

**TOPOLOJİ KONTROLÜ İLE KABLOSUZ ALGILAYICI AĞ
GÜVENLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

MELEK ŞENDİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2013

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Necip CAMUŐCU
Müdü

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Tahir HANALİOĐLU
Anabilim Dalı Başkanı

MELEK ŞENDİL tarafından hazırlanan TOPOLOJİ KONTROLÜ İLE KABLOSUZ ALGILAYICI AĐ GÜVENLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Bülent TAVLI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN

Üye : Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Melek Şendil

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Endüstri Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Aralık 2013

Melek Şendil

TOPOLOJİ KONTROLÜ İLE KABLOSUZ ALGILAYICI AĞ GÜVENLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmada KAA'lar için ağ ömrü en büyüklenirken, kısmi fazlalığa dayalı yeni bir güvenilirlik protokolüyle ağ güvenilirliğinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Önerilen karışık tam sayılı PRF modeli aşamalı olarak geliştirilmiştir. İlk olarak ağ ömrünün en büyüklendiği ve herhangi bir güvenilirlik protokolünün kullanılmadığı NRF modeli kurulmuştur. Ardından herhangi bir aksaklık esnasında yoğun kullanımıyla büyük veri kaybı problemlerine sebep olabilecek merkezi düğümlerden kaynaklanabilecek riskleri mümkün mertebe giderebilmek için algılayıcıların dengeli kullanıldığı bNRF modeli geliştirilmiştir. Daha sonra dengeli kullanım stratejisinin yanı sıra, çoklu kopya gönderimi ve çoklu yollar rotalama protokollerinin birlikte kullanıldığı FRF modeli sunulmuştur. Modelde algılayıcıların ürettikleri veri paketlerinin ikişer kopya halinde düğüm ayrık yollardan gönderilmesi sağlanarak, her veri paketi için iletim yollarından birinde bir aksaklık meydana geldiğinde diğer kopyanın baz istasyonuna ulaştırılabilmesi amaçlanmıştır. Ancak dengeli kullanım ve çoklu yollarla çoklu kopya gönderimi stratejilerinin birlikte kullanımı enerji sarfiyatını arttırdığından ağ ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle bahsedilen protokollerin daha enerji verimli şekilde kullanıldığı PRF modeli geliştirilmiştir. Bu modelde de dengeli kullanım stratejisi kullanılmış; ancak yoğun kullanımıyla ağ ömrünü iyileştirebilecek bir algılayıcı varsa merkezi düğüm seçilmesine izin verilmiştir. Ek olarak PRF'de sadece merkezi düğüm üzerinden veri aktaran algılayıcıların ürettikleri veriyi kopyalayıp düğüm ayrık yollardan göndermesi sağlanmıştır. Performans analizinde ağ ömrü, kalan enerji ve korunan veri kriterleri kullanılmıştır. Ağ ömrü ve ağ güvenilirliği arasındaki ödünleşim incelenmiştir. Son olarak PRF'nin çözüm süresini azaltan sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Algılayıcı Ağlar, ağ güvenilirliği, matematiksel modelleme, fazlalık akış .

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Industrial Engineering
Supervisor : Asst. Prof. Ayşegül ALTIN KAYHAN
Degree Awarded and Date : M.Sc. – December 2013

Melek Şendil

**IMPROVING WIRELESS SENSOR NETWORK RELIABILITY BY
TOPOLOGY CONTROL**

ABSTRACT

In this study, we aim to enhance the reliability of a WSN by a new partial redundancy protocol while maximizing network lifetime. We consider a network composed of a base station and many identical sensors with limited energy. The proposed mixed IP model PRF is built gradually. Initially, we develop the NRF model which maximizes network lifetime without any reliability protocol. Then to improve network reliability by eliminating possible massive data loss risks arising from overuse of central nodes, constraints that provide balanced use of sensors are added to get the bNRF model. Later FRF model is developed which employs balanced usage strategy and also forces each sensor to send multicopy of the same data on two node disjoint paths. In this model the purpose in sending multicopy on multipaths is to be able to transmit the data to the base station if a problem occurs on the path of the other copy of the same data. However using multicopy on multipath routing and balanced usage strategy at the same time decreases network lifetime significantly. Therefore a new model PRF which uses these protocols more efficiently is proposed. In PRF balanced usage strategy is considered but if there is a sensor whose extensive use leads to a better network lifetime, then it is allowed to be the central node. Moreover in this model only the sensors who send their own data through central node replicate their data and send it on two node disjoint paths. The performances of the models are evaluated according to some performance criteria such as lifetime, leftover energy, and conserved data. The tradeoff between network lifetime and reliability is examined. Finally to decrease the solution time of the PRF model a heuristic method is proposed.

Keywords: Wireless Sensor Networks, redundant flow, reliability, mathematical modelling.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, değerli katkılarıyla tezimi yönlendiren ve birlikte çalışmaktan büyük mutluluk duyduğum danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ayşegül ALTIN KAYHAN'a teşekkür ederim. Tezimi okuyarak tavsiyelerde bulunan jüri üyesi hocalarım Doç. Dr. Bülent TAVLI ve Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN'e teşekkürü bir borç bilirim. Bizlere her zaman içtenlikle ve özveriyle yaklaşan bölümümüz öğretim üyelerine, gerçek dostluklarıyla her zaman yanımda olduklarını hissettiğim arkadaşlarıma, maddi manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, yakınlarıma ve son olarak okuluma ve "112M226" numaralı projedeki maddi desteği için TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Optimizasyon Tabanlı Çalışmalar	4
2.2 Ağ Güvenliği ile İlgili Çalışmalar	8
2.3 Karmaşık Ağlar	12
3 PROBLEM TANIMI VE ENİYİLEME MODELLERİ	14
3.1 Varsayımlar ve Parametreler	14
3.2 Fazlalıksız Model (No Redundant Flow - NRF)	15
3.3 Dengeli Fazlalıksız Model (Balanced No Redundant Flow - bNRF)	16
3.4 Tam Fazlalıklı Model (Fully Redundant Flow - FRF)	17
3.5 Kısmi Fazlalıklı Model (Partially Redundant Flow - PRF)	19
3.6 Modellerin Bir Örnek Üzerinde Karşılaştırılması	22
3.7 Geçerli Eşitsizlikler	25
4 PERFORMANS ANALİZİ	27
4.1 Örnek Kümesinin Oluşturulması	27
4.2 Parametreler	28
4.3 Geçerli Eşitsizliklerin Etkisi	29
4.4 Uygun Ticari Çözücünün Seçilmesi	30
4.5 Deneysel Sonuçlar	31
4.5.1 Ağ Ömrü	32
4.5.2 Toplam ve Maksimum Kalan Enerji Oranı	35
4.5.3 Ağ Güvenilirliği	38
4.5.4 Genel Değerlendirme	42
5 SEZGİSEL YÖNTEM	44
5.1 Sezgisel Yöntem	44
5.2 Performans Analizi	46

