

Fanet Ağlar için Düşük Gecikmeli Yönlendirme Protokolü

Low Latency Routing Protocol For Fanets

Sümeyye ÜNSÜR
Gebze Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği
Kocaeli, Türkiye
sunsur@gtu.edu.tr
ORCID: 0000-0002-2351-3074

Hasari ÇELEBİ
Gebze Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi / Bilgisayar Mühendisliği
Kocaeli, Türkiye
hcelebi@gtu.edu.tr
ORCID: 0000-0001-7633-5374

Öz

Kablosuz bir ağda iletişim gerçekleştirilmeden önce kaynak-hedef arasında veri paketlerinin gönderileceği yolun belirlenmesi gerekmektedir. İnsansız Hava Araçlarının (İHA) oluşturduğu Uçan Tasarsız Ağ (FANET) ağlarda İHA'ların hareketliliği kaynak-hedef arası bağlantının kısa sürede kopmasına, mevcut veri yolunun geçerliliğinin son bulmasıyla sık sık yeni iletişim yolunun seçilmesine yol açmaktadır. Bu çalışmada FANET ağlar için Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) protokolüne dayanan, RSSI değerli bağlantı kalitesine göre iletişim yol seçimi yapan yeni bir yönlendirme protokolü sunulmaktadır. Önerilen yönlendirme protokolünün başarımları OLSR ve Dynamic Source Routing (DSR) protokolleriyle paket teslim oranı, yönlendirme yükü ve uçtan uca gecikme kriterlerine bağlı olarak karşılaştırılmakta ve simülasyon sonuçları sunulmaktadır.

Anahtar Sözcükler: FANETs, MANETs, VANETs, OLSR, NS2 simülasyonu, Yönlendirme protokolü, RSSI.

Abstract

Before transmitting in a wireless network, the path to send data packets between the source and destination must be determined. In Flying Ad hoc Network (FANET) networks formed by Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), the mobility of UAVs causes the source-target connection to be broken in a short time, and the new transmission path is frequently selected as the existing data path expires. In this study, a new routing protocol for FANET networks is presented, based on the Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) protocol, which selects the transmission path according to the link quality with RSSI value. The performance of the proposed routing protocol is compared with OLSR and Dynamic Source Routing (DSR) protocols based on packet delivery rate, routing load and end-to-end delay criteria, and simulation results are presented.

Gönderme, düzeltme ve kabul tarihi: 28.06.2023 - 31.10.2023 - 16.12.2023

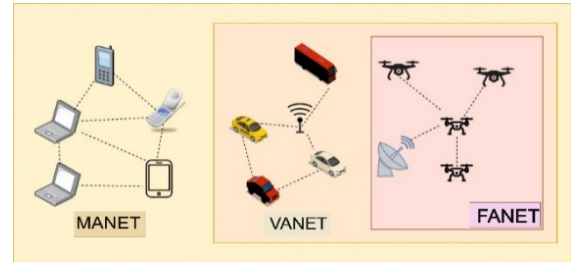
Makale türü: Araştırma

Key Words: FANETs, MANETs, VANETs, OLSR, NS2 simulation, Routing Protocol, RSSI.

1. Giriş

FANET, insan etkileşimi olsun veya olmasın bir hedefe ulaşmak için geçici bir ağ oluşturan bir İnsansız Hava Araçları grubudur [1]. Vehicular Ad Hoc Network (VANET) ağlara benzeyen FANET ağlar, Mobil Tasarsız Ağın (MANET) bir alt sınıfı olup [2], Şekil-1'de görsel olarak sunulmaktadır [3].

İHA kullanımı duyurulara, işlemci ve uygulamaların artmasından dolayı her geçen gün artmaktadır [4]. İHA'ların etkin haberleşebilmesini engelleyen zorlukların çözümü için çalışmalar yapılmasının, özellikle yönlendirme problemi için birçok yeni yönlendirme protokolü geliştirilmesinin ana sebebidir.



Şekil-1: VANET aracılığıyla MANET ve FANET ilişkisi

VANET ve MANET ile birçok benzer özelliğe sahip olan FANET ağlarda İHA'ların hızlı hareket etmelerine ve buna bağlı olarak hızlı topoloji değişim nedeniyle bağlantı ve yönlendirmeyi sürdürmek daha zordur [5][6].

Bu nedenle, bu çalışmada yönlendirme protokolüyle FANET ağlarda bağlantının sık kopma sorunundan kaynaklanan yönlendirme sorununun çözümü için bağlantı kalitesini sunan RSSI (Received Signal Strength Indicator) değerine bağlı olarak yeni bir yönlendirme protokolü önerilmektedir.

Bu makale şu şekilde düzenlenmiştir: 2. Bölüm yapılan çalışmayla benzer çalışmaları sunar ve aradaki farkları ortaya koyar. 3. Bölüm tasarsız mobil ağlarda yönlendirmenin nasıl

olduğunu, karşılaşılan zorlukları ve OLSR protokolünün temel yapısını sunar. 4. Bölüm, önerilen yönlendirme protokolünü anlatır. 5. Bölüm benzetim ortamı hakkında bilgi verir ve önerilen protokolün OLSR ve DSR protokolleriyle karşılaştırma benzetim sonuçlarını ortaya koyar. Son olarak, 6. Bölüm sonuçlar ve yorumlarla makaleyi sonlandırmaktadır.

1.1. Katkı ve Amaç

Günümüzde İnsansız Hava Araçlarının kullanımı oldukça artmıştır. Özellikle Askeri ya da Doğal afet olayları gibi bölgeden anlık bilgi alınmasının gerekli olduğu durumlarda kullanılmaktadır. İHA'ların oluşturduğu FANET ağda etkin iletişim gerçekleştirebilmek için çözülmesi gereken sorunlar bulunmaktadır. Bunlardan ilki yönlendirme problemi. Alt yapıdan bağımsız oluşturulan tasarsız bir ağda gerektiğinde tüm düğümler kapsama alanı içerisinde bulunmayan düğümlere erişimin sağlanabilmesi için yönlendirme görevi üstlenebilmektedir. Kaynak ve hedef arasında doğrudan bir ulaşım söz konusu olmadığında uygulanan yönlendirme protokolüne bağlı olarak kaynak düğüm kapsama alanı içerisinde bulunan komşu düğümlerden birine hedef düğüme ulaştırılması için paketini gönderir ve paket hedef düğüme ulaşana kadar belirlenen iletişim yolu üzerindeki tüm düğümlerde aynı işlem gerçekleştirilir. Kaynak ve hedef düğümler arasında çoğu zaman tek atlamalı komşu düğümlerin oluşturduğu birden çok yol mevcuttur ve olabilecek yollardan iletişim yolu yönlendirme protokolüne bağlı olarak seçilir. Ad Hoc Ağlar için geliştirilmiş yönlendirme protokolü FANET ağlarda etkin iletişim gerçekleştirebilmek için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle FANET ağlar için yeni yol seçim ölçüsü ne bağlı olarak iletişim yolunu belirleyen yeni yönlendirme protokolleri geliştirilmektedir. Yapılan çalışmalarda Ad Hoc Ağlar için var olan yönlendirme protokollerinin yol seçim ölçüleri değiştirilerek yeni bir yönlendirme protokolü geliştirilmektedir. Bu çalışmada da Ad Hoc Ağlar için tasarlanmış OLSR yönlendirme protokolüne dayalı yeni bir yönlendirme protokolü geliştirilmiştir.

Çalışma sonucunda FANET ağlar için kurulan senaryolardaki düğümlerin iletişim performansları arttırılmıştır. Network Simulator 2 (NS2) benzetim ortamında bulunan OLSR kodunda geliştirmeler yapılmıştır.

