



Analysis of molecular communication model via diffusion with cumulative distribution functions

İbrahim Işık^{1*}, Esmem Işık², Abdullah Ateş³

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

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

³Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Inonu University, 44280, Malatya, Türkiye

Highlights:

- Mathematical and physical examination of different cumulative distribution functions
- The effect of different distribution functions on the number of received molecules
- The receptors on the receiver are taken into account for the analysis

Keywords:

- Molecular communication
- System parameter
- Distribution functions
- Number of received molecules

Article Info:

Research Article

Received: 12.05.2023

Accepted: 12.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1296267

Correspondence:

Author: İbrahim Isik

e-mail:

ibrahim.isik@inonu.edu.tr

phone: +90 422 377 4818

Graphical/Tabular Abstract

Molecular Communication (MOC) is a novel communication method between nano-sized devices (transmitter and receiver) as given in Figure A. In this model, transmitter, receiver and information carrying molecules are used to analyze the number of molecules reaching the receiver and the molecule-interference ratio. However, a common trend observed in the existing MOC models is the predominant use of the Normal distribution function to describe the movement of carrier molecules within the diffusion medium.

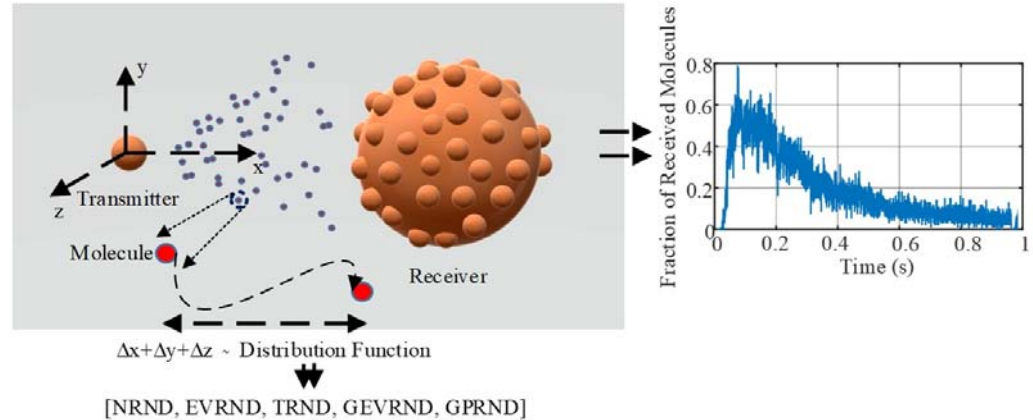


Figure A. The proposed model

Purpose:

In contrast to the existing literature, this study aims to thoroughly investigate alternative distribution functions for the diffusion of molecules in the medium, taking into consideration the number of received molecules, in order to identify the MOC model with optimal performance.

Theory and Methods:

In this study, the performance of various distribution functions including extreme value distribution (EVRND), normal distribution (NRND), t-distribution (TRND), generalized extreme value distribution (GEVRND), and generalized Pareto distribution (GPRND) were compared using different system parameters to identify the best MOC model.

Results:

As a result, the best performance was obtained using the GPRND distribution and the worst performance was obtained using the NRND distribution. Considering that the NRND distribution function is generally used for the analysis of MOC models in the literature, the importance of the study becomes evident once again.

Conclusion:

In this study, a new MOC model is proposed in which the molecules are moved according to different distribution functions in a fluid medium. In this study, receptors were also taken into account to strengthen the reality of biological living cells. After obtaining the number of molecules received for different distribution functions, the graphs of them given together.



Difüzyon yolu ile moleküler haberleşme modelinin birikimli dağılım fonksiyonları ile analizi

İbrahim Işık^{1*}, Esme Işık², Abdullah Ateş³

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

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

³İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Farklı dağılım fonksiyonların fiziksel ve matematiksel açıdan incelenmesi
- Farklı dağılım fonksiyonlarının alınan molekül sayısına etkisi
- Alıcı üzerindeki reseptörler dikkate alınarak analizlerin yapılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.05.2023

Kabul: 12.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1296267

Anahtar Kelimeler:

Moleküler haberleşme,
sistem parametresi,
dağılım fonksiyonları,
alınan molekül sayısı

ÖZ

Nano boyutlu cihazlar arasında yeni bir iletişim yöntemi olan Moleküler Haberleşme (MOH), son dönemde literatürde artarak ilgi görmektedir. Alıcıya ulaşan moleküllerin sayısı ve molekül girişim oranı gibi faktörleri analiz etmek için çok sayıda MOH modeli kullanılmıştır. Bununla birlikte, mevcut MOH modellerinde gözlemlenen ortak bir eğilim, taşıyıcı moleküllerin difüzyon ortamı içindeki hareketini açıklamak için Normal dağılım fonksiyonunun baskın olarak kullanılmasıdır. Mevcut literatürün aksine, bu çalışmada optimum performansa sahip MOH modelini belirlemek için alınan molekül sayısını dikkate alarak moleküllerin difüzyon ortamındaki hareketi için alternatif dağılım fonksiyonları kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışmada, uç değer dağılımı (EVRND), normal dağılım (NRND), t-dağılım (TRND), genelleştirilmiş uç değer dağılımı (GEVRND) ve genelleştirilmiş Pareto (GPRND) rastgele dağılım fonksiyonları, haberleşme sisteminin performansını önemli ölçüde etkileyen farklı sistem parametreleri ile karşılaştırılarak en iyi MOH modeli bulunmaya çalışılmıştır. Analizler, GPRND dağılımının en yüksek performansı, NRND dağılımının ise en kötü performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Literatürdeki MOH modellerinin analizinde NRND dağılımının yaygın kullanımı göz önüne alındığında, bu çalışmanın önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır.

Analysis of molecular communication model via diffusion with cumulative distribution functions

H I G H L I G H T S

- Mathematical and physical examination of different cumulative distribution functions
- The effect of different distribution functions on the number of received molecules
- The receptors on the receiver are taken into account for the analysis

Article Info

Research Article

Received: 12.05.2023

Accepted: 12.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1296267

Keywords:

Molecular communication,
system parameter,
distribution functions,
number of received
molecules

ABSTRACT

Molecular Communication (MOC), a novel communication method between nano-sized devices, has gained attention in recent literature. Numerous MOC models have been utilized to analyze factors such as the number of molecules reaching the receiver and the molecule-interference ratio. However, a common trend observed in the existing MOC models is the predominant use of the Normal distribution function to describe the movement of carrier molecules within the diffusion medium. In contrast to the existing literature, this study aims to thoroughly investigate alternative distribution functions for the diffusion of molecules in the medium, taking into consideration the number of received molecules, in order to identify the MOC model with optimal performance. In this study, the performance of various distribution functions including extreme value distribution (EVRND), normal distribution (NRND), t-distribution (TRND), generalized extreme value distribution (GEVRND), and generalized Pareto distribution (GPRND) were compared using different system parameters to identify the best MOC model. The analysis revealed that the GPRND distribution exhibited the highest performance, while the NRND distribution demonstrated the lowest performance. Given the prevalent use of the NRND distribution in analyzing MOC models within the literature, the significance of this study is further underscored.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *ibrahim.isik@inonu.edu.tr, esme.isik@ozal.edu.tr, abduallah.ates@inonu.edu.tr /
Tel: +90 422 377 4818

1. Giriş (Introduction)

Gelecekte hayatımızın hemen her alanında yer alacağı düşünülen nano ölçekli cihazların (nano-makinelerin) haberleşme sistemlerinin yazılım ve donanım modelleri üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Bu modellerden birisi de elektro-kimyasal iletişimden esinlenen Moleküler Haberleşme (MOH) sistemidir. Son zamanlarda bu alandaki çalışmaların değerli olduğu ve genellikle sistemin haberleşme performansını arttırmak için yapıldığı görülmektedir. MOH sistemlerinde, bilgilerin vericiden alıcıya iletilmesinde taşıyıcı olarak kimyasal yapıya sahip molekülleri temsilen çok küçük yarıçaplı küresel yapılar kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde, sayısal sistemlerdeki büyüklük ve elektromanyetik etki nedeniyle, genellikle kimyasal yöntemlerin kullanıldığı moleküller, verici ve alıcı arasında bilgi iletmek için kullanılır. Çünkü elektromanyetik dalga teorisinde kullanılan sayısal iletişim yöntemleri, bu alanda geliştirilen bu tür cihazların hem sağlık hem de nano/mikro ölçekte fizibilite açısından iletişim gereksinimlerini karşılayamamaktadır. Günümüzde geliştirilmekte olan MOH sistemlerinin gelecekte dış hekimliği, biyomedikal, çevresel izleme, endüstriyel ve savunma amaçlı gibi çeşitli alanlarda kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda son yıllarda nano cihazların (makinelere) haberleşmesi üzerine MOH sistemleri kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır [1-3].