6 DEĞERLENDİRME VE SONUÇ	49
KAYNAKLAR	52
EKLER	56
A Veriler	57
ÖZGEÇMİŞ	63

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

2.1	Çoklu Yol Atama Protokollerinin Sınıflandırılması	9
3.1	Basit Bir Örnek üzerinde Modellerin Çözümleri	22
3.2	Basit Bir Örnek üzerinde NRF ve bNRF Çözümlerinde Veri Kaybı	23
3.3	Basit Bir Örnek üzerinde FRF ve PRF Çözümlerinde Veri Kaybı	24
4.1	GUROBI 5.1 ve CPLEX 12.4 Çözüm Süreleri	31
4.2	Ağ Büyüklüğüne göre Ortalama Ağ Ömrü Değeleri	32
4.3	Ağ Büyüklüğüne göre Ortalama TKE Oranları	35
4.4	Ağ Büyüklüğüne göre En Büyük Kalan Enerji Oranları	37
4.5	Farklı Ağ Büyüklükleri için Ortalama Korunan Veri Oranları	39
4.6	Ortalama Korunan Veri Oranları	40
5.1	Sezgisel Yöntem	45

TABLULARIN LİSTESİ

2.1	Optimizasyon Tabanlı Çalışmalar	5
4.1	Örnek Kümesinin Özellikleri	28
4.2	Parametre Değerleri	28
4.3	PRF ₀ ve PRF ₁ için Ortalama Çözüm Süreleri	30
4.4	GUROBI 5.1 ve CPLEX 12.4 Ortalama Çözüm Süreleri	31
4.5	NRF Baz Alındığında Ortalama Ağ Ömrü Azalma Oranları	33
4.6	Merkezi Düğüm Kullanımının Ağ Ömrüne Etkisi	34
4.7	Modellerin Korunan Veri Oranlarına Katkısı	41
4.8	Ağ Güvenilirliğinde İyileşme Oranları	42
4.9	Elde Edilen Genel Sonuçlar	43
5.1	61 Dügümlü Ağlarda Sezgisel Yöntem ve PRF Çözüm Süreleri	46
5.2	71 Dügümlü Ağlarda Sezgisel Yöntem ve PRF Çözüm Süreleri	47
5.3	81 Dügümlü Ağlarda Sezgisel Yöntem ve PRF Çözüm Süreleri	48
A.1	PRF ₀ ve PRF ₁ için Saniye Cinsinden Çözüm Süreleri	57
A.2	21 ve 31 Dügümlü Ağlarda GUROBI 5.1 ve CPLEX 12.4 için Saniye Cinsinden Çözüm Süreleri	57
A.3	41 ve 51 Dügümlü Ağlarda GUROBI 5.1 ve CPLEX 12.4 için Saniye Cinsinden Çözüm Süreleri	58
A.4	Ortalama Ağ Ömrü Değerleri	58
A.5	Ağ Ömründe Ortalama Azalma Oranları	58
A.6	En Büyük, En Küçük ve Ortalama MKE Oranları	59
A.7	21 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları	60
A.8	31 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları	60
A.9	41 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları	60
A.10	51 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları	61
A.11	61 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları	61
A.12	71 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları	61
A.13	81 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları	62

A.14 Ortalama Korunan Veri Oranları	62
---	----

Algoritmaların Listesi

1	KAA'da Algılayıcıların Rastgele Konumlandırılması Algoritması 1	27
---	---	----

1. GİRİŞ

Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA'lar) belirli bir bölgedeki sıcaklık, nem, basınç gibi fiziksel ve çevresel değişiklikleri gözlemlemek ve raporlamak için kullanılırlar. Çoğu uygulamada KAA'lar sınırlı enerji, hafıza ve işlem kapasitesine sahip çok sayıda otonom algılayıcı ve daha gelişmiş kaynakları olan bir veya daha fazla baz istasyonundan oluşurlar. Algılayıcılar gözlem alanına düzenli veya rastgele olarak yerleştirilirler ve genellikle gözetimsiz bırakılırlar. Her algılayıcı kendi menzili içerisindeki alanı gözlemler, meydana gelen değişiklikleri uygun veri formatına dönüştürür ve veriyi doğrudan veya diğer algılayıcılar üzerinden baz istasyonuna gönderir. Algılayıcılar bu işlemlerin tamamı için enerji harcarlar. Dolayısıyla enerjisi tükenen algılayıcılar işlevlerini de kaybetmiş olurlar. Birçok uygulamada ağı oluşturan algılayıcı sayısı oldukça fazla olduğundan veya gözlem alanına rastgele yerleştirildiklerinden algılayıcıların pillerinin değiştirilmesi veya enerji ikmalinin yapılması mümkün olamamaktadır. Bu nedenle ağ içerisinde enerji verimsiz işlemleri ortadan kaldıracak ve ağ ömrünü iyileştirecek yenilikçi tekniklerin gerekliliği gündeme gelmiştir (Al-Karaki ve Kamal [6]). Gözlem ve veri işleme ile kıyaslandığında algılayıcıların en fazla enerji harcadıkları işlem veri transferi olduğundan bu işlem gerçekleştirilirken enerji verimliliği ve ağ ömrü göz önünde bulundurulmalıdır. Ek olarak ağın tamamının fonksiyonelliğini sürdürdürebilmesi için ağ üzerindeki algılayıcıların sınırlı enerjileri dengeli kullanılmalıdır. Aksi takdirde bazı algılayıcılar çok yoğun kullanılabilir ve bu da ağ üzerinde iletişim kopukluklarına ve zamanla ağın tamamının fonksiyonelliğini yitirmesine sebep olabilir.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte KAA'ların kullanım alanları da oldukça genişlemiştir. Günümüzde KAA'lar çevre denetimi, savaş alanı gözetimi, yurt içi güvenlik, stok yönetimi ve hasta durum takibi gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Akkaya ve Younis [1], Akyildiz vd. [2]). Özellikle güvenlik ve sağlık uygulama alanlarındaki gibi son derece hassas ve önemli verinin toplandığı ve yönetildiği durumlarda ağ güvenliğinin ve kullanılabilirliğinin her daim sağlanması büyük önem arz etmektedir. Aksi takdirde herhangi bir iletişim kesintisi olduğunda bir hastanın kalp krizi geçiriyor olduğunun veya düşman kuvvetlerinin yaklaştığının tespiti gibi hayati derecede önem taşıyan olaylar gözden kaçabilir (Stavrou ve Pitsillides [33]). Bu sebeple KAA üzerindeki verinin korunması ve her daim ulaşılabilir olması açısından ağın olası saldırılara ve rastgele aksaklıklara karşı güvenilirliğinin sağlanması elzemdir.

Bu çalışmada KAA'lar için algılayıcıların sahip oldukları enerjinin verimli kullanımı göz önünde bulundurularak ağ ömrünün enbüyüklenmesi ve aynı zamanda topoloji kontrolüne dayalı bir güvenlik protokolüyle ağ güvenliğinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Karmaşık ağlar literatüründen de yararlanılarak geliştirilen protokolde algılayıcıların üzerlerinden geçen veri miktarı sınırlandırılarak ağ üzerinde dengeli ve enerji verimli kullanım sağlanmıştır. Bu sayede öncelikle merkezi konumlardaki algılayıcıların yoğun kullanımı engellenerek, bu algılayıcılarda oluşabilecek aksaklıklardan kaynaklanan olası büyük veri kaybı problemlerinin azaltılması ve dolayısıyla her bir algılayıcının ağın işlerliği üzerinde yaratabileceği riskin dengelenmesi amaçlanmıştır. Bir başka deyişle, sadece bir algılayıcıda meydana gelen aksaklık sonucunda ağın büyük bölümünün veri iletiminin kesilmesi engellenmeye çalışılmıştır. Bunun yanı sıra protokolde kullanılan kısmi fazlalığa dayalı çoklu yol atama stratejisi doğrultusunda geliştirilen matematiksel modelde ağ ömrü enbüyüklenirken, önerilen bazı şartları sağlayan algılayıcıların aynı veriyi iki farklı yol üzerinden göndermesi sağlanmıştır. Böylelikle de bu algılayıcılarda veya bağlantılarında meydana gelebilecek sorunlar neticesinde kaybedilebilecek verinin kopyalanarak alternatif bir yol üzerinden gönderilebilmesi hedeflenmiştir.

