Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

# Nesnelerin interneti uygulamalarında heterojen veri trafiklerinin etkin ve adil iletimi için servis kalitesi destekli yeni bir ortam erişim kontrol protokolü tasarım ve başarım analizi

# Design and performance analysis of a new medium access control protocol with quality of service support for effective and fair transmission of heterogeneous data traffics in Internet of Things applications

*Sedat Atmaca*[1*]

[1]Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye.
sedatatmaca@mu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 13.03.2024 Düzeltme Tarihi/Revision: 22.11.2024 doi: 10.5505/pajes.2025.85710
Kabul Tarihi/Accepted: 07.01.2025 Araştırma Makalesi/Research Article

**Öz**

*Bu makale çalışmasında, nesnelerin interneti (Nİ) uygulamaları için farklı bantgenişliği ihtiyacına sahip, gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan iki değişik veri trafiğinin iletimi için tasarlanmış servis kalitesi destekli bir ortam erişim kontrol (OEK) protokolü önerilmektedir. Önerilen OEK protokolünde kullanılan adil kanal paylaştırma temelli planlama algoritması iki farklı veri trafik türü için bantgenişliği tahsisini verimli bir şekilde gerçekleştirmektedir. Çalışmada esnek bantgenişliği tahsisine yatkınlığı nedeniyle TDMA, OEK tekniği olarak seçilmiştir. TDMA OEK tekniği ile düğümlerin bantgenişliği gereksinimlerine göre bir veya daha fazla zaman dilimi tahsis edilerek, ilgili düğümlere servis kalitesi desteği sağlanmaktadır. Önerilen OEK protokolünün analitik modeli iki boyutlu sürekli-zamanlı Markov zinciri kullanılarak geliştirilmiş ve örnek bir ağ senaryosunda başarımı analiz edilmiştir. Başarım analizinde bağlantı engelleme olasılığı, iş çıkarma oranı, kanal kullanım oranı ve bağlantı tamamlanma oranı esas alınmıştır. Ayrıca önerilen OEK protokolünün Monte Carlo benzetimi de gerçekleştirilerek analitik modelden elde edilen sonuçlar benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ile doğrulanmıştır. Önerilen OEK protokollünün kullanıldığı örnek ağ senaryosundan elde edilen sonuçlara göre, ağın toplam yükü 10 iken, gerçek zamanlı kullanıcıların bağlantı engelleme olasılığı %10, gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait bağlantı engelleme olasılığı ise %26.6'dır. Aynı yük altında, gerçek zamanlı olmayan kullanıcılar için çağrı tamamlanma olasılığı %80.23 iken, gerçek zamanlı kullanıcılar için %46.80'dir.*

**Anahtar kelimeler:** Nesnelerin interneti, Ortam erişim kontrol, Zaman bölmeli çoklu erişim.

**Abstract**

*In this paper, a quality of service supported (QoS) medium access control (MAC) protocol designed to transmit two different data traffic types, namely real-time and non-real-time, with different bandwidth requirements for Internet of Things (IoT) applications is proposed. A new fair channel allocation-based algorithm used in the proposed MAC protocol efficiently performs bandwidth allocation for two different data traffic types. In this study, TDMA is chosen as the MAC technique due to its tendency to flexible bandwidth allocation. With the TDMA MAC technique, QoS support is provided to the related IoT nodes by allocating one or more time slots according to the bandwidth requirements of the nodes. The analytical model of the proposed MAC protocol has been developed by using a two-dimensional continuous-time Markov chain and its performance has been analyzed in an example network scenario. Performance analysis is carried out based on call blocking probability, throughput, utilization and call completion rate. In addition, a Monte Carlo simulation of the proposed MAC protocol has been performed, and the results obtained from the analytical model have been confirmed with the results obtained from the simulation model. According to the results obtained from the sample networking scenario in which the proposed MAC protocol is utilized, when the total load of the network is 10, the call blocking probability of real-time users is 10%, and the call blocking probability of non-real-time users is 26.6%. Under the same load conditions, the call completion ratio for non-real-time users is 80.23%, while for real-time users this ratio is 46.80%.*

**Keywords:** Internet of things, Medium access control, Time division multiple access.

## 1 Giriş

Günümüzde teknolojinin ve özellikle internetin gelişimi ile birlikte, nesnelerin interneti (Nİ) (Internet of Things, IoT) kavramı ortaya çıkmış ve kısa sürede çok fazla sayıda uygulama alanı bulmuştur. Akıllı ev sistemleri, sağlık sistemleri, ulaşım, tarım, üretim ve akıllı şehirler uygulama alanlarından sadece birkaçıdır. Nİ, fiziksel nesnelerin insan müdahalesine ihtiyaç duymadan birbirleriyle iletişim kurabileceği, veri paylaşabileceği ve gerektiğinde eyleyicilerin otonom olarak çalıştırılabileceği bir ağ sistemidir [1]-[8],[23]. Bu sistemlerin en temel bileşeni kablosuz algılayıcı ağlardır (KAA). KAA'lar, Nİ uygulamalarında gerçek dünya verilerini (sıcaklık, nem, basınç, ışık yoğunluğu, hareket vb.) toplama, izleme ve iletme işlevlerini yerine getirir [9],[24]. Günümüz algılayıcı ağlarında kullanılan algılayıcılar çok farklı türde veri ürettiğinden bu algılayıcıların ileteceği veri trafik türleri homojen değildir ve farklı bant genişliği ve servis kalitesi desteği (Quality of Service, QoS) ihtiyaçları vardır. Gerçek zamanlı uygulamalar için verilerin mümkün olduğu kadar hızlı iletilmesi gerekirken, bazı uygulamalar gecikmeye dayanıklıdır ve uzun veri iletim gecikmesini destekler. Örneğin hasta izleme sisteminde kullanılan ECG (electrocardiogram) verilerinin ihtiyaç duyduğu servis kalitesi desteği, belirli bir ortamdaki sıcaklık verilerinin iletimi için kullanılacak servis kalitesi desteğinden farklıdır [10],[25].