2. Kaynak Özetleri

Bu bölümde FANET ağlar için kaynaklarda bulunan yönlendirme protokolleri sunulmaktadır. [8] çalışmada, yazarlar OLSR tabanlı bir yönlendirme protokolü olan Cross-layer Optimized Link State Routing (C-OLSR) protokolü sunmuşlardır. C-OLSR, iletişim gerçekleştirmek için OLSR protokolü gibi Multi-point-relay (MPR) düğümleri kullanırken, olabilecek yollar arasından en az atlama sayılı yolu seçme yapısı FANET ağlarda yetersiz kaldığı için bu çalışmada düğümler arasındaki bağlantı kalitesini sunan Signal-to-Noise-Ratio (SNR) değerine bağlı olarak iletişim yollarını belirlemiştir.

[9] çalışmada ise, Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) yönlendirme protokolüne dayalı, düğümlerin Global Konumlandırma Sistemi (GPS) konum bilgisini kullanarak bağlantı geçerliliğini gösteren yeni bir ölçü ile Link Stability

Estimation-based Pre-emptive Routing (LEPR) yönlendirme protokolü sunulmaktadır. LEPR yönlendirme protokolünde, düğümler arasındaki bağlantı kalitesi ileri ve geri iletişim oranlarını kullanırken aynı zamanda düğümler arasındaki uzaklık ve düğümlerin hızları bağlantı kalitesine karar verirken kullanılmış diğer ölçülerdir. [10] çalışmada ise, yazarlar iki düğümün konumları, ilerleme yönleri ve hızlarına bağlı olarak hesaplanan bağlantı sona erme süresi ve atlama sayısı değerlerine göre bağlantının kalitesine karar verdikleri Link Aware on Demand Routing (LOAD) yönlendirme protokolünü sunmaktadır. Bağlantının geçerlilik süresinden kaynak düğüm ile hedef düğüm arasındaki atlama sayısı çıkarılarak elde edilen değer bağlantı kalite ölçüsü olarak sunulmakta ve mevcut yolların kararlılık değerlerine bağlı olarak en yüksek kararlılık yol iletişim yolu olarak belirlenmektedir.

Bir diğer çalışma olan Network Coding OLSR (NC-OLSR) yönlendirme protokolü [11]'de sunulmaktadır. Bu çalışmada, FANET'lerde iletişim için düğümler arasındaki bağlantı kalitesine bakılmaksızın iletişim için seçilebilecek tüm yollardan gönderilmek istenen veri paketleri kodlama sistemiyle gönderilmiş ve hedef düğüme tüm gönderilen paketlerin iletilmemesi durumunda dahi kaynak düğümden gönderilmek istenen tüm veri paketlerinin alınması sağlanmıştır.

[12]'de düğümlerin hareketliliğinden dolayı OLSR ve diğer yönlendirme protokollerinin sorunları ve FANET ağlardaki hareketliliğe uyum sağlayabilen Position-based OLSR (P-OLSR) yönlendirme protokolü sunulmaktadır. Bu makalede, düğümler Hello paketler aracılığıyla komşularının konumlarından haberdar olur ve sunulan Expected Transmission Count (ETX) ölçüsü ne göre iletişim yolu seçimini yaparlar.

[13]'te sunulan Directional Optimized Link State Routing Protocol (DOLSR) protokolü OLSR tabanlı bir protokol olup MPR sayısını azaltmayı hedeflemektedir. Bu protokolda, MPR seçim mekanizması için yönlü anten kullanımından yararlanılır ve OLSR protokolünün tamamen devre dışı bırakıldığı yönlendirme protokolü değildir. İletim yolu, kaynak ve hedef arasındaki uzaklık belirlenen üst uzaklıktan fazla ise OLSR yönlendirme protokolüne aksi takdirde DOLSR yönlendirme protokolüne bağlı olarak belirlenir.

[14]'de sunulan yönlendirme protokolünde ana hedef yüksek hızlı düğümlerin MPR düğüm olarak seçilmemesidir. Düğümlerin kararlılığına ve ulaşılabilirliğine bağlı olarak iletişim yolu seçimi uygulanır.

[15] çalışmada ise, OLSR protokolünün hızlı topoloji değişikliklerine uyum sağlayabilecek ve iletişimin kesintiye uğramasını önleyebilecek yeni bir formu sunulmaktadır. Bu protokol düğüm bağlantısının sona erme süresini hesaplamak ve artık enerjiyi hesaba katmak için GPS bilgilerini tam olarak kullanmayı hedefler. Bu makaledeki yönlendirme protokolü deniz sahnelerinde küçük uçan robotların iletişim gerçekleştirebilmeleri için tasarlanmıştır.

Bir diğer ilişkili çalışma olan Link-Quality and Traffic-Load Aware OLSR (LTA-OLSR) [16]'de sunulmaktadır. Bu protokolda iletişim yolu belirlenirken kullanılacak bağlantı kalite fiziksel

katman bilgisi olan RSSI değeridir. [18] çalışmasında ise, LTA-OLSR protokolü için belirlenen bağlantı kalite metriği AODV protokolünde bağlantı kalitesi olarak uygulanmakta ve elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Bu iki çalışmada diğer yönlendirme protokollerinden farklı olarak haberleşme için kullanılan kanalların meşgulliyet durumları da göz önüne alınarak iletişim yolu belirlenmektedir.

Yapılan çalışmada kaynaklardaki diğer çalışmalardan farklı olarak fiziksel katman bilgisi olan RSSI ölçüsü bağlantı kalitesi seçilmiştir. Fiziksel katmandan elde edilebilen bilgi iki düğüm arasındaki bağlantının geçerlilik süresinin tahminini sağlamaktadır. Bu bilgi ışığında en uzun süre bağlantıda kalması beklenen komşu düğümler iletişim yolunda yönlendirici düğüm olarak rol alırlar. Bağlantı kalitesini sunan birçok fiziksel katman ölçüsü bulunmaktadır. Ancak hem bağlantı kalitesini doğru yansıttığı hem de diğer ölçülerden daha hızlı hesaplanmasından dolayı RSSI ölçüsü bağlantı kalitesini belirleyici ölçü olarak seçilmiştir. LTA-OLSR makalesinde de bağlantı kalite ölçüsü olarak RSSI değeri kullanılmaktadır. Ancak LTA-OLSR protokolünde iki düğüm arasında tek bir RSSI değeri değil alınan birden çok RSSI değerlerine bağlı olarak ortalama RSSI değeri elde edilmesi ve bağlantı kalite ölçüsünün buna bağlı olarak belirlenmesi iki protokol arasındaki farktır. [17] makalesinde, RSSI değerinin bir bağlantının çok iyi kalitede olup olmadığına dair hızlı ve doğru bir tahmin sağlayabileceği, kısa bir zaman aralığında çok kararlı olduğu için bağlantının geçiş bölgesinde olup olmadığını belirlemek için tek bir RSSI okumasının yeterli olacağı bilgisi verilmektedir. Bu nedenle birlikte birden çok RSSI değerinin ölçülmesinde yaşanacak vakit kaybını ve bellek gereksinimini engellemek için önerilen protokol tek bir RSSI değer okuması üzerinden bağlantı kalitesine karar verilerek geliştirilmiştir. İlgili makalenin simülasyon sonuçlarına bakıldığında ağ senaryosundaki düğüm sayısının çokluğundan dolayı yönlendirici düğümler tarafından ulaşılamayan düğüm sayısı az olduğu için paket teslim oranında da iyileşmeler sunmuştur. Ancak bu çalışmada uçtan uca gecikme ölçüsüne ve yönlendirme yükü ölçüsüne göre önemli iyileşmeler sunulmaktadır.

3. Tasarsız Mobil Ağlarda Yönlendirme

Altyapıdan bağımsız olan Tasarsız Mobil ağlarda aygıtlar iletişim kurabilmek için herhangi bir aracıya gerek duymamaktadırlar. İletişim kurmak istedikleri aygıt kapsama alanlarında olmadığı durumda komşu aygıtlar üzerinden hedef aygıtı paketlerini iletebilirler.