İlk olarak ağ ömrünün enbüyüklenildiği ve herhangi bir güvenilirlik önleminin yer almadığı enerji verimli NRF (No Redundant Flow) modeli sunulmuştur. Daha sonra algılayıcıların dengeli kullanımının öngörülen faydalarının tespiti ve ağ ömrüne etkisini gözlemlemek için NRF modeline algılayıcıların üzerlerinden geçen azami akış miktarını sınırlayan kısıtlar eklenmiş ve yeni model bNRF (balanced No Redundant Flow) olarak adlandırılmıştır. Ardından literatürde sıklıkla kullanılan çoklu kopya gönderimi ve çoklu yol atama stratejilerinin dengeli kullanımla birlikte dikkate alındığı FRF (Fully Redundant Flow) modeli kurulmuştur. Her bir algılayıcının fazladan veri kopyası göndermesine izin verilmesiyle FRF modelinin kullanılan stratejilerle ulaşılabilecek en büyük güvenilirlik seviyesini sağladığı varsayılmıştır. Fakat ekstra güvenilirlik önleminin enerji sarfiyatını arttıracığı öngörüldüğü için alternatif bir protokol olarak kısmi fazlalığa dayalı güvenilirlik protokolünü yansıtan PRF (Partially Redundant Flow) modeli geliştirilmiştir. PRF modelinde algılayıcılar dengeli kullanılmakta; ancak eğer sistemde diğer algılayıcıların veri transferinde yoğun kullanımıyla ağ ömrünü iyileştirebilecek bir düğüm varsa bu düğüm merkezi algılayıcı seçilmekte ve bu algılayıcının iletebileceği toplam veri miktarı sınırlandırılmamaktadır. Bunun yanı sıra sadece merkezi olarak seçilen düğüm üzerinden iletilen veri paketlerinin kendi kaynak düğümlerinde kopyalanıp düğüm ayrık bir başka yol üzerinden baz istasyonuna gönderilmesi sağlanmaktadır.

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Öncelikle Bölüm 2’de konuyla ilgili incelenen literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Ardından Bölüm 3’te problemin tanımı yapılmış ve geliştirilen modeller ayrıntılı şekilde anlatılmıştır. Ek olarak PRF modeli için geliştirilen geçerli eşitsizliklere de bu bölümde yer verilmiştir. Bölüm

4'te CPLEX ticari çözücüsü kullanılarak yapılan performans analizi çalışmalarından bahsedilmektedir. Yapılan testlerde modellerin performansı ağ ömrü, korunan veri, kalan enerji kriterleri açısından incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Bölüm 5'te ise geliştirilen optimizasyon tabanlı sezgisel yöntem anlatılmaktadır. Son olarak Bölüm 6'da elde edilen sonuçların tamamı özetlenmiş ve genel bir değerlendirme yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde konuyla ilgili incelenen çalışmalar üç temel başlık altında derlenmiştir. ilk olarak Bölüm 2.1'de ağ ömrünü veya toplanan veri miktarını iyileştiren optimizasyon tabanlı çalışmalar ele alınmıştır. Ardından Bölüm 2.2'de ağ güvenliğini geliştirmeyi amaçlayan algoritmaların yer aldığı çalışmalara yer verilmiştir. Son olarak Bölüm 2.3'te KAA'ları karmaşık ağlar bakış açısıyla ele alan çalışmalar incelenmiştir.

2.1 Optimizasyon Tabanlı Çalışmalar

Literatürde algılayıcıların sahip oldukları enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasına odaklanarak ağ ömrünün iyileştirilmesine yoğunlaşan çalışmalar incelendiğinde yeni rotalama protokolleri sunan ve bu protokollerin performans ölçümlerinin yapıldığı simülasyon tabanlı analizlere yer veren birçok çalışma olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda genel amaç, rotalama kararları verilirken harcanan enerji miktarını ağ ömrünü en fazla uzatacak veya toplanan veri miktarını arttıracak şekilde ayarlayan karar mekanizmaları geliştirmektir. Genel çözüm yaklaşımı ise sezgisel algoritmaların geliştirilmesi şeklindedir. Bu alanda optimizasyon tabanlı çalışmalara ise nadiren rastlanmıştır. Bu bölümde optimizasyon modellerine yer veren veya optimizasyon tabanlı sezgisellerin yer aldığı çalışmalardan bahsedilmiştir.

İncelenen çalışmalar çeşitli ortak özellikleri ve varsayımları göz önünde bulundurularak gruplandırılmış ve Tablo 2.1'de sunulmuştur. Tablo 2.1'de de görüldüğü üzere optimizasyon modellerinin iki temel yaklaşım doğrultusunda kullanıldığı görülmüştür. İlk yaklaşıma sahip çalışmalarda problemin öncelikle matematiksel modelleri kurulmuş ardından bu modellerden faydalanılarak optimum veya optimuma yakın sonuçlar veren sezgisel yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmalarda modellerin performansından ziyade sezgisel algoritmaların performansı incelenmiştir. Diğer yaklaşımda ise matematiksel modeller pratik uygulamalardan çok ağır teorik performans limitlerini tespit edebilmek için kullanılacak araçlar olarak görülmüştür. Bu çalışmalarda geliştirilen modeller çeşitli topolojik özelliklerin ağır performansına etkisini incelemek için kullanılmıştır. Bunun yanı sıra problem genellikle ağ akış problemi olarak ele alınırken, bazı çalışmalarda çizelgeleme yaklaşımı da kullanılmıştır. Modeller incelendiğinde ise ağ ömrünün veya baz istasyonunda toplanan veri miktarının enbüyüklediği, toplanması gereken veri miktarı seviyesi için harcanan toplam enerjinin enküçüklediği ve ağ ömrü tamamlandıktan sonra algılayıcılarda kalan azami enerjinin enküçüklediği dört farklı amaç fonksiyonuna rastlanmıştır. Son olarak bu çalışmalarda ağ tipi, ağ

ömrü, algılayıcıların başlangıç enerji seviyeleri, ağda veri iletim sıklığı gibi özelliklerle ilgili farklı varsayımların olduğu görülmüştür. Çalışmalar incelenirken kullanılan varsayımlardan da ayrıntılı şekilde bahsedilmiştir.

