Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 37:1 (2022) 1-15

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Design and evaluation of a controller for energy efficient security management and traffic routing in SDN/NFV based 5G networks

Sedef Demirci*, Şeref Sağıroğlu
Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

Highlights:

- An energy efficient security management and traffic routing model for 5G networks
- Design and development of an SDN controller software that forwards traffic in 5G networks
- Evaluation of the developed SDN controller software in terms of 5G network performance metrics

Keywords:

- 5G
- SDN controller software
- Energy consumption
- Software-defined networking
- Traffic routing

Article Info:

Research Article
Received: 14.04.2020
Accepted: 11.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.718971

Correspondence:

Author: Sedef Demirci
e-mail: sedefgunduz@gazi.edu.tr
phone: +90 312 582 3141

Graphical/Tabular Abstract

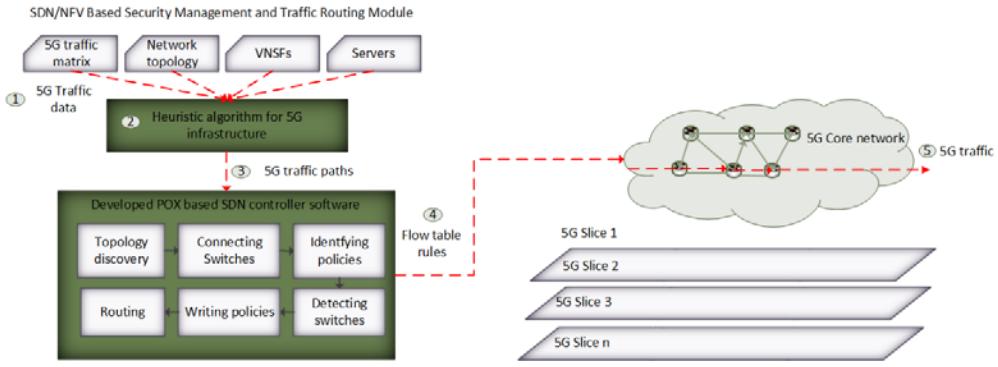


Figure A. Proposed system model on SDN/NFV based 5G architecture

Purpose: Software Defined Networking (SDN) and Network Functions Virtualization (NFV) are two key technologies underlying 5G networks. For routing traffic in a secure way in 5G networks, virtual network security functions (VNSF) that are virtualized by NFV, such as intrusion detection system and firewall etc. are deployed on the SDN architecture. In addition to routing network traffic securely via VNSFs, there are also some operational objectives (cost minimization, load balancing, etc.) that need to be considered in terms of the operation of 5G services. In this regard, in this study, it is aimed to route traffic flows according to their security needs through VNSFs which are placed in an energy-efficient manner in a 5G network where users may have different security service subscriptions.

Theory and Methods:
In this study, a heuristic algorithm aiming to minimize energy consumption in 5G architectures is proposed, and a novel SDN controller that forwards network traffic according to the results of the algorithm is designed and developed.

Results:
Experimental results show that the developed SDN controller can effectively route network traffic according to the paths determined by the proposed algorithm in terms of the QoS parameters including throughput, end-to-end latency, and packet loss rate, etc., and maximum loss rate is measured as 0.4%.

Conclusion:
In this paper, a novel SDN controller is designed and developed for providing energy-efficient efficient security management and traffic routing in 5G infrastructures. Obtained results show that the proposed approaches produces effective solutions in terms of energy consumption and quality of service parameters.

Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 37:1 (2022) 1-15

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

SDN/NFV tabanlı 5G ağlarında enerji-etkin güvenlik yönetimi ve trafik yönlendirme için kontrolcü tasarımı ve değerlendirmesi

Sedef Demirci*, Şeref Sağıroğlu
Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- 5G ağları için enerji-etkin güvenlik yönetimi ve trafik yönlendirme modeli
- 5G ağlarında trafiği yönlendiren SDN kontrolcü yazılımı tasarımı ve geliştirilmesi
- Geliştirilen SDN kontrolcü yazılımının 5G ağı performans metrikleri açısından değerlendirilmesi

Makale Bilgileri
Araştırma Makalesi
Geliş: 14.04.2020
Kabul: 11.01.2021

DOI:
10.17341/gazimmfd.718971

Anahtar Kelimeler:
5G,
SDN kontrolcü yazılımı,
enerji tüketimi,
yazılım tanımlı ağlar,
trafik yönlendirme

ÖZ

Yazılım Tanımlı Ağlar (SDN) ve Ağ Fonksiyonlarını Sanallaştırma (NFV), 5G ağlarının temelini oluşturan iki anahtar teknolojidir. Bu teknolojilerin bel kemiğini oluşturduğu 5G ağlarında trafiğinin güvenli bir şekilde yönlendirilebilmesi için, NFV ile birer yazılım haline getirilmiş olan saldırı tespit sistemi ve güvenlik duvarı gibi sanal ağ güvenliği fonksiyonları (VNSF), SDN mimarisi üzerinde hizmete sunulmaktadır. Ağ trafiğinin VNSF'ler aracılığıyla güvenli bir şekilde yönlendirilmesinin yanı sıra, 5G servislerinin işleyişi açısından göz önünde bulundurulması gereken bir takım operasyonel amaçlar (maliyetin en aza indirgenmesi, yük dengeleme yapılması vb.) da mevcuttur. Bu doğrultuda, bu çalışma kapsamında, kullanıcıların farklı güvenlik hizmeti aboneliklerine sahip olduğu bir 5G ağında trafiğin, enerji etkin bir biçimde yerleştirilmiş olan VNSF'ler üzerinden güvenlik ihtiyaçları doğrultusunda yönlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, 5G altyapısında enerji tüketimini en aza indirgemeyi hedefleyen bir sezgisel algoritma önerilmiş ve algoritmanın aldığı kararlar doğrultusunda ağa gelen trafik akışlarını yönlendiren yeni bir SDN kontrolcüsü tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen SDN kontrolcüsünün ağa gelen trafiği toplam bant genişliği, uçtan uca gecikme ve paket kayıp oranı gibi hizmet kalitesi parametreleri açısından etkin bir şekilde yönlendirebildiği görülmüş ve ulaşılan maksimum kayıp oranı değeri %0,4 olarak ölçülmüştür.

Design and evaluation of a controller for energy efficient security management and traffic routing in SDN/NFV based 5G networks

H I G H L I G H T S

- An energy efficient security management and traffic routing model for 5G networks
- Design and development of an SDN controller software that forwards traffic in 5G networks
- Evaluation of the developed SDN controller software in terms of 5G network performance metrics

Article Info
Research Article
Received: 14.04.2020
Accepted: 11.01.2021

DOI:
10.17341/gazimmfd.718971

Keywords:
5G,
SDN controller software,
energy consumption,
software defined networks,
traffic routing

ABSTRACT

Software Defined Networking (SDN) and Network Functions Virtualization (NFV) are two key technologies underlying 5G networks. For routing traffic in a secure way in 5G networks, virtual network security functions (VNSF) that are virtualized by NFV, such as intrusion detection system and firewall etc. are deployed on the SDN architecture. In addition to routing network traffic securely via VNSFs, there are also some operational objectives (cost minimization, load balancing, etc.) that need to be considered in terms of the operation of 5G services. In this regard, in this study, it is aimed to route traffic flows according to their security needs through VNSFs which are placed in an energy-efficient manner in a 5G network where users may have different security service subscriptions. To this end, a heuristic algorithm aiming to minimize energy consumption in 5G architectures is proposed, and a novel SDN controller that forwards network traffic according to the results of the algorithm is designed and developed. As a result, it is concluded that the developed SDN controller can effectively route network traffic in terms of the QoS parameters including throughput, end-to-end latency, and packet loss rate, etc., and maximum loss rate is measured as 0.4%.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *sedefgunduz@gazi.edu.tr, ss@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 582 3141