MOH modelleri kullanılarak yapılan çalışmalarda önerilen modellerin genellikle farklı parametre ve yöntemlerle iletilen ve alınan molekülleri analiz etmek için verici (T) ve alıcı (R) bölümlerinin analiz edildiği görülmüştür [4-6]. Bu çalışmalarda genellikle noktasal verici ve tam veya yarı emici küresel alıcı kullanılarak Sembol Girişim Oranı (SGO) ve alınan molekül sayısı analiz edilmiştir. Yapılan analizler sırasında verici ve alıcı arasındaki mesafe, kanal transfer fonksiyonu, darbe tepe süresi ve genliği, sinyal zayıflaması ve yayılma gecikmesi gibi parametrelerin dikkate alındığı görülmüştür. Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında önerilen MOH modellerinde kullanılan sistem ve ortam parametrelerinin alıcıda alınan molekül sayısı ve moleküller arası girişim gibi sonuçları doğrudan etkilediği bilinmektedir [7]. Literatürde önerilen MOH modellerinin farklı sistem ve ortam parametreleri dikkate alınarak analiz edildiği birçok çalışma da bulunmaktadır [8, 9].

Bilgi taşıyıcısı olarak kullanılan moleküller gibi alıcı ve vericinin de hareketli olduğu sistemler de yakın zamanda tasarlanmıştır [10]. Çünkü biyolojik hücrelerde T ve R'nin sabit değil aynı zamanda hareketli olduğu bilinmektedir [11, 12]. Örneğin, bir damara yerleştirilen nano makinelerin ilaç teslimi [13] gibi görevleri üstlenebilmesi için hareketli olması gerekir. Ancak literatürde bulunan çalışmaların daha çok alıcı üzerindeki reseptörler dikkate alınmadan mobil alıcı ve/veya verici kullanılarak geliştirilen modeller olduğu görülmüştür. Örneğin, [14] çalışmasında, mobil noktasal verici ve alıcı, üç boyutlu bir koordinat (3-D) sistemine yerleştirilmiştir. Bu çalışmada moleküllerin hareketinde kullanılan kanal iki kategoriye ayrılmıştır. Moleküllerin yoğunluk düşüşünün dikkate alındığı ve akış tabanlı sistemlerin kullanıldığı kanal modelleridir. Çalışmada nano cihazlar olarak tanımlanan alıcı ve verici birimlerin her iki kanal modelinde de hareketleri incelenmiş ve bu hareketin neden olduğu verici ile alıcı arasındaki mesafenin alınan molekül sayısını etkilediği açıklanmıştır. Mobil alıcı modeli [10] kullanılarak yapılan başka bir çalışmada, alıcının hareketine difüzyonun yanı sıra sürüklenme katsayısı da eklenerek çeşitli analizler yapılmıştır. Bu çalışmada önerilen model ile demodülasyon için gerekli eşik değeri araştırılmıştır. Ancak çalışmada verici sabit olarak ele alınmış ve alıcının hareketi rastgele olmayıp belirli bir sürüklenme katsayısı ile belirli bir yönde gerçekleştirilmiştir. Ancak literatür incelendiğinde bu tür hareketli sistemlerin daha çok ilaç dağıtım konusu ile ilgili olduğu anlaşılmaktadır. Ancak önerilen çalışma daha

çok genel bir MOH sisteminin performansını arttırmaya yönelik bir çalışmadır. Analizler sırasında kullanılan parametrelerden birisi de sistemin performansını büyük oranda etkileyen dağılım fonksiyonu modeli ve bu fonksiyonda kullanılan fonksiyon sabitlerinin olduğu düşünülmektedir. Çünkü verici ve alıcı arasındaki iletişimi sağlayan moleküllerin hareketi bu fonksiyonlar kullanılarak yapılmaktadır. Moleküllerin hareket ettiği ortamın özelliği ve bu hareketi sağlayan parametrelerin seçiminin çok önemli olduğu düşünülmektedir. Örneğin, ortamın viskozitesinden kaynaklanan sürüklenme, sonsuz boyutlu moleküllerin hareketliliğini azaltırken, sonlu parçacıklar için ortam molekülleri ile çarpışma, parçacığın hızlanmasına neden olur. Bu nedenle alıcının difüzyon ortamındaki hareketliliğini sağlayan difüzyon katsayısının MOH sisteminin performansını artıran en önemli parametrelerden biri olduğu düşünülmektedir. Ancak tüm bu çalışmalar incelendiğinde araştırmacıların genellikle moleküllerin ya da verici alıcı çiftinin hareketi için biyolojik olarak en yakın özelliğe sahip olan Normal dağılım fonksiyonunu kullanarak analizler yaptığı görülmüştür. Önerilen modelde kullanılan tüm sistem ve ortam parametrelerinin biyolojik gerçeklikten ayrılmadan belirli bir kural çerçevesinde belirlenmesi oldukça önemlidir. Ancak önerilen sistemin nano robot teknolojisi medikal alanda kullanılabileceği düşünüldüğünde böylesi sistemlerin sadece biyolojik olarak değil sistem performansını arttırmaya yönelik olarak da çalışmalar yapılması gerektiği düşünülmektedir. Bu bağlamda literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğini canlı organizmalar, özellikle insanlar, bazı hücrelerin yapısının veya moleküllerin hareket ettiği ortamın (viskozite) bozulması ile Multiple Skleroz (MS), Kalp ritim bozukluğu, Diyabet, Omurilik, Alzheimer ve Kanser gibi çeşitli hastalıklara yakalanmaktadır [15, 16]. Hücreler tarafından hatasız veya hatasız yakın iletişim, canlılar için çok önemlidir ve bu konuda çok sayıda çalışmayı gerektirir. Bu bakış açısıyla, mikro devrelere entegre edilmek üzere tasarlanmış bazı yapay nöron modellerinin veya nano robotların bu hastalıkların teşhis ve/veya tedavisinde kısmen kullanılabileceği düşünülmektedir [17, 18]. Tıp alanında literatürdeki çalışmalara bakıldığında genellikle tedavisi olmayan bazı hastalıkların tanı ve tedavisi üzerine yapıldığı görülmektedir. Bu kapsamda literatürde, nano robotlarla geliştirilen yeni hücre modelleri ve tıp alanında kullanıma potansiyeli olan çeşitli elektronik devreler kullanılarak geliştirilen çip teknolojileri gibi birçok çalışma bulunmaktadır [15, 19]. Ayrıca sinir hastalıklarında kullanılmak üzere geliştirilen yeni bir nano/mikro ölçekli nöro-spike iletişim sistemi bu tür hastalıkların teşhis ve tedavisinde kullanılmak üzere önerilmiştir [20].

Yukarıda detayları verildiği gibi literatürde geniş yer bulan bu parametrelerin iyileştirilmesinin MOH sistem performansını büyük oranda artıracak düşünülüyor olduğundan böyle bir çalışma yapılmış ve analiz sonuçlarının literatüre katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Literatürün aksine bu çalışmada, alınan molekül sayısı dikkate alınarak moleküllerin ortamdaki hareketliliğini belirleyen parametrelerden biri olan dağılım fonksiyonunun farklı türleri için en iyi performansla sahip MOH modelinin bulunması üzerine detaylı bir çalışma yapılmıştır.

