılığını artırma üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bu sebeple önerilen modelde, alıcı biriminin modellenmesi ve modelin performansını belirlemek için de bazı test ve analizler yapılmıştır. Bu bağlamda küp, küre ve dikdörtgen gibi geometrik şekillere sahip absorban (absorbing) alıcı modelinin performanslarını belirleme üzerine çalışma yapılmıştır. Bu alıcı modelleri kullanılarak tasarlanan sistem üzerinde verici-alıcı arasındaki uzaklık ve gönderilen (sinaptik boşluğa salınan) molekül sayısına bağlı olarak moleküllerin alıcıya başarılı bir şekilde ulaşma olasılığı (hitting probability), semboller arası girişim gibi parametreler bağlamında sistem üzerinde analizler yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulguların ileride geliştirilmesi muhtemel görünen nano-robotlar gibi nano-ölçekteki yeni nesil teknolojilere ilham kaynağı oluşturarak çeşitli tıbbi tedavi yöntemlerine yardımcı olacağı düşünülmektedir.



Şekil 1. Önerilen NMÖH modelinin 3D ortamdaki gösterimi (3D model of the proposed Molecular communication system)

2.2. Kanal Birimi (Channel Part)

Moleküler haberleşmede bilginin iletildiği kanal, Dijital haberleşmede kullanılan hava ya da elektrik kabloları yerine gaz veya sıvı ortamlardır. Böylesi bir iletişim kanalından bilginin vericiden alıcıya taşınması için biyolojik canlıların hücreleri tarafından oluşturulan nöronal ağda kullandıkları prensip ve yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar:

- Difüzyon
- Boşluk birleşimi
- Molekül ve bakteri tabanlı motorlardır.

Biyolojik canlıların vücut içerisinde, bilginin transferi genelde difüzyon ortamında moleküllerin serbest hareketi şeklinde gerçekleştiği bilinmektedir. Difüzyon ile iletimde çok az enerji harcanarak moleküllerin alıcıya iletilmesi ifade edilmektedir [17, 18]. Difüzyon yolu ile moleküllerin vericiden alıcıya nasıl iletiltiğini temsili olarak göstermek için Şekil 2 verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi verici hücrenin uyarılması ile hücre zarında bulunan iyon kanalları açılarak şifreli olduğuna inanılan molekül kesecikleri (vesicle) kanal ortamına salınmakta ve burada ortama dağılan bu molekül keseciklerin bir kısmı alıcı üzerindeki reseptörlere tutunarak yine iyon kanalları vasıtasıyla alıcı hücrenin içerisine alınırlar. Biyolojik canlılarda bu çeşit moleküller iletişimin hormonlar, nöro-verici, hücre içi mesajlar, DNA ve RNA gibi moleküller tarafından gerçekleştirildiği ifade edilmektedir [19, 20].

Böylesi bir iletişim için kullanılan bilgi parçacıklarının boyutu, şekli ve iletim ortamı iletim kalitesini etkilemektedir. Bir atom, delik, elektron ve molekül olabilen akım yoğunluğu sayısı, yük akış hızı olan akımı belirler. Yük taşıyıcı sayısı olarak bilindiği için akan akım da hesaplanabilir. Yüklerin hareket etmesine neden olan sürüklenme ve difüzyon olmak üzere iki akım mekanizması vardır. Uygulanan alan bir kuvvet uyguladığından, yük bir elektrik alanın etkisi altında hareket eder [21]. Eş. 1'de, yük taşıyıcıları üzerinde E , uygulanan alanı ve F , uygulanan kuvveti temsil etmektedir.

$$F=qE, \quad (1)$$

Bu hareket, sürüklenme akımı olarak bilinen ve Eş. 2'de verilen bir akımla sonuçlanır,

$$I_d=nqV_dA. \quad (2)$$

Burada I_d , V_d , A , n ve q sırasıyla sürüklenme akımı, yük taşıyıcının sürüklenme hızı, ortamın alanı, birim hacim başına yük taşıyıcı sayısı ve elektron yüküdür. Taşıyıcı hareketliliği μ , yük taşıyıcıların ne kadar hareketli olduğuna ve uygulanan bir alanın etkisi altında yük taşıyıcıların ne kadar kesin olarak transfer olduğuna karar verir [21]. Yük taşıyıcının sürüklenme hızı Eş. 3'de verilmiştir,

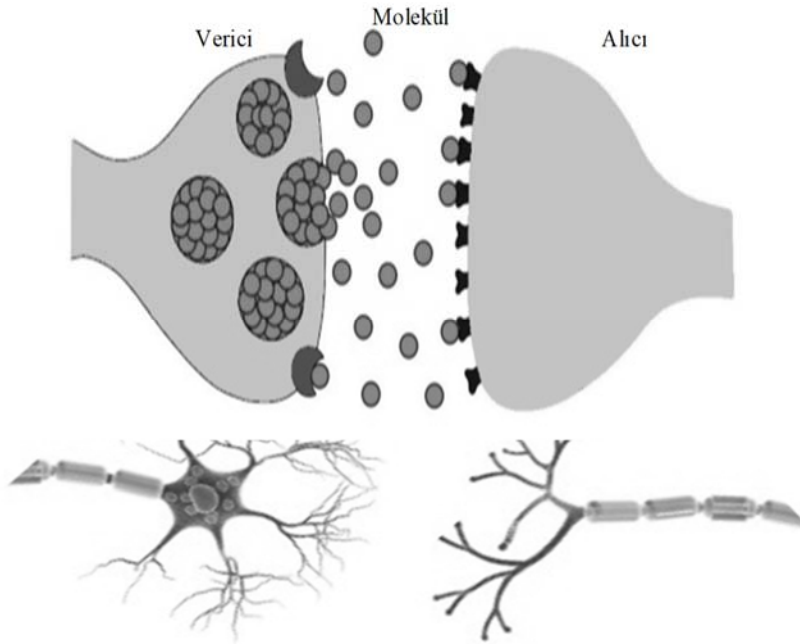
$$V_d=\mu E \text{ or } \mu=V_d/E. \quad (3)$$

Ortam termodinamik dengedeysen (uygulanan alan yok) yük taşıyıcının $\frac{k_B T}{2}$ kadar bir termal enerjisi vardır. 3D ortamda elektronun termal enerjisi, Eş. 4'de verildiği gibi ifade edilir,

$$E = \frac{3k_B T}{2} \text{ ve } V_{th} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m^*}}, \quad (4)$$

Burada V_{th} , k_B , m^* ve T sırasıyla elektronun termal hızını, Boltzman Sabiti ($1.38 * 10^{-23} J/K$), ortamın etkin kütlelerini ve sıcaklığını (Kelvin) ifade eder. Uygulanan alan yoksa, moleküllerin hareketi tamamen rastgele olacaktır ve bu rastgelelik net akım akışına neden olmaz. Moleküller, ısı enerjisi veya uygulanan alan nedeniyle ortam içinde hareket eder ancak birbirleriyle çarpışırlar. Çarpışmalar arasında geçen ortalama süre, gevşeme süresi veya ortalama serbest süre, τ olarak adlandırılır. Böylece hareketlilik Eş. 5'deki şekilde tanımlanabilir:

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} \quad (5)$$



Şekil 2. Difüzyon yolu ile moleküllerin vericiden alıcıya iletimi (Transmission of molecules from transmitter to receiver by diffusion)

Difüzyon akımı, taşıyıcıların yüksek konsantrasyon bölgesinden düşük konsantrasyon bölgesine doğru hareketinden kaynaklanmaktadır. Taşıyıcılar dağılırken, bir difüzyon akımı akar. Difüzyon akımının arkasındaki kuvvet, taşıyıcıların rastgele termal hareketidir. Bir konsantrasyon gradyanı, moleküller üzerinde onları hareket ettirmeye neden olan kuvveti üreten kuvvet basınç gradyanını üreten bir basınç gradyanı üretir [10]. Elektriksel hareketlilik denkleminde göre, yüklü parçacıklar için difüzyon sabiti aşağıdaki Eş. 6'daki gibi tanımlanır:

$$D = \frac{\mu k_B T}{q} \quad (6)$$

Bilgi aktarımının genellikle ortamdaki moleküllerin serbest difüzyon hareketi şeklinde gerçekleştiği bilinmektedir. İletim ortamının özelliği difüzyon katsayısı ile belirlenir. D küresel yüksüz parçacıkların bir sıvıda difüzyonu için Eş. 7'de verildiği gibi tanımlanır,

$$D = \frac{k_B T}{\zeta} \quad (7)$$

Burada ζ sürüklenme katsayısı olarak bilinir ve Eş. 8'deki gibi tanımlanır,

$$\zeta = 6\pi\eta R_H \quad (8)$$

Örneğin, difüzyon yolu ile iletimi gerçekleştirilen parçacıkların boyutu (R_H) değişince difüzyon katsayısı etkilenmekte ve buda difüzyon sürecini etkilemektedir [22]. Son olarak Difüzyon katsayısı Eş. 9'daki gibi ifade edilmektedir [23].