3.1. Uçan Tasarsız Ağların Özellikleri ve Sorunları

Son yirmi yıldır üzerinde oldukça fazla çalışma yapılan MANET ağlar, özellikle son on yılda teknolojinin elvermesiyle yeni uygulama alanları bulan İHA üzerinde uygulanabilir hale gelmeye başlamıştır [19]. Hareketli tasarsız ağların kapsadığı İHA'ların bir arada haberleşebilmesini sağlayan FANET ağlar, ağdaki düğümlerin hareket hızlarının çok yüksek olması ve ağ senaryosunun daha geniş alanı kapsaması gibi nedenlerden hareketli tasarsız ağlardan ayrılmaktadır [20]. FANET ağlarda düğümlerin başlangıçtaki konumlarını koruyan bir yol izlemesi halinde ağ iletişimi hareketli tasarsız ağlara benzer sonuçlar

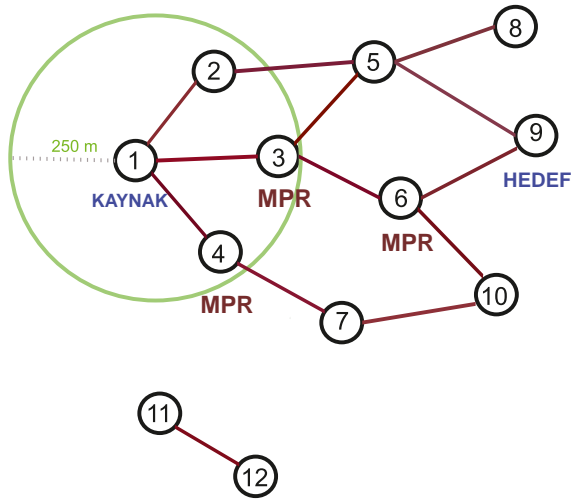
vermesi beklenir. Ancak gerçekleştirilen senaryolarda bu durum gözlenememektedir. FANET ağda iletişim gerçekleştirirken düğümler kısa süre içerisinde buldukları konumu terk ederek topolojinin sık değişimine sebep olmaktadır. Bu nedenden dolayı hareketli tasarsız ağların bir parçası olmasına karşın FANET ağlarda iletişim gerçekleştirmek için tasarlanmış yönlendirme protokollerinin yetersiz kalması sonucu FANET ağlar için yeni yönlendirme protokolleri geliştirilmesi gerekmektedir.

3.2. OLSR

OLSR, MANET ağlar için bir önalın yönlendirme protokolüdür [21]. Önalın yönlendirme protokolü, her düğümün ağdaki diğer tüm düğümlere bir yol bilgisi tutma ilkesine dayanır. Böylelikle ağda iletişim gerçekleştirmek istendiğinde iletişim gerçekleştirecek düğümler arasında yol bulma işlemi için zaman kaybı yaşanmaz. Bu nedenle sunulan çalışma önalın bir yönlendirme protokolü üzerine dayandırılmıştır. Yönlendirme protokollerinin görevi birbirlerinin kapsama alanı içerisinde olmayan iki düğüm arasında iletişim gerçekleştirilebilmesi için iletişim yolunun belirlenmesini sağlamaktır. Önalın yönlendirme protokolü olan OLSR protokolünde her düğüm ağdaki tüm düğümler için etkin bir yolu tablosunda saklar. OLSR protokolünün temelde üç paket yapısı ve kontrol paket sayısını azaltan bir mekanizması vardır. Bunlar HELLO mesaj paketi, TC (Topoloji Control) mesaj paketi ve MID (Multiple Interface Declaration) mesaj paketi ve MPR mekanizmasıdır [6]. OLSR yönlendirme protokolü yol belirleme işlemi Hello, TC ve Mid mesaj bilgisine bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. OLSR yönlendirme protokolünün en önemli yapısı olan MPR mekanizması, ağdaki paket yükünü azaltmak için geliştirilmiş, iki atlamalı komşuların tamamını örtbilecek en az sayıda tek atlamalı düğümler listesidir.

Şekil-2'de 250 m kapsama alanına sahip 10 düğümün oluşturduğu bir ağ senaryosu üzerinden OLSR protokolünün çalışma mantığı sunulmaktadır. Bu ağda iletişimin başlayabilmesi için OLSR protokolünün çalışma mantığına göre öncelikle ağdaki her düğümün Hello paketlerini çoklu yayınlaması, paketi alan her düğümün mesaj içeriğinde bulunan kaynak düğüm için tek atlamalı ve iki atlamalı komşular listesini oluşturması gerekmekte ve komşu listesine göre ağdaki tüm hedef düğümler için tutulan iletişim yolları tablosuna yeni kayıt ekleme ya da kayıt güncelleme işlemi gerçekleştirmelidir. Şekildeki 1 numaralı düğüm için tek atlamalı komşu düğümler 2, 3 ve 4 iken iki atlamalı komşular listesini 5, 6 ve 7 numaralı düğümler oluşturmaktadır. Şekilde birbirlerinin kapsama alanına giren düğümlerin belirtilebilmesi için aralarında bağlantılar çekilmiştir. Bağlantılar çift yönlüdür. Alınan her Hello paketinden sonra MPR düğümlerin seçimi gerçekleşir ve MPR düğümler tarafından gönderilen TC mesajları aracılığıyla ağ topolojisi tüm düğümlere sunulur. Ağ topoloji bilgisine bağlı olarak her düğüm kendinden ağdaki diğer tüm düğümlere en az atlama sayılı iletişim yolunu tablosuna kaydeder. Bu işlem için öncelikle gelen paketteki kaynak ve hedef düğümler için tablosunda kayıt bulundurmayan düğüm ilgili düğümler için kayıt ekler ancak mevcut bir kayıt olması durumunda atlama sayılarına bağlı yapılan karşılaştırma sonucu tablosundaki kaydı günceller ya da gelen paketi dikkate almaz. İletişim

yolları belirlendiğinde ağdaki her düğüm diğer tüm düğümlere paket gönderme işlemine başlayabilmektedir. Ancak herhangi bir düğüm üzerinden ulaşamayan düğümlere iletişim gerçekleştirilemez. Şekildeki 11 ve 12 numaralı düğümlerin diğer düğümlerle komşuluğu olmadığı için onlar sadece kendileri arasında iletişim gerçekleştirebilirler. Hareketliliğe ya da düğümün etkinlik durumlarına bağlı olarak yol, geçerliliğini yitirdiğinde dönüşümlü olarak iletilen paketlerin bilgisi aracılığıyla iletişim yolları güncellenir. Şekilde 1 kaynak düğümüyle 9 hedef düğümü arasında en az atlama sayılarına sahip olduklarından dolayı 1-2-5-9 ya da 1-3-6-9 yollarından biri iletişim yolu olarak belirlenecektir. Bu iki yol arasında ise 1 düğümüne ilk Hello paketini gönderen düğüm 2 olarak varsayıldığında iletişim yolu 1-2-5-9 yolu olarak belirlenmekte ve yol geçerliliğini kaybedene kadar iletişim gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil-2: OLSR'ın çalışma mantığı

3.3. Bağlantı Kalitesi Tahmin Ediciler

Telsiz ağlarda bağlantının kalitesinin tahmin edilebilmesi için donanım ve yazılım tabanlı bağlantı kalitesi tahmin ediciler bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda listelenmektedir.