2. Dağılım Fonksiyonlarının Matematiksel Modeli ve Fiziksel Arka Planı (Mathematical Model and Physical Background of Distribution Functions)

2.1. Normal Dağılım (Normal Distribution)

Bazen Gauss dağılımı olarak da adlandırılan normal dağılım (NRND), iki parametrelili bir eğri ailesidir. Modelleme için normal dağılımın kullanılmasının sebebi, sonlu ortalama ve varyansa sahip herhangi bir dağılımdan bağımsız örneklerin toplamının, örneklem boyutu sonsuza

giderken normal dağılıma yaklaştığını belirten Merkezi Limit teoremidir. Standart normal dağılım sıfır ortalama ve birim standart sapmaya sahiptir. Eğer z standart normal ise, o zaman $\sigma z + \mu$ ifadesi de μ , ortalama ve σ , standart sapma ile normaldir. Tersinde, eğer x normal ise μ ortalama ve σ standart sapma ile o zaman $z = (x - \mu)/\sigma$ ifadesi standart normaldir. Bu durumda, olasılık yoğunluk fonksiyonu Eş. 1’de ifade edilmiştir.

$$y = f(x|\mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\right) e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

Normal dağılım literatürde en sık kullanılan dağılım türlerinden birisidir. Çünkü birçok sisteme kolay bir şekilde adapte olabilen bir yapısı vardır. Bu nedenle, özellikle fizik ve astronomide, bilinmeyen dağılımlara sahip rastgele değişkenlerin genellikle normal olduğu varsayılır. Bu tehlikeli bir varsayım olsa da, merkezi limit teoremi olarak bilinen şaşırtıcı bir sonuç nedeniyle genellikle iyi bir yaklaşımdır. Bu teorem, sonlu bir ortalamaya, varyansa ve herhangi bir dağılıma sahip herhangi bir değişken kümesinin ortalamasının normal dağılım eğiliminde olduğunu belirtir. Test puanları, boy vb. gibi pek çok ortak özellik, az sayıda üye, üst ve alt uçlarda ve çoğu orta uça olmak üzere genellikle normal dağılım kullanılarak ifade edilir. Lippmann’ın belirttiği gibi, "Herkes üstel hatalar yasasına inanır: deneysel çalışan bilim insanları bunun matematikle kanıtlanabileceğini düşünürler ve matematikçiler bunun gözlemlenmesiyle inanırlar" [21].

Ölçüm hatasının olasılık dağılımı Gauss tarafından türetilmiştir ve Normal dağılım olarak da adlandırılır. Bu olasılık dağılımı, Eş. 2’deki gibi normal dağılım olasılık fonksiyonu kullanılarak elde edilebilir.

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

Standart normal dağılım fonksiyonu için olasılık yoğunluk fonksiyonunda $\sigma = 1$ ve $\mu = 0$ olarak alınır. Standart normal dağılım fonksiyonunda $z = \frac{(x-m)}{\sigma}$ ve $dz = \frac{dx}{\sigma}$ dönüşümleri de dikkate alınırsa, $P(x)$ Eş. 3’te yeniden elde edilir.

$$P(x)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (3)$$

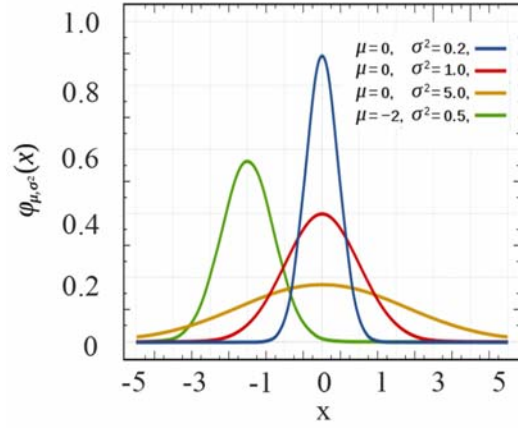
Fisher-Behrens problemi, farklı varyanslara sahip iki normal dağılım ve ortalamaların eşitliği için bir testin belirlenmesidir. Eş. 4’te verilen Normal dağılım fonksiyonu $Q(z)$, standart bir normal değişkenin $[0, z]$ aralığında bir değer alması olasılığını verir.

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (4)$$

Farklı ortalama ve varyansa sahip olasılık yoğunluk fonksiyonunun grafiği Şekil 1’de verilmiştir. Örneğin 0 ortalama ve 1 varyansa sahip standart olasılık yoğunluk fonksiyonu kırmızı çizgi ile belirtilmiştir [21].

2.2. Uç değer dağılımı (Extreme value distribution)

Uç değer dağılımları (EVRND), genellikle, ölçümleri veya gözlemleri temsil eden geniş bir bağımsız, aynı şekilde dağıtılmış rastgele değerler kümesi arasından en küçük veya en büyük değeri modellemek için kullanılır. Uç değer dağılımı, normal dağılım gibi, kuyrukları üstel olarak hızla azalan bir dağılımdan en küçük değeri modellemek için kullanılır. Ayrıca, orijinal değerlerin negatifini kullanarak normal veya üstel dağılımlar gibi bir dağılımdan en büyük değeri modellenilebilir.



Şekil 1. Farklı ortalama ve varyansa sahip Normal olasılık yoğunluk fonksiyonunun grafiği [21]

(Plot of normal probability distribution function with different mean and variance [21])

Konum parametresi μ ve ölçek parametresi σ ile uç değer dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu Eş. 5’teki gibi ifade edilebilir.

$$y = f(x|\mu, \sigma) = \sigma^{-1} \exp\left(\frac{(x - \mu)}{\sigma}\right) \exp\left(-\exp\left(\frac{(x - \mu)}{\sigma}\right)\right) \quad (5)$$

Olasılık yoğunluk fonksiyonunun bu formu, minimum değeri modellemek için uygundur.

2.3. Genelleştirilmiş uç değer dağılımı (Generalized extreme value distribution)

Uç değer dağılımı gibi, genelleştirilmiş uç değer dağılımı (GEVRND) da genellikle ölçümleri veya gözlemleri temsil eden büyük bir bağımsız, özdeş olarak dağıtılmış rastgele değerler kümesi arasından en küçük veya en büyük değeri modellemek için kullanılır. Örneğin, bir üretim sürecinden 1000 adet yıkayıcı partinin parçaları olabilir. Her partideki en büyük yıkayıcının boyutunu kaydederseniz, veriler blok maksimum (veya en küçüğünü kaydederseniz minimum) olarak bilinir. Bu blok maksimumlar için model olarak genelleştirilmiş uç değer dağılımı kullanılabilir.

Konum parametresi μ , ölçek parametresi σ ve şekil parametresi $k \neq 0$ ile genelleştirilmiş uç değer dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu Eş. 6’daki gibi ifade edilebilir.

$$1 + k \frac{(x - \mu)}{\sigma} > 0 \text{ için,}$$

$$y = f(x|\mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1 + k \frac{(x - \mu)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \left(1 + k \frac{(x - \mu)}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}} \quad (6)$$

Olasılık teorisi ve istatistikte, genelleştirilmiş uç değer dağılımı, tip I, II ve III uç değer dağılımları olarak da bilinen Gumbel, Fréchet ve Weibull ailelerini birleştirmek için uç değer teorisi içinde geliştirilen bir sürekli olasılık dağılımları ailesidir. Uç değer teoremi ile genelleştirilmiş uç değer dağılımı, bağımsız ve özdeş olarak dağıtılmış rastgele değişkenler dizisinin uygun şekilde normalleştirilmiş maksimumlarının olası tek sınırlı dağılımıdır. Dağılımın kuyruğunda düzenlilik koşulları gerektiren bir sınır

dağılımının olması gerekir. Buna rağmen, GEVNRD dağılımı genellikle uzun (sonlu) rastgele değişken dizilerinin maksimumlarını modellemek için bir yaklaşım olarak kullanılır.