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta R_H} \quad (9)$$

Literatürde, nano-cihazlar arası bilgi taşıyan moleküllerin serbest difüzyon ortamını kullanacağından ortamının yapısı ve bölgelerarası yoğunluk farkı moleküllerin haberleşmenin performansını doğrudan etkileyeceği açıktır. Akı olarak da bilinen difüzyon, iki bölge arasındaki yoğunluk farkından dolayı parçacıkların çok yoğun ortamdaki az yoğun ortama hareketi şeklinde ifade edilmiştir (Fick's birinci difüzyon yasası). Akı ya da Akım şiddeti Eş. 10'da ifade edilmiştir [24].

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (10)$$

Burada J , D ve C sırası ile maddenin akısını, ortamda yayılabilme gücünü (difüzyon sabiti) ve yoğunluğunu göstermektedir.

Moleküllerin verici nano-makineden belli bir salgılanma hızı (emission rate) ile iletim kanalına bırakıldığı düşünülürse, bu moleküllerin verici nano-makineden t anında ve x kadar uzakta oluşturdukları yoğunluk $C(x,t)$, aşağıdaki kısmi türevli denklemin belli sınır (boundary) ve başlangıç (initial) koşullarına göre çözümü ile ifade edilmektedir. Bu denklem literatürde Fick's ikinci difüzyon yasası olarak bilinen $\frac{\partial C}{\partial t} = D_i \nabla^2 C_i$ denklemi temel alınarak türetilmiştir. Burada i

madde çeşidini ve C madde yoğunluğunu ifade etmektedir. Salınan (emit edilen) molekülün zamana bağlı olarak hareket yönündeki (x yönünde) yoğunluk değişimi Eş. 11'deki gibi ifade edilmektedir [25].

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (11)$$

Fick's ikinci yasasına göre akışkan bir ortamda parçacıkların çok yoğun ortamdaki az yoğun ortama doğru yer değişimi yoğunluk değişimi ile nonlineer ve ters orantılıdır. Difüzyon sürecinde bilgi taşıyan moleküllerin hareketi gelişigüzel olabileceğinden bu hareket *Brownian Motion* olarak ifade edilmektedir. Parçacıklar difüzyon yoluyla taşınırken ortamda bulunan termal enerji kullanılır. Bu yüzden difüzyon ile iletişimde dışarıdan herhangi bir enerjiye ihtiyaç duyulmayacağı ifade edilmektedir. Bilgi parçacıklarının iletiminin üç boyutlu bir düzlemdeki hareketi aşağıdaki Eş. 12-Eş. 16'da formüle edilmiştir [23].

$$(m, \sigma^2), \quad (12)$$

$$(x_i, y_i, z_i) = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}) + (\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i), \quad (13)$$

$$\Delta x_i \sim N(0, 2D\Delta t), \quad (14)$$

$$\Delta y_i \sim N(0, 2D\Delta t), \quad (15)$$

$$\Delta z_i \sim N(0, 2D\Delta t), \quad (16)$$

Burada, m : Ortalama, σ^2 : Varyans, (x_i, y_i, z_i) : Bilgi parçacığının pozisyonu, $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$: Δt süresi boyunca bu parçacıkların her bir eksenindeki rastgele yer değişimi, N : Normal dağılım rastgele değişkenini göstermektedir.

Tasarlanan NMÖH modelinde, moleküllerin vericiden alıcıya hareketi yukarıda gösterildiği gibi Normal dağılım fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dijital haberleşmede bilginin vericiden alıcıya iletimi sırasında meydana gelen hatanın analizi için kullanılan hata fonksiyonu (error function) denkleminin, difüzyon ortamında Normal dağılım fonksiyonu ile hareket eden moleküllerin hata analizi için de kullanılabilirliği düşünülmektedir. Hata fonksiyonu, Eş. 17'de verilen Normal dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılarak elde edilmektedir.

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (17)$$

Bu denklemde, σ^2 ve m sırası ile fonksiyonun standart sapma ve ortalamasını göstermektedir. Standart normal dağılımda $\sigma = 1$ ve $m = 0$ olarak alınır. Standart normal dağılım fonksiyonunda $z = (x - m)/\sigma$ ve $dz = dx/\sigma$ dönüşümleri yapılırsa $P(x)$ fonksiyonu Eş. 18'de verildiği gibi elde edilmektedir,

$$P(x)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (18)$$

Normal dağılım fonksiyonunun 0'dan başlayarak z eksenine yönündeki dağılımını gösteren olasılık fonksiyonu aşağıdaki Eş. 19'da verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \quad (19)$$

Denklem 11 kullanılarak hata fonksiyonu $\operatorname{erf}(\cdot)$, ve tümleşik hata fonksiyonu $\operatorname{erfc}(\cdot)$, Eş. 20-Eş. 22'deki şekilde ifade edilmiştir [26].

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx, \quad (20)$$

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z), \quad (21)$$

$$\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-x^2} dx, \quad (22)$$

Bu ifadeler günümüzde Dijital haberleşme sistemlerinin analizinde de kullanılmaktadır. Araştırmacılar Dijital haberleşme sistemlerinde kullanılan bu denklemlerin Moleküler haberleşme sistemlerinde de kullanılabileceğini düşünmektedirler. Böylece iletişim kanalında bulunan bir molekülün t anına kadar alıcı tarafından emilme olasılığı aşağıdaki Eş. 23 ve Eş. 24'deki gibi ifade edilmiştir [23].

$$f_{hit}^{1D}(t) = \operatorname{erfc}\left(\frac{r_0 - r_r}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (23)$$

$$f_{hit}^{3D}(t) = \frac{r_r}{r_0} \operatorname{erfc}\left(\frac{r_0 - r_r}{\sqrt{4Dt}}\right). \quad (24)$$

Burada r_0 verici ile alıcının merkezi arasındaki uzaklığı, r_r alıcının yarıçapını ifade etmektedir [27]. Ayrıca çarpışma olasılığı gaus kümülatif dağılım fonksiyonu cinsinden, Eş. 25'deki şekilde ifade edilmiştir,

$$f_{hit}^{1D}(t) = \operatorname{erfc}\left(\frac{r_0 - r_r}{\sqrt{4Dt}}\right) = 2\Phi\left(-\frac{r_0 - r_r}{\sqrt{2Dt}}\right). \quad (25)$$

Burada $\Phi(\cdot)$, standart gaus kümülatif dağılım fonksiyonunu (KDF) ifade etmektedir.

Kanaldan alıcı birimine ulaşan moleküller reseptörler tarafından kimyasal reaksiyonlar ile veya doğrudan emilerek ortamdan içeri alınır [28]. Moleküllerin reseptörlere ulaşması ilk başarılı alınma (first hitting) olarak ifade edilmiştir. Bu ilk başarılı alınmanın 1-D düzlemdeki formülü [29], Eş. 26'da verildiği gibi ifade edilmiştir,

$$f_{hit}^{1D}(t) = \frac{d}{\sqrt{4\pi Dt^3}} e^{-d^2/4Dt} \quad (26)$$

3-D uzayındaki formülü ise Eş. 27'de ifade edilmektedir,

$$f_{hit}^{3D}(t) = \frac{r_r}{(r_r + d)} \frac{d}{\sqrt{4\pi Dt^3}} e^{-d^2/4Dt} \quad (27)$$

Burada d verici ile alıcı arasındaki uzaklığı ifade etmektedir.

Yukarıdaki denklemler temel alınarak yazılım tabanlı oluşturulmuş NMÖH modelinin analizi için iki denklem

kullanılmıştır. Bunlardan ilki vericiden gönderilen moleküllerin alıcıda alınma olasılığını gösteren h_0 , diğeri ise moleküller arası girişimin dikkate alındığı sinyal girişim oranı (SIR -signal to interference ratio) denklemleridir. Bu oran genellikle literatürde semboller arası girişim (ISI) olarak tanımlanmaktadır. Dijital haberleşme sistemlerinde olduğu gibi Moleküler haberleşme sistemlerinde de semboller arası girişim veri transferindeki en büyük problemlerden birisidir. Bu yüzden çalışma kapsamında ISI ya da SIR'ı dikkate alan çeşitli ölçüm ve değerlendirmeler yapılmıştır. Burada sembol süresinin uzun alınması, bir sinyal iletimi için salgılanan moleküllerin daha fazla oranla alıcı hücreye ulaşmasını sağlayacağından, iletişimdeki hata yüzdesini azaltır, fakat birim zamanda gönderilen sembol sayısı azalacağından, veri iletim hızı azalır. Diğer taraftan sembol süresinin kısa alınması ise, gönderilen moleküllerin algılanma süresinden sonra da ortamda o sembole ait moleküllerin kalmasına sebep olacağından ve bu moleküllerin bir sonraki sembol süresinde alıcıya ulaşması gereken moleküllere dahil olmasından dolayı girişime sebep olarak iletişimdeki hata yüzdesini ve birim zamanda gönderilen sembol sayısını artırarak veri iletim hızını artırır. Bu yüzden sembol süresi seçilirken, veri iletim hızı (kapasite) ile hata yüzdesi arasında dengeli bir tercih yapılmalıdır [30].