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

5G teknolojisinin sunduğu en önemli özelliklerden biri farklı kaynaklardan gelen büyük hacimdeki trafiğin gereksinimlerinin sağlanabilmesi için ultra-yüksek hız ve ultra-düşük gecikme ile çok sayıda eş zamanlı oturumun desteklenmesidir. Bu gereksinimleri karşılayabilmek amacıyla, ağ kaynaklarının verimli kullanımı, operasyonel değişikliklerin hızlı bir şekilde uygulanabilmesi ve daha hızlı hizmet sağlama döngülerinin desteklenebilmesi için 5G ağları, Ağ Fonksiyonlarını Sanallaştırma (NFV - Network Functions Virtualization) ve Yazılım Tanımlı Ağ (SDN - Software Defined Networking) teknolojileri üzerine yapılandırılmıştır [1-3]. NFV, ağ fonksiyonlarını donanımdan ayırarak birer yazılım haline getiren ve bu yazılımları genel amaçlı sunucular üzerinde çalıştırarak hizmet vermelerini sağlayan yeni bir ağ teknolojisidir [3]. NFV ile her bir servis için özel bir donanım kullanımına ihtiyaç duyulmadan sanallaştırılan ağ fonksiyonları ağda uygun yerlerde kolaylıkla çalıştırılabilmektedir. Böylelikle, fiziksel ağın yeniden tasarlanmasına gerek kalmadan yeni servisler kolaylıkla devreye alınabilmekte ve yenilikler hızlanmaktadır. Ayrıca, donanım bağımlılığı ile maliyeti azaltılmakta ve ağ fonksiyonları yazılımlaştırıldıkları için 5G altyapısı üzerinde çok daha kısa sürede hizmete sunulabilmektedir. SDN de bazı ortak amaçlarla ortaya çıkmış yeni bir ağ teknolojisidir. SDN'in temel felsefesi kontrol katmanını veri katmanından ayırmaktır. Ağdaki davranışı kontrol eden mantığı, paketlerin yönlendirilmesini sağlayan ağ cihazlarından alarak bu görevi merkezi bir kontrolcü yazılımına vermekte ve böylelikle ağı programlanabilir hale getirmektedir [4]. SDN, sunduğu merkezi kontrol katmanı sayesinde 5G ağındaki veri akışının kolay bir şekilde sağlanmasını ve kontrol edilmesini sağlamaktadır. Merkezi kontrol katmanı sayesinde optimum veri akışları gerçek zamanlı olarak belirlenmekte ve böylelikle büyük veri kesintilerinin önüne geçilmektedir. Bu da 5G'de gecikmenin en aza indirgenmesinde büyük rol oynamaktadır [1, 5]. NFV ve SDN'in 5G için sunduğu en önemli çözüm ağ dilimlemedir [1]. Ağ dilimleme, aynı fiziksel ağ altyapısında sanallaştırılmış birbirinden bağımsız mantıksal ağların oluşturulması ve yönetilmesi anlamına gelmektedir. Farklı amaçlara hizmet etmek üzere oluşturulan her bir dilim, kullanıcılar tarafından talep edilen çeşitli gereksinimleri yerine getirmek için tasarlanmış uçtan uca bir ağdır [2, 6]. Bu dilimlerin güvenliğinin sağlanması ise 5G ağları için ele alınması gereken önemli bir problemdir. Bu ağlarda güvenlik; saldırı tespit/engelleme sistemi, derinlemesine paket inceleme ve güvenlik duvarı gibi ağ güvenliği fonksiyonlarının NFV ile sanallaştırılması ve SDN mimarisi üzerindeki genel amaçlı sunucular üzerinde birer yazılım halinde çalıştırılması ile sağlanmaktadır. Böylelikle (i) son kullanıcıların ihtiyaçları doğrultusunda güvenlik hizmetleri oldukça özelleştirilebilir hale gelmekte, (ii) bu hizmetlerle ilişkili olan yatırım giderleri ve işletim giderleri azaltılmakta ve (iii) herhangi bir saldırı durumunda güvenlik fonksiyonlarının yerlerinin değiştirilmesi veya trafiğin bu fonksiyonlar üzerinden yeniden yönlendirilmesi çok daha kolay olmaktadır [3, 7, 8]. Her ağ türünde olduğu gibi 5G ağlarında da, sanal ağ güvenliği fonksiyonları (VNSF) tarafından işlenen trafiğin farklı güvenlik gereksinimleri olabilmektedir. Örneğin, şüpheli bir kaynaktan gelen trafiğin derinlemesine incelenmesi gerekirken, başka bir kaynaktan gelen trafiğe yalnızca güvenlik duvarı kurallarının uygulanması yeterli olabilir. Ya da kullanıcıların farklı güvenlik hizmeti aboneliklerine sahip olduğu bir senaryoda, trafiğin kullanıcıya özgü VNSF kümelerinden geçmesi gerekebilir. Bu nedenle, VNSF'lerin ağda nerelere yerleştirileceği ve trafiğin güvenlik gereksinimleri doğrultusunda bu VNSF'ler üzerinden nasıl yönlendirileceği ele alınması gereken önemli bir problemdir. Öte yandan her ağda, güvenlik sağlanırken göz önünde bulundurulması gereken ve ağın ihtiyaçlarına göre farklılık gösteren bir takım operasyonel amaçlar (maliyetin en aza indirgenmesi, yük dengeleme yapılması veya enerji tüketiminin en aza indirgenmesi vb.) vardır. Dolayısıyla, VNSF yerleştirme yapılırken, trafiğin güvenlik gereksinimlerinin yanı sıra; ağ topolojisi, link kapasiteleri, sunucu özellikleri gibi ağ karakteristiklerinin ve aynı zamanda yazılım ve enerji giderleri gibi bütçe kısıtları ile kullanıcı deneyiminin kalitesi gibi parametrelerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Literatürdeki çalışmalarda, VNSF yerleştirme problemi için [3, 7] çoğunlukla, yerleştirilen VNSF sayısı [8-10], bant genişliği [11-13] ve linklerin sayısı [14-16] gibi parametrelerin bir kombinasyonu olarak tanımlanan maliyetin [16-18] en aza indirgenmesi hedeflenmiştir. Fakat VNSF yerleştirme probleminde ele alınması gereken en önemli operasyonel amaçlardan biri, ağdaki enerji tüketiminin minimize edilmesidir. Çünkü VNSF'lerin üzerine kurulduğu sunucular tarafından tüketilen enerji miktarının güç yönetimi teknikleri uygulansa bile, toplam enerji tüketiminin oldukça büyük bir kısmını oluşturduğu bilinmektedir [9-11]. Bu doğrultuda Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI - European Telecommunications Standards Institute) de 5G gibi NFV ve SDN tabanlı ağlar için sanal ağ fonksiyonları yerleştirilirken kullanılan kaynak sayısını azaltarak enerji tüketimini optimize eden NFV çerçevelerine olan ihtiyacı vurgulamıştır [12]. Bu amaçla bu çalışmada, kullanıcıların farklı güvenlik hizmeti aboneliklerine sahip olduğu bir 5G servis sağlayıcısı ağı senaryosu için, gelen trafik akışlarının güvenlik gereksinimlerini karşılayacak şekilde sunucuların enerji tüketiminin en aza indirgenmesi amacıyla sanal ağ güvenliği fonksiyonlarını yerleştirme çözümü üreten bir sezgisel algoritma önerilmiştir. Ayrıca, geliştirilen yaklaşımın 5G altyapısı üzerinde uygulanabilirliğini göstermek için ağa gelen trafik akışlarını enerji etkin bir biçimde yerleştirilmiş olan VNSF'ler üzerinden yönlendirecek yeni bir SDN kontrolcü yazılımı tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrolcü yazılımının 5G çekirdek ağı üzerinde uygulanabilirliğini göstermek için gerçek topoloji ve trafik verisi ile performans değerlendirmeleri yapılmış ve bu doğrultuda toplam bant genişliği, paket kayıp oranı, ortalama gecikme ve ortalama akış yol uzunluğu gibi hizmet kalitesi parametreleri açısından performans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, literatürde karşılaştırma ve

değerlendirme amacıyla kullanılan referans çözümler ile de kıyaslanarak geliştirilen yöntemlerin başarısı ölçülmüştür.

Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2'de ilgili çalışmalar özetlenmiştir. Bölüm 3'te, 5G ağları için enerji etkin VNSF yerleştirme ve güvenlik yönetimi problemi için önerilen sezgisel algoritma sunulmuştur. Ayrıca, geliştirilen yaklaşımın 5G altyapısında uygulanabilirliğini göstermek amacıyla geliştirilen SDN kontrolcü yazılımı tanıtılmıştır. Bölüm 4'te, önerilen sezgisel algoritma ve geliştirilen SDN kontrolcü yazılımının performans değerlendirmeleri yapılmış ve toplam bant genişliği, paket kayıp oranı ve ortalama gecikme gibi ağ parametreleri açısından üretilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Son olarak, Bölüm 5'te elde edilen bulgular özetlenmiş ve sonuçlar tartışılmıştır.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR (RELATED WORKS)

Literatürde farklı ağ türlerinde (veri merkezleri, servis sağlayıcısı ağları, mobil ağlar vb.) uygulanmak üzere geliştirilmiş olan birçok VNSF yerleştirme çözümü bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genel olarak maliyet etkin çözümler geliştirilmesi amaçlanmış ve maliyetin farklı bileşenleri göz önünde bulundurulmuştur. Bazı çalışmalarda; yatırım giderleri dikkate alınarak [3, 7] donanımsal bileşenler ve fonksiyon sayısı en aza indirgenmesi hedeflenirken [8-10], bazılarında işlevsel giderler dikkate alınmış [11-13] ve bant genişliği, link sayısı [14-16], CPU kullanımı gibi ağ kaynakları kullanımının [16-18] en aza indirgenmesi amaçlanmıştır. Yatırım giderlerinin göz önünde bulundurulduğu bir çalışmada Murukan ve Jamaluddine [7], genetik algoritma tabanlı bir yaklaşımla aktif hale getirilen VNSF sayısını minimize etmişlerdir. Fakat bu yaklaşımda, farklı VNSF türlerinin güvenlik gereksinimleri ve kaynak tüketimi parametreleri gibi özel ihtiyaçları dikkate alınmamıştır. İşletim giderlerine odaklanılan bir başka çalışmada, Shameli-Sendi vd. [10], hesaplama maliyeti ve gecikmeyi optimize etmeye çalışmışlardır. Trafiğin daha kısa sürede daha az düğüm üzerinden yönlendirilmesinin amaçlandığı bu çalışmada, önerilen algoritmanın OpenStack'te kullanılan mevcut yerleştirme algoritmasına göre daha iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür. Doriguzzi vd. [11] VNSF'leri yerleştirirken toplam bant genişliği, CPU ve hafıza gibi ağ kaynaklarının kullanımını minimize eden bir tam sayılı doğrusal programlama (ILP - Integer Linear Programming) modeli geliştirmişlerdir. Diğer çalışmalardan farklı olarak, maliyet optimizasyonu kısıtlarının yanı sıra güvenlik kısıtlarının da göz önünde bulundurulduğu çalışmada, ağdaki düğümler kısmen meşgulken ortalama gecikmenin 2-3 kat azaltıldığı gözlenmiştir. [13]'de ise yazarlar bu çalışmalarını genişleterek kabul edilebilir zaman aralığında optimuma yakın sonuçlar üretecek bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Dwiardhika ve Tachibana [12], VNSF'leri maliyet etkin bir şekilde yerleştirirken sanal ağların güvenlik seviyesini artıracak bir yaklaşım önermişlerdir. Bu amaçla, her bir sanal düğüme bir güvenlik derecesi değeri atamış ve bunları istenilen güvenlik seviyesine ulaşılacak şekilde ağda konumlandırmışlardır. Liu vd. [14], ağdaki toplam kaynak kullanımını minimize ederken VNSF'lerden kaynaklanan gecikmeyi de en aza indirgemişlerdir. Phan vd. [15], maliyeti optimize edecek şekilde, değişken hacimdeki trafiğe hizmet verebilmek için yeni VNSF'leri aktif hale getirebilecek proaktif bir yaklaşım önermişlerdir. Geliştirdikleri yaklaşımın kaynak kullanımını minimize edecek uygulanabilir çözümler ürettiğini gösterseler de, ağdaki kaynak kısıtlarını göz önünde bulundurmamışlardır. [16]'da yazarlar kaynak tüketimini minimize etmeye çalışmış ve ağdaki güvenlik ve kaynak gereksinimi kısıtlarını da dikkate almışlardır. Gelen trafik akışlarının güvenlik seviyesini göz önünde bulundurmuşlar fakat akışların geçmesi gereken VNSF kümelerini akışlara özgü bir biçimde değil de rastgele bir şekilde belirlemişlerdir. Literatürde yatırım giderleri ile işletim giderlerini bir arada göz önünde bulundurarak çözümler üreten çalışmalar da mevcuttur. Bu doğrultuda, Bouet vd. [3], güvenlik kısıtlarını da karşılayacak şekilde derinlemesine paket inceleme (DPI-Deep Packet Inspection) fonksiyonlarının maliyet etkin yerleştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Bu amaçla yazarlar, DPI sayısını ve ağ yükünü aynı anda minimize edecek genetik algoritma tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Fakat bu çözüm, geniş ölçekli ağlar için uygulanabilir olmadığından [3]'teki karmaşıklığı azaltarak çizge tabanlı yeni bir açgözlü sezgisel algoritma geliştirmişlerdir [9]. Jarraya vd. [17], [7]'de ele alınan problem için VNSF'lerin önceliklerini de dikkate alarak uygun bir sırada yerleştirilmesini sağlayan OCDO (Ordered Cloud Defense Optimization) isminde bir çerçeve önermişlerdir. Geliştirdikleri bu yaklaşım ile maliyeti makul seviyede düşürebildikleri görülmüştür. Shameli-Sendi vd. tarafından yapılan son çalışmada [18], maliyet optimizasyonu kısıtlarının yanı sıra güvenlik kısıtlarını da göz önünde bulunduran bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan temel farkı, ağ güvenliği uzmanları tarafından farklı yerleştirme çözümleri için tanımlanmış olan ağ güvenliği savunması örüntülerinin dikkate alınmasıdır. Sonuç olarak, literatürde yer alan VNSF yerleştirme çalışmalarında (i) yerleştirilen VNSF sayısı, (ii) donanımsal ekipman sayısı [8-10] ve (iii) ağ kaynakları kullanımının [11-13] [(bant genişliği, linklerin sayısı [14-16], CPU kullanımı vb.) [16-18] bir kombinasyonu olarak tanımlanan maliyetin [3, 7] en aza indirgendiği görülmektedir. Fakat bu çalışmaların hiçbirinde, 5G ağları için maliyetin en önemli bileşenlerinden biri olan enerji tüketimi ele alınmamıştır. Bunlara ek olarak, 5G trafiğini yönlendirirken, abonelik paketi bazında güvenlik gereksinimlerini göz önünde bulunduran bilgimiz dâhilinde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada ise, yukarıda bahsedilen diğer çalışmalardan farklı olarak, ağa gelen trafik akışlarının abonelik paketi bazındaki gereksinimlerini karşılayacak şekilde enerji tüketiminin en aza indirgenmesi amacıyla, 5G ağlarında uygulanabilecek şekilde enerji etkin güvenlik yönetimi ve trafik yönlendirme problemi ele alınmıştır. Böylelikle, ağda hem abonelik seviyesinde güvenliğin sağlanması hem de sürdürülebilirlik ile yeşil bilişim hedeflerine ulaşmak için kritik bir önlem olduğu bilinen enerji etkin bir yönlendirme çözümü geliştirilmesi hedeflenmektedir.