Donanım Tabanlı Olanlar:

- RSSI
- SNR

Yazılım Tabanlı Olanlar:

- RNP

RSSI, -28dBm ile -127dBm arasında değerler alabilen donanım tabanlı bağlantı kalitesi tahmin edicidir. Bir bağlantının çok iyi kalitede olup olmadığına dair hızlı ve doğru bir tahmin sağlayabilmesi, kısa bir zaman aralığında çok kararlı olması (standart sapma 1 dBm'den az) nedenleriyle iki düğüm arasında tek bir RSSI okuması (bir paket alımı üzerinden) bağlantının geçiş bölgesinde olup olmadığını belirleyebilmektedir. Ayrıca donanım tabanlı olması nedeniyle değerler herhangi bir işlem uygulanmadan düğümler arasındaki bağlantı kalitesini temsil edebilmesi çalışmada bağlantı kalite ölçüsü olarak seçilmesini sağlamıştır. İki düğüm arasında bağlantının ne kadar süreceğini tahmin etmek için kullanılan başka bir ölçüde SNR'dır. SNR, alınan

sinyal ile arka gürültü gücü arasındaki orandır. SNR değerini elde edebilmek için alıcı RSSI değeri yanında arka plan gürültüsünü de ölçmek zorundadır. RNP gönderici tarafında hesaplanan bir değerdir. Başarılı bir alımdan önce gönderilmesi gereken ortalama paket iletişim/yeniden iletişim sayısına bağlıdır. Bu ölçü aşağıdaki (1) numaralı formüldeki gibidir.

$$RNP = \frac{\text{İletilen \ Yeniden İletilen Paket Sayısı}}{\text{Başarılı Alınan Paket Sayısı}} \quad (1)$$

Gönderici tarafından gönderilen paket durumuna bağlı olarak hesaplanan RNP değeri ve RNP değerine benzer yazılım tabanlı bağlantı kalite ölçü değerlerinin elde edilmesi sürekli değildir. RNP değerinin hesaplanabilmesi için göndericinin sürekli paket göndermesi gerekmektedir, göndericiden üretilen trafik olduğu sürece bağlantı kalitesi tahminleri sağlanabilir.

4. Önerilen Yönlendirme Protokolü

FANET ağlarda düğümlerin hızlı hareket etmelerine bağlı olarak topolojinin sık sık değişimi nedeniyle tasarsız ağlar için tasarlanmış mevcut yönlendirme protokolleriyle verimli iletişim gerçekleştirilememektedir. Bu nedenle FANET ağlarda iletişimi geliştirmek için düğümler arasındaki bağlantı kalitesinin ölçülebilmesi ve iletişim yolunun ölçülen değere bağlı olarak belirlenmesi daha iyi sonuçlar elde etmeyi sağlar.

Bu çalışmada bu bilgiler ışığında OLSR tabanlı yeni bir yönlendirme protokolü geliştirilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde önerilen protokole yapılan geliştirmeler ve protokolün özellikleri sunulmaktadır. OLSR yönlendirme protokolünün ayrıntılarından bahsedilerek paket yapılarında, tablo yapısında ve temel çalışma ilkelerinde yapılan değişikliklerden bahsedilmektedir.

4.1. Önerilen Protokole Genel Bakış

OLSR yönlendirme protokolünde amaç ağdaki düğümlerin birbirleriyle etkin bir şekilde iletişim kurabileceği yolu belirlemek için her düğümün ağdaki tüm hedef düğümlere tablosunda bir yol tutmasını sağlamaktır. Bu protokole Hello ve TC mesaj paketleri aracılığıyla her düğümün ağ topolojisinden haberdar olarak tablolarını oluşturması sağlanmaktadır. OLSR hedef tablo bilgisini oluştururken ağdaki tüm düğümler için olabilecek en az atlama kriterine bağlı olarak seçimler yapar. Ancak diğer bölümlerde açıklandığı üzere FANET ağlarda bu kriter yetersiz kalmakta ve bu nedenle geliştirilen yönlendirme protokolünde bağlantı kalitesini sunan farklı bir ölçü uygulanmaktadır.

Düğümler arasındaki bağlantı kalitesini sunan birçok değer mevcuttur. Bu makalede fiziksel katman değeri olan RSSI ölçüsüne bağlı olarak düğümler arası bağlantı kalitesi belirlenmiş ve kaynak-hedef arasında bulunan yollar arasından iletişim yolu bu değere bağlı olarak seçilmiştir. Her düğüm komşusu olduğunu öğrendiği düğümden aldığı RSSI değerini fiziksel katmandan almaktadır. Kendi ile komşusu arasındaki RSSI bilgisini bağlantı kalite ölçüsü olarak Hello ve TC mesaj paketleriyle ağda iletir. Düğüm, OLSR protokolündeki gibi kontrol paketleri aracılığıyla ağdaki tüm düğümlerin ulaşılabilirliğini ve arasındaki bağlantı kalitesini

bilginin yayınlanabileceği bir yapı olmadığı için tek atlamalı komşular için bu yapı, komşularıyla olan bağlantının kalite bilgisini alan her düğümün tek atlamalı komşular bilgisini sunduğu Hello mesaj paketi ile bu bilgiyi sunması sağlanmaktadır.

Hello mesaj paketi yapısında yapılan değişiklikler Şekil-5'te sunulmaktadır. Önerilen protokolün mesaj paket yapısı, OLSR protokolünün Hello mesaj paket yapısına RSSI değerinin taşınabileceği bir alanın eklenmiş halidir. Görüldüğü üzere mesaj paketi yapısında komşu bilgilerinin sunulduğu alanlardan önce her komşu için ayrı ayrı mesaj paketini gönderen düğümle arasındaki RSSI değeri taşınmaktadır.

0					1					2					3																			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4
Reserved										Htime					Willingness																			
LinkCode					Reserved					Link Message Size																								
RSSI of Neighbor Interface Address 1																																		
Neighbor Interface Address 1																																		
RSSI of Neighbor Interface Address 2																																		
Neighbor Interface Address 2																																		

Şekil-5: Tasarlanan Protokolün Hello mesaj paket formatı

Şekil-6'da ise, topolojide RSSI değerinin taşınabilmesi için TC mesaj paketi yapısında yapılan değişiklikler sunulmaktadır. RSSI1 ve RSSI2 alanları OLSR protokolünün TC mesaj paket yapısı içerisine eklenmiş alanlardır. Üç ve daha fazla atlamalı komşuların kendi komşularıyla aralarındaki bağlantı kalite bilgisine ulaşılabilirliği sağlamak için TC mesaj paketleri içerisine RSSI değerleri eklenerek yeni bir paket yapısı oluşturmadan var olan OLSR paketlerini güncelleyerek gerekli bilgilerin elde edilmesi sağlanmıştır.

ANSN		Reserved	
Advertised Neighbor Main Address			
Advertised Neighbor Main Address			
.....			
ANSN		Reserved	
Advertised Neighbor Main Address			
RSSI1			
Advertised Neighbor Main Address			
RSSI2			
.....			

Şekil-6: OLSR ve Önerilen Protokolün TC mesaj paket formatları

4.4. OLSR ve Önerilen Protokol Yönlendirme Tabloları

RSSI değerlerinin tüm düğümler tarafından öğrenilmesini sağlamak kaynak-hedef düğüm arasında bulunan yollar arasında seçilmesi gereken yolun belirlenebilmesi için yeterli değildir. Çünkü tablosunda RSSI değeri tutulmadığı için tabloya kaydolmuş yol ile yeni yolun karşılaştırılabilmesi mümkün değildir. Bu nedenle yönlendirme tablosuna kaydedilen her yol için RSSI değerinin tutulabileceği bir alan eklenmesi gerekmektedir ve böylelikle olabilecek yolların RSSI değerine bağlı olarak karşılaştırılması sağlanabilmektedir.

OLSR protokolünde yönlendirme tablosuna kayıt ekleme işleminde kaynak-hedef arası olabilecek tüm yolların karşılaştırılması atlama sayısı kriterine göre yapılmakta iken tasarlanan protokolde atlama sayısı kriterinin yerini RSSI değeri almaktadır. Şekil-7'de görüldüğü üzere yönlendirme tablosunda bulunan atlama sayısı alanı RSSI değeri olarak değiştirilmiştir. Her düğüm gelen paketler içerisinden RSSI değerine göre ağdaki tüm hedeflere bir iletişim yolu belirler. Her alınan paketle ya paket hedef bilgisi için ilk yol kaydı oluşturulur ya da yeni yolun RSSI değeri tabloda mevcut olan yolun RSSI değerinden büyükse kaynak ve hedef arasındaki var olan yolun güncellemesi yapılır.