Bir NMÖH sisteminde, alıcının ilk sembol süresinde aldığı molekül sayısının vericinin gönderdiği toplam molekül sayısına oranı, diğer bir deyişle alıcının molekül alma olasılığı h_0 , ile ifade edilmektedir (Eş. 28). Literatürde genellikle ISI olarak ifade edilen ilk sembol süresinde alıcıya ulaşan molekül olasılığı h_0 'ın ilk sembol süresinden sonra alıcıya ulaşan molekül olasılığına oranı ise burada SIR ile ifade edilmiştir (Eş. 29).

$$h_0 = \frac{N_{rx}(0)}{N_{tx}(0)}, \quad (28)$$

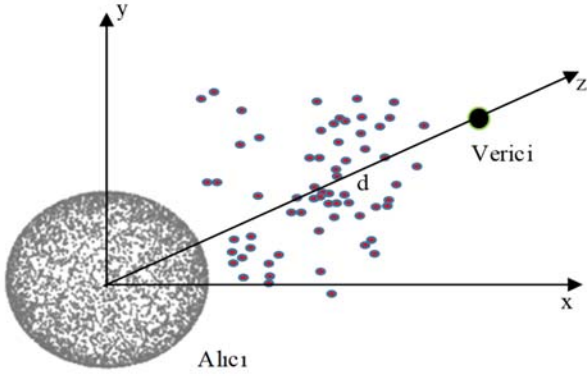
$$SIR = \frac{h_0}{\sum_{k \in (1, \dots, \text{son})} h_k}, \quad (29)$$

$N_{rx}(0)$, ilk sembol süresinde alıcıya ulaşan toplam molekül sayısını ve $N_{tx}(0)$, ilk sembol süresinde vericiden salınan toplam molekül sayısını göstermektedir.

3. BULGULAR (RESULTS)

3.1. Küre Alıcı Modeli (Sphere Receiver Model)

Bu bölümde daha önce literatürde de birçok araştırmacı tarafından analizleri yapılmış olan [9, 15, 27] küre alıcı modelinin reseptör yarıçapı ve hacmi değiştirilerek NMÖH sistemi analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu analizin yapılmasındaki amaç NMÖH modelinin farklı topolojideki alıcı modelleri denenmeden önce literatürdeki mevcut modeller ile karşılaştırılmasının yapılarak test edilmesidir. Bunun için Şekil 3'deki gibi küre alıcı modeli kullanılmıştır.



Şekil 3. Küre alıcı modeli (Sphere receiver model)

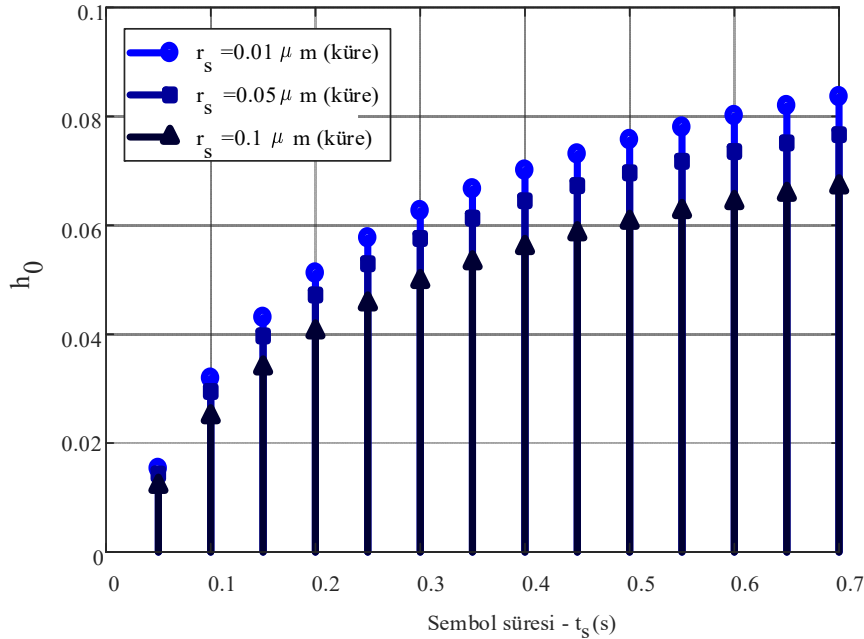
Bu analiz için alıcı yarıçapı $r_r=3.101 \mu\text{m}$, verici ile alıcı arasındaki uzaklık $d=3 \mu\text{m}$ olarak alınmış ve reseptör yarıçapının $r_s=0.01, 0.05$ ve $0.1 \mu\text{m}$ değerlerinde elde edilen h_0 ve SIR sonuçları Şekil 4 ve Şekil 5’de gösterilmiştir. Reseptör yarıçapı değiştirilirken alıcı yüzeyinde bulunan bütün reseptörlerin kapladığı toplam alan eşit olacak şekilde reseptör sayısı değiştirilmiştir ($r_s=0.01 \mu\text{m}$ iken reseptör sayısı 7200, $r_s=0.05 \mu\text{m}$ iken reseptör sayısı 288, $r_s=0.1 \mu\text{m}$ iken reseptör sayısı 72). Denklem 28’e göre h_0 oranının yüksek çıkması alıcıda alınan moleküllerin daha yüksek bir olasılık ile alındığını, Denklem 29’a göre ise SIR oranının yüksek çıkması moleküllerin daha az girişim ile alıcıya ulaştığını göstermektedir. Şekil 4’den görüldüğü gibi yarıçapı $0.01 \mu\text{m}$ olan reseptörlerin kullanıldığı NMÖH modelinde, moleküllerin alıcıda alınma olasılığı daha yüksek çıkmıştır. Şekil 5’ten görüldüğü gibi farklı yarıçaptaki reseptörlerin moleküller arası girişime olan etkisi incelenmiş ve elde edilen SIR sonuçları birbirine yakın çıksa da en

yüksek SIR değerinin, yani en az girişimin, yarıçapı $0.01 \mu\text{m}$ olan reseptörlerin kullanıldığı NMÖH modeli ile elde edildiği görülmüştür. Reseptör yarıçapının değiştirilmesi ile elde edilen h_0 ve SIR sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, az sayıda büyük yarıçaplı reseptörlere çok sayıda küçük yarıçaplı reseptörlerin alıcı yüzeyine yerleştirilmesinin daha iyi olacağı sonucuna varılmaktadır. Ayrıca burada elde edilen sonuçlar bu konu ile ilgili literatürde daha önce yapılan çalışmaların [9, 15, 27] sonuçları ile benzerlik taşımamasından dolayı önerilen modelin doğruluğu reseptörler açısından tespit edilmiştir. Önerilen modelde kullanılan tüm sistem parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

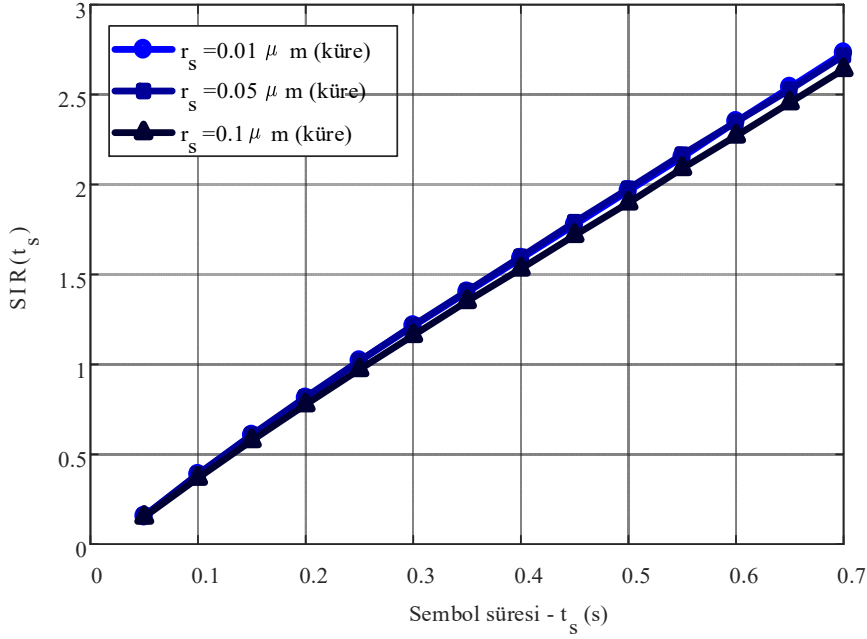
Tablo 1. NMÖH modelinde kullanılan sistem parametreleri (System parameters used in the NMÖH model)

Sistem Parametresi	Değeri
D	$79.4 \mu\text{m}^2/\text{s}$
d	$3-5 \mu\text{m}$
r_r	$2.87-4.92 \mu\text{m}$
r_s	$0.01-0.1 \mu\text{m}$
Reseptör sayısı	7200-72
Alıcının hacmi	$100-1000 \mu\text{m}^3$