*Yazışılan yazar/Corresponding author

İletişim ağlarının çoğunda, birden fazla terminal paketlerini iletmek için ortak bir kanalı paylaştığından, kanal erişiminin bu terminaller arasında düzenlenmesi gerekir. OEK katmanı, ortak kanalın düğümler tarafından uygun şekilde kullanılmasından ve paylaşılmasından sorumludur [9]-[12]. OEK protokolü tasarımı, paylaşılan ortamdaki iletişim trafiğini yönetmeyi ve düğümlerin birbirleriyle ve erişim noktasıyla iletişim kurabilmesi için gerekli ağ altyapısını sağlamayı hedefler [9], [10]. Bir ağın başarımı kullanılan OEK protokolünden doğrudan etkilendiğinden, yüksek verim, düşük uçtan uca gecikme ve düşük enerji tüketimi elde etmek için uygun OEK protokolünün tercih edilmesi kritik önem taşımaktadır [9]-[14]. Nİ ağlarında kullanılan mevcut OEK protokolleri, (1) çekişme tabanlı protokoller, (2) çekişmesiz protokoller ve (3) hibrit protokoller olmak üzere üç kategoride sınıflandırılabilir [15]-[16]. Çekişme tabanlı protokoller, birçok kullanıcının aynı paylaşılan ortamı belirli bir koordinasyon olmadan kullanmalarını sağlar. Aloha ve Carrier Sense Multiple Access (CSMA), çekişme tabanlı OEK protokollerinin en bilinen örnekleridir. Aloha tekniğinde, bir düğüm iletecek verisi olduğunda, kanalın başka bir terminal tarafından kullanılıp kullanılmadığını kontrol etmeden veri paketini hemen gönderir. Bu nedenle düşük başarım gösterir. CSMA tekniği ise, "konuşmadan önce dinle" felsefesini kullanarak Aloha'nın başarımını iyileştirir [15]. Bu tekniğin kullanıldığı ağlarda, bir düğüm iletecek verisi varsa, önce kanalı dinler ve kanal başka bir düğüm tarafından kullanılmıyorsa paketini gönderir [15]-[16]. Nİ ağlarında çekişmesiz (kanal tahsis tabanlı) OEK protokolleri kanal erişimi için ağırlıklı olarak Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access, TDMA) tekniğine dayanmaktadır. Bu teknikte, ağdaki tüm algılayıcı düğümlerin senkronize olduğu varsayılır ve her düğüme kanala erişmesi ve verilerini iletmesi için bir veya daha fazla zaman dilimi tahsis edilir. TDMA tekniğinin paket çarpışmalarını en aza indirgemek ve çekişme tabanlı protokollere göre daha fazla enerji verimliliği sağlamak gibi olumlu yönleri vardır [15]-[17]. Hibrit OEK protokolleri daha iyi başarım sağlamak için hem çekişmeli hem de çekişmesiz OEK tekniklerinin avantajlarını bir arada kullanır [15].

Bu çalışmada, heterojen veri iletim destekli bir OEK protokolü tasarımı ve başarım analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma ile literatüre iki önemli katkı sunulmaktadır. (1) İki farklı veri trafik türünü kullanan Nİ düğümlerine servis kalitesi destekli bant genişliği tahsisi algoritması (2) önerilen Heterojen Veri Transfer Destekli OEK (HVTD-OEK) protokolünün örnek bir ağda iki boyutlu Markov zinciri ile analitik modellenmesi ve başarım analizi. Özellikle Markov zinciri kullanarak böyle bir ağın analitik modellenmesi ve başarım analizi bu alanda yapılacak sonraki çalışmalar için önemli katkılar sağlayacaktır. Önerilen HVTD-OEK protokollünün kullanıldığı örnek ağ senaryosundan elde edilen sonuçlara göre, ağın toplam yükü 10 iken, gerçek zamanlı kullanıcıların bağlantı engelleme olasılığı %10, gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait bağlantı engelleme olasılığı ise %26.6'dır. Aynı yük altında, gerçek zamanlı olmayan kullanıcılar için bağlantı tamamlanma oranı %80.23 iken, gerçek zamanlı kullanıcılar için bu oran %46.80'dir. Elde edilen bu değerler, ağdaki ağır yük durumlarında bile başarımın oldukça yüksek olduğu göstermektedir.

Makale altı ana bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2'de Nİ uygulamalarında kullanılan OEK Protokolleri sunulmuştur. Bölüm 3'de geliştirilen OEK protokolünün kullanıldığı Nİ ağ modeli ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Geliştirilen ağ modeli esas alınarak başarım analizleri Bölüm 4'de yapılmaktadır. Sayısal sonuçlar Bölüm 5'te verilerek sonuçlar ve değerlendirmeler Bölüm 6'de sunulmaktadır.

## 2 Nesnelerin interneti uygulamalarında kullanılan ortam erişim kontrol protokolleri

Literatürde Nİ ağları için sunulan çok fazla sayıda OEK protokolü bulunmaktadır. [18]'de, 802.11ah protokolüne düzenleme yapılarak, çekişme ve kanal tahsis tekniklerini birlikte kullanan, öncelik gruplama ve zamanlama işlemlerini gerçekleştiren bir hibrit OEK protokolü sunulmaktadır. Bu protokol, ağdaki paket çarpışmalarını azaltmanın yanı sıra farklı kullanıcıların servis kalitesi gereksinimlerinin karşılanmasını da sağlamaktadır. Ağdaki algılayıcı düğümlerin kaynak isteklerinden elde edilen servis süresi bilgileri kullanılarak, düğümler gruplara ayırılır. Daha sonra, zaman dilimi tahsis algoritması, düğümler arasında öncelikleri belirler ve en kritik olanlara en yüksek öncelik atar. Bu da öncelikli düğümlerin iletişim ihtiyaçlarının daha hızlı ve etkin bir şekilde karşılanmasına yardımcı olduğundan ağ başarımını artırır. Makalede birim zamandaki iş çıkarma oranı (throughput) başarım metriği olarak kullanılmıştır ve hibrit OEK protokolünden elde edilen iş çıkarma oranı sonuçları ile klasik 801.11ah protokolünden elde edilen iş çıkarma oranı sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Nİ uygulamalarında sıklıkla tercih edilen IEEE 802.15.4 standardı, yüksek veri trafiği altında düşük verimlilik, yüksek gecikme ve süper çerçeve süresinin yetersizliği gibi nedenlerle başarım düşüklüğü göstermektedir. Bu sorunları gidermek amacıyla, Backoff Freezing and Sleep MAC (BSMAC) protokolü önerilmiştir [19]. BSMAC protokolü, veri paketi iletimi için mevcut süper çerçeve süresinde zaman yetersizliği olduğunda "backoff" sayacını dondurur ve düşük güç tüketimine sahip uyku durumuna geçer. Belirli bir süre sonra, Nİ düğümü uyku durumundan uyandırılır ve "backoff" sayacı yeniden başlatılır. Ancak, karmaşık bir Nİ ağındaki rastgele uyku süresi, verimlilik ve güç verimliliğini etkileyebilir. Bu sorunu çözmek için, güç tüketimi ve verimlilik koşullarına bağlı olarak optimal uyku süresi hesaplanmıştır. BSMAC protokolü, üç boyutlu Markov zinciri kullanılarak analitik olarak modellenmiş ve ayrıca ns-2 kullanılarak benzetim modeli geliştirilmiştir. Benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ile analitik modelden elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır. BSMAC protokolünün başarım değerlendirmesinde uçtan-uca gecikme, iş çıkarma oranı, güç tüketimi ve güvenilirlik başarım metrikleri kullanılmıştır.