Tablo 2.1: Optimizasyon Tabanlı Çalışmalar

Kullanım Amacı (Temel yaklaşım)	Sezgisellerin geliştirilmesinde katkı sağlamak ([5], [11], [12], [13], [18], [19], [28], [30])	Ağ performans limitlerinin tespiti için araçlar geliştirmek ([10], [14], [21], [26])		
Problem	Ağ akış problemi ([10], [11], [12], [13], [14], [18], [21], [26], [30])	Çizelgeleme problemi ([5], [10], [28])		
Amaç Fonksiyonu	mak Ağ Ömrü ([10], [11], [12], [13], [14], [19], [28])	mak Toplam Veri ([18], [21], [26], [30])	min Enerji ([21], [26])	min(mak Kalan Enerji) ([5])
Ağ Tipi	Homojen ([5], [14], [19])	Heterojen ([10], [11], [12], [13], [18], [21], [26], [28], [30])		
Ağ Ömrü	Enerjisi ilk tükenen algılayıcı ([10], [11], [12], [13], [14], [18], [21], [26], [28], [30])	Hedef kapsama alanı gereksinimi ([5])		
Başlangıç Enerji Seviyesi	Eşit ([5], [14], [19])	Eşit olmayan ([10], [11], [12], [13], [18], [21], [26], [28], [30])	Toplam bütçenin dağıtılması ([21], [26])	
Veri İletim Sıklığı	Sürekli ([5], [10], [11], [12], [13], [14], [18], [21], [26])	Önce depola sonra gönder ([18], [30])		

Chang ve Tassiulas [11], [12], [13] KAA'ların ağ ömrünü enbüyükleyen modeller üzerinde çalışmışlardır. Geliştirdikleri ilk doğrusal programlama modelinde, algılayıcılar arasındaki veri akış miktarları güç kaynağı en çabuk tükenen algılayıcının ömrü enbüyüklenerek şekilde belirlenmektedir [11]. Bir doğrusal programlama modeli yardımıyla algılayıcıların enerji seviyelerine göre enerji tüketimlerini dengelemeyi amaçlayan Akış

Yönlendirme ve En Büyük Kalan Enerjili Yol Rotalama (Maximum Residual Energy Path Routing) algoritmalarını geliştirmişlerdir. Daha sonraki çalışmalarında ise model ve algoritmaları çok ürünlü durum (multicommodity) göz önünde bulundurularak genişletmişlerdir [12]. Son ortak çalışmalarında ise sabit ve değişken veri üretme hızının olduğu durumları ayrı ayrı incelemişlerdir [13]. Her iki modelde de iletim enerji sarfiyatının yanı sıra veri alma için harcanan enerji de göz önünde bulundurulmuştur. Ek olarak yolun iki ucundaki düğümlerin enerji tüketimlerini ve kalan enerji miktarlarını kullanan en düşük maliyetli yol algoritması geliştirilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda algoritmaların tamamının, geliştirilen modellerle elde edilen optimal ağ ömrü sonuçlarına çoğu zaman ulaştığı görülmüştür. Kalpakis vd. [19] ise verinin algılayıcılardan sabit bir hızla periyodik olarak gönderildiği homojen ağlarda ağ ömrünün enbüyüklenmesi üzerinde çalışmışlardır. Ağ ömrü, enerjisi ilk biten algılayıcının aktif olarak çalıştığı periyot sayısına eşit olduğundan bir tam sayılı programlama modeli kullanmışlardır. Çalışmada veri birleştirmenin olduğu ve olmadığı durumlar ayrı ayrı incelenmiştir. Son olarak bu modeller yardımıyla polinom zamanlı sezgisel yöntemler sunulmuştur.

Ağ üzerindeki bir algılayıcının ömrünü iyileştirebilmek için uygulanabilecek en temel yöntemlerden biri transceiveri gerekmediği zamanlarda devre dışı bırakmaktır (Akyildiz vd. [2]). Bu bağlamda Perillo ve Heinzelman [28] ağ ömrünü iyileştirmek amacıyla belirli bir hizmet kalitesini sağlayan olurlu algılayıcı kümelerinin çalışır zamanlarını çizelgeleyen bir model geliştirmişlerdir. Kısaca açıklamak gerekirse, modelde menzilleri çakışan algılayıcı gruplarının farklı zaman dilimlerinde aktif çalışmaları sağlanarak ağ ömrü enbüyüklenmektedir. İlk olarak model tek adımlı yol varsayımı altında geliştirilmiş ve daha sonra çok adımlı durum göz önünde bulundurularak genişletilmiştir. Ayrıca modellerin azami akış modeline dönüştürülmesi de çalışmada önerilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre optimal bir çizelge kullanmanın ağ ömründe iki kata kadar bir gelişme sağladığı tespit edilmiştir. Alfieri vd. [5] de ağ ömrünü iyileştirmek için farklı zaman aralıklarında aktif olan alt ağ gruplarıyla çalışmışlardır. Diğer çalışmalardan farklı olarak ağ ömrü, algılayıcıların kısıtlı enerjilerinin bitmesiyle ağın aktif kapsama alanının küçülerek belirlenen hedef kapsama alanı seviyesinin altına düşmesine kadar geçen süre olarak tanımlanmıştır. Önerilen ilk yaklaşımda geliştirilen sütun türetme uygulamasıyla hedef kapsama seviyesini sağlayan olası alt ağlar arasından ağ ömrünü enbüyükleyecek şekilde seçim yapılmakta ve kullanım süreleri belirlenmektedir. Ek olarak problem NP zor olduğundan daha büyük ağlarda uygulanabilecek açgözlü sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Sütun türetme tabanlı yaklaşımın daha iyi sonuç verdiği; ancak pratikte daha zor uygulandığı görülmüştür.

Hong ve Prasanna [18] ve Sadagopan vd. [30] önce depola sonra topla tipi heterojen yapılı KAA'lar üzerinde çalışmışlardır. Önce depola sonra topla tipi ağlarda algılama ve veri gönderme işlemi farklı zaman dilimlerinde yapılmaktadır. Algılayıcılar ilk olarak belirli bir süre sadece çevrelerindeki değişiklikleri algılayarak ürettikleri veriyi depolarlar. Algılama periyodu tamamlandıktan sonra veri transferi işlemi başlar ve üretilen veri baz istasyonunda toplanır. Veri toplama süreci için herhangi bir zaman sınırı bulunmadığından bu ağlara yönelik çalışmalarda algılayıcıların veri akış hızları yerine algılayıcılar arasındaki veri transferi miktarları karar değişkeni olarak kullanılmıştır. Her iki çalışmada da problem en büyük akış problemi olarak ele alınmış ve doğrusal programlama modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller bir varsayım dışında oldukça benzerlik göstermektedir. Hong ve Prasanna [18] kısa menzil iletişim ağları üzerinde çalışmış ve bu ağlarda veri alma ve gönderme maliyetleri oldukça yakın olduğundan eşit kabul edilmiştir. Sadagopan vd. [30]'da ise veri iletim maliyeti gönderici ve alıcı düğüm arasındaki mesafenin bir fonksiyonu olarak kabul edilmiştir. Geliştirilen modelin dual formu yardımıyla Garg-Koenemann algoritmasına benzer bir sezgisel geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sezgisel model, senaryoların çoğunda yüzde 1-10 arasında optimale yakın sonuçlar vermektedir. Hong ve Prasanna [18] önce depola sonra topla tipi ağların yanı sıra algılama ve veri transferi işlemlerinin eş zamanlı gerçekleştirildiği sürekli algıla ve topla tipi ağlar üzerinde de çalışmışlardır. Daha çok savaş alanı gözetimi, hedef takip gibi alanlarda kullanılan bu tip ağlarda toplanan verinin baz istasyonuna olabildiğince hızlı şekilde gönderilmesi büyük önem arz etmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada da algılayıcıların veri aktarım hızları karar değişkeni olarak kullanılmış ve benzer bir doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Ek olarak her iki ağ tipi için modeller ayrıt kapasiteli durum göz önünde bulundurularak genişletilmiştir. Son olarak Push-Relabel algoritmasına benzer bir akış enbüyüklenme algoritması sunulmuştur.