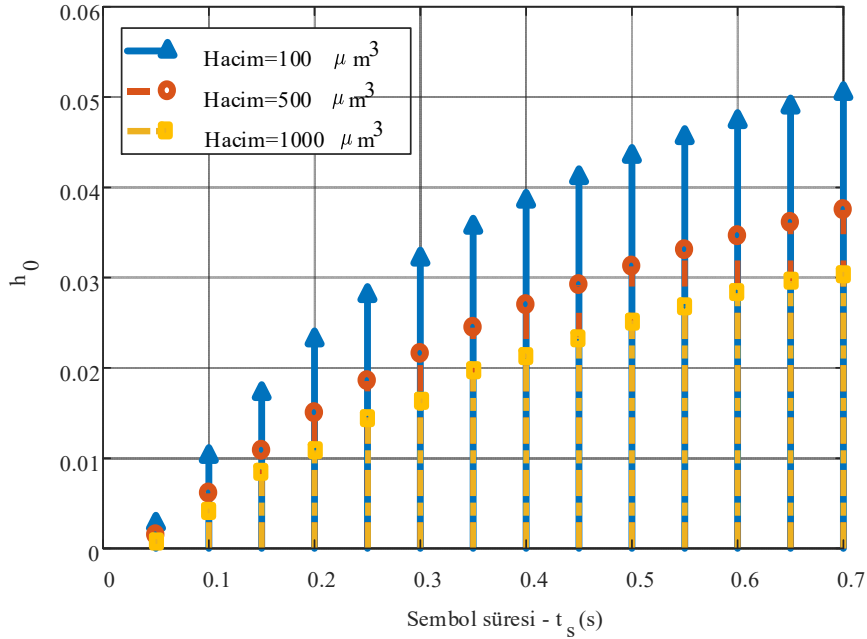
Ayrıca önerilen model, $100, 500$ ve $1000 \mu\text{m}^3$ gibi farklı hacme sahip küre alıcı için test edildiğinde Şekil 6 ve Şekil 7’deki h_0 ve SIR sonuçları elde edilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7’den görüldüğü üzere küçük hacme sahip küre alıcı modeli kullanıldığında h_0 ve SIR oranlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu verinin elde edilmesi sürecinde vericiden alıcının en yakın noktasına olan uzaklık eşit olacak şekilde alıcının boyutu değiştirilmiştir. Bu durumda vericinin 3D uzayındaki konumu sabit tutulurken alıcının konumu değişmektedir. Alıcı hacminin değiştirilmesi ile



Şekil 4. Farklı yarıçaptaki reseptörlerin kullanılması ile elde edilen h_0 - sembol süresi grafiği (h_0 -symbol duration plot obtained using different radius of receptors)



Şekil 5. Farklı yarıçaptaki reseptörlerin kullanılması ile elde edilen SIR - sembol süresi grafiği (SIR-symbol duration plot obtained using different radius of receptors)



Şekil 6. Farklı boyutlardaki küre alıcı model için h_0 - sembol süresi grafiği ($d=5 \mu\text{m}$, $r_s=0.02 \mu\text{m}$ ve reseptör sayısı=1800) (h_0 - symbol duration graph for different sizes of sphere receiver model ($d=5 \mu\text{m}$, $r_s=0.02 \mu\text{m}$ ve reseptör sayısı=1800))

elde edilen h_0 ve SIR sonuçları değerlendirildiğinde, aynı yarıçap ve sayıya sahip reseptörlerin alıcı yüzeyinde geniş bir alana dağıtılmasından dar bir alana dağıtılmasının daha iyi olacağı görülmüştür. Ancak reseptörlerin alıcı yüzeyine dağıtılma yoğunluğunun belirli bir değeri geçmemesi beklenir çünkü reseptörler üst üste gelecek kadar yoğunluğun artırılmasının molekülün alıcıda alınma olasılığını kötü etkileyeceği düşünülmektedir.

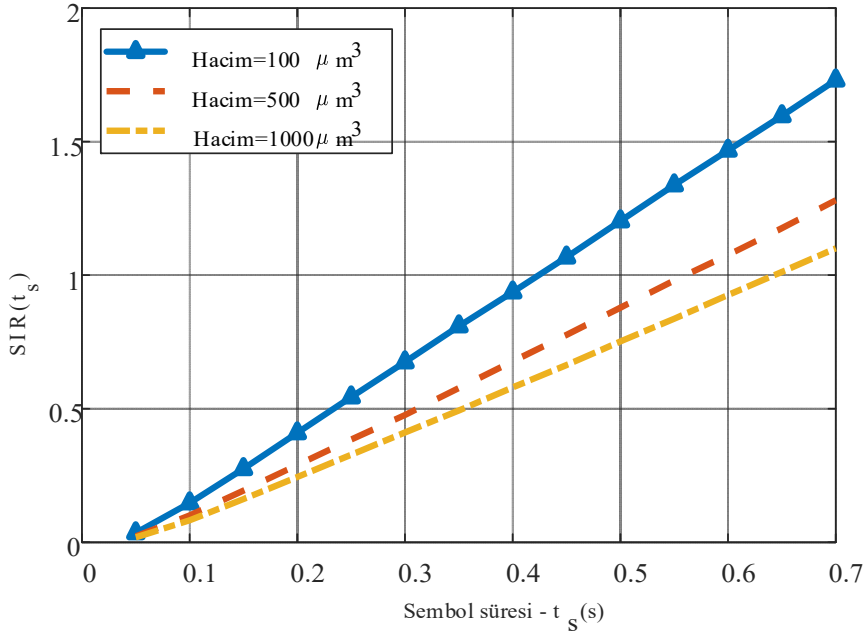
Verici ile reseptör merkezleri arasındaki ortalama uzaklık hesaplandığında ise 100, 500 ve 1000 μm^3 hacimlerdeki alıcı modellerinin ortalama uzaklığı sırasıyla 8.2242, 10.7497 ve 12.3464 μm hesaplanmıştır. Alınan sonuçlardan anlaşılacağı üzere küçük hacme sahip alıcı modelinin reseptörlerinin ortalama uzaklığı vericiye daha yakın çıkmış yani sinyal iletim oranı artmıştır. Buda moleküllerin alıcıda alınma olasılığını artırmıştır. Reseptörlerin sayısı ve

yarıçapı eşit tutulduğunda daha küçük hacme sahip alıcı modelinin neden daha iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır.

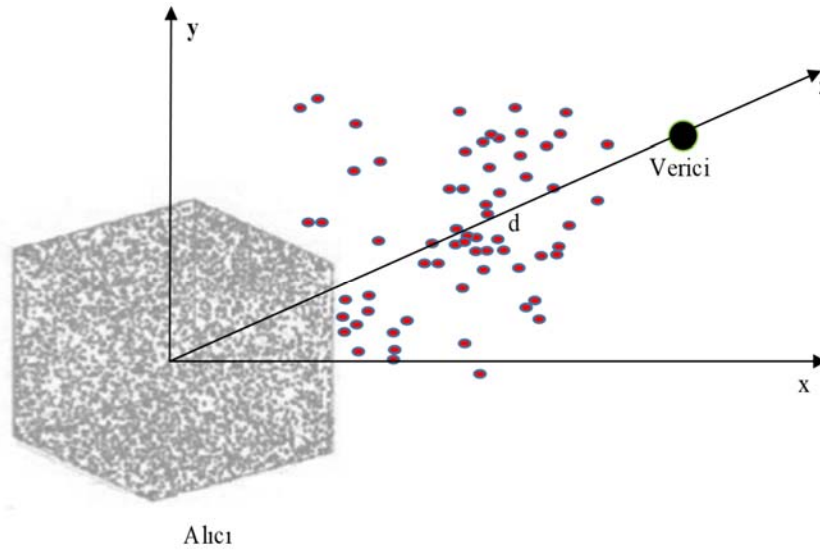
3.2. Küp Alıcı Modeli (Cube Receiver Model)

Farklı topolojilerdeki alıcı modellerinin analiz edildiği çalışmanın bu bölümünde Şekil 8'de görülen küp alıcı modeli için çeşitli analizler yapılmıştır. Küre alıcı modelinde olduğu gibi farklı boyutlardaki reseptörlerin küp alıcı modelin üzerine yerleştirilmesi ile moleküllerin alıcıda alınma olasılığı ve iletim sırasında meydana gelen girişim incelenmiştir.