Nurzaman ve diğ. kablosuz algılayıcı ağlarda kullanılan IEEE 802.11ah protokolünün başarımını, literatürde yaygın olarak tercih edilen IEEE 802.15.4 protokolüyle karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir [20]. Gerçekleştirilen kapsamlı benzetim sonuçları, Nİ ağlarında kullanıldığında 802.11ah protokolünün ilişkilendirme süresi (association time), iş çıkarma oranı, uçtan-uca gecikme ve ağ kapsama alanı (network coverage range) açısından IEEE 802.15.4 protokolüne göre daha iyi başarım sonuçları verdiğini göstermektedir. Ancak, IEEE 802.15.4'in, IEEE 802.11ah'a kıyasla daha yüksek enerji verimliliği sergilediği gösterilmiştir.

Mondal ve diğ. akıllı otomasyon uygulama alanlarına yönelik, aşağı bağlantı (downlink) trafiğine duyarlı yeni bir OEK protokolü (IoT-MAC) sunmuşlardır [21]. IoT-MAC protokolünde kullanılan algoritma, yukarı bağlantı trafiğinin periyodikliğini ve tazeliğini göz önünde bulundurarak aşağı bağlantı etkinleştirme trafiğini planlamak için yeni Kısıtlı

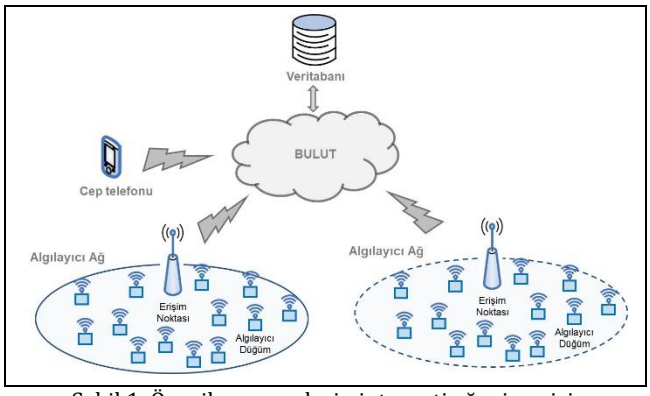
Erişim Penceresi (Restricted Access Window, RAW) çerçeveleri kullanmıştır. RAW yönteminin temel fikri, düğümleri belirli sayıda gruplara ayrılması ve yalnızca kendi grubundakilerin o grup için belirlenen zaman dilimlerinde kanala erişimlerinin sağlanmasıdır. Böylece kanala aynı anda erişebilecek düğüm sayısı sınırlandırılarak paket çarpışma olasılığının önemli ölçüde azaltılması hedeflenmektedir. IoT-MAC, yukarı bağlantı trafiğinin periyodikliğini tanımlar ve daha fazla çekişme olmadan yeni bir RAW planlar. Daha sonra, yeni yukarı bağlantı verilerini kaybetmeden kritik aşağı bağlantı trafiğine öncelik verir. IoT-MAC protokolünün farklı Nİ uygulamalarını çalıştırmak için gerçekleştirilen başarım analizi, iş çıkarma oranı, uçtan-uca gecikme, güç tüketimi ve paket kaybı açısından önemli bir iyileşme gösterdiği belirtilmektedir.

Mayssa ve diğ. gerçek zamanlı Nİ uygulamaları için farklı gecikme gereksinimlerini karşılamak amacıyla Çarpışma Önleme (Collision Avoidance) ve WuR (Wake-up radio) tabanlı yeni bir OEK protokolü (CaWuQoS-MAC) sunmuşlardır [22]. CaWuQoS-MAC protokolü, paketin iletilmesi gereken gecikme sınırlarını belirleme ve sonrasında süresi dolan paketlerin belirlenmesi olanağı sağlamaktadır. Protokolün başarımını değerlendirmek için ayrık zamanlı bir Markov zinciri modeli geliştirilmiştir. CaWuQoS-MAC protokolünün başarımı, güvenilirlik, gecikme ve güç tüketimi açısından Uyandırma Çağrısı (Wake-up Call, WuC) iletimi öncesinde Çarpışma Önleme işlemini gerçekleştirmeyen başka bir WuR protokolüyle karşılaştırılmıştır. Başarım sonuçlarına göre hem hafif hem de ağır trafik yükleri altında ve yüksek ağ yoğunluğunda CaWuQoS-MAC'ın istenen servis kalitesi gereksinimlerini desteklediği gösterilmiştir.

Bu makalede önerilmekte olan çalışmada, Nİ uygulamaları için farklı bantgenişliği ihtiyacına sahip, gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan iki farklı veri trafiğinin iletimi için tasarlanmış servis kalitesi destekli yeni bir OEK protokolü (HVTD-OEK) önerilmektedir. HVTD-OEK protokolündeki Bağlantı Kabul Kontrol (Call Admission Control) mekanizması, adil kanal paylaştırma temelli (terminaller arasında öncelik içermeyen) bir planlama algoritması aracılığıyla iki farklı veri trafik türü için bantgenişliği tahsisini verimli bir şekilde gerçekleştirmektedir. Protokolün geliştirilmesinde, esnek bant genişliği tahsisine yatkınlığı nedeni ile TDMA, OEK tekniği olarak seçilmiştir. Bağlantı isteğine yönelik servisler için tasarlanan TDMA tabanlı bu OEK tekniğinde, ortak kanal çerçevelere, çerçeveler ise eşit uzunlukta zaman dilimlerine bölünmüştür. TDMA ortam erişim kontrol tekniği ile düğümlerin bantgenişliği gereksinimlerine göre bir veya daha fazla zaman dilimi tahsis edilerek, ilgili düğüme servis kalitesi desteği sağlanmaktadır. Önerilen HVTD-OEK protokolünün analitik modeli 2 boyutlu sürekli Markov zinciri kullanılarak geliştirilmiş ve örnek bir ağ senaryosunda başarımı analiz edilmiştir. Önerilen HVTD-OEK protokolünün başarım analizinde bağlantı engelleme olasılığı (call blocking probability), iş çıkarma oranı (throughput), kanal kullanım oranı (utilization) ve bağlantı tamamlanma oranı (call completion ratio) esas alınmıştır. Ayrıca önerilen HVTD-OEK protokolünün Monte Carlo benzetimi de gerçekleştirilerek analitik modelden elde edilen sonuçlar benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ile doğrulanmıştır.

## 3 Önerilen ortam erişim kontrol protokolünün kullanıldığı Nİ ağ modeli

Nİ interneti ağ yapısı genel olarak dört katmandan meydana gelmektedir. (1) Fiziksel ortamdan verilerin toplandığı algılayıcı katmanı, (2) algılayıcı verilerinin erişim noktasına iletimi için ortam erişim kontrol katmanı, (3) algılayıcı ağdaki erişim noktasının ağa erişimini sağlayan ağ katmanı ve (4) uygulamaların çalıştığı uygulama katmanıdır [1]-[6]. Şekil 1'de HVTD-OEK protokolünün kullanıldığı Nİ ağ yapısı görülmektedir. Ağda, bir veya daha fazla algılayıcı ağ yapısı bulunabilir. Algılayıcı ağ, bir erişim noktası ve algılayıcı düğümlerden meydana gelen merkezi ağ topolojisini kullanmaktadır. Algılayıcı düğümlerin, iletişim alanına düzgün dağılımla rastgele dağıldığı varsayılmıştır. Algılayıcı ağ yapısında çok yüksek sayıda algılayıcı düğümün olduğu varsayılmıştır. Algılayıcı düğümler, gerçek zamanlı (GZ) ve gerçek zamanlı olmayan (GZO) iki farklı veri trafik türü kullanmaktadır. Algılayıcı düğümlerin kullandıkları veri trafik türü, ağdaki tüm düğümlere tek düze (düzgün) dağıtılmıştır.