Destination Address
Next Address
Iface address
Distance

Destination Address
Next Address
Iface address
RSSI

Şekil-7: OLSR ve Önerilen protokolün Yönlendirme Tablo Yapıları

Bölüm-4'te sunulan yönlendirme protokolünün akış şeması Şekil-8'de sunulduğu gibidir. Şema önerilen yönlendirme protokolünün kaynak ve hedef arasındaki iletişim yolunun belirlenmesi için gerekli tüm adımları içermektedir.

5. Benzetim Ortamı ve Sonuçları

Bu bölümde önerilen yönlendirme protokolünün başarımlı değerlendirilmesi bilgisayar benzetim ortamında uçan tasarsız bir ağ senaryosunda ele alınmıştır.

Benzetim sonuçları OLSR ve DSR protokolleri ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları, paket teslim oranı, yönlendirme yükü ve uçtan uca gecikme ölçülerine bağlı olarak sunulmaktadır.

5.1. Benzetim Ortamı

Önerilen yönlendirme protokolü, OLSR ve DSR protokollerinin karşılaştırılması için kurulan senaryo NS2 simülatör ortamında gerçekleştirilmiştir. Önerilen yönlendirme protokolünün karşılaştırılmasında benzetim senaryo parametreleri Çizelge-1'de verilmiştir. Senaryo süresi 100 saniye olup ilk saniyelerden son saniyeye kadar iletişim gerçekleştirilmiştir.

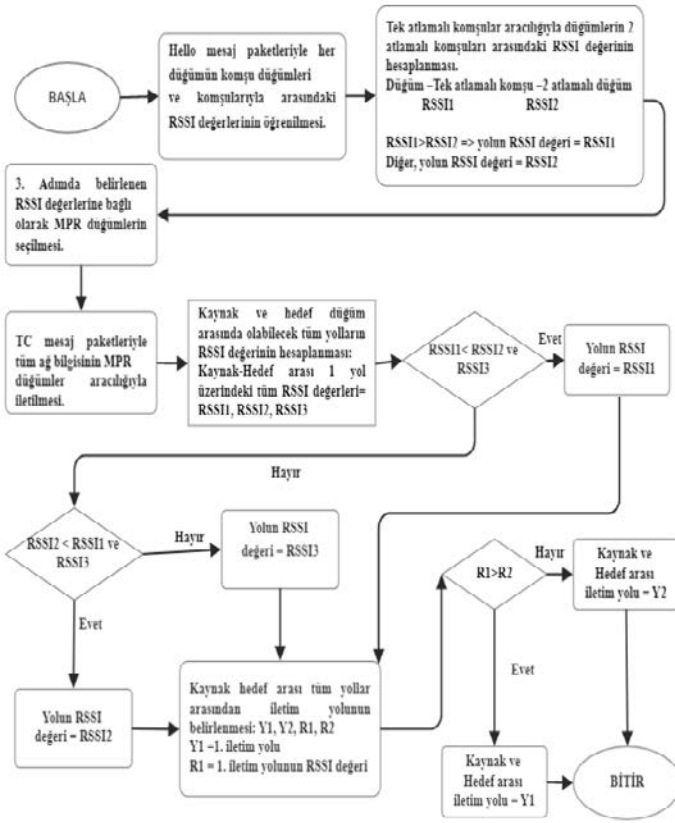
Benzetim senaryosunda düğümler 40 m/s, 50 m/s, 70 m/s, 80 m/s, 90 m/s hızlarıyla hareket etmekte ve hız değişimine bağlı olarak kurulan ağın sonuçları incelenmiştir. Senaryodaki tüm düğümler hareketli olup simülasyon başlangıcında hareket etmeye başlamaktadırlar. Senaryo gereği düğümlerin sabit hızla hareket etmeleri gerektiği için simülasyon boyunca düğümler başlangıç hızlarını korumuşturlar. Kurulan ağ içerisinde 15 düğüm bulunmakta ve her düğüm birbiriyle çift yönlü bağlantıya sahiptir.

Benzetim, ns-2.35 sürümünün ubuntu 20.04 işletim sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. OLSR ve önerilen yönlendirme

protokolü üç ölçüyle karşılaştırılmıştır. Bu ölçüler, Paket Teslim Oranı, Yönlendirme Yükü ve Uçtan Uca Gecikmedir.

Çizelge-1 Benzetim Parametreleri

Parametre	Değer	Referanslar
Simülatör	NS2	[12]
Ağ Boyutu	1000 m X 1000 m X 1000 m	[12]
Simülasyon Süresi	100 s	[12]
Düğüm Sayısı	15	[2]
Kapsama Alanı	250 m	[12]
Trafik Tipi	Constant Bit Rate (Cbr)	[2]
Paket Boyutu	512bytes	[16]
Mac Protocol	IEEE 802.11p	[16]
Düğüm Hızı	40-90m/s	[14]
Hareketlilik Modeli	Random Way Point	[2]
Yönlendirme Protokolleri	OLSR, DSR, Önerilen Protokol	[16]



Şekil-8: Önerilen Yönlendirme Protokolün Akış Şeması

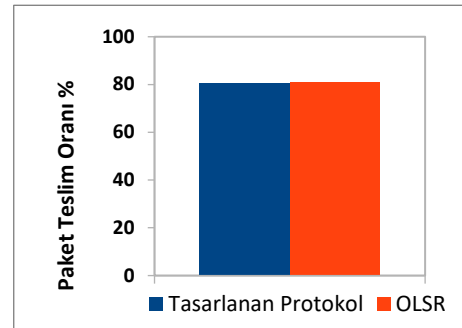
5.2. Benzetim Sonuçları

Bu bölümde, önerilen protokolün OLSR ve DSR protokolleriyle NS2 simülatöründe paket teslim oranı, yönlendirme yükü ve uçtan uca gecikme ölçülerine göre karşılaştırılma sonuçları sunulmaktadır.

Düğümün hareket hızlarına bağlı olarak farklı senaryolar kurulmakta, her senaryoda rasgele düğümler arasında paket iletişimi gerçekleştirilmektedir. Geliştirilen protokolde düğümlerin hızlarındaki artışa bağlı olarak iyileşmeler sunması beklenmektedir. OLSR ve DSR hareketli düğümlerin oluşturduğu MANET ağlar için geliştirilmiştir. Düşük hızlarda FANET ağ senaryosu MANET ağ senaryosuna benzeyebilmektedir. Bu nedenle düğüm hızları minimum 40 m/s olacak şekilde ayarlanmıştır. Senaryo benzetim süresi boyunca rastgele düğümler arasında paket gönderimi gerçekleştirilmiştir. Sunulan çalışmada geliştirilen protokolün bağlantı kalitesine bağlı olarak yol seçimi yapıldığı için uçtan uca gecikme ve yönlendirme yükünde iyileşmeler sunması hedeflenmektedir.

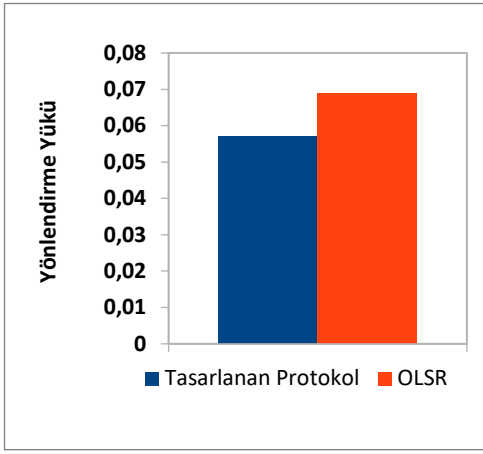
Düğüm hızlarının 40 m/s olduğu sınıma: Bu topoloji de ağ parametreleri yukarıda verildiği gibidir. 15 düğüm rastgele konumlandırılmış ve düğüm sayısı kadar rastgele seçilen her ikili düğüm arasında iletişim gerçekleştirilmiştir. Bu sınıma için sonuçlar aşağıda sunulduğu gibidir.