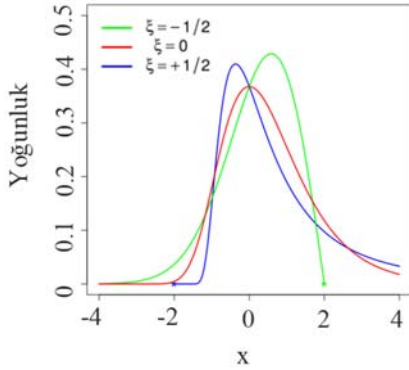
Standartlaştırılmış $s = (x - \mu)/\sigma$ değişkenini kullanarak burada μ konum parametresi ve herhangi bir gerçek sayı olabilir ve $\sigma > 0$, ölçek parametresidir; GEV dağılımının kümülatif dağılım fonksiyonu daha sonra Eş. 7'deki gibi ifade edilebilir.

$$F(s; \xi) = \begin{cases} \xi = 0 & \text{ için } \exp(-e^{-s}) \\ \xi \neq 0 \text{ ve } \xi s > -1 & \text{ için } \\ \exp(-(1 + \xi s)^{-1/\xi}) & \\ \xi > 0 \text{ ve } \xi s \leq -1 & \text{ için } 0 \\ \xi < 0 \text{ ve } \xi s \leq -1 & \text{ için } 1 \end{cases} \quad (7)$$

Standartlaştırılmış dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu ise Eş. 8'deki gibi ifade edilebilir.

$$f(s; \xi) = \begin{cases} \xi = 0 & \text{ için } e^{-s} \exp(-e^{-s}) \\ \xi s > -1 \text{ ve } \xi \neq 0 & \text{ için } \\ (1 + \xi s)^{-(1+1/\xi)} \exp(-(1 + \xi s)^{-1/\xi}) & \\ 0 & \end{cases} \quad (8)$$

Genelleştirilmiş uç değer fonksiyonunun farklı şekil parametresi değerleri kullanılarak elde edilen olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği için Şekil 2 örnek olarak verilebilir [22].



Şekil 2. Genelleştirilmiş uç değer fonksiyonunun farklı şekil parametresi değerleri için elde edilen olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği ($\mu = 0, \sigma = 1$) [22]
(Probability density function graph obtained for different shape parameter values of generalized outlier function ($\mu = 0, \sigma = 1$) [22])

2.4. t dağılımı (t distribution)

Olasılık ve istatistikte, t-dağılımı (veya student t-dağılımı) (TRND), örneklem boyutunun küçük olduğu ve popülasyonun standartının olduğu durumlarda normal olarak dağıtılan bir popülasyonun ortalamasını tahmin ederken ortaya çıkan sürekli olasılık dağılımları ailesinin herhangi bir üyesidir [23]. t-dağılımı istatistiklerde sıklıkla görülür. Olağan türevi ve kullanımı, normalite altında belirli test istatistiklerinin örneklem dağılımı gibidir, ancak olası aykırı değerlere karşı sağlamlık açısından bir endişe olduğunda, t dağılımı, hem sıklık hem de Bayesian istatistiklerinde normal dağılıma bir alternatif olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır [24]. t-dağılımı, normalden daha uzun kuyruklu hataları içeren veri kümelerinin istatistiksel modellenmesi için normalin yararlı bir uzantısı sağlar. Çok değişkenli t hatalarına sahip genel bir model için maksimum olasılığa dayalı bir analitik strateji önermiştir. t dağılımının serbestlik derecesi parametresi, birçok model için hesaplama karmaşıklığında

orta düzeyde artışlar ile sağlam istatistiksel çıkarım elde etmek için uygun bir boyut sağlamaktadır [23, 25]. t-dağılımı, iki örnek ortalaması arasındaki farkın istatistiksel önemini değerlendirmek için, iki popülasyon ortalaması arasındaki fark için güven aralıklarının oluşturulması ve doğrusal olarak da dahil olmak üzere, yaygın olarak kullanılan bir dizi istatistiksel analizde rol oynamaktadır.

Normal bir dağılımdan bir n gözlem örneği alırsak, o zaman $v = n - 1$ serbestlik dereceli t-dağılımı şu şekilde tanımlanabilir: standartlaştırma terimi \sqrt{n} ile çarpıldıktan sonra, gerçek ortalamaya göre örnek ortalamasının konumu, örnek standart sapmasına bölünür. Bu şekilde, gerçek ortalama için bir güven aralığı oluşturmak için t-dağılımı kullanılabilir.

X_1, \dots, X_n rastgele örneği $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ normal dağılımından alınsın, bu beklenen ortalama değeri μ ve varyansı σ^2 olan normal dağılmış bir popülasyonda n boyutunda bir örnektir. Örnek ortalaması Eş. 9'daki gibi ifade edilebilir.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (9)$$

olarak alınırsa, örnek varyansı Eş. 10'daki gibi ifade edilebilir.

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2. \quad (10)$$

Rastgele değişken ise Eş. 11'deki gibi standart bir normal dağılıma (yani beklenen ortalama 0 ve varyans 1 ile normal) ve rastgele değişkene sahiptir (Eş. 12).

$$\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (11)$$

$$\frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \quad (12)$$

S, σ yerini aldığından, bu ifadedeki tek gözlemlenemeyen miktar μ yani bu, μ için güven aralıklarını üretmek için kullanılabilir. Önceki ifadedeki pay ve payda, aynı örneğe dayalı olmalarına rağmen X_1, \dots, X_n istatistiksel olarak bağımsız rastgele değişkenlerdir. Bu, $cov(\bar{X}, X_i - \bar{X}) = 0$ gözlemlenerek görülebilir ve \bar{X} ve $X_i - \bar{X}$ ifadesi ile aynı normal dağılımlı rastgele değişkenler kümesinin Eş. 13'teki gibi doğrusal kombinasyonlarıdır.

$$f(t) = \frac{\Gamma(\frac{v+1}{2})}{\sqrt{v\pi}\Gamma(\frac{v}{2})} \left(1 + \frac{t^2}{v}\right)^{-(v+1)/2}, \quad (13)$$

Burada v serbestlik derecesi sayısıdır ve Γ gama fonksiyonudur. Aynı ifade Eş. 14'teki gibi ifade edilebilir.

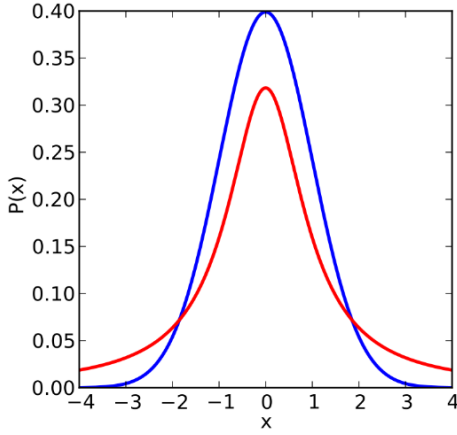
$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{vB(\frac{1}{2}, \frac{v}{2})}} \left(1 + \frac{t^2}{v}\right)^{-(v+1)/2}. \quad (14)$$

Burada B , beta fonksiyonudur. Şekil 3, artan serbestlik derecesi değerleri için t dağılımının yoğunluğunu göstermektedir. Normal dağılım, karşılaştırma için mavi bir çizgi ile gösterilmiştir. Serbestlik derecesi arttıkça t dağılımının (kırmızı çizgi) normal dağılıma yaklaştığı görülmüştür [26].

2.5. Genelleştirilmiş pareto dağılımı (Generalized Pareto distribution)

Üstel dağılım gibi, genelleştirilmiş Pareto dağılımı (GPRND) da genellikle başka bir dağılımın kuyruklarını modellemek için kullanılır. Örneğin, bir üretim sürecinden rondelalarınız olabilir. İşlemdeki rastgele etkiler yıkayıcıların boyutlarında farklılıklara yol açarsa, bu boyutları modellemek için normal gibi standart bir olasılık

dağılımı kullanılabilir. Bununla birlikte, normal dağılım kendi moduna yakın iyi bir model olabilirken, kuyruklardaki gerçek verilere iyi uymayabilir ve tüm veri aralığını tanımlamak için daha karmaşık bir modele ihtiyaç duyulabilir. Öte yandan, yalnızca belirli bir eşikten daha büyük (veya daha küçük) pulların boyutlarını kaydetmek, aşımolarak bilinen bu kuyruk verilerine ayrı bir model sığdırabileceğiniz anlamına gelir. Aşırı karmaşık verilere iyi bir uyum sağlamak için genelleştirilmiş Pareto dağılımı bu şekilde kullanılabilir.