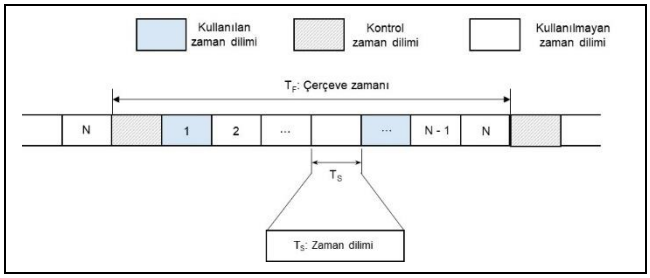



Şekil 1. Önerilen nesnelerin interneti ağ mimarisi.

*Figure 1. Proposed internet of things network architecture.*

### 3.1 Önerilen HVTD-OEK protokolünde kullanılan çerçeve yapısı

Önerilen HVTD-OEK protokolünün kullanıldığı algılayıcı ağ yapısında bulunan düğümler, zaman bölmeli çoklu erişim tekniği kullanarak erişim noktasına veri iletimlerini gerçekleştirirler. Erişim noktası da frekans bölmeli çoklama tekniği ile bulut sistemine erişmektedir. Önerilen HVTD-OEK protokolünde kullanılan çerçeve yapısı Şekil 2'de görülmektedir. Bir çerçeve, bir kontrol zaman dilimi ve *N* iletim zaman dilimi olmak üzere, iki farklı türde zaman diliminden oluşur. Kontrol zaman dilimi, algılayıcı düğümlerin iletişime başlamadan önce kullanacakları veri trafik türünü erişim noktasına bildirdiği zaman dilimidir. İletim zaman dilimi ise algılayıcı düğümlere tahsis edilen ve bu düğümlerin veri iletimlerini gerçekleştirdikleri zaman dilimleridir.




Şekil 2. Önerilen HVTD-OEK protokolünde kullanılan çerçeve yapısı.

*Figure 2. Frame structure used in the proposed* HVTD-*MAC protocol.*

Erişim noktası, ağdaki düğümlere tahsis edilen zaman dilimlerini dinamik olarak kontrol edebilmek için bir zaman

dilimi tahsis tablosu (Time Slot Allocation Table, TSAT) tutar. Bu tablo, zaman dilimlerinin kullanılıp kullanılmadığını ve eğer kullanılıyorsa hangi terminal tarafından kullanıldığını ve zaman dilimini kullanan trafik türünü tutar ve her yeni bağlantı sonrası güncellenir. Yeni bağlantı isteğinde bulunan bir düğüm için TSAT'a bakılarak eğer yeterli sayıda kanal mevcut ise bağlantı kurulur, yoksa ilgili düğüm için bağlantı engelleme durumu oluşur.

### 3.2 Önerilen HVTD-OEK protokolünde kullanılan kanal tahsis yaklaşımı

Algılayıcı ağ yapısında bulunan tüm düğümler eşit önceliklidir, ancak kullandıkları trafik türüne göre, farklı bantgenişliği isteklerine sahiptirler. Düğümler, alt katmandan kendilerine paket geldiğinde bu paketi erişim noktasına iletmek için çerçevedeki kontrol zaman dilimini beklerler. Kontrol zaman diliminde iletecekleri trafik türüne göre erişim noktasından zaman dilimi isterler. Kontrol zaman diliminde erişim noktasına erişim için Nİ düğümleri CSMA (1-persistent CSMA) tekniğini kullanırlar. Erişim noktası, yeterli zaman dilimi varsa, bu algılayıcı düğüm için ilgili zaman dilimlerini tahsis ederek, düğümü bilgilendirir. Algılayıcı düğüm de ilgili zaman dilimlerini kullanarak, paket iletimini gerçekleştirir. Algoritma 1'de önerilen HVTD-OEK protokolünde kullanılan kanal tahsis algoritmasının sözde kodu görülmektedir.

**Kanal Tahsis Algoritması**

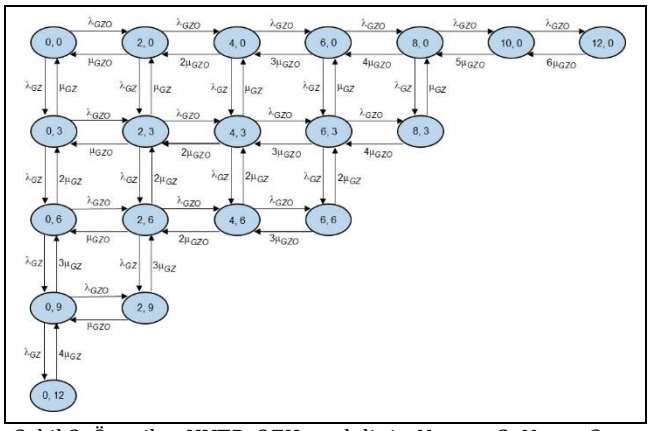
```
1:  begin
2:      sistem değişkenlerini ve başlangıç değerlerini yükle
3:      while (true) do
4:          yeni bağlantı isteği bekle
5:          if (yeni bağlantı isteği) then
6:              istekte bulunan IoT düğüm tipini belirle
7:              if (yeterli sayıda kanal varsa) then
8:                  bu düğüm için gerekli sayıda kanal tahsis et
9:                  bu düğüm için rassal bir servis zamanı üret
10:             else
11:                 çağrı bloke sayısını 1 arttır
12:                 bu düğüm için rassal bir varış zamanı üret
13:             end if
14:         end if
15:     end while
16: end
```

Algoritma 1. Önerilen HVTD-OEK protokolünde kullanılan kanal tahsis algoritmasının sözde kodu.

Algorithm 1. *Pseudo code of the channel allocation algorithm used in the proposed HVTD-OEK protocol.*

## 4 Önerilen HVTD-OEK protokolünün başarım analizi

Önerilen HVTD-OEK protokolünün başarım analizi hem iki boyutlu sürekli Markov zinciri kullanılarak analitik olarak, hem de Monte Carlo benzetimi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te önerilen HVTD-OEK modelinin $N = 12$, $N_{GZO} = 2$ ve $N_{GZ} = 3$ durumu için Markov zinciri modeli görülmektedir. Burada, $N$ sistemde kullanılan toplam kanal sayısını (zaman dilimi), $N_{GZO}$, gerçek zamanlı olmayan trafikler için gerekli kanal sayısını $N_{GZ}$ ise gerçek zamanlı trafiklerin iletimi için gerekli kanal sayısını göstermektedir. Markov zinciri modelinde her bir durum $(i, j)$ ikililerinden oluşmaktadır. Burada, $(i, j)$ sırasıyla sistemde kullanılan gerçek zamanlı olmayan ve gerçek zamanlı kanal sayısını göstermektedir.