Küp alıcı modelin analizi sırasında kullanılan sistem parametreleri küre alıcı modelde kullanılan sistem parametreleri ile aynıdır. Reseptör yarıçapının $r_s = 0.01, 0.05$ ve $0.1 \mu m$ değerleri için h_0 ve SIR analizlerinin yapıldığı modelde, $d = 3 \mu m$ ve hacim $125 \mu m^3$ olacak şekilde küpün her bir kenar uzunluğu $5 \mu m$ olarak alınmıştır. Küre alıcı modelinde olduğu gibi küp alıcı modelinde de reseptör yarıçapı değiştirilirken alıcı yüzeyinde bulunan bütün reseptörlerin kapladığı alan eşit olacak şekilde reseptör sayısı da değiştirilmiştir ($r_s = 0.01 \mu m$ iken reseptör sayısı 7200, $r_s = 0.05 \mu m$ iken reseptör sayısı 288, $r_s = 0.1 \mu m$ iken reseptör sayısı 72). Şekil 9'dan görüldüğü üzere küre modelinde



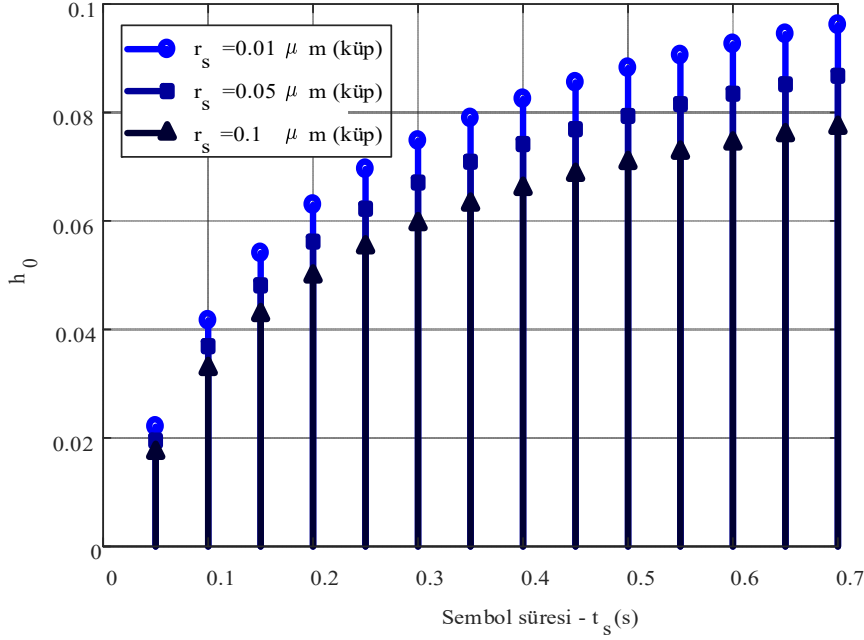
Şekil 7. Farklı boyutlardaki küre alıcı model için SIR - sembol süresi grafiği ($d = 5 \mu m$, $r_s = 0.02 \mu m$ ve reseptör sayısı=1800) ($d = 5 \mu m$, $r_s = 0.02 \mu m$ ve reseptör sayısı=1800)
(SIR - symbol duration graph for different sizes of sphere receiver model ($d = 5 \mu m$, $r_s = 0.02 \mu m$ ve reseptör sayısı=1800))



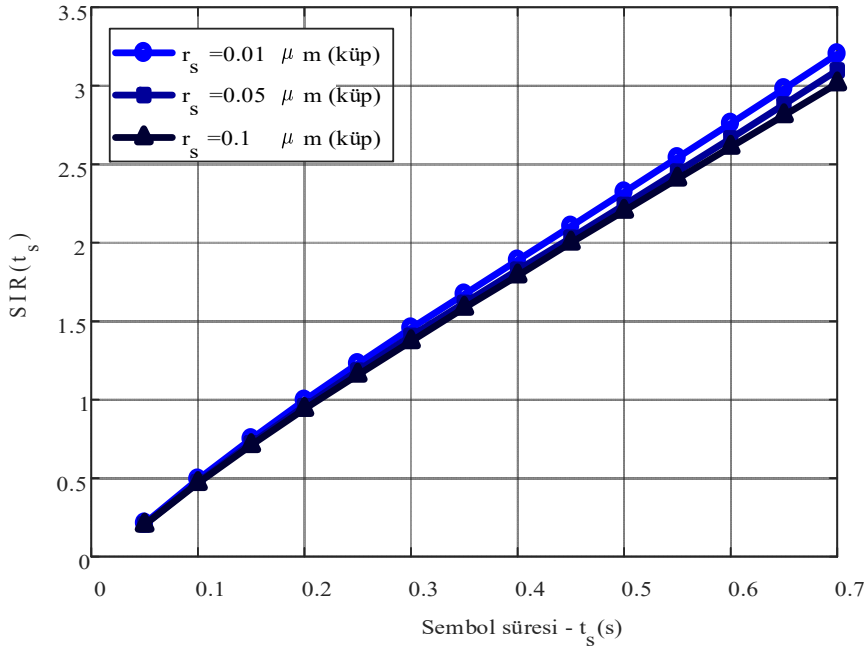
Şekil 8. Küp alıcı modeli (Cube receiver model)

olduğu gibi küp alıcı modelinde de küçük yarıçaplı reseptörlerin kullanılması ile sinyal iletim oranı daha yüksek çıkmıştır. Şekil 10'de ise küp alıcı modelin moleküller arası girişim, *SIR* açısından analiz sonucu gösterilmiştir. Küre alıcı modelinde olduğu gibi değişen reseptör yarıçapı, moleküller arası girişimi çok az etkilemiş ancak en az girişim küçük yarıçaplı reseptörlerin kullanılması ile elde edilmiştir. Bu durumda küre alıcı modelinde olduğu gibi küp alıcı

modelinde de reseptör yarıçapının moleküller arası girişimi çok az etkilediği sonucuna varılabilir. Sonuç olarak, az sayıda büyük yarıçaplı reseptörlere çok sayıda küçük yarıçaplı reseptörlerin küp alıcı yüzeyine yerleştirilmesi ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Kürede olduğu gibi küp alıcı modelinde de farklı hacimlere sahip alıcılar için sistem h_0 ve *SIR* açısından analiz edilmiştir. Küp hacminin 100, 500 ve $1000 \mu\text{m}^3$ değerleri için Şekil 11'de h_0 ve Şekil 12'deki



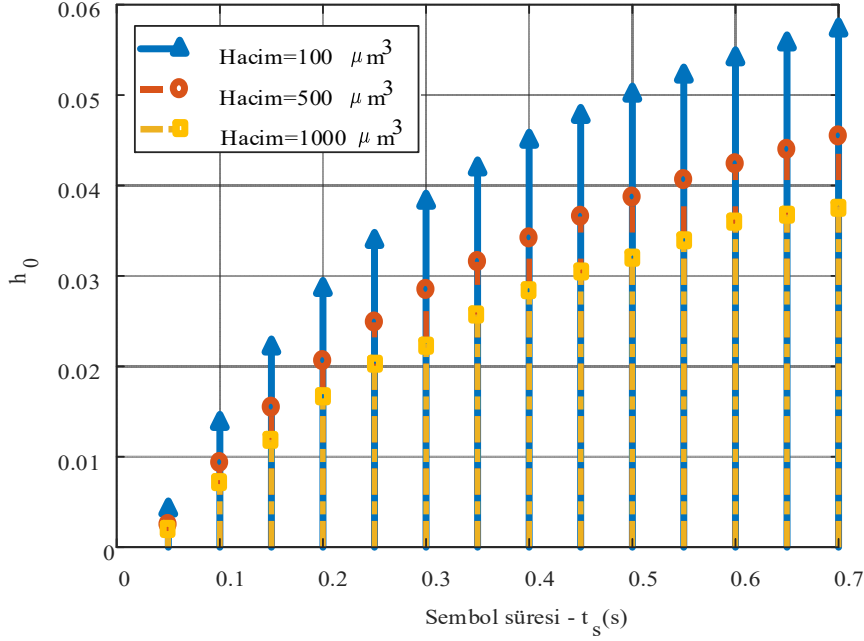
Şekil 9. Farklı yarıçaptaki reseptörlerin kullanılması ile elde edilen h_0 - sembol süresi grafiği (h_0 - symbol duration plot obtained using different radius of receptors)



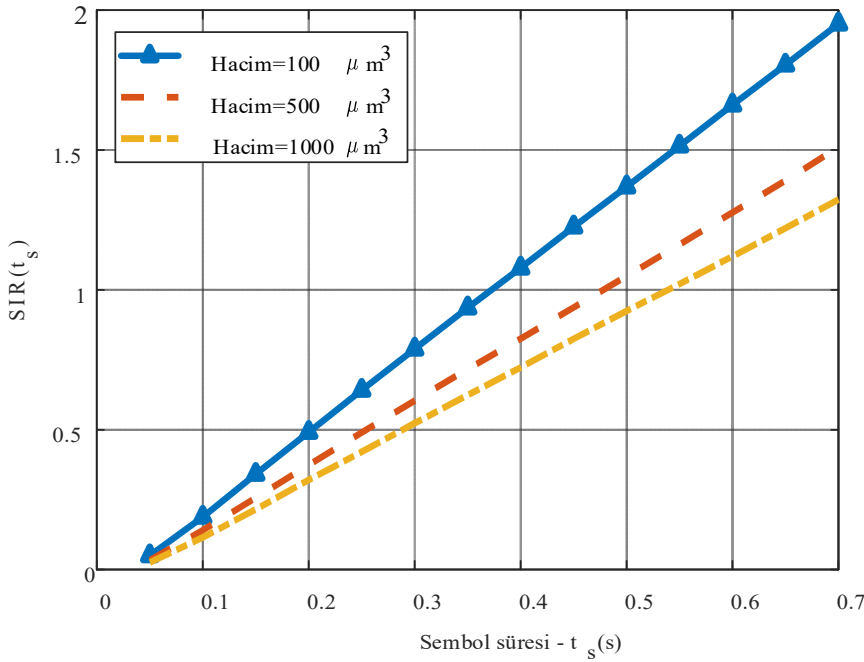
Şekil 10. Farklı yarıçaptaki reseptörlerin kullanılması ile elde edilen *SIR* - sembol süresi grafiği (*SIR* - symbol duration plot obtained using different radius of receptors)