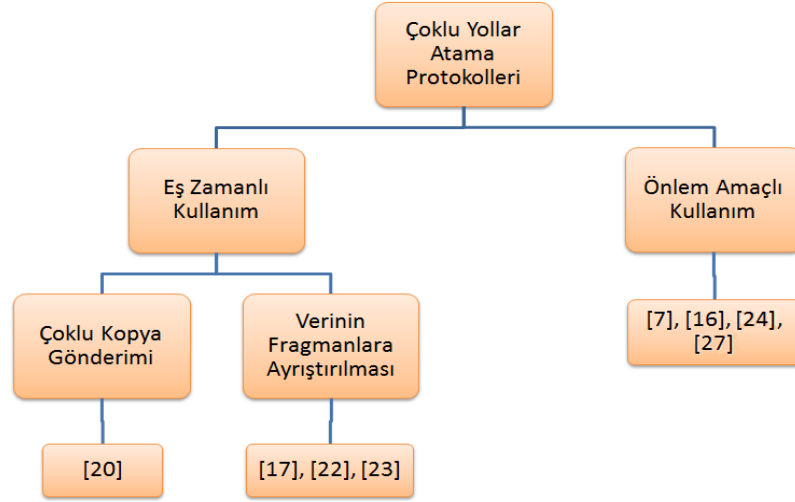
Optimizasyon modelleri pratikte kullanım amaçlı geliştirilen protokol ve algoritma çalışmalarının yanı sıra, verilen parametreler altında KAA'ların temel performans sınırlarını tespit etmeyi amaçlayan birçok çalışmada da yer almıştır. Nitekim Krishnamachari ve Ordóñez [21] ağın performans limitlerini saptamak için tamamlayıcı bir metodolojiye ihtiyaç duyulduğunu vurgulamış ve bu amaçla doğrusal olmayan iki model geliştirmişlerdir. Bu modelleri kullanarak topoloji, düğüm sayısı, enerji seviyesi, adil kullanım gibi tasarım parametrelerinin ağ performansına etkisini incelemişlerdir. Geliştirilen ilk modelde verilen başlangıç enerji seviyeleri kullanılarak ayrıtlar üzerindeki optimum veri akış hızı ve iletim gücü seviyeleri tespit edilmektedir. Amaç fonksiyonunda baz istasyonunda toplanan veri miktarı enbüyüklenmektedir. İkinci modelde ise baz istasyonunda toplanması gereken veri miktarı için bir alt sınır konulmuş ve

bu miktar için harcanması gereken toplam enerji miktarı enküçülenmiştir. Benzer şekilde bu modelde de optimum veri hızı ve iletim gücü belirlenmektedir. Her iki modelde de akış denge, enerji ve doğrusal olmayan kanal kapasitesi kısıtları mevcuttur. Ordóñez ve Krishnamachari [26]'da ise algılayıcıların enerji seviyelerinin de model tarafından belirlendiği durum ele alınmıştır. Bir önceki çalışmanın devamı niteliğinde olan bu çalışmada genel bir enerji bütçesi olduğu varsayılmış ve toplam enerjinin algılayıcılara optimum şekilde dağıtıldığı benzer modeller geliştirilmiştir. Aynı zamanda geliştirilen modelin farklı versiyonları olan akış hızı yerine akış miktarının karar değişkeni olarak kullanıldığı veya ağırlıklı adil kullanımın enbüyüklendiği modellerden de bahsedilmiştir. Bhardwaj vd. [10] geliştirdikleri model yardımıyla ağ ömrü ile ilgili performans ölçümlerinde teorik üst sınır olarak kabul edilebilecek sonuçlara ulaşmayı amaçlamışlardır. Ağı oluşturan düğümler için algılama, veri aktarma, birleştirme gibi görevlerin optimum çizelgesi matematiksel modelleme ile yapılarak bazı varsayımlar altında teorik en büyük ağ ömrü tespit edilmektedir. Algılayıcılar, bahsedilen görevlerden bir ya da bir kaçını yapabilmekte ve farklı zaman aralıklarında görev kombinasyonları değişebilmektedir. Ek olarak ele alınan problemin ağ akış problemi olarak incelenmesiyle polinom zamanda çözüm veren modeller geliştirilmiştir. Son olarak tek algılayıcı, birden fazla algılayıcı ve birden fazla birleştiricinin olduğu durumlar ayrı ayrı incelenmiştir. Cheng vd. [14] ise algılayıcılar arasında dengeli enerji kullanımının ağın her daim kullanılabilirliği açısından önemini vurgulamış ve özellikle baz istasyonuna komşu algılayıcıların yoğun kullanımının ağ ömrüne olumsuz etkilerine yönelik tek/çoklu, sabit/mobil baz istasyonu kullanımı; homojen/heterojen enerji dağılımı; eşit/eşit olmayan veri üretme hızı gibi çeşitli kurulum stratejilerini incelemişlerdir. Çalışmada bu stratejilerin analizi ve değerlendirmelerinde kullanılmak üzere ağ ömrünün enbüyüklendiği temel bir doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Modelde verilen başlangıç enerji seviyeleri ve menzil değerleri kullanılarak algılayıcılar arasındaki akış miktarlarına karar verilmektedir. Çalışmada her stratejinin farklı varsayımları doğrultusunda kullanılan kısıtlar ayrı ayrı gösterilmiştir. Yapılan analizler sonucunda iyi bir kurulum stratejisinin enerji verimliliği ve dengeli kullanımı birlikte sağlaması gerektiği sonucuna varılmıştır.

2.2 Ağ Güvenliği ile İlgili Çalışmalar

Sınırlı kaynaklara sahip algılayıcı düğümler genellikle tehlikeli ortamlarda gözetimsiz kaldıklarından olası saldırılardan veya teknik aksaklıklardan dolayı ortaya çıkabilecek sorunlara karşı savunmasızdırlar (Ma vd. [22]). Ancak kullanım alanları gereği

birçok uygulamada KAA üzerinde taşınan bilgi son derece önemlidir. Bu nedenle ağın güvenlik gereksinimlerinin tasarım aşamasında göz önünde bulundurulması büyük önem arz etmektedir (Shi ve Perrig [32]). Ağ güvenliğini iyileştiren ve destekleyen yeni protokoller ve mekanizmalar literatürde birçok çalışmanın konusu olmuştur. Çoklu yol atama stratejileri ise bu alanda geliştirilen birçok protokolde kullanılmaktadır (Stavrou ve Pitsillides [33]). Kısaca açıklamak gerekirse çoklu yol atama stratejilerinde algılayıcılar kullandıkları veri aktarım yolları üzerinde meydana gelebilecek aksaklıklardan korunmak için birden fazla yol kullanmaktadırlar. Şekil 2.1’de de görüldüğü üzere bazı uygulamalarda çoklu yollar üzerinden aynı verinin bir kaç kopyası gönderilirken bazılarında ise veri paketleri parçalara ayrılıp çeşitli şifreleme yöntemleri kullanılarak farklı yollar üzerinden gönderilmektedir. Bunun yanı sıra algılayıcıların veri aktarımı esnasında bir yol kullandığı; ancak mevcut yolun bozulması halinde kullanılacak yedek yolların önlem amaçlı önceden tespit edildiği algoritmalar da literatürde çoklu yol atama protokolleri olarak tanımlanmaktadır. Bu bölümde ağ güvenliğini iyileştirmek için önerilen çoklu yol atama protokollerinden bahsedilmektedir.