Şekil 3. Standart normal dağılıma (mavi) kıyasla 1, 2, 3, 5, 10 ve 30 derecelik serbestlik için t dağılımının (kırmızı) yoğunluğu [26] (Density of the t distribution (red) for 1, 2, 3, 5, 10 and 30 degrees of freedom compared to the standard normal distribution (blue) [26])

Genelleştirilmiş Pareto dağılımı, özel durumlar olarak hem üstel hem de Pareto dağılımlarını içeren sürekli bir olası şekil aralığına izin verir. Belirli bir aşım veri kümesini modellemek için bu dağıtımlardan herhangi biri kullanılabilir. Genelleştirilmiş Pareto dağılımı, hangi dağılımın uygun olduğuna "verilerin karar vermesine" izin verir.

Şekil parametresi $k \neq 0$, ölçek parametresi σ ve eşik parametresi θ ile genelleştirilmiş Pareto dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu Eş. 15 ve Eş. 16'daki gibi ifade edilebilir.

$$\theta < x, k > 0 \text{ veya } \theta < x < \theta - \frac{\sigma}{k}, k < 0 \text{ için}$$

$$y = f(x|k, \sigma, \theta) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \left(1 + k \frac{(x-\theta)}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{k}} \quad (15)$$

$k = 0$ ve $\theta < x$ için

$$y = f(x|0, \sigma, \theta) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) e^{-\frac{(x-\theta)}{\sigma}} \quad (16)$$

$k = 0$ ve $\theta = 0$ ise, genelleştirilmiş Pareto dağılımı üstel dağılıma eşdeğerdir. $k > 0$ ve $\theta = \sigma/k$ ise, genelleştirilmiş Pareto dağılımı, σ/k 'ye eşit bir ölçek parametresi ve $1/k$ 'ye eşit bir şekil parametresi ile Pareto dağılımına eşdeğerdir. Genelleştirilmiş Pareto Dağılımları maksimum entropi kuyruğu dağılımlarının, birçok uygulamalı problemde ağır kuyruklu dağılımları modellemek için çok faydalı olduğu kanıtlanmıştır [27].

Bu çalışmada moleküler haberleşme modeli beş farklı dağılım fonksiyonu kullanılarak modellenmiş ve genelleştirilmiş pareto dağılım fonksiyonu kullanarak alınan molekül sayısının maksimum değerine ulaşılmıştır. Moleküler haberleşme modelinde kullanılan modelin ağır kuyruklu yapısı Pareto dağılımlarında en iyi sonucu elde etmeyi sağlamıştır.

3. Dağıtım Fonksiyonları ile Moleküler Haberleşme (Moh-Df) Modeli (Molecular Communication Model with Distribution Functions (Moc-Df))

Bilindiği gibi temel moleküler haberleşme çalışmalarında parçacıkların dağılımı için normal dağılım fonksiyonu kullanılmaktadır. Fakat farklı dağılım fonksiyonları kullanılarak sistemlerin veya optimizasyon algoritmalarının performansının artırıldığı literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin Harris hwak algoritmasında algoritma içerisinde bulunan normal dağılım yerine başka dağılım fonksiyonları kullanılarak optimizasyon algoritmasının performansı artırılmıştır. Ates ve Akpamukcu çalışmasında Monarch butterfly optimizasyon algoritmasında farklı dağılım fonksiyonları kullanılarak birçok problem optimizasyon algoritmasının performansı artırılmıştır [28, 29]. Akpamukcu tez çalışmasında birçok dağılım fonksiyonları incelenerek farklı problemler üzerinde irdelenmiş ve algoritmaların performansının arttığı gösterilmiştir. Bu çalışmada, difüzyon yolu ile MOC sistemleri için nano veya mikro boyutlarda verici ve alıcı arasındaki sinyal iletimi için moleküllerin taşıyıcı olarak kullanıldığı bir model önerilmiştir. Bu moleküllerin difüzyon ortamındaki hareketi için Brownian hareket ilkesine dayalı sistem modellenmesi yapılmıştır. Önerilen modelde, taşıyıcı moleküllerin hareketini analiz etmek için simülasyon zamanı küçük zaman adımlarına bölünmüş ve ardışık her zaman adımında üç boyutun her birine rastgele bir hareket eklenecek şekilde bir senaryo gerçekleştirilmiştir. Bu dinamiklere göre n boyutlu uzayda, Δt zaman adımı ile yayılan moleküllerin toplam yer değiştirmesi, Eş. 17, Eş. 18 ve Eş. 19 kullanılarak Eş. 20'deki gibi ifade edilebilir [30, 31]:

$$N(\mu, \sigma^2), \quad (17)$$

$$(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i) = N(0, 2D\Delta t) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \text{ için}, \quad (18)$$

$$(x_i, y_i, z_i) = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}) + (\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i), \quad (19)$$

$$\Delta x = (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots \Delta x_i), \quad (20)$$

Burada (x_i, y_i, z_i) ve $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ nano-makinelerin n 'inci boyuttaki konumunu ve yer değiştirmesini ve D difüzyon katsayısını ifade eder. $N(\mu, \sigma^2)$, σ^2 varyans and μ ortalama ile Gauss (Normal) rastgele değişkenini ifade eder.

Bilgi taşıyan bir molekülün difüzyon ortamındaki hareketi için yukarıdaki formüllerde verilen Normal dağılım fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilir. Fakat normal dağılım kullanılması genelde stokastik süreçlerin normal dağılım ile modellenmesinden kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi farklı dağılım fonksiyonlarının normal dağılım fonksiyonu yerine kullanılması önerilen modelin performansını da artırabilir. Çünkü her problem kendine özgü bir dağılım fonksiyonu yapısını içerisinde barındırmaktadır. Bilindiği gibi temel MOH modelinde moleküllerin hareketinde normal dağılıma göre üretilen diziler kullanılmaktadır. Bu bölümde aşağıda verilen matematiksel modeller farklı dağılım fonksiyonlarının kullanılabilirliği yapıya getirilmiştir. Çalışmada EVRN, NRND, TRND, GEVRND ve GPRND kullanılmıştır. Bu dağılımların genel yapısı ve fiziksel anlamları 2. bölümde verilmiştir.

Verici ile alıcı arasındaki bilgi aktarımı sırasında oluşan hatanın analizi için sayısal haberleşme sistemlerinde kullanılan hata fonksiyonu (erf) denklemi aşağıda verilmiştir. Moleküler haberleşme sistemlerinden biri olan MOH için bilgi aktarımı sırasında kullanılan moleküllerin hata analizi için bu fonksiyonun kullanılabilirliği düşünülmektedir. Bu, Eş. 1'deki gibi Normal dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılarak Eş. 21, Eş. 22 ve Eş. 23'deki gibi elde edilebilir.