Şekil -9'de görüldüğü üzere düğümlerin 40 m/s hızında hareket ettikleri senaryoda OLSR ve Önerilen Protokol paket teslim oranı olarak benzer sonuçlar üretmiştir. Düğümlerin başlangıç konumlarının ve hareket konumlarının rastgele atanmasına bağlı olarak senaryo gereği iletişim yapılmak istenen düğüme herhangi bir düğüm üzerinden erişebilirliğin olmaması durumlarında bağlantı kalitesine bağlı olarak yol belirlenmesine rağmen paket teslim oranında iyileşmeler elde edilememiştir.

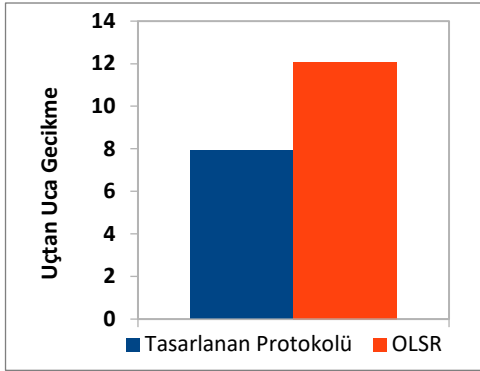


Şekil-9: 40m/s Hızına sahip düğümlerin oluşturduğu ağın paket teslim oranı.

Şekil-10'daki Yönlendirme yükü ve Şekil-11'deki uçtan uca gecikme yükü ölçülerine göre Tasarlanan Protokol OLSR protokolünden daha iyi sonuçlar sunmuştur. OLSR 3 ve daha fazla atlamalı komşularına erişim sağlamak için kaynak düğümün MPR düğüm üzerinden paket gönderebilmesine imkan sunmaktadır. Bu da MPR düğümlerin aynı anda birden fazla iletişimi gerçekleştirmek için kullanılmasını gerektirmektedir. Kaynak ve hedef arasında iletişim yolu kurulabilmesine rağmen MPR düğümlerin yoğunluğuna bağlı olarak paket düşmeleri ya da paket iletilmek üzere bekletilirken iletişim yolunun geçerliliğini kaybetmesi durumlarından dolayı paket simülasyon süresi içerisinde teslim edilebilse dahi yönlendirme yükü ve uçtan uca gecikme ölçülerine göre kötü sonuçlar sunmuştur.



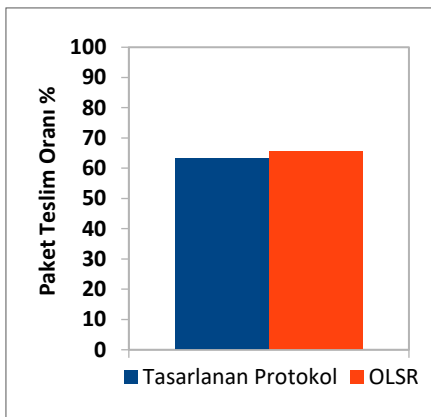
Şekil-10: 40 m/s hızı sahip düğümlerin oluşturduğu ağın yönlendirme yükü.



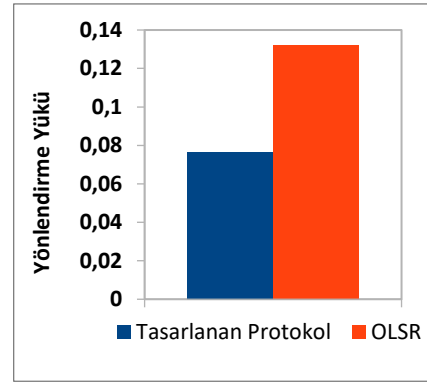
Şekil-11: 40 m/s hızı sahip düğümlerin oluşturduğu ağın uçtan uca gecikme.

Düğüm hızlarının 50 m/s olduğu sınıma: Bu senaryo için düğüm hızları 50 m/s olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sınıma için sonuçlar aşağıda sunulduğu gibidir.

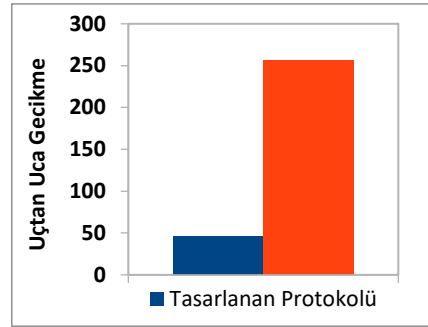
Şekil-12'de görüldüğü üzere düğümlerin 50 m/s hızında hareket ettikleri senaryoda OLSR ve Tasarlanan Protokol paket teslim oranı olarak benzer sonuçlar üretmiştir. Tasarlanan protokol ile OLSR performansları hareket ve bağlantılı düğümlerin rastgele olmasından dolayı birbirlerine yakın çıkabilmektedir. Şekil 13'deki Yönlendirme yükü ve Şekil-14'deki uçtan uca gecikme yükü ölçülerine göre Tasarlanan Protokol, OLSR protokolünden daha iyi sonuçlar sunmuştur.



Şekil-12: 50 m/s hızı sahip düğümlerin oluşturduğu ağın paket teslim oranı.



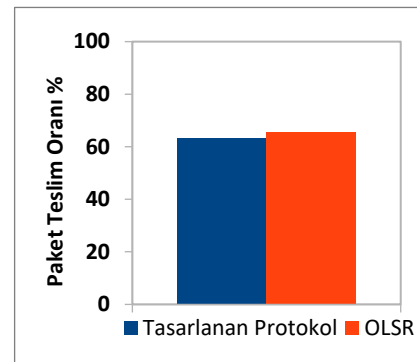
Şekil-13: 50 m/s hızı sahip düğümlerin oluşturduğu ağın yönlendirme yükü.



Şekil-14: 50 m/s hızı sahip düğümlerin oluşturduğu ağın uçtan uca gecikme.

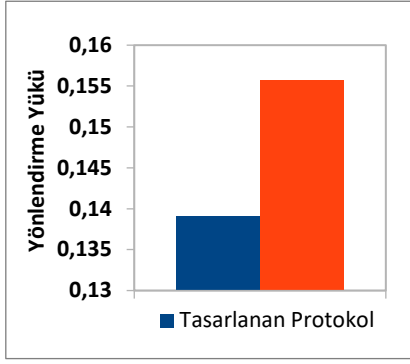
Düğüm hızlarının 70 m/s olduğu sınıma: Bu benzetimde 15 düğüm başlangıçta rastgele konumlandırılmış ve 70 m/s hızıyla birlikte rastgele belirlenmiş konumlara hareket etmeleri sağlanmıştır. Bu sınıma için sonuçlar aşağıda sunulduğu gibidir.

Bu senaryoda düğümlerin 70 m/s hızıyla hareket etmelerine rağmen düğümlerin rastgele konumlandırılmalarına bağlı olarak 40 m/s hızıyla ya da 50 m/s hızıyla hareketin gerçekleştiği senaryolardan uçtan uca gecikme ölçüsü ne göre daha iyi sonuçlar sunulmuştur.

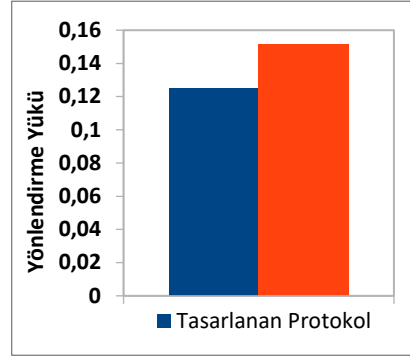


Şekil-15: 70 m/s hızı sahip düğümlerin oluşturduğu ağın paket teslim oranı.