Şekil 3. Önerilen HVTD-OEK modelinin $N_{GZO} = 2, N_{GZ} = 3$ ve $N = 12$ için Markov zinciri modeli.

*Figure 3. Markov chain model of the proposed* HVTD-OEK *for* $N_{GZO} = 2, N_{GZ} = 3$ *and* $N = 12$.

Markov zincirine ait durum uzayı $S$, aşağıda verilen Denklem (1) ile tanımlanır;

$$S = \{(i, j) | 0 \leq i, j \leq N, i + j \leq N\} \tag{1}$$

Önerilen ağın HVTD-OEK protokolü Markov zinciri modelinde $i = 0, j = 0$ durumuna ait denge eşitliği Denklem (2)'de verilmiştir.

$$P[0,0](\lambda_{GZ} + \lambda_{GZO}) = (P[N_{GZO}, 0]\mu_{GZO} + P[0, N_{GZ}]\mu_{GZ}) \tag{2}$$

Markov zinciri modelinde $i = N_{GZO,max}, j = 0$ durumuna ait denge eşitliği Denklem (3)'de verilmiştir. Burada $N_{GZO,max}$ $\lfloor N/N_{GZO} \rfloor N_{GZO}$ değerine eşittir. Bununla birlikte $\lfloor \cdot \rfloor$ operatörü, aşağı yuvarlama (floor) fonksiyonunu göstermektedir.

$$\begin{aligned} P\left[N_{GZO,max}, 0\right]\left(\left(N_{GZO,max}/N_{GZO}\right)\mu_{GZO}\right) \\ = \left(P\left[N_{GZO,max} - N_{GZO}, 0\right]\lambda_{GZO}\right) \end{aligned} \tag{3}$$

Markov zinciri modelinde $N_{GZ,max} + N_{GZO} > N$ ve $N_{GZ,max} + N_{GZO} \leq N$ durumlarına ait denge eşitlikleri Denklem (4) ve Denklem (5)'te verilmiştir. Denklemlerde $N_{GZ,max}$, $\lfloor N/N_{GZ} \rfloor N_{GZ}$ değerine eşittir.

$$\begin{aligned} P\left[0, N_{GZ,max}\right]\left(\left(N_{GZ,max}/N_{GZ}\right)\mu_{GZ}\right) \\ = \left(P\left[0, N_{GZ,max} - N_{GZ}\right]\lambda_{GZ}\right) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} P\left[0, N_{GZ,max}\right]\left(\left(N_{GZ,max}/N_{GZ}\right)\mu_{GZ} + \lambda_{GZO}\right) \\ = \Big(P\left[0, N_{GZ,max} - N_{GZ}\right]\lambda_{GZ} \\ + \left(P\left[N_{GZO}, N_{GZ,max}\right]\mu_{GZO}\right)\Big) \end{aligned} \tag{5}$$

Markov zinciri modelinde $N_{GZO} \leq i < N_{GZO,max}$ ve $\left(i + N_{GZ,max}\right) \leq N$ durumuna ait denge eşitliği Denklem (6)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} P[i, 0](\lambda_{GZO} + \lambda_{GZ} + (i/N_{GZO})\mu_{GZO}) \\ = (P[i - N_{GZO}, 0]\lambda_{GZO} + \\ = (P[i \\ + N_{GZO}, 0]((i + N_{GZO})/N_{GZO})\mu_{GZO}) \\ + P[i, N_{GZ}]\mu_{GZ}) \end{aligned} \tag{6}$$

Markov zinciri modelinde $N_{GZO} \leq i < N_{GZO,max}$ ve $(i + N_{GZ,max}) > N$ durumuna ait denge eşitliği Denklem (7)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} P[i,0](\lambda_{GZO} + (i/N_{GZO})\mu_{GZO}) \\ = \big(P[i - N_{GZO},0]\lambda_{GZO} + \\ = (P[i \\ + N_{GZO},0]((i + N_{GZO})/N_{GZO})\mu_{GZO})\big) \end{aligned} \quad (7)$$

Markov zinciri modelinde $N_{GZ} \leq j < N_{GZ,max}$ durumuna ait denge eşitliği Denklem (8)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} P[0,j](\lambda_{GZO} + \lambda_{GZ} + (j/N_{GZ})\mu_{GZ}) \\ = (P[0,j - N_{GZ}]\lambda_{GZ} \\ + P[0,j + N_{GZ}]((j + N_{GZ})/N_{GZ})\mu_{GZ} \\ + P[N_{GZO},j]\mu_{GZO}) \end{aligned} \quad (8)$$

Markov zinciri modelinde $N_{GZO} \leq i \leq N$ , $N_{GZ} \leq j \leq N$ ve $N - N_{GZO} < (i + j) \leq N$ durumuna ait denge eşitliği Denklem (9)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} P[i,0]\big((i/N_{GZO})\mu_{GZO} + (j/N_{GZ})\mu_{GZ}\big) \\ = (P[i - N_{GZO},j]\lambda_{GZO} \\ + P[i,j - N_{GZ}]\lambda_{GZ}) \end{aligned} \quad (9)$$

Markov zinciri modelinde $N_{GZO} \leq i < N$ , $N_{GZ} \leq j < N$ ve $(i + j) \leq N - N_{GZ}$ durumuna ait denge eşitliği Denklem (10)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} P[i,j](\lambda_{GZO} + \lambda_{GZ} + (i/N_{GZO})\mu_{GZO} + (j/N_{GZ})\mu_{GZ}) \\ = (P[i - N_{GZO},j]\lambda_{GZO} \\ + P[i,j - N_{GZ}]\lambda_{GZ} \\ + P[i,j + N_{GZ}]((j + N_{GZ})/N_{GZ})\mu_{GZ} \\ + P[i \\ + N_{GZO},j]((i + N_{GZO})/N_{GZO})\mu_{GZO}) \end{aligned} \quad (10)$$

Markov zinciri modelinde $N_{GZO} \leq i < N$ , $N_{GZ} \leq j < N$ ve $N - N_{GZ} < (i + j) \leq N - N_{GZO}$ durumuna ait denge eşitliği Denklem (11)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} P[i,j](\lambda_{GZO} + (i/N_{GZO})\mu_{GZO} + (j/N_{GZ})\mu_{GZ}) \\ = (P[i - N_{GZO},j]\lambda_{GZO} \\ + P[i \\ + N_{GZO},j]((i + N_{GZO})/N_{GZO})\mu_{GZO} \\ + P[i,j - N_{GZ}]\lambda_{GZ}) \end{aligned} \quad (11)$$

Markov zinciri modelinde tüm durumlara ait olasılıkların toplamı 1'dir. Bu durum Denklem (12)'de verilmiştir.