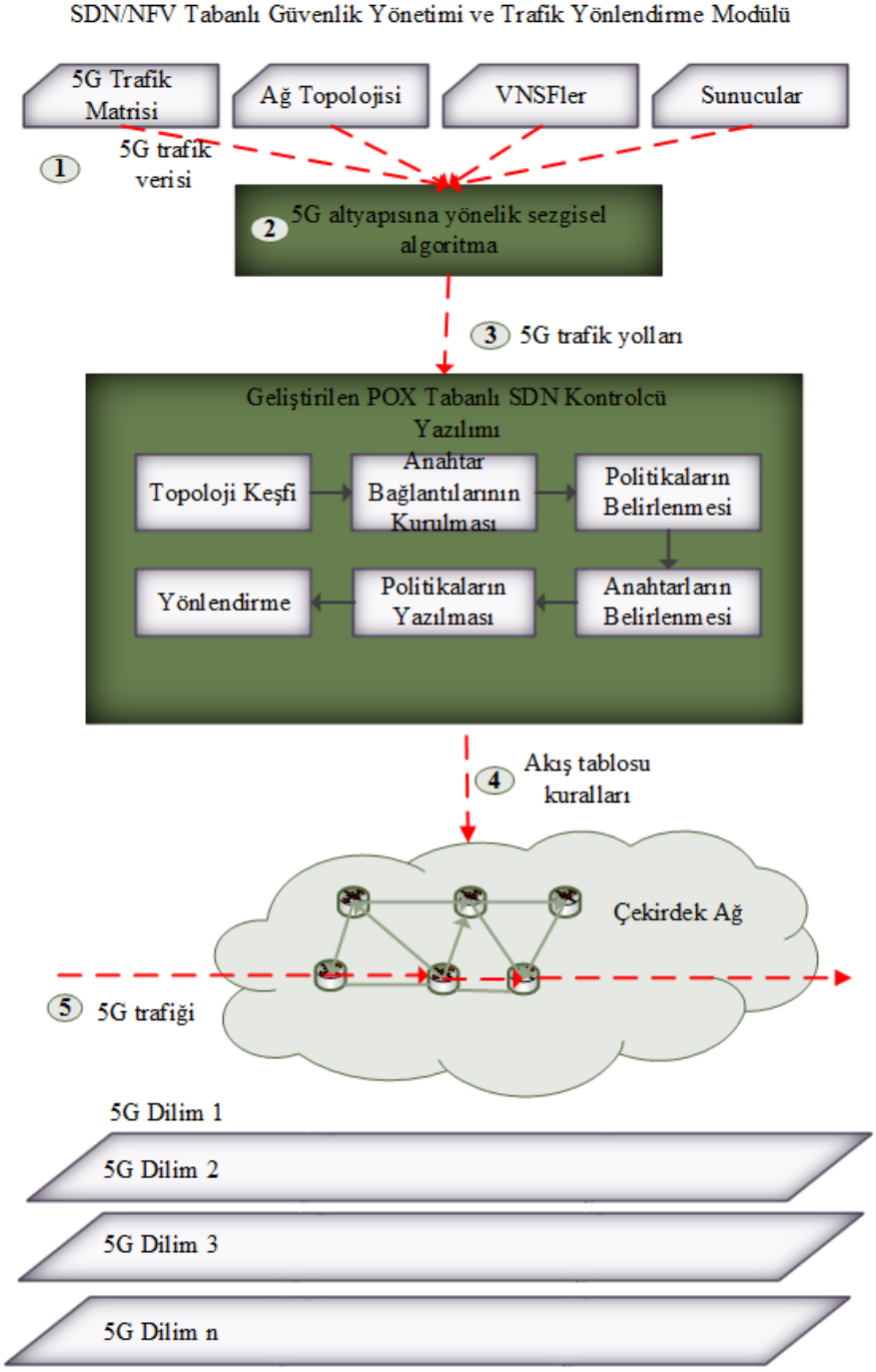
3. SDN/NFV TABANLI 5G AĞLARI İÇİN ENERJİ ETKİN VNSF YERLEŞTİRME MODELİ
(ENERGY EFFICIENT VNSF PLACEMENT FOR SDN/NFV BASED 5G NETWORKS)

3.1. Problem Tanımı (Problem Definition)

Bu çalışma kapsamında ele alınan problem, SDN ve NFV tabanlı 5G mimarisi üzerinde, sunucuların toplam enerji tüketimini en aza indirgeyecek şekilde ağa gelen 5G trafiğinin abonelik paketi bazındaki güvenlik gereksinimlerine uygun olarak, SDN kontrolcüsü tarafından etkin bir biçimde yönlendirilmesi olarak tanımlanmaktadır.

3.2. Önerilen Sistem Modeli (Proposed System Model)

Önerilen sistem modeli Şekil 1'de SDN ve NFV tabanlı 5G mimarisi üzerinde sunulmuştur. Şekilde de gösterildiği gibi 5G mimarisi, farklı özelliklere ve gereksinimlere sahip alanlarda hizmet sunmak üzere birden çok dilimden



Şekil 1. Önerilen sistem modelinin SDN/NFV tabanlı 5G mimarisi üzerinde gösterimi
(Proposed system model on SDN/NFV based 5G architectur

oluşmaktadır [1]. Birbirinden bağımsız mantıksal birer sanal ağ olarak ifade edilebilecek olan her bir dilimde güvenlik, NFV ile sanallaştırılmış VNSF'ler aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu doğrultuda, VNSF'lerin SDN tabanlı 5G çekirdek ağı üzerinde enerji etkin yerleştirilmesi ve trafiğin yönlendirilmesi amacıyla geliştirilen sistemin çalışma prensibini ifade eden her bir adım aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

- Girdilerin alınması: İlk olarak, VNSF'lerin yerleştirilmesi ve trafik akışlarının güvenlik gereksinimleri doğrultusunda bu fonksiyonlardan yönlendirilirken takip etmeleri gereken yolların hesaplanabilmesi için ağ topolojisi, trafik matrisi, sunucu listesi ve VNSF'lerin özellikleri SDN/NFV Tabanlı Güvenlik Yönetimi ve Trafik Yönlendirme Modülü tarafından girdi olarak alınmaktadır. Bu girdilerden; farklı türdeki VNSF'lerin (CPU gereksinimi, trafik işleme kapasitesi ve birim maliyeti vb.) özellikleri ve sunucu listesi (maksimum ve boş durumdaki enerji tüketimi, VNSF'leri barındırmak için sahip olduğu CPU kapasitesi vb.) NFV orkestratörü tarafından sağlanmaktadır. NFV orkestratörü, bu tür meta verilerin sağlanmasının yanı sıra VNSF'lerin yönetimi ve birbirleriyle uyumlu bir şekilde çalışmasından sorumludur. Trafik matrisi, ağ operatörü tarafından istenen zaman aralıklarında (saatlik, günlük, haftalık vb.) sağlanmaktadır ve her bir trafik akışı için kaynak düğüm, varış düğümü, bant genişliği gereksinimi ve geçmesi gereken VNSF'lerin kümesini içermektedir. Son olarak ağ topolojisi, SDN mimarisinin merkezi kontrol yapısı sayesinde, tüm ağın görünümüne hâkim olan kontrolcü tarafından alınmaktadır. Topoloji verisi, ağ alt yapısındaki anahtarların birbirleriyle ve sunucularla olan bağlantıları ile anahtarları ve sunucuları birbirine bağlayan linklerin bant genişliği kapasitelerini içermektedir.
- Güvenlik gereksinimlerinin belirlenmesi: SDN/NFV Tabanlı Güvenlik Yönetimi ve Trafik Yönlendirme Modülü, VNSF konumlarının belirlenmesi ve trafik akışlarının takip edeceği yolların hesaplanmasından sorumludur. Bu doğrultuda, ilk olarak, trafik matrisindeki akışların geçmesi gereken VNSF'ler listesi değerlendirilerek abonelik seviyeleri belirlenir; akışların geçmesi gereken VNSF türleri ve sayıları gibi akışlara ait güvenlik gereksinimlerini çıkarılır ve organize edilir. Daha sonra bu veriler işlenmek üzere, önerilen sezgisel algoritmaya girdi olarak verilir.
- VNSF konumlarının bulunması ve akış yollarının hesaplanması: 5G altyapısı için önerilmiş olan sezgisel algoritma, trafik matrisindeki akışların abonelik bazlı güvenlik gereksinimlerini göz önünde bulundurarak enerji etkin bir biçimde VNSF'lerin yerleştirilmesi ve trafik akışlarının abonelikleri doğrultusunda bu fonksiyonlar üzerinden yönlendirilmesinden sorumludur. Önerilen sezgisel algoritmanın nasıl çalıştığı ve bu kararları nasıl verdiği Bölüm 3.3'te detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.
- Kuralların akış tablolarına yazılması: Sezgisel algoritma tarafından VNSF konumları belirlenip trafik matrisindeki akışlar için rotalar hesaplandıktan sonra belirlenen yollar geliştirilen kontrolcü yazılımına bildirilir. Kontrolcü yol bilgilerini aldıktan sonra veri katmanında yer alan anahtarların akış tablolarını güncellemekte ve SDN/NFV Tabanlı Güvenlik Yönetimi ve Trafik Yönlendirme Modülü tarafından alınan kararlar doğrultusunda gelen akışları nasıl yönlendireceklerini anahtarlara söylemektedir. Bu doğrultuda geliştirilen kontrolcü yazılımının nasıl çalıştığı ve belirlenen kuralları nasıl uyguladığı Bölüm 3.4'te detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Ayrıca kontrolcü, NFV mimarisinin bileşenlerinden biri olan VNSF yöneticisi ile de iletişim içindedir. VNSF yöneticisi; yerleştirilen VNSF'lerin başlatılması, ölçeklenmesi, güncellenmesi ve sonlandırılması gibi VNSF yaşam döngüsünün tüm adımlarından sorumlu bir modül olup bu çalışmanın kapsamı dışında yer almaktadır.
- Trafik akışının yönlendirilmesi: Ağa trafik matrisinde yer alan bir akış geldiğinde, anahtarlar kontrolcü yazılımı tarafından kendilerine iletilen kurallar doğrultusunda akışı yönlendirerek kaynak düğümünden varış düğümüne ulaşmasını sağlamaktadır. Anahtarların bu işlemi gerçekleştirirken uyguladığı adımlar Bölüm 3.4'te detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