SIR sonuçları gösterilmiştir. Analiz için $d=5 \mu m$, $r_s=0.02 \mu m$ ve diğer bütün sistem parametreleri eşit alınmıştır. Şekil 11 ve Şekil 12'den görüldüğü üzere küçük hacme sahip küp alıcı modelinin kullanılması ile daha yüksek h_0 ve *SIR* değerleri elde edilmiştir. Bu verinin elde edilmesi sürecinde vericiden alıcının en yakın noktasına olan uzaklık eşit olacak şekilde alıcının boyutu değiştirilmiştir. Bu durumda

vericinin 3D uzayındaki konumu sabit tutulurken alıcının konumu değişmektedir. Daha küçük hacme sahip küp alıcı modelinin neden daha iyi sonuç vermesi, küpün yan yüzeylerinde bulunan reseptörler ile arka yüzeyinde bulunan reseptörlerin vericiye olan uzaklığının birbirine yakın çıkmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Analiz sonucunda, verici ve reseptör merkezleri arasındaki ortalama



Şekil 11. Farklı boyutlardaki küp alıcı model için h_0 - sembol süresi grafiği (h_0 - symbol duration plot obtained for different volume of cube receiver model)



Şekil 12. Farklı boyutlardaki küp alıcı model için *SIR* - sembol süresi grafiği (*SIR* - symbol duration plot obtained for different volume of cube receiver model)

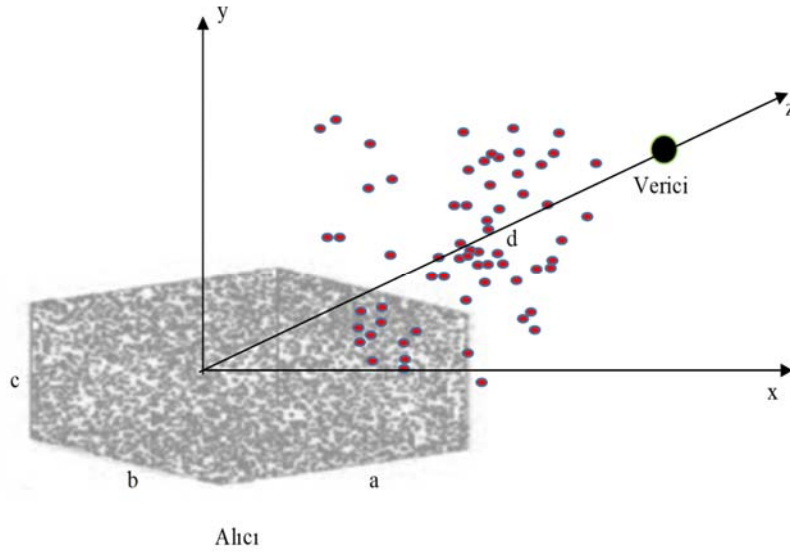
uzaklık 100, 500 ve 1000 μm^3 hacme sahip küp alıcı modelleri için sırası ile 7.7382, 9.9499 ve 11.4117 μm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca aynı d uzunluğunda küçük hacme sahip alıcının reseptör miktarı en yüksek çıkmıştır. Böylece reseptörlerin alıcı üzerinde kapladıkları toplam alan eşit tutulduğunda daha küçük hacme sahip alıcı modelinin neden daha iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır.

3.3. Dikdörtgen Prizma Alıcı Modeli (Rectangular Prism Receiver Model)

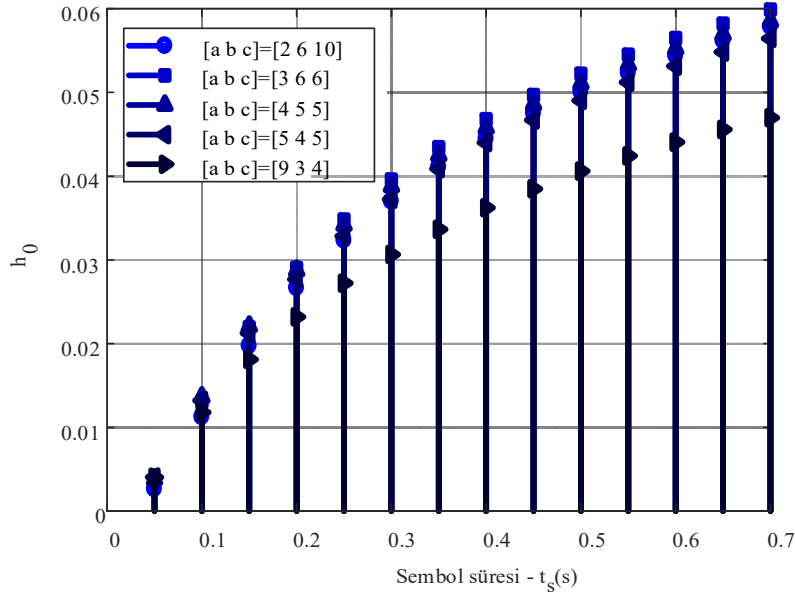
Bu bölümünde küp ve küre alıcı modellerden farklı olarak değişik boyutlardaki dikdörtgen prizma alıcı modeli analiz edilmiş ve alıcının molekül alma olasılığı artırılmaya

çalışılmıştır. Alıcının vericiye bakan yüzeyinin boyutlarının değiştirilmesi ile molekül alma olasılığının artacağı düşüncesi ile bu model denenmiş ancak küp alıcı modelinden daha iyi bir sonuç alınamamıştır. Önerilen modelin analizi için Şekil 13'de görüldüğü üzere $[a \ b \ c]$ boyutlarındaki bir dikdörtgen prizma modeli b ve c kenarları verici tarafına bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Analiz için $d=5 \ \mu\text{m}$, $r_s=0.02 \ \mu\text{m}$ ve diğer bütün sistem parametreleri küp ve küre alıcı modelleriyle aynı seçilmiştir.

Şekil 14'de toplam hacim ($a*b*c=125$) eşit olacak şekilde farklı boyutlardaki dikdörtgen prizmadan elde edilen h_0 sonuçları görülmektedir. Elde sonuçlardan anlaşılacağı üzere



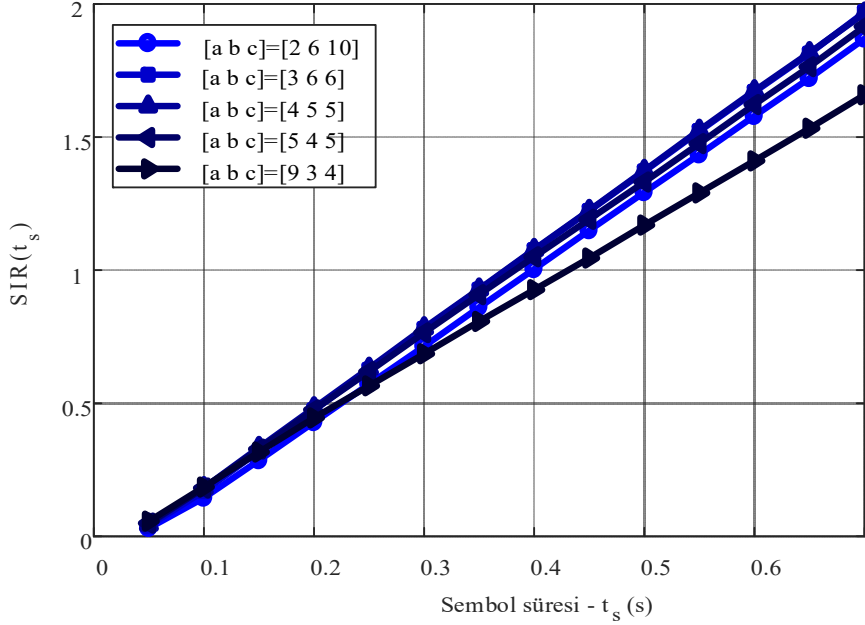
Şekil 13. Dikdörtgen prizma alıcı modeli (Rectangular prism receiver model)