$$\sum_{i \in S}^{N} \sum_{j \in S}^{N} P[i,j] = 1 \quad (12)$$

Ağdaki kaynak yetersizliğinden dolayı engellenen bağlantı isteği sayısının, toplam bağlantı isteği sayısına oranı, çağrı engelleme olasılığı (*call blocking probability*) olarak tanımlanır [27]. Önerilen ağ modelindeki gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait çağrı engelleme olasılıkları sırasıyla Denklem (13) ve Denklem (14)'te verilmiştir.

$$P_{B,GZ} = \sum_{i \in S}^{N} \sum_{j \in S, N - N_{GZ} < (i+j) \leq N}^{N} P[i,j] \left( \frac{\lambda_{GZ}}{\lambda_{GZO} + \lambda_{GZ}} \right) \quad (13)$$

$$P_{B,GZO} = \sum_{i \in S}^{N} \sum_{j \in S, N - N_{GZO} < (i+j) \leq N}^{N} P[i,j] \left( \frac{\lambda_{GZO}}{\lambda_{GZO} + \lambda_{GZ}} \right) \quad (14)$$

Ağda birimde zamanda tamamlanan bağlantı sayısı iş çıkarma oranı (*throughput*) olarak tanımlanır [26]. Önerilen ağ modelindeki gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait iş çıkarma oranları sırasıyla Denklem (15) ve Denklem (16)' da verilmiştir.

$$\eta_{GZ} = \sum_{i \in S}^{N} \sum_{j \in S, i+j \leq N}^{N} P[i,j](j/N_{GZ})\mu_{GZ} \left( \frac{\lambda_{GZ}}{\lambda_{GZO} + \lambda_{GZ}} \right) \quad (15)$$

$$\eta_{GZO} = \sum_{i \in S}^{N} \sum_{j \in S, (i+j) \leq N}^{N} P[i,j](i/N_{GZO})\mu_{GZO} \left( \frac{\lambda_{GZO}}{\lambda_{GZO} + \lambda_{GZ}} \right) \quad (16)$$

Ağda tamamlanan bağlantı sayısının toplam bağlantı sayısına oranı bağlantı tamamlama oranı (*call completion ratio*) olarak tanımlanır [26]. Önerilen ağ modelindeki gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait bağlantı tamamlama oranları sırasıyla Denklem (17) ve Denklem (18)' de verilmiştir.

$$P_{CCR,GZ} = \sum_{i \in S}^{N} \sum_{j \in S, i+j \leq N}^{N} P[i,j](j/N_{GZ})\mu_{GZ} \left( \frac{1}{\lambda_{GZ}} \right) \quad (17)$$

$$P_{CCR,GZO} = \sum_{i \in S}^{N} \sum_{j \in S, (i+j) \leq N}^{N} P[i,j](i/N_{GZ})\mu_{GZO} \left( \frac{1}{\lambda_{GZO}} \right) \quad (18)$$

Kanal kullanım oranı (*utilization*), kullanıcılar tarafından kullanılan kanal sayısının ağdaki toplam kanal sayısına oranı olarak tanımlanabilir [27]. Önerilen ağ modelindeki gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait kanal kullanım oranları sırasıyla Denklem (19) ve Denklem (20)' de verilmiştir.

$$U_{GZ} = \sum_{i \in S}^{N} \sum_{j \in S, i+j \leq N}^{N} P[i,j](j/N) \quad (19)$$

$$U_{GZO} = \sum_{i \in S}^{N} \sum_{j \in S, (i+j) \leq N}^{N} P[i,j](i/N) \quad (20)$$

## 5 Sayısal sonuçlar ve analiz

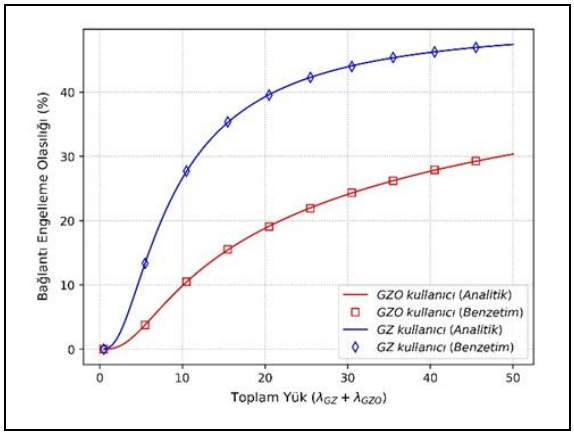
Bu çalışmada Nİ için önerilen HVTD-OEK protokolünün kullanıldığı ağ modelinden elde edilen analitik ve benzetim sonuçları, artan ağ yükleri (gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan kullanıcıların toplam varış oranları) için analiz edilmiştir. Ağın toplam yükünün ağdaki bütün kullanıcılara tekdüze dağılımla düzgün dağıldığı varsayılmıştır. Ağın başarım analizinde kullanılan metrikler, bağlantı engelleme olasılığı, iş çıkarma oranı, bağlantı tamamlama oranı ve kanal kullanım oranıdır. Önerilen HVTD-OEK analitik ve benzetim modelinde kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Önerilen HVTD-OEK protokolünde kullanılan parametreler.

*Table 1. The parameters utilized in the proposed HVTD-OEK protocol.*

| | |
|---|---|
| Kanal sayısı ($N$) | 12 |
| GZ trafikler için kanal sayısı | 3 |
| GZO trafikler için kanal sayısı | 1 |
| GZ trafikler için varış hızı ($\lambda_{GZ}$) | 0-25 |
| GZO trafikler için varış hızı ($\lambda_{GZO}$) | 0-25 |
| GZ trafikler için servis hızı ($\mu_{GZ}$) | 1.2 |
| GZO trafikler için varış hızı ($\mu_{GZO}$) | 1.2 |

Şekil 4'te ağın artan yüklerine karşılık gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait bağlantı engelleme olasılıkları sunulmaktadır. Grafikler incelendiğinde ağdaki toplam yük arttırıldığında (0–50), her iki kullanıcı türü için de bağlantı engelleme olasılıkları artmaktadır. Örneğin, ağın toplam yükü 10 iken, gerçek zamanlı kullanıcıların bağlantı engelleme olasılığı %10 iken, gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait bağlantı engelleme olasılığı %26.6'dır. Gerçek zamanlı kullanıcıların kaynak ihtiyacı, gerçek zamanlı olmayan kullanıcılarınkinden daha fazla olduğundan, bu kullanıcılara ait kaynak isteğinin karşılanması daha zor olur ve dolayısıyla bu kullanıcılara ait bağlantı engelleme olasılıkları, gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara göre daha yüksek elde edilmiştir.

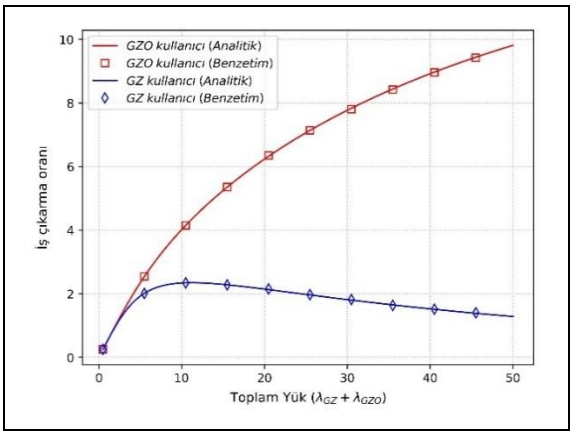



Şekil 4. Önerilen HVTD-OEK protokolünün kullanıldığı ağ senaryosunda gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait bağlantı engelleme olasılıkları.