3.3. Önerilen Sezgisel Algoritma (Proposed Heuristic Algorithm)

VNSF yerleştirme probleminin NP-Zor sınıfında yer aldığı bilinmektedir [19-22]. Bu tür problemlerde, polinom zamanda optimum çözümler üretebilmek için sezgisel algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında, gerçek ağ senaryoları için enerji etkin VNSF yerleştirme problemini çözmek amacıyla [23]'te sunulan algoritma temel alınarak, 5G altyapısına yönelik bir sezgisel algoritma önerilmiştir. 5G dilimleri üzerinde enerji etkin trafik yönlendirme amacına uyarlanarak geliştirilen sezgisel algoritma; verilen bir ağ topolojisi, trafik matrisi ve sanal güvenlik fonksiyonu türlerinin özellikleri için akış düzeyindeki güvenlik gereksinimlerini göz önünde bulundurarak enerji tüketimini en aza indirecek şekilde farklı türdeki VNSF'lerin sayılarını ve hangi sunucuların üzerine konumlandırılacağını bulmaktadır. Çıktı olarak ise (i) VNSF-sunucu eşleşmelerini ve (ii) tim 5G trafiği tarafından izlenecek rotayı vermektedir. Şekil 2'de önerilen algoritmaya ait sözde kod sunulmuş ve Şekil 3'teki akış diyagramında detaylı bir şekilde verilen işlem adımları aşağıda açıklanmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı enerji tüketimini en aza indirgemek olduğu için VNSF'lerin yerleştirildiği sunucuların sayısının minimize edilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle, temel aldığımız sezgisel algoritmada VNSF'lerin yerleştirileceği anahtar sunucuları tespit etmek için arasındalık merkezliği (betweenness centrality) tabanlı bir yaklaşım kullanılmaktadır [23]. Bu yaklaşım doğrultusunda ilk olarak, Dijkstra algoritması ile her bir 5G trafik akışı için en kısa yol hesaplaması yapılmaktadır. Daha sonra, 5G çekirdek ağında yer alan her bir düğüm için arasındalık merkeziliği değeri hesaplanarak düğümler bu metriğe göre azalan şekilde sıralanır. En yüksek arasındalık merkeziliği değerine sahip olan düğümün üzerinden geçen akışlar

```
Algoritma I. 5G Çekirdek Ağında VNSF Yerleştirme için Onerilen Sezgisel Algoritma
5G çekirdek ağ topolojisi, trafik matrisi, sunucu bilgisi ve fonksiyon özelliklerini girdi olarak al.
Dijkstra's algoritması ile trafik matrisindeki tüm 5G trafik akışları için en kısa yolu hesapla.
5G trafik akışları için abonelik bazlı belirlenmiş VNSF türlerini belirle.
5GdüğümListesi ← 5G çekirdek ağındaki anahtar düğümleri tespit et ve azalan şekilde sırala.
5GTrafikListesi← abonelik bazlı belirlenmiş VNSF türlerinin tümünden hizmet alamamış 5G trafik akışları
foreach düğüm in 5GdüğümListesi
    trafikListesi ← düğüm üzerinden geçen VNSF gereksinimleri karşılanmamış akışlar
    f ← trafikListesi'ndeki 5G trafik akışları tarafından en çok talep edilen fonksiyon
    if düğüm'e sunucu bağlı ise
      if sunucunun kapasitesi yeterli ise ve f türünde bir fonksiyon sunucuya yerleştirilmemiş ise
        f fonksiyonunu sunucuya yerleştir.
        sunucunun kapasitesini güncelle.
      end if
      foreach akış in trafikListesi
        f fonksiyonunun kapasitesi akış'a hizmet vermek için yeterli ise
          akış f'den hizmet alsın.
          f fonksiyonunun kapasitesini güncelle.
        end if
      end for
    end if
end for
if tüm akışların VNSF gereksinimleri karşılandı ise
  algoritmayı sonlandır.
end if
else if 5GTrafikListesi'nde bir veya daha fazla 5G akışı var ise
  foreach akış in 5GTrafikListesi
    akış için hesaplanan tüm basit yollar arasından akış'ın gereksinimlerin, karşılayacak bir rota belirle.
    akış'a belirlenen rota üzerinde hizmet ver.
  end for
  if akış'ın gereksinimleri tüm basit yol alternatifleri ile karşılanmadı ise
    akış'ın ihtiyaç duyduğu fonksiyon türü örneklerini en kısa yolu üzerindeki sunuculara yerleştir ve akış'a hizmet ver.
  end if
end if
```

Şekil 2. 5G altyapısı için önerilen algoritmaya ait sözde kod (Pseudocode of the algorithm which is proposed for 5G architecture)

tarafından en çok istenen fonksiyon belirlenir. O düğüme bağlı olan sunucunun kapasitesi belirlenen fonksiyon için yeterliyse, fonksiyon o sunucuya yerleştirilmekte ve akışlar bu fonksiyona atanmaya başlanmaktadır. Algoritma bu noktada, hangi akışların isteklerinin karşılanıp karşılanmadığını kontrol etmekte ve tüm istekleri karşılanan akışları işlem sürecinden çıkarmaktadır. Düğüm üzerinden geçen akışlar tarafından talep edilen fonksiyonların sunucuya yerleştirilmesi işlemi bu şekilde tekrar edilir. Sunucunun kapasitesi dolduğunda ise bu işlem adımları, sırayla diğer düğümlere bağlı sunucular için tekrarlanır. Bu adımların sonunda, ağa gelen tüm 5G trafiğinin istekleri giderildiyse, sezgisel algoritma sonlandırılmaktadır. Fakat istekleri karşılanmayan bir veya daha fazla trafik akışının kaldıysa, bu akışların her biri için alternatif rotalar hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu rotalar arasından da her defasında en kısa olanın seçilmesi mantığı uygulanır ve uygun rotalar üzerine fonksiyonlar yerleştirilir. En kısa yolları üzerinde güvenlik hizmeti istekleri karşılanamayan her akış için, istekleri karşılanana kadar bu işlemler tekrar edilir. Ağa gelen bütün trafik akışlarının tüm güvenlik ihtiyaçları karşılandığında ise önerilen sezgisel algoritmanın çalışması sonlandırılır.

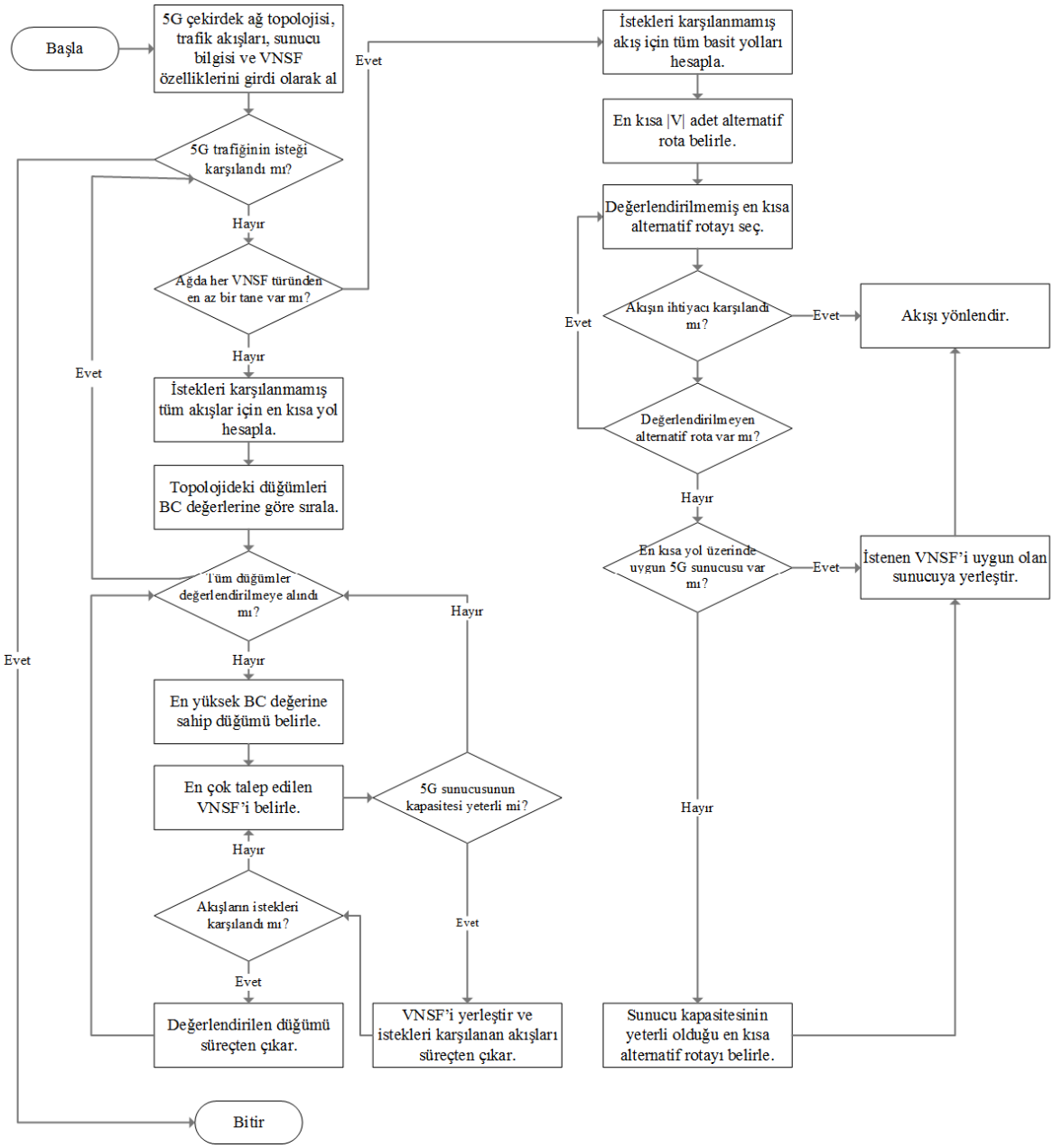
3.3.1. Karmaşıklık analizi (Complexity analysis)