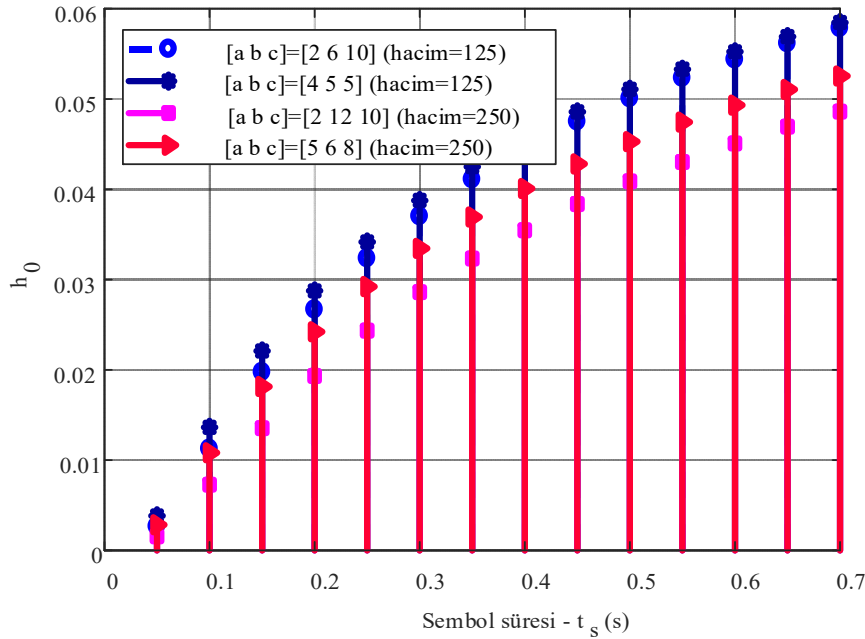
Şekil 14. Dikdörtgen prizma alıcı modelin farklı kenar uzunlukları için h_0 - sembol süresi grafiği
(h_0 - symbol duration plot for different side lengths of the rectangular prism receiver model)

a kenarının küçültülmesi veya b ve c kenarlarının büyütülmesi ile alıcının molekül alma olasılığı artmamış aksine azalmıştır. Grafik genel olarak incelendiğinde alıcının a , b ve c kenarlarının farklı değerlerde olmasından birbine yakın değerlerde olmasının molekül alma olasılığını arttıracakı düşünülmektedir (küre alıcıya yakınsadığından). Şekil 15’de ise önerilen modelin SIR yani moleküller arası girişim sonuçları görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere sonuçlar birbirine yakın çıksa da en az

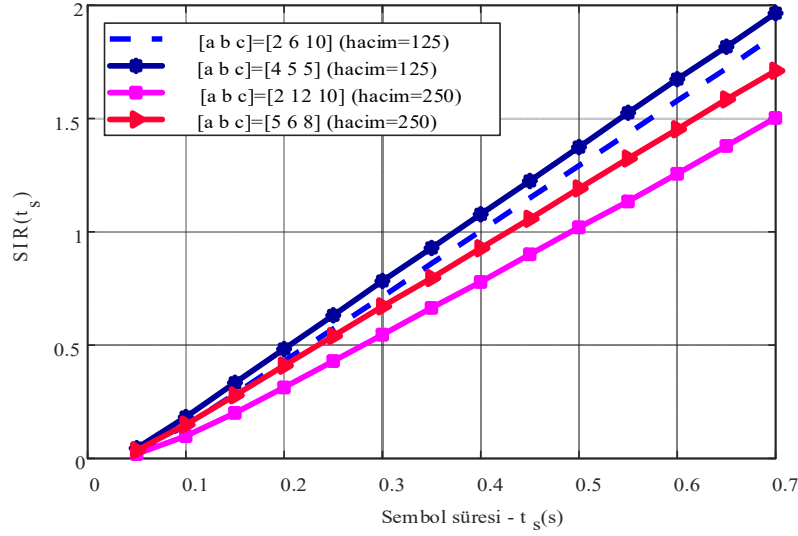
girişim, boyutları birbirine yakın olan prizma modeli ile elde edilmiştir. Küp ve küre alıcı modellerde olduğu gibi dikdörtgen prizma alıcı modelinde de farklı hacimlerdeki prizma alıcı modelleri için h_0 ve SIR analizleri yapılmış ve Şekil 16 ve Şekil 17’deki sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan anlaşılacağı üzere küp ve küre ile aynı sistem parametrelerine sahip prizma modelinde de daha küçük hacimdeki modelin kullanılması ile daha az girişim ve daha yüksek molekül alma olasılığı elde edilmiştir.



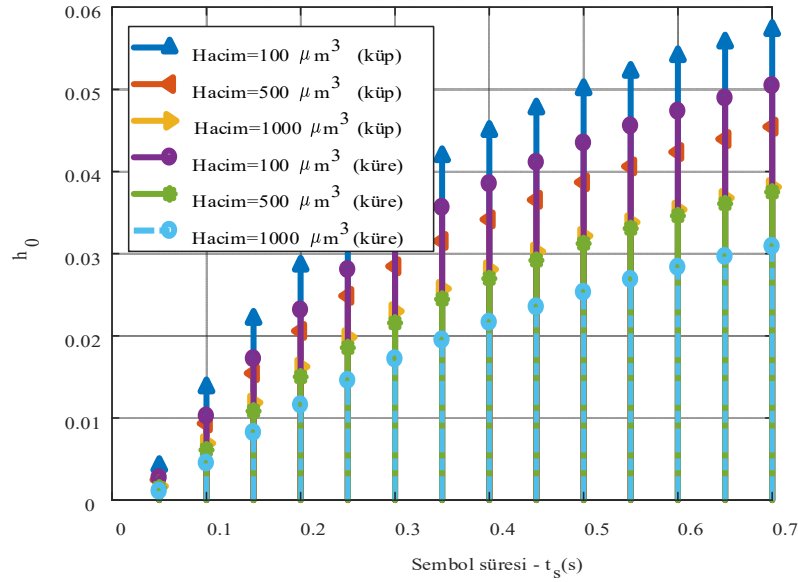
Şekil 15. Dikdörtgen prizma alıcı modelin farklı kenar uzunlukları için SIR - sembol süresi grafiği (SIR - symbol duration plot for different side lengths of the rectangular prism receiver model)



Şekil 16. Farklı hacimlerdeki dikdörtgen prizmanın farklı kenar uzunlukları için h_0 - sembol süresi grafiği (h_0 - symbol duration graph for different side lengths of a rectangular prism in different volumes)



Şekil 17. Farklı hacimlerdeki dikdörtgen prizmanın farklı kenar uzunlukları için S/R - sembol süresi grafiği (S/R- symbol duration graph for different side lengths of a rectangular prism in different volumes)



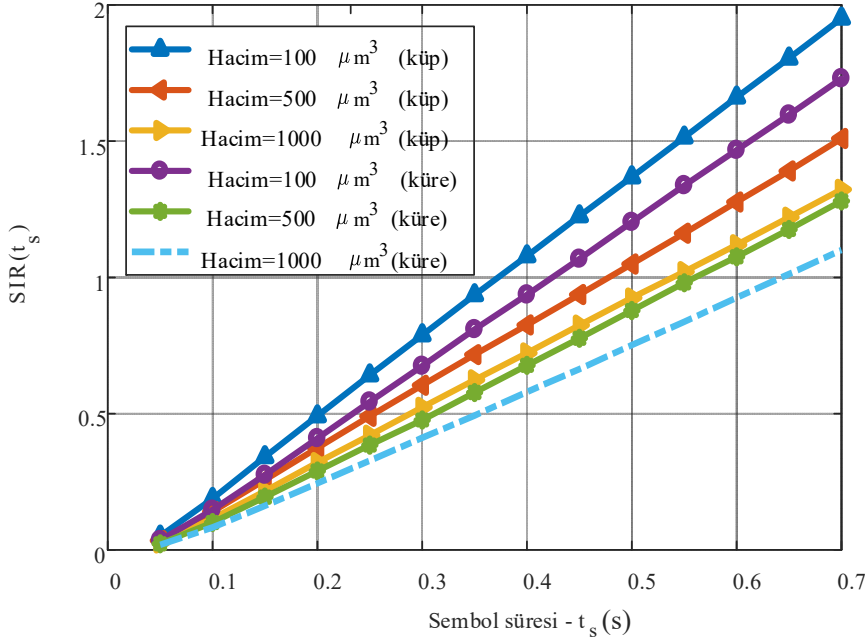
Şekil 18. Küre ve küp alıcı modellerin farklı hacimleri için h_0 - sembol süresi grafiği (h_0 - symbol duration graph for different volumes of sphere and cube receiver models)

Bu verinin elde edilmesi sürecinde vericiden alıcının en yakın noktasına olan uzaklık eşit olacak şekilde alıcının boyutu değiştirilmiştir. Bu durumda vericinin 3D uzayındaki konumu sabit tutulurken alıcının konumu değişmektedir. Sonuç olarak, boyutları birbirine yakın olan dikdörtgen prizma modelinin daha iyi ancak küp modelinden daha kötü sonuçlar verdiği söylenilebilir. Bu yüzden sonraki bölümde sadece birbirine daha yakın sonuçlar veren küp ve küre alıcı modelleri karşılaştırılmıştır.

3.4. Küre ve Küp Alıcı Modellerinin Karşılaştırılması (Comparison of Sphere and Cube Receiver Models)

Küre ve küp alıcı modellerinin dikdörtgen prizma modelinden daha iyi sonuç verdiği görüldükten sonra bu

modellerin burada detaylı bir şekilde karşılaştırılması gereği duyulmuştur. Karşılaştırma yapılan modellerde $d=5 \mu\text{m}$ ve $r_s=0.02 \mu\text{m}$ olarak alınmıştır. İlk olarak 100, 500 ve 1000 μm^3 hacme sahip küre ve küp alıcı modelleri karşılaştırılmış ve Şekil 18'de görüldüğü gibi en yüksek h_0 oranı, en düşük hacme sahip küp modeli ile en düşük h_0 oranı ise en yüksek hacme sahip küre modeli ile elde edilmiştir. Önerilen modeller girişim açısından incelendiğinde ise Şekil 19'da görüldüğü gibi en yüksek girişim 1000 μm^3 hacme sahip küre modelinde elde edilirken en düşük girişim 100 μm^3 hacme sahip küp modeli ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, küp alıcı modelinin hem moleküller arası girişim hem de alıcının molekül alma olasılığı açısından küre modeline göre tercih edilebileceği yorumu yapılabilir.