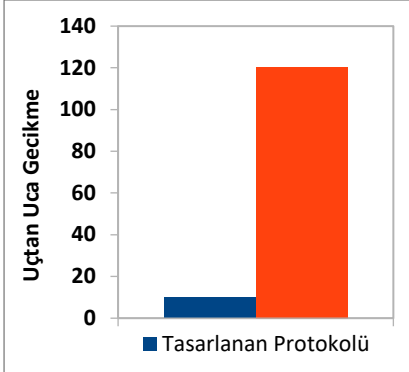
Şekil-15'te görüldüğü üzere düğümlerin 70 m/s hızında hareket ettikleri senaryoda OLSR ve Tasarlanan Protokol paket teslim oranı olarak benzer sonuçlar üretmiştir. Şekil 16'deki Yönlendirme yükü ve Şekil-17'deki uçtan uca gecikme yükü ölçülerine göre Tasarlanan Protokol OLSR protokolünden daha iyi sonuçlar sunmuştur.



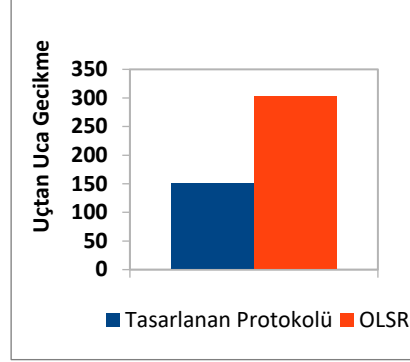
Şekil-16: 70 m/s hızı sahip düğümlerin oluşturduğu ağıın yönlendirme yüğü.



Şekil-19 80 m/s hızı sahip düğümlerin oluşturduğu ağıın yönlendirme yüğü.



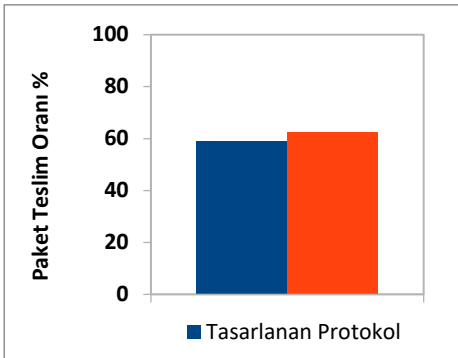
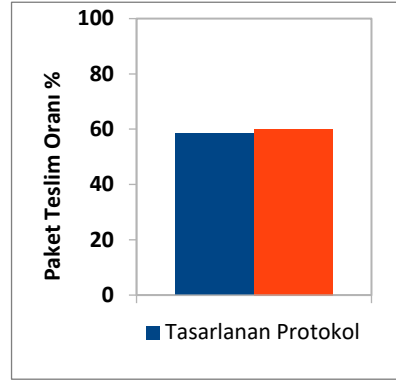
Şekil-17: 70 m/s hızı sahip düğümlerin oluşturduğu ağıın uçtan uca gecikme.



Şekil-20 80 m/s hızı sahip düğümlerin oluşturduğu ağıın uçtan uca gecikme.

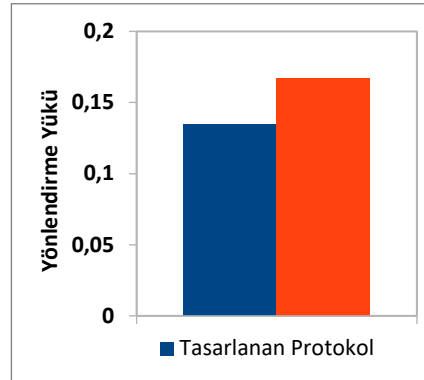
Düğümler hızlarının 80 m/s olduğu sına: Bu benzetimde 15 düğümler başlangıçta rastgele konumlandırılmış ve 80 m/s hızıyla birlikte rastgele belirlenmiş konumlara hareket etmeleri sağlanmıştır. Bu sına için sonuçlar aşağıda sunulduğu gibidir.

Şekil 18'de görüldüğü üzere düğümler 80 hızında hareket ettikleri senaryoda OLSR ve Tasarlanan Protokol paket teslim oranı olarak benzer sonuçlar üretmiştir. Şekil 19'deki Yönlendirme yüğü ve Şekil 20'deki uçtan uca gecikme yüğü ölçülerine göre Tasarlanan Protokol OLSR protokolünden daha iyi sonuçlar sunmuştur.



Şekil-18 80 m/s hızı sahip düğümlerin oluşturduğu ağıın paket teslim oranı.

Şekil-21 90 m/s hızı sahip düğümlerin oluşturduğu ağıın paket teslim oranı.

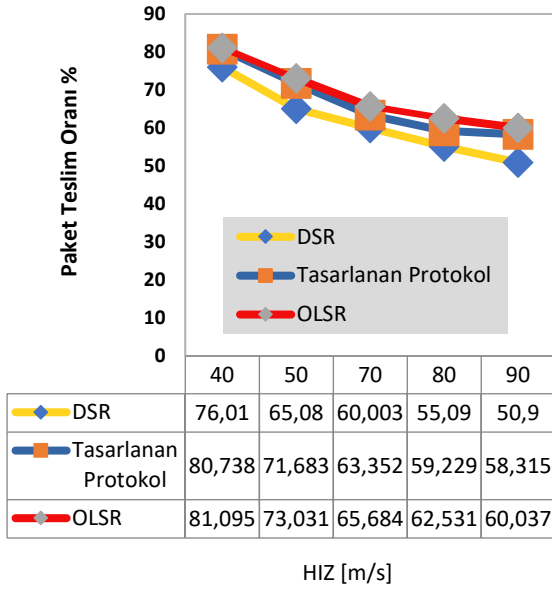


Şekil-22 90 m/s hızı sahip düğümlerin oluşturduğu ağıın yönlendirme yüğü.

Düğümler hızlarının 90 m/s olduğu sına: Bu benzetimde düğümler 90 m/s hızıyla birlikte rastgele belirlenmiş

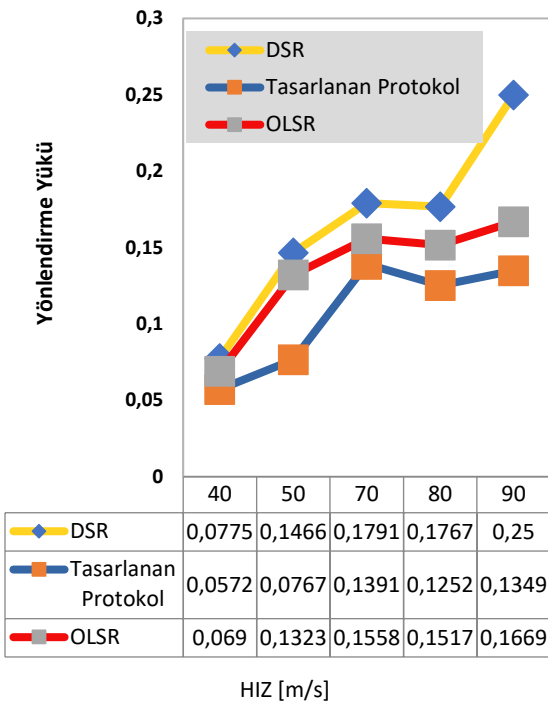
konumlara hareket etmeleri sağlanmıştır. Bu sınama için sonuçlar aşağıda sunulduğu gibidir.

Şekil-21'de görüldüğü üzere düğümlerin 90 m/s hızında hareket ettikleri senaryoda OLSR ve Tasarlanan Protokol paket teslim oranı olarak benzer sonuçlar üretmiştir. Şekil-22'deki Yönlendirme yükü ölçüsü ne göre Tasarlanan Protokol OLSR protokolünden daha iyi sonuçlar sunmuştur.



Şekil-23 Paket Teslim Oranı Sonuçları.