Yer kısıtından dolayı detaylı bir şekilde açıklanamasa da, yapılan analiz sonucunda, |F| trafik akışlarını |V| de ağdaki düğüm sayısını temsil etmek üzere, geliştirilen algoritmanın polinom zamanlı bir algoritma olduğu ve zaman karmaşıklığının ($O(|F|.|V|^2)$) olduğu görülmüştür.

3.4. Geliştirilen SDN Kontrolcüsü Yazılımı (Developed SDN Controller Software)

Geliştirilen kontrolcü yazılımı, sezgisel algoritma tarafından belirlenen yollar doğrultusunda ağa gelen trafik akışlarının yönlendirilmesinden sorumludur. Bu doğrultuda kontrolcü, trafik akışları için hesaplanan yolları aldıktan sonra gerekli yönlendirme kurallarını belirler bunları ve 5G çekirdek ağındaki programlanabilir anahtarların akış tablolarına yazar. Geliştirilen kontrolü yazılımı çalışmaya başladığında her bir anahtarla bağlantı kurulur ve belirlenen kurallar anahtarların akış tablolarına yazılır. Kontrolcü yazılımının bu yazma işlemini nasıl gerçekleştirdiği Şekil 4'te sözde kod şeklinde sunulmuş ve Şekil 5'te verilen akış diyagramı üzerinden detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Kontrolcü yazılımının çalışma prensibini daha iyi ifade edebilmek için Tablo 1'de yönlendirme politikalarına küçük bir örnek sunulmuş ve kontrolcü tarafından 1 numaralı anahtara yazılması gereken kurallardan bir kesit gösterilmiştir. Bu politikalar doğrultusunda kontrolcü yazılımının yönlendirme işlemini nasıl gerçekleştirdiği aşağıda detaylı bir biçimde açıklanmıştır. Örnek olarak, Tablo 1'de verilen yönlendirme politikalarına göre, 1 numaralı anahtar, 00:00:00:00:00:03 kaynağından gelip 00:00:00:00:00:02 MAC adresli sunucuya iletilmesi gereken



Şekil 3. 5G altyapısı için önerilen algoritmaya ait akış diyagramı (Flowchart of the algorithm which is proposed for 5G architecture)

bir paket aldıysa, bu paketi (2 numaralı porttan) 00:00:00:00:00:07 MAC adresli sunucuya; 00:00:00:00:00:03 kaynağından gelip 00:00:00:00:00:04 MAC adresli sunucuya iletilmesi gereken bir paket aldıysa, bu paketi (3 numaralı porttan) 00:00:00:00:00:08 MAC adresli sunucuya iletecektir.

Ağa trafik matrisinde yer almayan yeni bir akış geldiğinde ise şu adımlar verilen sırada uygulanır: Ağdaki anahtarlardan biri, akış tablosundaki girdilerle eşleşmeyen bir akış algıladığında Şekil 6'da gösterilen 2 numaralı işlem gerçekleştirilir ve bu akış bir paket haline getirilerek, ne yapılacağını sormak için güvenli OpenFlow kanalı üzerinden kontrolcüye iletilir. Kontrolcü paketi aldığında yeni akış hakkında bilgi sahibi olur ve akış için gerekli hesaplamaların başlatılması amacıyla SDN/NFV Tabanlı Güvenlik Yönetimi ve Trafik Yönlendirme Modülü ile iletişim kurar. Bu aşamadan sonra yukarıda bahsedilen 1-5 arası adımlar eşleşmeyen akış için tekrarlanır.

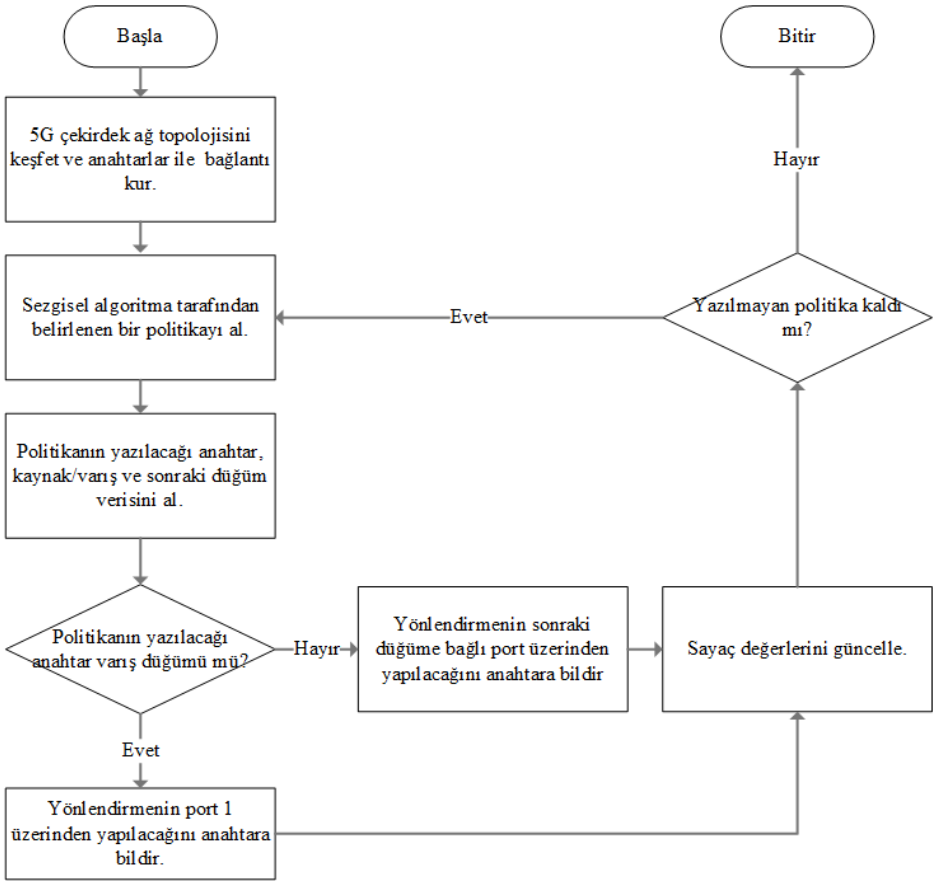
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR
(EXPERIMENTAL STUDIES)

4.1. Deney Ortamı ve Kullanılan Veriler
(Experiment Environment and Used Data)

Önerilen sezgisel algoritmanın performansını gerçekçi senaryolar altında değerlendirebilmek için literatürde sıklıkla tercih edilen ve 5G çekirdek ağını modelleyebilecek

```
Algoritma II. Geliştirilen SDN kontrolcü yazılımı
Ağı keşfet ve topolojideki tüm anahtarlar ile bağlantıları kur.
foreach anahtar in topoloji
  dpid (data path id) değerlerini öğren.
end for
yönlendirmePolitikaları ← SDN/NFV tabanlı trafik yönlendirme modülü tarafından belirlenen akış yolları
msg ← new akışKuralı
foreach politika in yönlendirmePolitikaları
   msg.match.dl_src ← politika.src
   msg.match.dl_dst ← politika.dst
   anahtar ← politika.sw
   sonraki_düğüm ← politika.next_hop
   if event.connection.dpid == anahtar
      if anahtar == politika.dst
         msg.actions.append(outPort = 1)
         event.connection.send(msg)
         Sayaç değerlerini güncelle.
      end if
      else
          msg.actions.append(outPort = sonraki_düğüm)
          event.connection.send(msg)
          Sayaç değerlerini güncelle.
      end if
end for
```

Şekil 4. Geliştirilen kontrolcü yazılımının çalışma prensibine ait sözde kod (Pseudocode for the developed controller software)

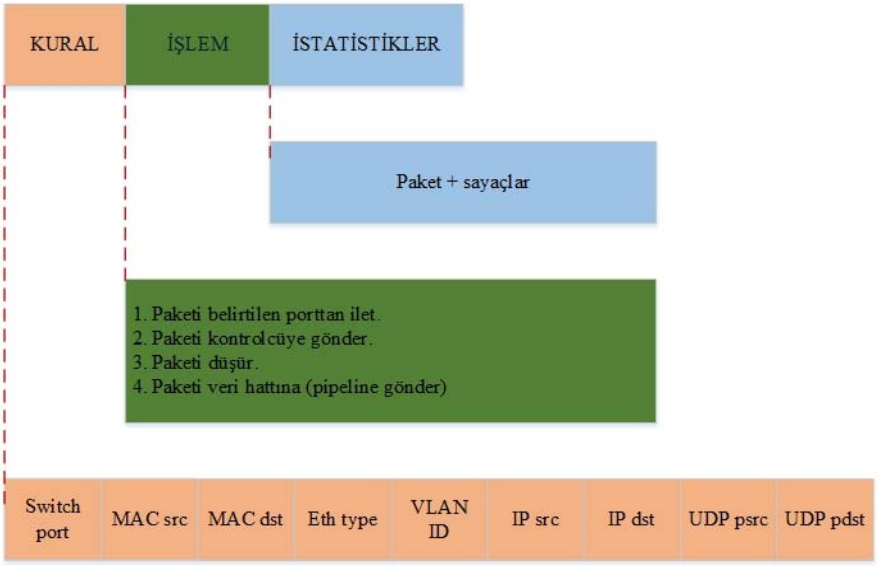


Şekil 5. Geliştirilen kontrolcü yazılımının çalışma prensibine ait akış diyagramı (Flowchart for the developed controller software)

bir topoloji içeren 12 anahtar, 15 çift yönlü link ve 132 trafik akışından oluşan Internet2 gerçek dünya veri seti kullanılmıştır [24]. Ağdaki tüm sunucuların CPU kapasiteleri ve enerji tüketimi özellikleri birbirleriyle aynı olup maksimum ve boş durumdaki enerji tüketimi değerleri yakın zamanda Berkeley Laboratuvarı tarafından yayınlanan