Şekil 2.1: Çoklu Yol Atama Protokollerinin Sınıflandırılması

Literatürde *security* ve *reliability* olarak ifade edilen ve bu tezde *güvenlik* ve *güvenilirlik* olarak Türkçe’ye çevrilen kavramlar birçok çalışmada ayrı ayrı ele alınmıştır. Veri toplama süresince algılayıcıların enerjilerinin tükenmesi, arızalanmaları, iletilerinin bozulması gibi olası aksaklıklara karşı ağın dayanıklı olması; yani ağın *hata/arıza toleransına* sahip olması genellikle ağ güvenilirliği ile ilişkilendirilmiştir. Ağ güvenliğinin sağlanması ise ağın hizmet dışı bırakma saldırıları, gizlice dinleme gibi dış kaynaklı tehditlere karşı korunaklı ve dayanıklı olması; bir başka deyişle *saldırı toleransına* sahip olması şeklinde ifade edilmektedir. Bu kavramların her ikisi de toplanan verinin baz istasyonuna herhangi bir kayıp veya bozulma olmadan ulaştırılmasını desteklediğinden

ağ güvenliği ve güvenilirliğinin aslında birbirini tamamladığı ve hatta oldukça girift kavramlar oldukları söylenebilir. Nitekim bazı çalışmalarda ağın fonksiyonelliğini yitirmemesi ve sağlıklı veri toplayabilmesi için ağ güvenliği en önemli güvenlik gereksinimlerinden biri olarak kabul edilmektedir. İncelenen çalışmalarda çoklu yol atama stratejilerinin hem saldırı hem de hata/arıza toleransını destekleyen güvenlik protokollerinde kullanıldığı görülmüştür.

Karlof vd. [20] geliştirdikleri algoritmada hem çoklu yol atama hem de birden fazla kopya gönderme stratejilerini birlikte kullanmışlardır. Çalışmalarında bağlantı ve düğüm arızaları ile zararlı düğüm saldırılarına (malicious and misbehaving nodes) karşı güvenilirlik ve direnç sağlayan bir olasılık algoritması önermişlerdir. ARRIVE olarak adlandırılan algoritmada algılayıcılar çevrelerindeki algılayıcıların davranışlarını gözlemleyerek olasılığa dayalı kararlar doğrultusunda veri iletimini gerçekleştirmektedir. Açıklamak gerekirse bir düğüm gelen veriyi iletirken yol üzerindeki bir sonraki ayırıt ve düğümün güvenilirliğine dayalı olasılık değerlerini kullanarak hangi yolu kullanacağına karar vermektedir. Bunun yanı sıra bir düğüme aynı verinin birden fazla kopyası ulaşırsa kopyalar farklı yollardan iletilmektedir. Bu algoritma aynı zamanda pasif katılım yöntemiyle iç yayın ortamından faydalanarak dış ataklara karşı ağın korunmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca algılayıcılar tarafından aynı verinin birkaç kopyasının gönderilmesiyle veri kaybının azaltılması hedeflenmiştir. Fakat fazladan gönderilen kopyalar nedeniyle ağ ömrünün ne kadar kısılacacağı hakkında bir yorum yapılmamıştır.

Yapılan çalışmalarda çoklu kopya gönderiminin veri kaybını azaltmada etkili olduğu görülmüş; ancak veri trafiği ve harcanan enerji miktarı artışının bu yöntemler için en büyük dezavantaj olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle Djukic ve Valaee [17] ve Ma vd. [22], [23] çoklu kopya gönderimi yerine veri paketlerinin parçalara ayrılıp şifrelenerek düğüm ayırık yollardan gönderildiği, enerji verimliliği daha yüksek algoritmalar önermişlerdir. Djukic vd. [17]'de üzerinde çalışılan ağın hiyerarşik bir yapıdan meydana geldiği ve baz istasyonun birden fazla vekil düğümlerle ağ üzerinden veri topladığı varsayılmaktadır. Böylelikle alternatif yol sayısı da arttırılmıştır. Geliştirilen yöntemde kaynak düğümler FEC (Forward Error Correction) metoduyla önce veri paketlerini fragmanlara (parçalara) ayırıp ardından kodlayarak her bir parçayı düğüm ayırık yollardan farklı vekil düğümlere göndermektedir. Kullanılan bu metot sayesinde bazı parçalar kaybolsa bile baz istasyonunda verinin tamamı yeniden oluşturulabilmektedir. Algoritmada kaynak düğümler alternatif yollarla ilgili veri kaybı ve harcanan enerji değerleri hakkında bilgi sahibidirler ve bu bilgiler ışığında ağ üzerindeki veri parçalarını enerji verimli ve güvenilir şekilde yollara dağıtmaktadırlar. Ek olarak bu çalışmada harcanan enerji miktarını enküçükleyen

bir doğrusal programlama modeli de sunulmuştur. Ma vd. [22], [23] ise ağıın saldırı toleransını iyileştirmek amacıyla geliştirdikleri algoritmalarda FEC algoritmasının yanı sıra birçok kriptografi yöntemi de kullanmışlardır. Algoritmalarda öncelikle veri paketleri gruplandırılıp simetrik ve asimetrik farklı kriptografi yöntemleriyle şifrelenmektedir. Daha sonra şifrelenmiş veri paketleri FEC kullanılarak parçalara ayrılıp kodlanmakta ve çoklu yollar üzerinden gönderilmektedir. Ma vd. [23]'te veri paketlerinin şifrelenmesi aşamasında Reed-Solomon Kodu'nun (RS(n,k)) da kullanıldığı yeni bir versiyon geliştirilmiştir.