*Figure 4. Call blocking probabilities of real-time and non-real-time users in the network scenario in which the proposed* HVTD-OEK *protocol is used.*

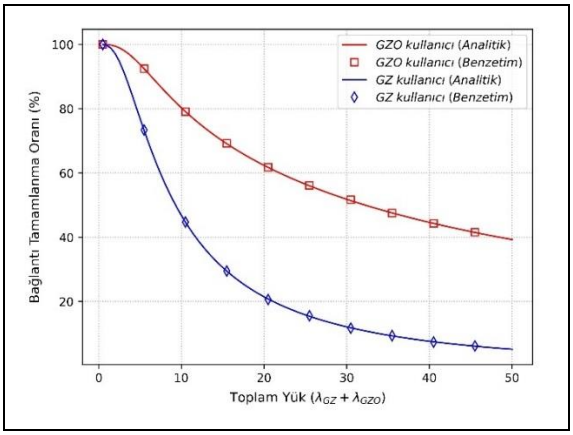
Şekil 5'te ağın artan yüklerine karşılık gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait iş çıkarma oranları verilmektedir. Grafikler incelendiğinde gerçek zamanlı olmayan kullanıcılar için iş çıkarma oranları artan yük değerleri için artmıştır. Ancak, gerçek zamanlı kullanıcıların iş çıkarma oranları yük 10 oluncaya kadar artmış, bu değerden sonra azalmıştır. Bu azalmanın nedeni, artan yük değerleri ile bağlantı engelleme durumlarının artmasıdır. Gerçek zamanlı veri üreten düğümlerin kaynak ihtiyacı fazla olduğundan artan yük değerleri ile bu düğümlere ait bağlantı engelleme durumları artar ve bu durum ağdaki iş çıkarma oranlarını azaltır.

Şekil 6'da ağa sunulan artan yük değerlerine karşılık gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait bağlantı tamamlama oranları verilmektedir. Grafikler incelendiğinde artan yük değerleri için her iki kullanıcı türü için de bağlantı tamamlama oranları azalmıştır.




Şekil 5. Önerilen HVTD-OEK protokolünün kullanıldığı ağ senaryosunda gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait iş çıkarma oranları.

*Figure 5. Throughput of real-time and non-real-time users in the network scenario in which the proposed* HVTD-OEK *protocol is used.*

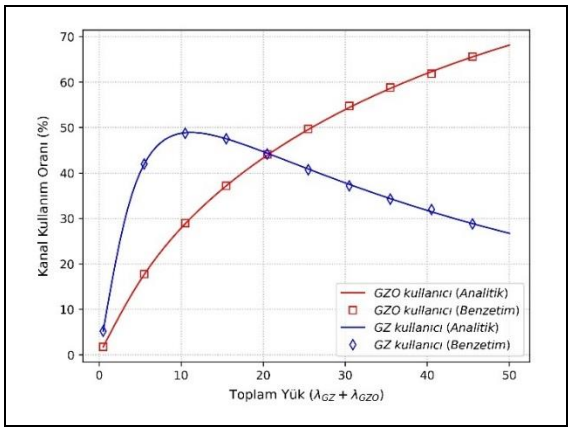



Şekil 6. Önerilen HVTD-OEK protokolünün kullanıldığı ağ senaryosunda gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait çağrı tamamlanma oranları.

*Figure 6. Call completion rates of real-time and non-real-time users in the network scenario in which the proposed* HVTD-OEK *protocol is used.*

Bununla birlikte, artan yük değerleri için gerçek zamanlı kullanıcıların bağlantı engelleme olasılıkları daha yüksek olduğundan engellenen bağlantı isteklerinden dolayı bu kullanıcıların bağlantı tamamlanma oranları daha düşük olmaktadır. Örneğin, yükün 10 olduğu durumda, gerçek zamanlı olmayan kullanıcılar için bağlantı tamamlanma olasılığı %80.23 iken, gerçek zamanlı kullanıcılar için %46.80'dir.

Ağa sunulan artan yük değerlerine karşılık gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan veri üreten düğümlere ait kanal kullanım oranları Şekil 7'de sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde artan yük değerleri için gerçek zamanlı olmayan veri üreten düğümlerin kanal kullanım oranları artmıştır. Fakat gerçek zamanlı kullanıcıların kanal kullanım oranları yük 10 olana kadar artmış, bu değerden sonra azalmıştır. Bunun nedeni artan yük değerleri ile birlikte bu kullanıcılara gerekli kaynakların tahsis edilememesi ve bağlantı engellenme olasılıklarının artmasıdır.




Şekil 7. Önerilen HVTD-OEK protokolünün kullanıldığı ağ senaryosunda gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan kullanıcılara ait kanal kullanım oranları.

*Figure 7. Utilization of real-time and non-real-time channels in the network scenario in which the proposed* HVTD-OEK *protocol is used.*

## 6 Sonuçlar

Bu makale çalışmasında, Nİ uygulamaları için farklı bantgenişliği gereksinimlerine sahip, iki farklı veri trafiğinin iletimi için servis kalitesi destekli HVTD-OEK protokolü önerilmiştir. Önerilen HVTD-OEK protokolünde adil kanal paylaştırma temelli kanal tahsis algoritması farklı veri trafik türleri için bantgenişliği tahsisini verimli bir şekilde gerçekleştirmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada TDMA, ortam erişim kontrol tekniği olarak seçilmiştir. HVTD-OEK protokolünün başarım analizinde bağlantı engelleme olasılığı, iş çıkarma oranı, kanal kullanım oranı ve bağlantı tamamlanma oranı esas alınmıştır. HVTD-OEK protokolünün başarım analizi, iki boyutlu sürekli Markov zinciri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve örnek bir ağ senaryosunda analiz edilmiştir. Ayrıca önerilen modelin Monte Carlo benzetimi de gerçekleştirilerek analitik modelden elde edilen sonuçlar benzetim modelinden elde edilen sonuçlar ile doğrulanmıştır. Analitik ve benzetim modelinden elde edilen sonuçlara göre; örneğin, ağdaki toplam yük 10 olduğunda, gerçek zamanlı kullanıcıların bağlantı engelleme olasılığı %10 iken, bu oran gerçek zamanlı olmayan kullanıcılar için %26'dır. Aynı yük altında bağlantı tamamlanma oranı, gerçek zamanlı kullanıcılar için %46.80 iken, bu oran gerçek zamanlı olmayan kullanıcılar için %80.23'tür. Elde edilen bu değerler, gerçek zamanlı veri trafiklerinin bantgenişliği ihtiyaçları fazla olduğunda başarımlarının gerçek zamanlı olmayan trafiklerden elde edilen sonuçlara göre daha düşük olduğunu göstermektedir. Gelecek çalışma olarak düğümlere trafik türüne göre öncelik verilen nesnelerin interneti uygulamaları için yeni bir ortam erişim kontrol protokolünün tasarımı ve analizi hedeflenmektedir.