Tablo 1. Örnek yönlendirme politikaları (Example routing policies)

Politika ID	Anahtar ID	Kaynak düğüm	Varış düğümü	Sonraki düğüm
100	1	00:00:00:00:00:03	00:00:00:00:00:02	00:00:00:00:00:07
101	1	00:00:00:00:00:03	00:00:00:00:00:04	00:00:00:00:00:08



Şekil 6. OpenFlow anahtarlarının akış tablosunda gerçekleşen işlemler (Operations in the flow tables of OpenFlow switches)

bir veri raporundan alınmıştır [25]. Yapılan deneylerde, güvenlik duvarı, saldırı tespit sistemi/saldırı engelleme sistemi (IDS/IPS - Intrusion Detection System/Intrusion Prevention System), DPI ve zararlı yazılım tarayıcı olmak üzere ağa yerleştirilecek olan dört farklı türde sanal ağ güvenliği fonksiyonu ile çalışılmıştır [23]. Bu fonksiyonlar için CPU gereksinimi veya trafik işleme kapasitesi gibi veriler de literatürdeki diğer çalışmalardan ve fonksiyon üreticilerin yayınladığı veri raporlarından elde edilmiştir [26, 27]. Her bir fonksiyonun trafiği hat hızında işleyebildiği bilinmektedir. Değerlendirme amacıyla, abonelik bazında güvenlik gereksinimlerini temsil edecek şekilde [28]'de belirtilen kurumsal ağ güvenliğindeki seviyeler dikkate alınarak üç farklı güvenlik paketi [23] belirlenmiştir. Ağa gelen trafiğin, trafik sınıflandırıcısı tarafından bu güvenlik paketi sınıflarına kabaca eşit bir şekilde dağıtıldığı varsayılmaktadır. Bu güvenlik paketleri şu şekilde özetlenebilir. Temel seviye güvenlik aboneliğine sahip olan akışlar için yalnızca güvenlik duvarından geçmek yeterli olacaktır. İleri düzey güvenlik aboneliğinde ise trafik akışları güvenlik duvarı ile birlikte herhangi bir zararlı yazılım tarayıcı fonksiyonu tarafından da analiz edilmelidirler. Son olarak kritik güvenlik aboneliğine sahip akışlar, tüm güvenlik fonksiyonlarından en az bir kere geçmelidirler. Sezgisel algoritmanın aldığı kararlar doğrultusunda trafik akışlarının yönlendirilmesi için geliştirilen kontrolcü yazılımını test etmek amacıyla SDN ortamında yapılan deneyler açık kaynaklı bir ağ emülatörü olan Mininet üzerinde gerçekleştirilmiştir [29]. Kontrol katmanında modüler POX kontrolcüsü [30] kullanılmış ve geliştirilen kontrolcü yazılımı POX üzerinde yeni bir modül olarak gerçeklenmiştir. Veri katmanında ise Mininet emülatörünün desteklediği SDN tabanlı Open vSwitch anahtarlar kullanılmıştır. Ayrıca Mininet ile ağ topolojisindeki her anahtar için bir NFV sunucusu oluşturulmuş ve Internet2 veri setindeki trafik verisinin Mininet ortamında üretilebilmesi için ise literatürde sıklıkla tercih edilen Iperf aracı kullanılmıştır [31].

4.2. Değerlendirme Metrikleri (Evaluation Metrics)

Önerilen sezgisel algoritmayı test etmek için kullanılan değerlendirme parametreleri, toplam enerji tüketimi ve aktif sunucu sayısı; algoritmanın belirlediği yollar doğrultusunda trafik akışlarını yönlendirmek amacıyla geliştirilen kontrolcü yazılımını test etmek amacıyla kullanılan değerlendirme parametreleri ise, Iperf tarafından üretilen çıktıda yer alan ve literatürdeki çalışmalarda performans değerlendirmesi amacıyla kullanılan, toplam bant genişliği, ortalama paket kayıp oranı, gecikme, jitter ve akış yol uzunluğudur [31]. Bu metrikler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- *Toplam enerji tüketimi:* Ağdaki sunucular tarafından tüketilen toplam enerji miktarıdır. Bir sunucunun enerji tüketimi, çalışmaya başlamasıyla tükettiği boş durumdaki enerji tüketimi miktarı ile o sunucuya fonksiyon yerleştirilmesiyle ortaya çıkan enerji tüketiminin toplamına eşittir. Bir sunucuda bir fonksiyonun çalışmasına bağlı olarak ortaya çıkan enerji tüketimi ise, o fonksiyonun sunucunun CPU kapasitesinin ne kadarını kullandığı ile doğru orantılıdır.
- *Aktif sunucu sayısı:* VNSF'leri yerleştirmek için gerekli olan toplam sunucu sayısıdır.

- *Toplam bant genişliği:* Değişen trafik akışı sayısı için ağdaki toplam veri aktarım hızıdır.
- *Ortalama paket kayıp oranı:* Ağda gönderilen paketlerin ne kadarının kaybolduğunu ifade etmektedir.
- *Ortalama gecikme:* Trafik akışlarının kaynak düğümünden varış düğümüne gitmesi için geçen süredir.
- *Ortalama jitter:* Jitter, paket iletiminde meydana gelen gecikmedeki değişim oranıdır. Ortalama jitter ise her bir akış için hesaplanan jitter değerlerinin aritmetik ortalaması şeklinde hesaplanmaktadır.
- *Ortalama akış yolu uzunluğu:* Trafik akışları tarafından takip edilen yollardaki ortalama atlama (hop) sayısı olarak ifade edilmektedir.

4.3. Deneysel Sonuçlar ve Değerlendirmeler
(Experimental Results and Evaluations)

4.3.1. Önerilen sezgisel algoritmanın enerji parametreleri açısından değerlendirilmesi
(Evaluation of proposed heuristic algorithm in terms of energy parameters)

Bu çalışma kapsamında, 5G ağlarında VNSF yerleştirme ve trafik yönlendirme problemi, enerji etkin çözüm geliştirme bakış açısıyla ele alınmıştır. Belirtilen bu problemi aynı amaç ve kısıtlar doğrultusunda çözen herhangi bir çalışma olmadığından, geliştirilen sezgisel algoritma literatürde değerlendirme amacıyla sıklıkla kullanılan [31-33] ve referans olarak kabul edilen yerleştirme çözümleri [34, 35] ile karşılaştırılmıştır. Bu çözümler aşağıda kısaca açıklanmaktadır:

Rastgele yerleştirme (random-fit): Bu strateji ile VNSF'ler rastgele bir biçimde seçilen uygun sunuculara yerleştirilmektedir [33-35].

Dengeli yerleştirme: Bu yaklaşım; her sunucuya birer tane VNSF yerleştirerek, her birinde en az bir tane VNSF olana kadar birden fazla VNSF yerleştirmekten kaçınan ve böylelikle VNSF'leri sunucular arasında mümkün olduğunca eşit bir şekilde dağıtmayı amaçlayan bir stratejidir. Bu tür bir yük dengeleme yaklaşımı, tek arıza noktası (single point of failure) problemi açısından iyidir [34]. Her bir modelin Internet2 topolojisi üzerinde değişen miktardaki trafik akışı sayısı için toplam enerji tüketimi ve aktif sunucu sayısı açısından ürettiği sonuçlar Tablo 2 ve Tablo 3'te sunulmuştur. Rastgele yerleştirme modeli, her defasında farklı bir yerleştirme çözümü ürettiği için, beş kere çalıştırılarak bu deneylerin ortalaması alınmıştır.

Tablo 2 ve Tablo 3'te gösterildiği gibi, geliştirilen sezgisel algoritma ürettiği daha az enerji tüketimi ve sunucu sayısı sonuçları ile rastgele yerleştirme ve dengeli yerleştirme yöntemlerinden daha iyi performans sergilemektedir. Çünkü ağdaki merkezi düğümleri bularak VNSF'leri yerleştirmekte ve böylelikle en az sayıda sunucuyu aktif hale getirmektedir. Daha detaylı bir şekilde açıklamak gerekirse, 132 trafik akışına hizmet verebilmek için sezgisel algoritma yalnızca 2 sunucuyu aktif hale getirirken dengeli yerleştirme yaklaşımı, Tablo 3'te gösterildiği üzere aynı durum için 6 adet sunucuyu aktif hale getirmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur çünkü sezgisel algoritma VNSF'leri en az sayıda sunucu üzerinde gruplarken, dengeli yerleştirme yöntemi bu fonksiyonları sunucular arasında dağıtmaktadır. Öte yandan, rastgele yerleştirme yaklaşımı, dengeli yerleştirmeye göre daha iyi bir çözüm üreterek ortalama 5 adet sunucuyu aktif hale getirmektedir. Bu da beklenen bir durumdur, çünkü rastgele yerleştirme stratejisi VNSF'leri sunucular arasında kasıtlı bir şekilde dağıtmak yerine rastgele bir biçimde uygun sunuculara yerleştirmektedir. Son olarak, geliştirilen algoritma, dengeli yerleştirme çözümüne göre %38 ila %48 enerji tasarrufu sağlarken, rastgele yerleştirme yaklaşımına göre %27 ila %48 enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu değerler, trafik akışı sayısı arttıkça yükselmektedir ki bu da gerçekçi ağ koşulları için istenen bir sonuçtur. Bu değerlendirmelere ek olarak önerilen algoritma, VNSF yerleştirme problemi ile benzer olduğu bilinen fonksiyon/sanal makine, [36-38] /sanal ağ/orta kutu/ vb. [39-41] yerleştirme problemlerini enerji etkin bir biçimde çözmeyi hedefleyen sezgisel algoritmalar [42-45] ile kıyaslanmıştır. Bu çalışmalarda elde edilen enerji tasarrufu değerlerinin %10 ile %46,1 arasında değiştiği görülmüştür. Geliştirilen bu algoritmalar farklı amaç ve kısıtları içeren problemlere yönelik olsa da, bu çalışmada önerilen sezgisel algoritmanın %48'e varan oranda enerji tasarrufu sağlaması, önemli bir iyileştirme olarak yorumlanmaktadır. Ayrıca, bu çalışmalarda önerilen sezgisel algoritmaların çalışma zamanının 0,2 ila 0,52 saniye arasında değiştiği; bu çalışmada önerilen sezgisel algoritmanın ise Internet2 topolojisi için 0,13 saniyede sonuç üretebildiği görülmüştür. Dolayısıyla çalışma zamanının %75'e varan oranda daha kısa olması, önerilen algoritmanın bir diğer önemli avantajıdır. Daha önce de bahsedildiği gibi SDN ve NFV, 5G'nin bel kemiğini oluşturan iki temel teknolojidir. Bu nedenle NFV ile sanallaştırılmış VNSF'lerin enerji etkin bir biçimde 5G altyapısında yerleştirilmesi amacıyla geliştirilmiş olan sezgisel algoritmanın, 5G mimarisi üzerinde uygulanabilirliğini göstermek için algoritmanın aldığı kararlar doğrultusunda ağa gelen trafik akışlarını yönlendirecek yeni bir SDN kontrolcü yazılımı tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Bir sonraki bölümde, geliştirilen kontrolcünün hizmet kalitesi parametreleri açısından değerlendirmesi yapılmıştır.