Bazı çalışmalarda çoklu yollar herhangi bir saldırı gerçekleştiğinde mevcut yolun bozulması ihtimaline karşı alternatif iletim yolu bulundurmak için tanımlanmaktadır (Deng vd. [16], Quadjaout vd. [27], Al-Wakeel vd. [7], Nasser vd. [24]). Yani bir zaman diliminde her algılayıcı için bir aktif yol bulunurken diğer alternatif yollar herhangi bir aksaklık ihtimaline karşı pasif konumda bekletilmektedir. Nitekim Deng vd. [16]'nin geliştirdiği protokolde herhangi bir saldırı veya arıza anında önceden belirlenmiş alternatif yollar kullanılarak bozuk düğümler baypas edilmekte ve güvenli iletişim sağlanmaktadır. Bu protokolde öncelikli amaç dış saldırıların etkisini minimum düzeyde tutarak bölgesel kalmalarını sağlamaktır. Bu çalışmada da çeşitli kriptografi yöntemleri kullanılarak ağ güvenliği desteklenmiştir. Al-Wakeel vd. [7] olası saldırılara karşı ağın güvenliğini arttırmak amacıyla her iletim için farklı iletim yöntemleri işleten (round robin, redundant, selective mode) alternatif yolların kullanılmasına dayanan PRSA isimli bir algoritma önermişlerdir. Geliştirilen yöntemde öncelikle Dijkstra algortimasıyla kaynak hedef düğümler arasındaki çoklu en kısa yollar tespit edilmektedir. Daha sonra çeşitli atak tipleri göz önünde bulundurularak tehdit oluşturabilecek düğümler elimine edilmekte ve gerekli sayıda örülü veya ayrık güvenli en kısa yollar belirlenmektedir. Son olarak her iletim aşaması için iletim biçimi seçilmekte ve veri aktarımı gerçekleştirilmektedir. Ouadjaout vd. [27] ise çoklu yolların tespiti için yeni bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu algortimada her algılayıcı için baz istasyonunun iki adım uzaklıktaki farklı komşularına giden yollar belirlenmektedir. Önerdikleri rotalama protokolünde algılayıcılar öncelikle bu algoritma yardımıyla enerji verimli, düğüm ayrık, alternatif yolları tespit etmekte ve kendi rotalama tablolarını oluşturmaktadır. Daha sonra önerilen bir diğer algoritma yardımıyla algılayıcılar her periyotta kullanacakları yolu tablo üzerinden rastgele seçmektedir. Nasser ve Chen [24] diğer çalışmalardan farklı olarak ağ ömrü ve ağ güvenliğini birlikte ele almışlardır. Geliştirilen SEEM algoritmasında verinin hangi yoldan baz istasyonuna gönderileceği algılayıcı tarafından değil de baz istasyonu tarafından belirlenmektedir. Açıklamak gerekirse, öncelikle baz istasyonu ağdaki alternatif yolları tespit etmektedir. Daha sonra her veri aktarımında algılayıcıların

kalan enerji seviyelerine göre en yüksek enerjiye sahip yollar belirlenmekte ve bu yollar üzerinden veri aktarımı gerçekleşmektedir. Algılayıcıların enerji seviyeleri gönderdikleri ve aldıkları veri miktarına göre hesaplanmaktadır. SEEM algoritmasında bu kararları baz istasyonu verdiği için algılayıcıları etkileyecek rota protokolleriyle alakalı tehditlere karşı KAA daha iyi korunmaktadır.

2.3 Karmaşık Ağlar

Karmaşık Sistemler (Complex Systems) bilimi, sistemi oluşturan birimlerin etkileşimlerinin sistemin kolektif yapısını nasıl şekillendirdiğini ve sistemin çevresi ile ilgisini inceler. Karmaşık Ağlar (Complex Networks), doğada ve toplumda var olan hücreden insana, enerji dağıtım ağlarından internete pek çok sistemi tanımlarlar. Her ne kadar bu sistemler önceleri rastgele ortaya çıkan ağlar gibi modellenmiş olsalar da zamanla gerçek ağların topolojilerinin ve gelişimlerinin bazı organizasyon kurallarına göre oluştuğu belirlenmiştir (Albert vd. [4], Barabási ve Albert [9], Newman [25], Watts ve Strogatz [34]). Bu kurallar neticesinde de bu ağların ortak bazı yapısal özelliklere sahip oldukları anlaşılmıştır. Her ne kadar büyük olsalar da çoğu ağda bütün düğüm çiftleri arasında kısa mesafeli yolların olması (Small-World/Küçük Dünya özelliği), düğümler arası kümelenmenin fazla olması yani komşu iki düğümün ortak komşularının olması, ve genellikle az sayıda merkezî (kertesî yüksek) ve çok sayıda düşük kerteli düğümlerden oluşmaları (Scale-Free/Ölçekten Bağımsız kerte dağılımı) bunlara örnek olarak verilebilir. Bahsedilen bu özelliklerin aynı zamanda ağın kalımlılığı, kullanılabilirliği ve güvenilirliği açılarından önemli etkileri olduğu da belirlenmiştir. Örneğin az sayıda merkezî düğümün varlığı bunları hedefleyen planlı saldırılar karşısında ağ kalımlılığı ve kullanılabilirliğinin tehlikeye girecek olmasına sebep olmaktadır. Diğer yandan karmaşık ağlarda belli bir virüsün/etkinin yayılma hızı da rastgele ağlara kıyasla oldukça yüksektir. İnternet üzerinden yayılan virüslerin kısa zamanda çok fazla kullanıcıya ulaşması da bu nedene dayandırılmaktadır.

Genellikle çok sayıda algılayıcıdan oluşan KAA'lar da aslında karmaşık sistemlerdir ve bahsedilen ortak özelliklerin etkileri dikkate alınarak daha etkin ve güvenli bir şekilde oluşturulabilirler. Bir başka deyişle bu sayede adaptasyon, kendini örgütlenme (herhangi bir dış etki olmadan sistemin elemanlarının etkileşerek sistemin belli bir yapısal özelliği göstermesini sağlama), gürbüzlük gibi genel ağ özellikleri her bir algılayıcıyı tek tek programlamadan elde edilebilecektir. Bu gözlem de son dönemlerde geleneksel yaklaşımlarda olduğu gibi yeni protokoller yaratarak KAA performansını iyileştirmeye çalışmak yerine istenen sistem özelliklerine sahip olacak şekilde ağ topolojisinin

geliştirilmesine odaklanılması fikrini oluşturmuştur (Antoniou ve Pitsillides [8], Ruela vd. [29], Sharma ve Mazumdar [31]). Bu doğrultuda Sharma ve Mazumdar [31], kısıtlı altyapısal kaynakların KAA'nın enerji verimliliğinin arttırılması amacıyla nasıl kullanılabileceğini incelemişlerdir. Ağdaki ortalama sekme sayısını azaltacak şekilde eklenen kabloların hem düğüm başına ortalama enerji sarfiyatını düşürdüğünü hem de düğümlerin enerji kullanım oranlarının dengeli bir hale getirilebildiğini göstermişlerdir. Ruela vd. [29] ise karmaşık ağ yapısına sahip bir KAA topolojisi (düşük en kısa yol uzunluğu ve yüksek kümelenme katsayısı) oluşturulması durumunda ağın enerji sarfiyatını azaltarak ağ ömrünü uzatmanın ve ayrıca veri iletimindeki gecikmenin azaltılmasının mümkün olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Fakat bu çalışmalar konferans makaleleri kapsamında kalmış ve yeterince derinleştirilememiştir.

3. PROBLEM TANIMI VE ENİYİLEME MODELLERİ

Yapılan literatür incelemeleri sonucunda ağ güvenilirliği ve ağ ömrünün ayrı ayrı ele alındığı çok sayıda rotalama protokolü çalışması tespit edilirken her iki kriterin birlikte incelendiği çalışmalara nadiren rastlanmıştır. İncelenen optimizasyon tabanlı rotalama çalışmalarında ise ağ güvenliği kriterini de göz önünde bulunduran çalışmalarla karşılaşmamış ve bu alanda literatürde bir açık olduğu görülmüştür. Bu tez çalışmasında ağ ömrünü enbüyükleyen ve aynı zamanda ağ güvenilirliğini önerilen kısmi fazlalığa dayalı çoklu yol atama protokolüyle iyileştiren bir karışık tam sayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Karmaşık ağlar literatüründen de faydalanılarak geliştirilen bu protokolde ağın bazı topolojik özelliklerinden kaynaklanabilecek olası güvenilirlik riskleri göz önünde bulundurulmuştur. Böylelikle KAA şemsiyesi altında farklı disiplinlerdeki uygulamaları birleştiren yeni bir bakış açısı geliştirilmiştir.