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx, \quad (21)$$

$$\operatorname{erf} c(z) = 1 - \operatorname{erf}(z), \quad (22)$$

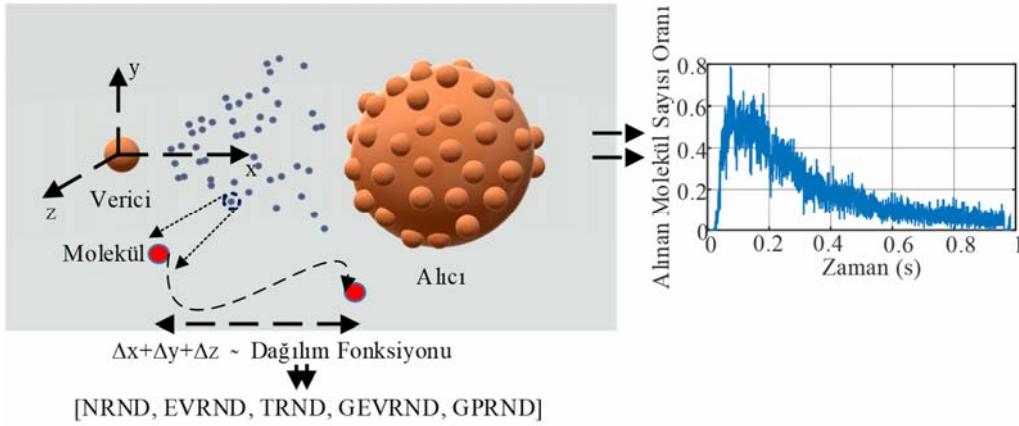
$$\operatorname{erf} c(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} e^{-x^2} dx. \quad (23)$$

İlk olarak, önerilen MOH modeli, çeşitli dağılım fonksiyonu değerleri için alınan moleküllerin sayısına göre bağımsız olarak incelenmiştir. Tüm analizler alıcının reseptörleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Alınan molekül, alıcı tarafından herhangi bir reseptöre dokunmadan alınmışsa dikkate alınmamıştır [32]. Tablo 1'de belirtilen sistem parametreleri için alınan molekül sayısı analiz edilmiştir.

Tablo 1. Sistem parametreleri (System parameters)

Alıcı yarıçapı, r_r	3.101 μm
Verici ile alıcı arasındaki uzaklık, d	5 μm
Reseptör yarıçapı, r_s	0.01, 0.02, 0.03 μm
Reseptör sayısı	7200
İletilen molekül sayısı	20000
Simülasyon tekrar sayısı	100
Ortamın difüzyon sabiti, D	79.4 $\mu\text{m}^2/\text{s}$
Örnekleme süresi, Δt	0.01, 0.001 s

MOH sistemlerinde veri iletimi sırasında kullanılan kanallar iki gruba ayrılır. İlk yöntem, Brown hareketi olarak da bilinen saf bir difüzyon ortamında bilgi moleküllerinin hareketi ve konsantrasyon gradyanı [33] nedeniyle moleküllerin yalnızca iki bölge arasında hareket ettiği kanallardır. Akışa dayalı difüzyon kanalları, moleküllerin konumunun difüzyonun yanı sıra sıvı akışı tarafından belirlendiği ikinci yoldur. Önerilen yöntemde, Nanomakineler (NM)'lerin akışkan bir ortamda hareketi için ilk yöntem olan saf difüzyon kanalı kullanılmıştır. Saf bir difüzyon ortamında moleküllerin hareketinin ancak moleküler haberleşme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir. Moleküllere ek olarak, alıcı ve verici NM'lerin hareketliliği de bilgi aktarım hızını etkileyebilir. Bu açıdan, NM'lerin hareketliliğinin molekül alım sayısı üzerindeki etkileri araştırmaya değerdir [34]. Farklı dağılım fonksiyonları için önerilen MOC modelinde, alıcı üzerindeki reseptörler bulunmaktadır. Böylece mobil nano makineler, 3 boyutlu düzlemin her yönünde sonsuz genişlemeye sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Moleküller ortama boşaltıldıktan ve Brownian hareketine göre yayıldıktan sonra alıcıya ulaşır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, küresel alıcı 3B düzlemin (0, 0, 0) orijininde ve verici alıcıdan d kadar uzağa konumlandırılmıştır. Gerçek bir biyolojik sisteme yakın bir model geliştirebilmek için, ortamda bulunan moleküllerin konumu her zaman adımından (Δt) sonra değiştirilmiştir. Önerilen modelde, r_s yarıçaplı küresel reseptörler kullanılmış böylece alıcı Şekil 4'de gösterildiği gibi bilgi taşıyan



Şekil 4. Önerilen model (The proposed model)

Algoritma 1. Önerilen MOH modelinin mimarisi (Architecture of the proposed MOH model)

Giriş: r_s, r_r, d , reseptör sayısı, farklı dağılım fonksiyonları
Çıkış: Alınan molekül sayısı

For her bir yürütmede **do**
If $t=0$ **then**
Moleküller kanal ortamına salınır
End if
Alıcıya girmeyen molekülleri tespit et
Alınmayan moleküller için **do**
Her bir zaman adımındaki moleküllerin hareketi için Brownian hareket prensibini kullan
Her bir molekülün alıcıya olan uzaklığını hesapla
While $R_x \leq r_r$ **do**
Molekülün hareketini durdur
Molekülü tekrar hareket ettir
End while
End for
Molekülün alıcının içinde olup olmadığına karar ver
If molekül içerideyse
Molekülün alıcı üzerinde bulunan reseptörlerden birine temas edip etmediğini kontrol et
Molekülün yeni konumunu tespit et
End if
Alınan molekül sayısını kaydet
End for

molekülleri reseptörlerini kullanarak içine almıştır. Ayrıca önerilen modelde NM'lerin birbirleriyle çarpışma olasılığı dikkate alınmamıştır. Önerilen m MOH modelinin analizi sırasında kullanılan sistem parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Analizler sırasında, küresel tamamen emici bir alıcı için alınan molekül sayısı kümülatif olarak Eş. 24 ve Eş. 25 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F_{hit}^{r_s, n}(t) = \frac{r_r}{r_0} \frac{r_s n}{r_s n + \pi r_r} \left(1 + \operatorname{erf} \left[\frac{r_r - r_0}{\sqrt{4Dt}} \right] - \exp \left[(r_0 - r_r) \left(\frac{\pi r_s + \pi r_r}{\pi r_r^2} \right) + Dt \left(\frac{\pi r_s + \pi r_r}{\pi r_r^2} \right)^2 \right] * \operatorname{erfc} \left[\frac{r_0 - r_r + 2Dt \left(\frac{\pi r_s + \pi r_r}{\pi r_r^2} \right)}{\sqrt{4Dt}} \right] \right) \quad (24)$$

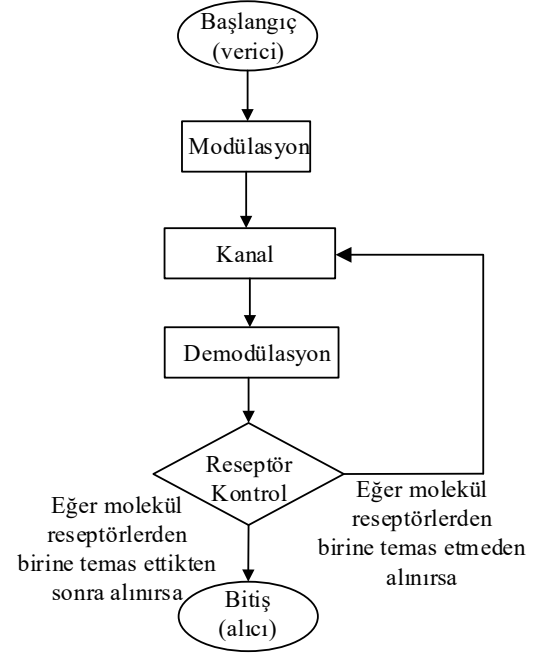
$$F_{hit}^{r_s, n}(t_1, t_2) = F_{hit}^{r_s, n}(t_1) - F_{hit}^{r_s, n}(t_2) \quad (25)$$