Şekil 19. Küre ve küp alıcı modellerin farklı hacimleri için *SIR* - sembol süresi grafiği
(*SIR* - symbol duration graph for different volumes of sphere and cube receiver models)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Matlab ortamında bir NMÖH modeli tasarlanmış ve tasarlanan bu model üzerinde alıcı şekli ve bazı sistem parametreleri değiştirilerek alıcının molekül alma olasılığı artırılmaya çalışılmıştır. Bunun için ilk olarak bilgi alışverişinde kullanılan moleküllerin hareket ettiği difüzyon ortamı ve difüzyon sabitinin temel fizik kuralları ile türetilmesi detaylı olarak anlatılmıştır. Literatürde bu konuda yapılmış çalışmalar daha çok küre alıcı modeli ile gerçekleştirilmiş ve bu modeller üzerinde alıcı şeklinin değil de alıcı üzerinde bulunan reseptör sayısı ve boyutu, verici ile alıcı arası uzaklık gibi diğer sistem parametreleri değiştirilerek önerilen modeller analiz edilmiştir [9], [31]. Burada yapılan çalışmada ise literatürde daha önce yapılan çalışmalara ek olarak alıcının farklı topolojileri için MH modeli analiz edilmiştir. Dijital haberleşme sistemlerindeki patch anten yapılarına benzer bir şekilde farklı topolojideki alıcı modelleri denenmiştir. Aynı hacim ve özelliklere sahip küre ve küp alıcı modelleri karşılaştırıldığında küp alıcı modelinin daha düşük girişim ve daha yüksek molekül alma olasılığına sahip olduğu görülmüştür. Literatürde alıcı üzerine yerleştirilmiş çeşitli şekillerdeki kılıf modellerinin yönlü antenler gibi düşünüldüğü bazı çalışmalar bulunmaktadır [11, 32]. Bu çalışmalarda alıcının molekül alma olasılığı artırılmaya çalışılmış ancak yeterince kapsamlı bir çalışma yapılmamış sadece alınan molekül sayısı gibi parametreler analiz edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen düşünsel ve metrik çıktıların nano-ölçekteki yeni nesil tıbbi tedavi stratejilerin ve süreçlerin geliştirilmesini de içeren nano-sistemlerin geliştirilmesi ve uygulanması hususunda literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Farsad, N., Molecular Communication, York university, Toronto, A.B.D, 2014.
2. Islam, M. Z., Islam, M. M., Asraf, A., A combined deep CNN-LSTM network for the detection of novel coronavirus (COVID-19) using X-ray images, Informatics Med. Unlocked, 20, 100412, 2020.
3. Tripathi, S. D., Krakowiak, P. A., Darsey, J. A., Computational Modeling Studies of the Beta-Amyloid Protein Binding to Develop Drugs for the Treatment of Alzheimers Disease, Current Trends in Biomedical Engineering & Biosciencesvol, 10 (5), 1–8, 2017.
4. Chang, G., Lin, L., Yan, H., Adaptive Detection and ISI Mitigation for Mobile Molecular Communication, IEEE Trans. Nanobioscience, 17 (1), 21–35, 2018.
5. Chouhan, L., Sharma, P. K., Molecular communication in three-dimensional diffusive channel with mobile nanomachines, Nano Commun. Netw., 24, 100296, 2020.
6. Er, M. B., Isik, E., Isik, I., Parkinson's Detection Based on Combined CNN and LSTM Using Enhanced Speech Signals with Variational Mode Decomposition, Biomed. Signal Process. Control, 70, 2021.
7. Gürkahraman, K., Karakiş, R., Brain tumors classification with deep learning using data augmentation, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (2), 997–1011 2021.
8. Özgönül M.C., Seçmen M., Size-reduced printed log-periodic dipole antenna for wireless communication applications, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (3), 1631–1645, 2020.

9. Akkaya, A., Yilmaz, H. B., Chae, C. B., Tugcu, T., Effect of receptor density and size on signal reception in molecular communication via diffusion with an absorbing receiver, *IEEE Commun. Lett.*, 19 (2), 155–158, 2015.
10. Einolghozati, A., Sardari, M., Fekri, F., Capacity of diffusion-based molecular communication with ligand receptors, *IEEE Information Theory Workshop, ITW* 2012, 85–89, 2012.
11. Felicetti, L., Femminella, M., Reali, G., Directional receivers for diffusion-based molecular communications. *IEEE Access*, 12, 1, 2018.
12. Yilmaz, H. B., Heren, A. C., Tugcu, T., Chae, C., Three-Dimensional Channel Characteristics for Molecular Communications With an Absorbing Receiver, *IEEE Communications Letters*, 19 (2), 155-158, 2015.
13. Deng, Y., Noel, A., Elkashlan, M., Nallanathan, A., Cheung, K. C., Cheung, Modeling and Simulation of Molecular Communication Systems with a Reversible Adsorption Receiver, *IEEE Trans. Mol. Biol. Multi-Scale Commun.*, 1 (4), 347–362, 2015.
14. Deng, Y., Noel, A., Elkashlan, M., Nallanathan, A., Cheung, K. C., Molecular Communication with a Reversible Adsorption Receiver, 2016 *IEEE International Conference on Communications, ICC* 2016, 2016.
15. Yilmaz, H. B., Chae, C., Simulation Modelling Practice and Theory Simulation study of molecular communication systems with an absorbing receiver. *Simul. Model. Pract. Theory*, 49, 136–150, 2014.
16. Malak, D., Akan, O. B., Communication theoretical understanding of intra-body nervous nanonetworks, *IEEE Commun. Mag.*, 52, 129–135, 2014.
17. Noel, A., Cheung, K. C., Schober, R., Optimal Receiver Design for Diffusive Molecular Communication With Flow and Additive Noise, 13 (3), 350-362, 2013.
18. Nakano, Tadashi, Andrew W. Eckford, T. H, *Molecular Communication*. Cambridge University Press, UK, 2013.
19. Alberts, L. J. B., Johnson A., *Molecular Biology of the Cells*, New York: Garland Science, 2002.
20. Lewis, J., Raff, M. & Roberts, K., *Cell Biology*. Annals of Botany Company, UK, 2003.
21. Walter, H. & Vreeburg, J., *Fluid Sciences and Materials Science in Space - a European Perspective*, *Space Science Reviews*, 50, 619, 1989.
22. Yilmaz, H. B., Chae, C.-B., Tepekule, B., Pusane, A. E., Arrival Modeling and Error Analysis for Molecular Communication via Diffusion with Drift, *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication*, 2015.
23. Farsad, N., Yilmaz, H. B., Eckford, A., Chae, C.B., Guo, W., A Comprehensive Survey of Recent Advancements in Molecular Communication, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 1-34, 2014.
24. Jacques, S., Prahl, S., *Diffusion Theory: Fick's 1st Law*, *Optics*, <https://omlc.org/classroom/ece532/class5/ficks1.html>. Yayın tarihi 1998. Erişim tarihi Eylül 11, 2019.
25. Schulten, K., Kosztin, I. & Street, N. M., *Lectures in Theoretical Biophysics*, Department of Physics and Beckman Institute University of Illinois at Urbana–Champaign, April 23, 2000.
26. Whittaker, E. T., Robinson, G., *The Calculus of Observations: A Treatise on Numerical Mathematics*, Dover Publications, New York, A.B.D., 1967.
27. Yilmaz, H. B., Heren, A. C., Tugcu, T., Chae C.B., 3-D Channel Characteristics for Molecular Communications with an Absorbing Receiver, *IEEE Commun. Lett.* 1–4, 2014.
28. Guo, W., Asyhari, T., Farsad, N., Yilmaz, H. B., Li, B., Eckford, A., Chae, C. B., Molecular communications: Channel model and physical layer techniques, *IEEE Wirel. Commun.*, 23, (4), 120–127, 2016.
29. Eckford A. W., *Nanoscale Communication with Brownian Motion*, 41st Annual Conference on Information Sciences and Systems, 160–165, 2007.
30. Kiliçli, F. N., Özşahin, M. T., Yilmaz, H. B., Kuran, M. Ş., Tuğcu, T., Nano Ağlarda Difüzyon İle Haberleşme Üzerine Geliştirilmiş Modeller, *Akademik Bilişim, Antalya, Türkiye*, 1-5, 23 - 25 Ocak 2013.
31. Akkaya, A. & Tugcu, T., dMCS: Distributed Molecular Communication Simulator, 8th International Conference on Body Area Networks 468-471, 2013.
32. Felicetti, L., Femminella, M. Reali, G., Smart Antennas for Diffusion-based Molecular Communications, *Proc. Second Annu. Int. Conf. Nanoscale Comput. Commun*, 2015.