Şekil-23'de ise, farklı senaryolara üç protokolün sunduğu paket teslim oran yüzdelere göre çizilmiş bir grafik sunulmaktadır. Grafiğe bakıldığında geliştirilen protokolün OLSR protokolü ile benzer sonuçlar sunarken DSR protokolünden daha iyi sonuçlar sunduğu görülmektedir. X



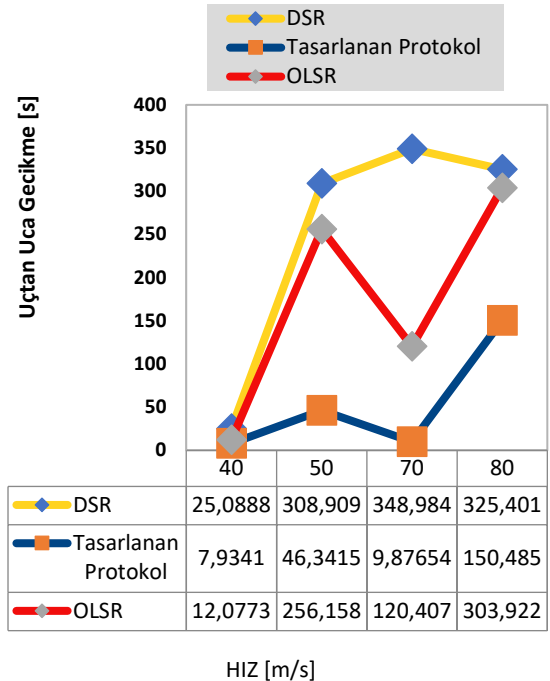
Şekil-24 Yönlendirme Yükü Sonuçları.

ekseninde bulunan hızlara bağlı olarak elde edilen sonuçlar yukarıda ayrı ayrı açıklanmıştır.

1000[m] X 1000[m] X 1000[m] boyutlu bir alanda konumlandırılmış düğümler bazı durumlarda iletişim gerçekleştirecek kaynak ve hedef arasında yol bulunamamasına sebep olmaktadır. Bu durumdan iletişim yolunun harekete bağlı olarak kopma sorununun azaltılmasına rağmen kaynak hedef yolu belirlenemediği için paket teslim oranında iyi sonuçlar sunamamaktadır.

Şekil-24'de, farklı senaryolara üç protokolün sunduğu yönlendirme yükü değerlerine göre çizilmiş bir grafik sunulmaktadır. Grafiğe bakıldığında tasarlanan protokolün düğüm hareket hızlarının arttığı senaryolarda diğer iki protokolden de daha iyi sonuçlar sunduğu görülmektedir.

Şekil-25'de farklı senaryolara üç protokolün sunduğu uçtan uca gecikme değerlerine göre çizilmiş bir grafik sunulmaktadır. Grafiğe bakıldığında geliştirilen protokolün OLSR protokolden daha düşük gecikmeler sunduğu görülmektedir. Önerilen protokol DSR protokolünden de daha iyi sonuçlar sunmaktadır.



Şekil-25 Uçtan Uca Gecikme Sonuçları.

Sonuç olarak önerilen yönlendirme protokolü paket teslim oranı ölçüsü ne göre OLSR protokolüne benzer, DSR protokolünden ise daha iyi sonuçlar sunarken, yönlendirme yükü ve uçtan uca gecikme ölçülerine göre diğer 2 protokolden de daha iyi başarımlar sergilediği ve FANET ağlar için verimi arttırdığı gözlemlenmiştir.

6. Sonuçlar ve Yorumlar

Bu çalışmada FANET ağlar için düşük gecikmeli ve yönlendirme yüklü yeni bir yönlendirme protokolü sunulmuş ve elde edilen benzetim sonuçlarına göre FANET ağlarda yüksek hıza bağlı olarak yaşanan iletişim sorunlarının yol açtığı yönlendirme yükü ve uçtan uca gecikme ölçülerinde önemli iyileşmeler elde edilmiştir. Bir ağda kaynaklar ve hedefler

arasındaki iletişim düzeyini gösteren önemli bir metriğe göre elde edilen sonuçlar tasarlanan protokolün iletişim geliştirmek için FANET ağlarda yönlendirme protokolü olarak kullanılabilirliğini göstermektedir.

7. Kaynakça

- [1] Khan, M. A., Safi, A., Qureshi, I. M., Khan, I. U., *Flying ad-hoc networks (FANETs): A review of communication architectures, and routing protocols*, First International Conference on Latest Trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT), 2017.
- [2] AlKhatieb, A., Felemban, E., Naseer, A., *Performance Evaluation of Ad-Hoc Routing Protocols in (FANETs)*, IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2020.
- [3] Al-Emadi, S., Al-Mohannadi, A., *Towards Enhancement of Network Communication Architectures and Routing Protocols for FANETs: A Survey*, 3rd International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet), 2020.
- [4] Kaushik, P., *FANET routing protocols: Review*, International Journal of Advance Research and Development, 2018.
- [5] Bekmezci, İ., Sahingoz, O. K., Temel, Ş., *Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey*, Science Direct, 2013.
- [6] Clausen, T., Jacquet, P., Adjih, C., Laouiti, A., Minet, P., Muhlethaler, P., Qayyum, A., Viennot, L., *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*, Institute National De Recherche En Informatique Et En Automatique, 2003.
- [7] Usman, Q., Chughtai, O., Nawaz, N., Kaleem, Z., Khaliq, K. A., Nguyen, L. D., *A Reliable Link-Adaptive Position-Based Routing Protocol for Flying ad hoc Network*, Mobile Networks and Applications, 2021.
- [8] Fan, X., Lin, J., Zhang, C., Zhang, S., *A Cross-Layer Anti-Jamming Routing Protocol for FANETS*, IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC), 2018.
- [9] Li, X., Yan, J., *LEPR: Link Stability Estimation-based Preemptive Routing protocol for Flying Ad Hoc Networks*, IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), 2017.
- [10] Waheed, A., Wahid, A., Shah, M. A., *LAOD: Link Aware on Demand Routing in Flying Ad-Hoc Networks*, IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2019.
- [11] Yin, J., Wang, L., Han, C., Yang, Y., *NC-OLSR: A network coding based OLSR multipath transmission scheme for FANETs*, 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), 2017.
- [12] Sharma, S., *P-OLSR: Position-based optimized link state routing for mobile ad hoc networks*, IEEE 34th Conference on Local Computer Networks, 2009.
- [13] Alshabtat, A. I., Dong, L., *Low Latency Routing Algorithm for Unmanned Aerial Vehicles Ad-Hoc Networks*, International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2010.
- [14] Zheng, Y., Jiang, Y., Dong, L., Wang, Y., Li, Z., Zhang, H., *A mobility and load aware OLSR routing protocol for UAV mobile ad-hoc networks*, International Conference on Information and Communications Technologies (ICT 2014), 2014.
- [15] Xie, P., *An Enhanced OLSR Routing Protocol based on Node Link Expiration Time and Residual Energy in Ocean FANETS*, 24th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), 2018.
- [16] Pu, C., *Link-Quality and Traffic-Load Aware Routing for UAV Ad Hoc Networks*, IEEE 4th International Conference on Collaboration and Internet Computing (CIC), 2018.
- [17] Kirubasri, G., Maheswari, U., *A Study on Hardware and Software Link Quality Metrics for Wireless Multimedia Sensor Networks*, Int. J. Advanced Networking and Applications Volume, 2016.
- [18] Pu, C., *Jamming-Resilient Multipath Routing Protocol for Flying Ad Hoc Networks*, IEEE Access, 2018.
- [19] Dener, M., Toklu, S., *DSDV ve DSR Manet Yönlendirme Protokollerinin Başarım Değerlendirmesi*, Journal of Polytechnic, 2009.
- [20] Erdemkılıç, B., Yazıcı, M. A., *A Software Defined Networking-based Routing Algorithm for Flying Ad Hoc Networks*, Sakarya University Journal of Computer and Information sciences, 2022.
- [21] Jacquet, P., Muhlethaler, P., Clausen, T., Laouiti, A., Qayyum, A., Viennot, L., *Optimized link state routing protocol for ad hoc networks*, Proceedings, IEEE International Multi Topic Conference, 2001. Web 1, (2022), https://en.wikipedia.org/wiki/Widest_path_problem, (Erişim tarihi: 20.07.2022)