4. Analiz Sonuçları (Results Of Analysis)

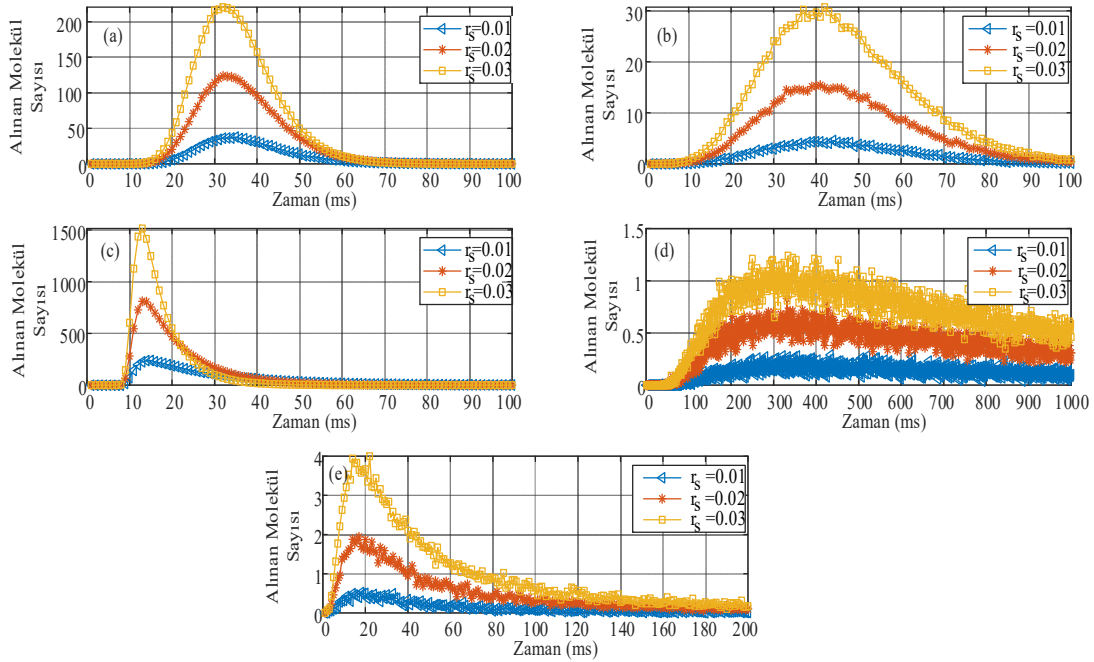
Algoritma 1'de verilen yapıya göre, MOH parametreleri başta dağılım fonksiyonları olmak üzere alınan molekül sayısını maksimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Diğer bir deyişle, Algoritma 1, farklı dağılım fonksiyonları için her alınan molekül sayısı hesaplanmasında sürekli olarak otomatik olarak çağrılır. Algoritmik yapının adımları aşağıda verilmiştir. Analizler için Şekil 4'te verilen yapı kullanılarak Algoritma 1 MOH modelinin mimarisi ve Şekil 5'deki akış diyagramı baz alınarak Şekil 6 ve Şekil 7'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Farklı dağılım fonksiyonlarının performanslarının karşılaştırıldığı Şekil 6 grafiğinde, alınan molekül sayısının zamana göre grafikleri gösterilmektedir. Ayrıca sistem parametrelerinden birisi olan ve alınan molekül sayısını önemli derecede etkileyen alıcı üzerinde bulunan reseptör yarıçapı da Şekil 6'da, reseptör yarıçapının 3 farklı değeri (0.01, 0.02, 0.03) ve 5 farklı dağılım fonksiyonu kullanılarak analiz edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere reseptör yarıçapı arttıkça alınan molekül sayısı da bütün dağılım fonksiyonlarında artış

göstermiştir. Farklı dağılım fonksiyonları için Şekil 6'da elde edilen grafikler karşılaştırıldığında en iyi performansın (alınan molekül sayısının maksimum olduğu) GPRND dağılım fonksiyonu kullanılarak elde edildiği, en kötü performansın (alınan molekül sayısının minimum olduğu) NRDN dağılım fonksiyonu kullanılarak elde edildiği görülmüştür. Kullanılan diğer dağılım fonksiyonlarının performansı incelendiğinde sırası ile EVRND, GEVRND ve TRND olarak en iyiden kötüye olarak sıralanabilir.

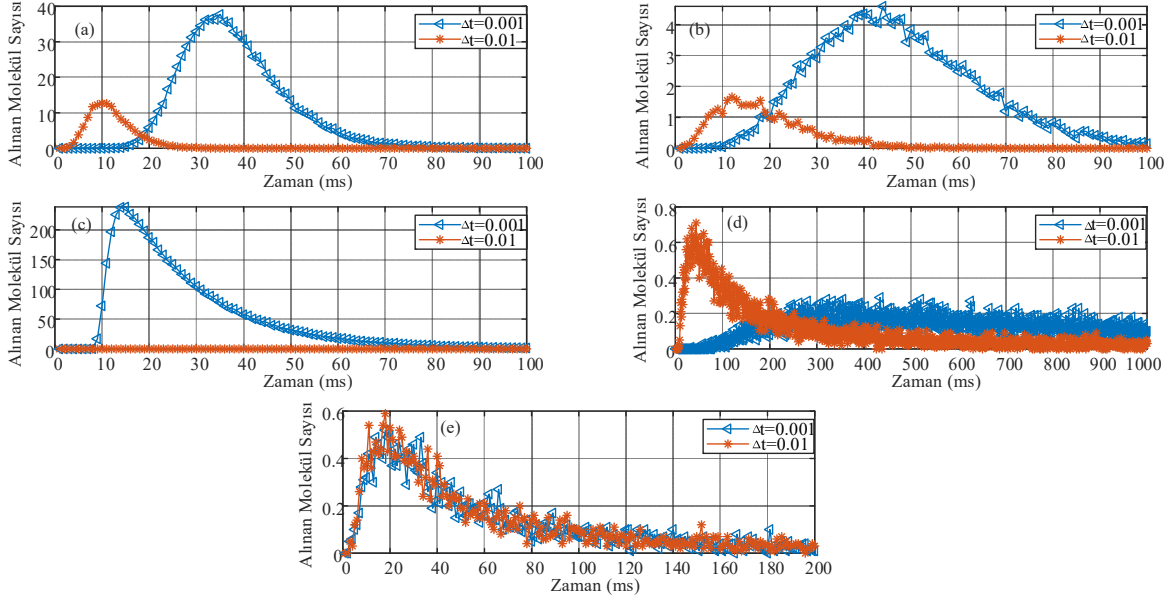


Şekil 5. Önerilen MOH modelinin akış diyagramı (Flow chart of the proposed MOC model)



Şekil 6. Farklı reseptör yarıçapları için alınan molekül sayısının zamana karşı grafikleri a) EVRND, b) GEVRND, c) GPRND, d) NRDN, e) TRND

(Graphs of the number of molecules received for different receptor radius versus time a) EVRND, b) GEVRND, c) GPRND, d) NRDN, e) TRND)



Şekil 7. Farklı örnekleme süresi değerleri için alınan molekül sayısının zamana karşı grafikleri a) EVRND, b) GEVRND, c) GPRND, d) NRND, e) TRND
(Graphs of the number of molecules received for different step time versus time a) EVRND, b) GEVRND, c) GPRND, d) NRND, e) TRND)