Tablo 2. Değişen trafik akışı sayısı için ulaşılan toplam enerji tüketimi
(Total energy consumption reached for varying number of traffic flows)

Akış Sayısı	Sezgisel Algoritma	Rastgele Yerleştirme	Dengeli Yerleştirme
10	323,07	600,27	620,27
20	323,07	620,27	620,27
30	323,07	580,47	620,27
40	323,07	620,27	620,27
50	323,07	600,27	620,27
60	323,07	580,47	620,27
70	323,07	600,27	620,27
80	323,07	600,27	620,27
90	323,07	580,47	620,27
100	479,82	776,82	776,82
110	479,82	697,62	776,82
120	479,82	658,02	776,82
132	502,92	799,92	898,92

Tablo 3. Değişen trafik akışı sayısı için aktif hale getirilen toplam sunucu sayısı
(Total number of activated servers for varying number of traffic flows)

Akış Sayısı	Sezgisel Algoritma	Rastgele Yerleştirme	Dengeli Yerleştirme
10	1	3.8	4
20	1	4	4
30	1	3.6	4
40	1	4	4
50	1	3.8	4
60	1	3.6	4
70	1	3.8	4
80	1	3.8	4
90	1	3.6	4
100	2	5	5
110	2	4.2	5
120	2	3.8	5
132	2	5	6

4.3.2. Geliştirilen SDN kontrolcüsünün hizmet kalitesi parametreleri açısından değerlendirilmesi
(Evaluation of the developed SDN controller in terms of quality of service parameters)

Geliştirilen kontrolcü yazılımı, Internet2 topolojisi üzerinde değişen sayıda trafik akışı için toplam bant genişliği, ortalama paket kayıp oranı, gecikme jitter ve ortalama akış yol uzunluğu parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Deneyler, her bir akış sayısı için beş kere tekrarlanarak elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Elde edilen bulgulara göre, Tablo 4'te de gösterildiği gibi, toplam bant genişliğinin 132 trafik akışına kadar sürekli artış eğiliminde olması ağ kapasitesinin aşılmadığını ve ağın daha çok trafik akışına hizmet verebilecek durumda olduğunu göstermektedir. Bu da geliştirilen sezgisel algoritma tarafından belirlenen yolların ağ kapasitesi açısından herhangi bir probleme yol açmadığını göstermektedir.

Tablo 4. Değişen trafik akışı sayısı için ulaşılan toplam bant genişliği
(Total bandwidth reached for varying number of traffic flows)

Akış Sayısı	Toplam Bantgenişliği (Mbps)
10	125.758
20	247.109
30	474.215
40	632.196
50	676.905
60	893.091
70	1115.833
80	1240.476
90	1395.119
100	1577.073
110	1632.531
120	1853.027
132	2004.768

Bir diğer değerlendirme metriği olan jitter açısından bakıldığında ise paket iletimindeki gecikmede meydana gelen değişimin 0,005 ms ile 0,008 ms arasında değiştiği görülmektedir. Ölçülen bu değerler oldukça düşük olup kabul edilebilir jitter aralığında yer almaktadır [46]. Bu da ağda tıkanıklıktan kaynaklanan herhangi bir gecikme olmadığını göstermektedir, çünkü yüksek jitter değerlerinin temel sebeplerinden biri ağda tıkanıklık olmasıdır. Ağda tıkanıklık varsa paketlerin yönlendiricilerdeki kuyruk yapılarında bekleme süreleri artacak bu da paketlerin gönderim hızıyla alım hızı arasındaki dalgalanmaya sebebiyet vererek jitter değerini artıracaktır [47, 48].

Bunlara ek olarak, 50 trafik akışına kadar ağda herhangi bir paket kaybı olmadığı gözlenmiştir. 50 akıştan sonra kayıplar görülse de, ulaşılan maksimum kayıp oranının %0,4 olduğu gözlenmiştir. Bu da yukarıdaki bulguları destekler nitelikte olup ağda herhangi bir tıkanıklık olmadığını göstermektedir. Dolayısıyla bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, geliştirilen algoritma tarafından enerji etkin bir mantıkla belirlenen yolların ağ performansında herhangi bir bozulmaya neden olmadığı sonucuna varılmaktadır. Tablo 5 ve 6'da elde edilen ortalama yol uzunluğu ve ortalama gecikme değerleri değişen trafik akışı sayısına bağlı olarak gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, ortalama yol uzunluğunun arttığı yerde ortalama gecikme de artmakta ve ortalama yol uzunluğunun azaldığı yerde ortalama gecikme de azalmaktadır. Bu değerlerin eğilimlerinin aynı yönde olması, sezgisel algoritmanın yolları olabildiğince kısa tutmaya çalışmasının gecikme üzerinde de etkisi olduğunu göstermektedir. Çünkü geliştirilen en kısa yol tabanlı sezgisel algoritma, olabildiğince çok sayıda trafik akışını en kısa yollardan yönlendirmeye çalışmakta ve en kısa yolu üzerinde istediği güvenlik hizmetini alamayan akışlar için belirlediği alternatif yol uzunluklarını ise olabildiğince kısa tutmaya çalışmaktadır. Bu da geliştirilen algoritma tarafından belirlenen yolların hizmet kalitesi parametreleri açısından etkin yönlendirme yapabildiği ve sorunsuz performans ile çalıştığı şeklinde yorumlanmaktadır..

Tablo 5. Değişen trafik akışı sayısı için elde edilen ortalama yol uzunluğu değerleri
(Average path length values obtained for varying number of traffic flows)

Akış Sayısı	Ortalama Yol Uzunluğu (atlama)
10	4.41
20	4.78
30	4.81
40	4.84
50	4.85
60	4.65
70	4.64
80	4.73
90	4.87
100	4.82
110	4.78
120	4.82
132	4.85

Literatürdeki VNSF yerleştirme çalışmalarında, farklı amaçlar doğrultusunda geliştirilen sezgisel algoritmaların belirlediği kuralları dikkate alarak trafik akışlarını yönlendiren bir kontrolcü yazılımına bilgimiz dâhilinde

rastlanmamıştır. Fakat VNSF yerleştirme problemi ile benzer olduğu bilinen orta kutu yerleştirme problemini ağ yükünü dengeleme amacıyla ele alan ve bu doğrultuda kontrolcü yazılımı geliştiren bir çalışmada [49], paket kayıp oranının %0,8'lere kadar çıktığı ifade edilmiştir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen kontrolcü yazılımı tarafından ulaşılan maksimum kayıp oranı değeri ise %0,4 olarak ölçülmüştür. Farklı topoloji ve trafik kümesinin kullanıldığı [49] ile birebir kıyaslama yapılamasa da kayıp oranının %50'ye varan oranlarda daha düşük olması geliştirilen sezgisel algoritmanın ve kontrolcü yazılımının önemli bir avantajı olarak yorumlanmaktadır.

Tablo 6. Değişen trafik akışı sayısı için elde edilen ortalama gecikme değerleri
(Average latency values obtained for varying number of traffic flows)

Akış Sayısı	Ortalama Gecikme (ms)
10	0.157
20	0.272
30	0.298
40	0.314
50	0.351
60	0.332
70	0.328
80	0.387
90	0.422
100	0.407
110	0.374
120	0.427
132	0.460

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, kullanıcıların farklı güvenlik hizmeti aboneliklerine sahip olduğu SDN ve NFV tabanlı 5G servis sağlayıcısı ağı senaryosu üzerinde, trafiğin, enerji etkin bir biçimde yerleştirilmiş olan VNSF'ler üzerinden güvenlik ihtiyaçları doğrultusunda yönlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, 5G ağlarında VNSF yerleştirme yaparken trafiğin abonelik bazındaki güvenlik gereksinimlerini göz önünde bulundurarak enerji tüketimini en aza indirgeyen bir sezgisel algoritma önerilmiştir. Önerilen sezgisel algoritma, gerçek dünya topolojisi üzerinde gerçek trafik verisi ile test edilerek performans değerlendirmeleri yapılmış ve 5G çekirdek ağı üzerinde uygulanabilirliğini göstermek için yeni bir SDN kontrolcü yazılımı tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Sonuç olarak, enerji tüketiminin önemli ölçüde azaltıldığı ve geliştirilen SDN kontrolcüsünün ağa gelen trafiği toplam bant genişliği, uçtan uca gecikme ve paket kayıp oranı gibi hizmet kalitesi parametreleri açısından etkin bir şekilde yönlendirebildiği görülmüştür. SDN kontrolcüsü tarafından işlenen trafik verisi büyük hacimlere ulaştığında, büyük veri yaklaşımlarının geliştirilmesi, çalışmanın gelecek hedefleri arasında yer almaktadır. Bu doğrultuda, büyük trafik verisindeki gizli örüntülerin ve bilinmeyen korelasyonların çıkarılmasıyla elde edilmiş istatistiksel sonuçları kullanarak, 5G altyapısı için önerilen sezgisel algoritmanın yapay zekâ tabanlı bir yerleştirme çözümüne dönüştürülmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Barakabitze, A. A., Ahmad, A., Mijumbi, R., Hines, A., 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges, Computer Networks, 167, 106984, 1-40, 2020.
2. Zhang, Q., Liu, F., Zeng, C., Adaptive interference-aware VNF placement for service-customized 5G network slices, IEEE Conference on Computer Communications, Paris-Fransa, 2449-2457, 29 Nisan-2 Mayıs, 2019.
3. Agarwal, S., Malandrino, F., Chiasserini, C. F., De, S., VNF placement and resource allocation for the support of vertical services in 5G networks, IEEE/ACM Transactions on Networking, 27 (1), 433-446, 2019.
4. Balta M., Ozcelik I., A proposal of SDN based VANET architecture for urban intersection management, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1452-1468, 2019.
5. Ordonez-lucena, J., Ameigeiras, P., Lopez, D., Ramos-munoz, J. J., Lorca, J., Folgueira, J., Network Slicing for 5G with SDN / NFV : Concepts, Architectures, and Challenges, IEEE Communications Magazine, 55 (5), 80–87, 2017.
6. Agarwal, S., Malandrino, F., Chiasserini, C. F., De, S. Joint VNF placement and CPU allocation in 5G, IEEE Conference on Computer Communications, Honolulu-ABD, 1943-1951, 15-19 Nisan, 2018.
7. Murukan, P., Jamaluddine, D., A Cost-based Placement Algorithm for Multiple Virtual Security Appliances in Cloud using SDN: MO-UFLP (Multi-Ordered Uncapacitated Facility Location Problem). https://arxiv.org/pdf/1602.08155.pdf. Yayın Tarihi 2016, Erişim tarihi Mart 6, 2020.
8. Krishnaswamy, D., Kothari, R., Gabale, V., Latency and policy aware hierarchical partitioning for NFV systems, IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Network, Kaliforniya-ABD, 205–211, 7-9 Kasım, 2016.
9. Bouet, M., Leguay, J., Combe, T., Conan, V., Cost-based placement of vDPI functions in NFV infrastructures, International Journal of Network Management, 25 (6), 490–506, 2015.
10. Shameli-Sendi, A., Jarraya, Y., Fekih-Ahmed, M., Pourzandi, M., Talhi, C., Cheriet, M., Optimal placement of sequentially ordered virtual security appliances in the cloud, IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management, Ottawa-Kanada, 818–821, 11-15 Mayıs, 2015.
11. Doriguzzi-Corin, R., Scott-Hayward, S., Siracusa, D., Salvadori, E., Application-centric provisioning of virtual security network functions, IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks, Berlin-Almanya, 276–279, 6-8 Kasım, 2017.
12. Dwiardhika, D., Tachibana, T., Cost Efficient VNF Placement with Optimization Problem for Security-Aware Virtual Networks, IEEE 7th International Conference on Cloud Networking, Tokyo-Japonya, 1–3, 22-24 Ekim 2018.