## 7 Conclusions

In this paper, a MAC protocol with quality of service support is proposed for the transmission of two different data traffic types with different bandwidth requirements for Internet of Things applications. In the proposed MAC protocol, the channel allocation algorithm based on fair channel sharing efficiently performs bandwidth allocation for different data traffic types. In the proposed solution, TDMA has been chosen as the media access control technique. With the TDMA MAC technique, quality of service support is provided to the IoT terminal by allocating one or more time slots according to the bandwidth requirements. In the performance analysis of the proposed MAC protocol, call blocking probability, throughput, channel utilization and call completion ratio have been adopted. The performance analysis of the proposed MAC protocol has been studied by means of a two-dimensional continuous Markov chain under different networking scenarios. Additionally, Monte Carlo simulation of the proposed model has been also performed and the results obtained from the analytical model have been verified with the results obtained from the simulation model. According to the results obtained from the analytical and simulation models, for example, when the total load on the network is 10, the probability of call blocking probability for real-time users is 10%, while it is 26.6% for non-real-time users. While the connection completion rate under the same load is 46.80% for real-time users, this rate is 80.23% for non-real-time users. It can be concluded that as the bandwidth requirements of real-time data traffics are high, their performance is lower than the results obtained from non-real-time traffics. As a future work, it is aimed to design and analyze a new MAC protocol for Internet of Things applications, where the nodes are prioritized according to their traffic type.

## 8 Yazar katkı beyanı

Sunulan çalışmada, Sedat Atmaca, fikrin oluşması, literatür taraması, modellerin geliştirilmesi, sonuçların analiz edilmesi, değerlendirilmesi ve makalenin yazım işlerinin tümünü gerçekleştirmiştir.

## 9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

## 10 Kaynaklar

[1] Atzori L, Iera A, Morabito G. "The internet of things: a survey". *Computer Networks*, 54(15), 2787-2805, 2010.

[2] Bandyopadhyay D, Sen J. "Internet of things: applications and challenges in technology and standardization". *Wireless Personal Communications*, 58(1), 49-69, 2011.

[3] Callebaut G, Leenders G, Mulders JV, Ottoy G, Strycker LD, Perre VLD. "The art of designing remote IoT devices technologies and strategies for a long battery life". *Sensors*, 21(913), 1-37, 2021.

[4] Palattella MR, Accettura N, Vilajosana X, Watteyne T, Grieco LA, Boggia G, Dohler M. "Standardized protocol stack for the internet of (important) things". *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(3), 1389-1406, 2013.

[5] Gubbi J, Buyya R, Marusic S, Palaniswami M. "Internet of things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions". *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660, 2013.

[6] Al-Fuqaha A, Guizani M, Mohammadi M, Aledhari M, Ayyash M. "Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols and applications". *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347-2376, 2015.

[7] Gündüz MZ, Daş R. "Nesnelerin interneti: gelişimi, bileşenleri ve uygulama alanları". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 327-335, 2018.

[8] Khalil EA, Özdemir S. "Nesnelerin internetine genel bir bakış: kavram, özellikler, zorluklar ve fırsatlar". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 311-326, 2018.

[9] Bachir A, Dohler M, Watteyne T, Leung KK. "MAC essentials for wireless sensor networks". *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 12(2), 222-248, 2010.

[10] Akyıldız IF, McNair J, Martorell LC, Puigjaner R, Yesha Y. "Medium access control protocols for multimedia traffic in wireless networks". *IEEE Network*, 13(4), 39-47, 1999.

[11] Atmaca S, Karahan A, Ceken C. Ertürk I. "A new MAC protocol for broadband wireless communications and its performance evaluation". *Telecommunication Systems*, 57, 13–23, 2014.

[12] Atmaca S, Ceken C, Erturk I. "A new QoS-aware TDMA/FDD MAC protocol with multi-beam directional antennas". *Computer Standards & Interfaces*, 31(4), 816-829, 2009.

[13] Goursaud C, Gorce JM. "Dedicated networks for IoT: PHY/MAC state of the art and challenges". *EAI endorsed transactions on Internet of Things*, 1(1), 1-12, 2015.

[14] Zhang L, Liang YC, Xiao M. "Spectrum sharing for internet of things: a survey". *IEEE Wireless Communications*, 26(3), 132-139, 2018.

[15] Olatinwo DD, Mahfouz AM, Hancke GP. "Towards achieving efficient MAC protocols for WBAN enabled iot technology: a review". *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 60, 1-47, 2021.

[16] Oliveira L, Rodrigues JJPC, Kozlov SA, Rabêlo RAL, Albuquerque VHC. "MAC layer protocols for internet of things: a survey". *Future Internet*, 11(1), 1-42, 2019.

[17] Nurzaman A, Debashis D, Barbhuiya FA, Hussain MI. "MAC protocols for IEEE 802.11ah-based internet of things: a survey". *IEEE Internet of Things Journal*, 9(2), 916-938, 2022.

[18] Nurzaman A, Debashis D, Hussain MI. "A QoS-aware MAC protocol for IEEE 802.11ah-based internet of things". *IEEE 5th International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, Kolkata, India, 2-4 February 2018.

[19] Banerjee B, Mukherjee A, Naskar MK, Tellambura C. "BSMAC: a hybrid MAC protocol for IoT systems". *IEEE Global Communications Conference*, Washington, DC, USA, 4-8 December 2016.

[20] Nurzaman A, Rahman H, Hussain MI. "A comparison of 802.11 ah and 802.15. 4 for IoT". *ICT Express*, 2(3), 100-102, 2016.

[21] Mondal MA, Nurzaman A, Hussain MI. "IoT-MAC: a channel access mechanism for IoT smart environment". *Array*, 18, 1-8, 2023.

[22] Mayssa G, Aref M. "CaWuQoS-MAC: collision avoidance and QoS based MAC protocol for wake-up radio enabled IoT networks". *36th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, Sydney, Australia, 13-15 April 2022.

[23] Li Y, Liang W, Xu W, Jia X. "Data collection of IoT devices using an energy-constrained UAV". *IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, New Orleans, LA, USA, 18-22 May 2020.

[24] Mohammed J, Lung CH, Ocneanu A, Thakral A, Jones C, Adler A. "Internet of things: remote patient monitoring using web services and cloud computing", *IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom)*, Taipei, Taiwan, 1-3 September 2014.

[25] Sen S. "Context-aware energy-efficient communication for IoT sensor nodes". *53rd ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference*, Austin, TX, USA, 5-9 June 2016.

[26] Jain RK. *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*. 1st. New York, USA, Wiley, 1991.

[27] Zukerman M. "Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Models". *arXiv*, 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.1307.2968