Diğer bir sistem parametresi olan ve alınan molekül sayısını önemli derecede etkileyen örnekleme süresi (Δt) Şekil 7'de, 2 farklı Δt (0.01, 0.001) değerleri için 5 farklı dağılım fonksiyonunu kullanarak analiz edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere artan örnekleme süresi için alınan molekül sayısı bütün dağılım fonksiyonlarında azalış göstermiştir. Farklı dağılım fonksiyonları için Şekil 7'de elde edilen grafikler karşılaştırıldığında en iyi performansın (alınan molekül sayısının maksimum olduğu) GPRND dağılım fonksiyonu kullanılarak elde edildiği, en kötü performansın (alınan molekül sayısının minimum olduğu) NRND dağılım fonksiyonu kullanılarak elde edildiği görülmüştür. Ancak burada dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da TRND dışındaki bütün dağılım fonksiyonlarında örnekleme süresinin değişimi ile alınan molekül sayısını ciddi oranda değiştirdiğini gözlemlendiği. Örneğin GPRND dağılımı kullanıldığında $\Delta t=0.01$ değeri için alınan molekül sayısı sıfıra düşmüştür. Buda farklı dağılım fonksiyonlarının farklı örnekleme sürelerinde farklı karakteristikler göstermesi olarak yorumlanmıştır.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Alıcıdaki moleküllerin sayısını arttırmanın amaçlandığı bu çalışmada, moleküllerin akışkan bir ortamda farklı dağılım fonksiyonlarına göre hareket ettirildiği yeni bir MOH modeli önerilmektedir. Önceki araştırmalardan farklı olarak, simülasyonun her bir adımında ortamda bulunan moleküllerin konumu her bir bit süresi için değiştirilmiştir. Bu çalışmada biyolojik canlı hücrelerin gerçekliğini güçlendirmek için reseptörler de dikkate alınmıştır. Alıcı üzerinde bulunan reseptörler dikkate alınarak alıcıda alınan molekül sayısı analiz edilmiştir. Farklı dağılım fonksiyonları için alınan molekül sayısı elde edildikten sonra, en iyi MOH modelini bulmak için alınan molekül sayısının zamana göre grafikleri birlikte verilmiştir. Literatürde MOH modellerinin analizi için genellikle NRND dağılım fonksiyonunun kullanıldığı düşünüldüğünde yapılan çalışmanın önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır [30, 31]. Çünkü önerilen çalışma ile NRND dışında diğer dağılım fonksiyonları ile moleküller haberleşme sistemlerinin performanslarının artırılacağı gösterilmiştir. Önerilen model ile en iyi MOH performansının GPRND ile en kötü

MOH performansının ise NRND ile elde edildiği sonucuna varılmıştır. Alınan molekül sayısının çok kısa sürede maksimum değere ulaştığı ve zamanla azalarak ağır kuyruklu bir şekil oluşturduğu görülmektedir. Bu yapı GPRND modeli için uygun kuyruk yapısına sahip olduğunu ve sonuç olarak da en yüksek molekül sayısını vererek en iyi performansa sahip olduğunu göstermiş böylece önerilen çalışma ile literatürün aksine daha iyi bir MOH modeli elde edilmiştir.

İleride, farklı dağılım fonksiyonlarının kullanıldığı MOH modelleri için, hassas sürüklenme hızı, vasküler dallanma ve kan moleküllerinin hareketi gibi birçok sistem ve çevre yönü dikkate alınarak gelecekte daha dinamik ve biyolojik sistemler oluşturulabilir. Derin sinir ağları, ortamdaki moleküllerin konumunu tahmin etmek ve daha düşük sinyal-gürültü oranı ve alıcıda daha yüksek alım olasılığı ile daha dinamik bir model oluşturmak için de kullanılabilir.

Kaynaklar (References)

1. Akyildiz, I. F., Brunetti, F., Blázquez, C., Nanonetworks: A new communication paradigm. *Comput. Networks*, 52, 2260–2279, 2008.
2. Nakano, T., Andrew W. E., *Molecular Communication*, Cambridge University Press, 2013.
3. Isik I., Tagluk M.E., Isik E., Interference and molecule reception probability analysis in nano/micro scale communication systems using Fick's diffusion law, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (2), 967–983, 2022.
4. Isik, I., Yilmaz, H. B., Demirkol, I., Tagluk, M. E., Effect of receiver shape and volume on the Alzheimer disease for molecular communication via diffusion, *IET nanobiotechnology*, 14, 602–608, 2020.
5. Isik, I., How mobility of transmitter and receiver affects the communication quality, 12, 0–1, 2022.
6. Isik, E., Analyzing of the diffusion constant on the nano-scale systems by using artificial neural networks, *AIP Adv.* 11, 2021.
7. Yilmaz, H. B., Cho, Y., Guo, W., Chae, C., Interference reduction via enzyme deployment for molecular communication, *Electronics letters*, 52, 2016.

8. Farsad, N., Yilmaz, H. B., Eckford, A., Chae, C.-B., Guo, W., A Comprehensive Survey of Recent Advancements in Molecular Communication, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18, 3, 2014.
9. Huang, X., Fang, Y., Noel, A., Yang, N., Channel characterization for 1-D molecular communication with two absorbing receivers. *IEEE Commun. Lett.* 24, 1150–1154, 2020.
10. Kumar, S., Nanomachine Localization in a Diffusive Molecular Communication System. *IEEE Syst. J.* 14, 3011–3014, 2020.
11. Harvey L., Arnold B., S Lawrence Z., Paul M., David B., J. D., *Molecular Cell Biology*, 29, 2000.
12. Kitano, H., Computational systems biology, *Nature*, 420, 206–210, 2002.
13. Okaie, Y., Ishiyama, S., Hara, T., Leader-Follower-Amplifier Based Mobile Molecular Communication Systems for Cooperative Drug Delivery, *IEEE Glob. Commun. Conf. GLOBECOM 2018 - Proc.* 1–6, 2018.
14. Lin, L., Wu, Q., Ma, M., Yan, H., Concentration-based demodulation scheme for mobile receiver in molecular communication, *Nano Commun. Network*, 20, 11–19, 2019.
15. Barros, M. T., Silva, W., Regis, C. D. M., The Multi-Scale Impact of the Alzheimer's Disease in the Topology Diversity of Astrocytes Molecular Communications Nanonetworks., *IEEE Access*, 1–16, 2018.
16. Bi, D., Almpanis, A., Noel, A., Deng, Y., Schober, R., A Survey of Molecular Communication in Cell Biology: Establishing a New Hierarchy for Interdisciplinary Applications, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 1–53, 2021.
17. Chouhan, L., Sharma, P. K., Molecular communication in three-dimensional diffusive channel with mobile nanomachines. *Nano Commun. Netw.* 24, 100296, 2020.
18. Li, B., Sun, M., Wang, S., Guo, W., Zhao, C. Local Convexity Inspired Low-Complexity Noncoherent Signal Detector for Nanoscale Molecular Communications, *IEEE Trans. Commun.* 64, 2079–2091, 2016.
19. Farsad, N., Eckford, A. W., Hiyama, S., Moritani, Y., On-chip molecular communication: Analysis and design. *IEEE Trans. Nanobioscience*, 11, 304–314, 2012.
20. Balevi, E., Akan, O. B., Physical Channel Model for Nanoscale Neuro-Spike Communications, *IEEE Transactions on Communications*, 61, 1178–1187, 2013.
21. Normal distribution, https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution, Erişim tarihi Kasım 15, 2019.
22. Generalized extreme value distribution. https://en.wikipedia.org/wiki/Generalized_extreme_value_distribution, Erişim tarihi Eylül 15, 2022.
23. Peel, D., Robust mixture modelling using the t distribution, *Statistics and Computing*, 10, 339–348, 2000.
24. Taylor, P. et al., Robust Statistical Modeling Using the t Distribution, *Journal of the American Statistical Association*, 84, 37–41, 1989.
25. Fernanda L. Schumacher, Larissa A. Matos, Celso R. B. Cabral, Canonical fundamental skew-t linear mixed models, arXiv:2109.12152, 2021.
26. Student t distribution. https://en.wikipedia.org/wiki/Student%27s_t-distribution, Erişim tarihi Eylül 25, 2021.
27. Bercher, J., Tsallis distribution as a standard maximum entropy solution with 'tail' constraint, 372, 5657–5659, 2008.
28. Ates, A., Akpamukcu, M., Modified monarch butterfly optimization with distribution functions and its application for 3 DOF Hover flight system. *Neural Comput. Appl.* 34, 3697–3722, 2022.
29. Seyyarer E., Karci A., Ateş A., Effects of the stochastic and deterministic movements in the optimization processes, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (2), 949–965, 2022.
30. Moore, M. J., Suda, T., Oiwa, K., Molecular Communication : Modeling Noise Effects on Information Rate, 8, 169-180, 2009.
31. 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.
32. 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. Letter*, 19, 155–158, 2015.
33. Iwasaki, S., Yang, J. & Nakano, T. A Mathematical Model of Non-Diffusion-Based Mobile Molecular Communication Networks, *IEEE Commun. Letter*, 21, 1969–1972, 2017.
34. Walsh, F., *Protocols for Molecular Communication*, Waterford Institute of Technology, Doktora tezi, 2013.