13. Doriguzzi-Corin, R., Scott-Hayward, S., Siracusa, D., Savi, M., Salvadori, E. Dynamic and Application-Aware Provisioning of Chained Virtual Security Network Functions, IEEE Transactions on Network and Service Management, Early Access, 1-14, 2019.

14. Liu, Y., Zhang, H. Q., Liu, J., Yang, Y. J., A new approach for delivering customized security everywhere: Security service chain, Security and Communication Networks, 1-17, 2017.

15. Phan, T. V., Bao, N. K., Kim, Y., Lee, H. J., Park, M., Optimizing resource allocation for elastic security VNFs in the SDNFV-enabled cloud computing, International Conference on Information Networking, Barselona-İspanya, 163–166, 11-13 Ocak 2017.

16. Liu, Yicen, Lu, Y., Qiao, W., & Chen, X., A dynamic composition mechanism of security service chaining oriented to SDN/NFV-Enabled networks, IEEE Access, 6, 53918–53929, 2018.

17. Jarraya, Y., Shameli-Sendi, A., Pourzandi, M., Cheriet, M., Multistage OCDO: Scalable Security Provisioning Optimization in SDN-Based Cloud, IEEE 8th International Conference on Cloud Computing, New York-ABD, 572–579, 27 Haziran-2 Temmuz, 2015.

18. Shameli Sendi, A., Jarraya, Y., Pourzandi, M., & Cheriet, M., Efficient Provisioning of Security Service Function Chaining Using Network Security Defense Patterns, IEEE Transactions on Services Computing, 12 (4), 534–549, 2016.

19. Deng, J., Hu, H., Li, H., Pan, Z., Wang, K. C., Ahn, G. J., Bi, J., Park, Y. VNGuard: An NFV/SDN combination framework for provisioning and managing virtual firewalls, IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Network, Kaliforniya-ABD, 107–114, 7-9 Kasım, 2016.

20. Bari, M. F., Chowdhury, S. R., Ahmed, R., Boutaba, R., Duarte, O. C. M. B., Orchestrating Virtualized Network Functions, IEEE Transactions on Network and Service Management, 13 (4), 725–739, 2016.

21. Pham, C., Tran, N. H., Ren, S., Saad, W., & Hong, C. S., Traffic-aware and Energy-efficient vNF Placement for Service Chaining: Joint Sampling and Matching Approach, IEEE Transactions on Services Computing, 1374, 1–14, 2017.

22. Carpio, F., Dhahri, S., Jukan, A., VNF placement with replication for Loac balancing in NFV networks, IEEE International Conference on Communications, Paris-Fransa, 1–6, 21-25 Mayıs, 2017.

23. Demirci, S., Sagiroglu, S., Demirci M. Energy Efficient Virtual Security Function Placement in NFV-Enabled Networks, Sustainable Computing: Informatics and Systems, 100494, 2020.

24. Internet2, https://www.internet2.edu/, Erişim Tarihi Şubat 8, 2020.

25. Arman Shehabi, Sarah Josephine Smith, Dale A Sartor, Richard E Brown, Magnus Herrlin, Jonathan G Koomey, Eric R Masanet, Nathaniel Horner, Inês Lima Azevedo, William Lintner., United States Data Center Energy Usage Report, https://eta-publications.lbl. gov/sites/default/files/lbnl-1005775_v2.pdf, Yatın Tarihi 2016, Erişim Tarihi Mart 6, 2020.

26. Gupta, L., Jain, R., Erbad, A., & Bhamare, D., The P-ART framework for placement of virtual network services in a multi-cloud environment, Computer Communications, 139 (March), 103–122, 2019.

27. Martins, J., Ahmed, M., Raiciu, C., Olteanu, V., Honda, M., Bifulco, R., Huici, F., Nsdi, I., ClickOS and the art of network function Virtualization. Symposium on Networked Systems Design and Implementation, Seattle-ABD, 459-473, 2-4 Nisan, 2014.

28. Murashka, U., Corporate network security levels, https://www.scnsoft.com/blog/3-levels-corporate-network-security, Yayın Tarihi 2019, Erişim Tarihi Mart 6, 2020.

29. Mininet: An Instant Virtual Network on your Laptop (or other PC) - Mininet, http://mininet.org/, Erişim Tarihi Ocak 18, 2019.

30. POX Controller Tutorial | SDN Hub, http://sdnhub.org/tutorials/pox/, Erişim Tarihi Haziran 21, 2019.

31. Ma, W., Jonathan, B., Pan, Z., Pan, D. and Pissinou, N., SDN-Based Traffic Aware Placement of NFV Middleboxes Wenrui. IEEE Transactions on Network and Service Management, 14 (3), 528–542, 2017.

32. Ma, W., Medina, C., & Pan, D., Traffic-aware placement of NFV middleboxes, IEEE Global Communications Conference, San Diego-ABD, 1-6, 6-10 Aralık, 2015.

33. Sahhaf, S., Tavernier, W., Rost, M., Schmid, S., Colle, D., Pickavet, M., & Demeester, P., Network service chaining with optimized network function embedding supporting service decompositions, Computer Networks, 93, 492–505, 2015.

34. Kim, S., Han, Y., & Park, S., An energy-Aware service function chaining & reconfiguration algorithm in NFV. IEEE 1st International Workshops on Foundations and Applications of Self-Systems, Augsburg-Almanya, 54–59, 12-16 Eylül, 2016.

35. Hirwe, A., & Kataoka, K., LightChain: A lightweight optimisation of VNF placement for service chaining in NFV, IEEE Conference and Workshops: Software-Defined Infrastructure for Networks, Clouds, IoT and Services, Seoul- Kore, 33–37, 10-11 Ekim, 2016.

36. Qi, D., Shen, S. and Wang, G., Towards an efficient VNF placement in network function virtualization, Computer Communications, 138, 81–89, 2019.

37. Addis, B., Belabed, D., Bouet, M. and Secci, S., Virtual network functions placement and routing Optimization, IEEE 4th International Conference on Cloud Networking, Niagara Falls-ABD, 171-177, 5-7 Ekim, 2015.

38. Luizelli, M. C., Bays, L. R., Buriol, L. S., Barcellos, M. P. and Gaspary, L. P., Piecing together the NFV provisioning puzzle: Efficient placement and chaining of virtual network functions, IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management, Ottawa-Kanada, 98-106, 11-15 Mayıs, 2015.

39. Xia, M., Shirazipour, M., Zhang, Y., Green, H., & Takacs, A., Network function placement for NFV chaining in packet/optical datacenters, Journal of Lightwave Technology, 33 (8), 1565–1570, 2015.

40. Xu, Q., Gao, D., Li, T., & Zhang, H., Low Latency Security Function Chain Embedding Across Multiple Domains, IEEE Access, 6, 14474–14484, 2018.

41. Rajabzadeh, M., Haghighat, A. T., and Rahmani, A. M., New comprehensive model based on virtual clusters and absorbing Markov chains for energy-efficient virtual machine management in cloud computing, The Journal of Supercomputing, 1-20. 2020.

42. Li, Z., Guo, S., Yu, L., and Chang, V., Evidence-Efficient Affinity Propagation Scheme for Virtual Machine Placement in Data Center, IEEE Access, 8, 158356-158368, 2020.

43. Tang, M., and Pan, S., A hybrid genetic algorithm for the energy-efficient virtual machine placement problem in data centers, Neural Processing Letters, 41 (2), 211-221, 2015.

44. He, M., Zhuang, L., Tian, S., Wang, G., and Zhang, K., DROI: Energy-efficient virtual network embedding algorithm based on dynamic regions of interest, Computer Networks, 166, 106952, 2020.

45. Guan, X., Choi, B. Y., and Song, S., Energy efficient virtual network embedding for green data centers using data center topology and future migration, Computer Communications, 69, 50-59, 2015.

46. Amiri, M., Al Osman, H., Shirmohammadi, S. and Abdallah, M., An SDN controller for delay and jitter reduction in cloud gaming, ACM international conference on Multimedia, 1043-1046, 23-26 Ekim, Brisbane-Avustutalya, 2015.

47. Steed, A. and Oliveira, M. F., Networked Graphics Building Networked Games and Virtual Environments, Elsevier, Amsterdam-Hollanda, 2010.

48. Yang, M., Li, Y., Jin, D., Zeng, L., Wu, X. and Vasilakos, A. V., Software-Defined and Virtualized Future Mobile and Wireless Networks: A Survey. Mobile Networks and Applications, 20 (1), 4–18, 2015.

49. Ma, W., Jonathan, B., Pan, Z., Pan, D. and Pissinou, N., SDN-Based Traffic Aware Placement of NFV Middleboxes Wenrui. IEEE Transactions nn Network and Service Management, 14 (3), 528–542, 2017.