Kısmi fazlalığa dayalı protokol için önerilen model aşamalı olarak geliştirilmiştir. Öncelikle ağ ömrünün enbüyüklediği ve ağ güvenliğinin göz ardı edildiği temel bir model kurulmuştur. Daha sonra bu modele algılayıcıların dengeli kullanımlarını sağlayarak merkezi düğümlerde meydana gelebilecek aksaklıklar karşısında büyük veri kaybı problemlerini azaltmayı hedefleyen kısıtlar eklenmiştir. Ardından bu yöntemin çoklu kopya ve çoklu yol atama stratejileriyle birlikte kullanıldığı yeni bir model geliştirilmiştir. Bu modelde güvenilirliğin sağlanması adına aşırı enerji sarfiyatı yapılmasına razı olunmaktadır. Her ne kadar bu modelde de amaç ağ ömrünün enbüyüklemek olsa da yoğun güvenlik önlemleri, haddinden fazla enerji harcanmasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla son olarak daha enerji verimli güvenilirlik stratejilerinin uygulandığı yeni bir karışık tamsayı programlama modeli geliştirilmiştir. Bu bölümde modeller ayrıntılı olarak incelenecek ve önerilen kısmi fazlalığa dayalı protokol anlatılacaktır.

3.1 Varsayımlar ve Parametreler

Bu çalışmada homojen yapılı KAA'lar üzerinde çalışılmıştır. Problem akış problemi olarak modellenmiştir. Ağ $G(N, A)$ olarak gösterilen yönlü bir çizge olarak ele alınmıştır. N düğüm kümesini, A ise algılayıcılar arasındaki tek adımlı iletişim yollarını ifade eden yönlü ayrıt kümesini göstermektedir. Bir (i, j) ayrıtının A kümesinde olabilmesi için j algılayıcısının i algılayıcısının menziline bulunması gerekir. $G(N, A)$ bir baz istasyonu (BS) ile başlangıç enerjileri, veri üretim sıklıkları ve enerji tüketim değerleri açısından özdeş olan çok sayıda algılayıcı düğümlerden oluşmaktadır.

Algılayıcı düğümler için kısıtlı enerji kaynakları bulunurken BS için herhangi bir enerji kısıtı bulunmadığı varsayılmaktadır. Düğümlerin başlangıç enerji miktarları eşittir ve B ile gösterilmektedir. Her algılayıcının birim zamanda çevresindeki değişiklikleri gözlemleyerek ürettiği veri miktarı S ile ifade edilmekte ve sabit olduğu varsayılmaktadır. P , enerji cinsinden birim veri üretme maliyetini ifade etmektedir. i algılayıcısı üzerindeki bir birim veriyi j algılayıcısına göndermek için PTX_{ij} kadar enerji harcamaktadır. Her algılayıcının gelen veriyi almak için harcadığı birim enerji ise sabittir ve PRX ile gösterilmektedir. Çalışmada ağ ömrü için KAA'da enerjisi ilk tükenen algılayıcının aktif olarak çalıştığı süreye eşit olduğu varsayılmıştır.

3.2 Fazlalıksız Model (No Redundant Flow - NRF)

Fazlalıksız Model'de (NRF'de) algılayıcıların ürettikleri verinin enerji verimli şekilde BS 'de toplanması sağlanarak ağ ömrü enbüyüklenmektedir. Ağ ömrü, T sürekli karar değişkeni ile gösterilmektedir. NRF'de herhangi bir fazladan veri gönderimi öngörülmez ve her algılayıcı ürettiği veriyi tek kopya halinde baz istasyonuna gönderir. Buna göre geliştirilen NRF modeli aşağıdaki gibidir;

(NRF)

$$\text{maks } T \quad (3.1)$$

kısıtları altında

$$\sum_{j:(i,j) \in A} f_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in A} f_{ji}^k = \begin{cases} S.T & \text{eğer } i = k \text{ ise} \\ -S.T & \text{eğer } i = BS \text{ ise} \\ 0 & \text{dd} \end{cases} \quad \forall i \in N, k \in N \setminus \{BS\} \quad (3.2)$$

$$\sum_{k \in N \setminus \{BS\}} \sum_{j:(j,i) \in A} PRX f_{ji}^k + \sum_{k \in N \setminus \{BS\}} \sum_{j:(i,j) \in A} PTX_{ij} f_{ij}^k + P.S.T \leq B \quad \forall i \in N \setminus \{BS\} \quad (3.3)$$

$$f_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, k \in N \setminus \{BS\}. \quad (3.4)$$

Burada f_{ij}^k sürekli karar değişkeni $k \in N \setminus \{BS\}$ tarafından üretilen verinin ne kadarının i algılayıcısı üzerinden j algılayıcısına gönderildiğini gösterir. Amaç fonksiyonu (3.1)'de ağ ömrü T enbüyüklenmektedir. (3.2) kısıtları veri akışı için akış dengesini sağlamaktadır. Buna göre istenen, her $k \in N \setminus \{BS\}$ algılayıcısının ürettiği verinin tamamını BS 'ye ulaştırması ve iletim yolu üzerindeki hiç bir algılayıcıda veri kaybı

olmadan aktarımın sağlanmasıdır. Yani aradaki herhangi bir $i \in N \setminus \{BS, k\}$ algılayıcısı için i 'ye gelen toplam akış, i 'den çıkan toplam akışa eşit olmalıdır. Aynı şekilde k kaynaklı olup BS 'ye gelen toplam akış k 'dan çıkan akış miktarına eşit olmalıdır. Enerji kısıtları (3.3)'te birinci terim diğer algılayıcılardan gelen veriyi almak için harcanan toplam enerji miktarını, ikinci terim veri iletmek için harcanan toplam enerji miktarını ve son terim de veri üretmek için kullanılan enerji miktarını ifade etmektedir. Algılayıcıların birim zamanda ürettikleri veri miktarı sabit varsayıldığından T zamanda üretilen toplam veri miktarı ağ ömrü ile doğru orantılıdır.

(3.4)'te gösterildiği gibi f_{ij}^k sürekli bir değişkendir. Dolayısıyla NRF'de bir $k \in N \setminus \{BS\}$ sensörünün BS 'ye gönderdiği verinin fragmanlara ayrılıp çoklu yollar üzerinden gönderilmesine izin verilmektedir. Fakat bu durum verinin kopyalanarak çoklu yollar üzerinden gönderilmesi ile karıştırılmamalıdır. Adından da anlaşılacağı gibi NRF'de hiç bir sensör için verinin kopyalanması ile fazladan veri gönderimi söz konusu değildir. NRF'de amaç sadece algılayıcı enerjilerini en verimli şekilde kullanarak ağ ömrünü enbüyüklemektir. Dolayısıyla modelde ağ güvenilirliğini iyileştirmeye yönelik herhangi bir yöntem kullanılmamıştır. Çeşitli stratejilerle ağ güvenilirliğini iyileştirmeyi amaçlayan ve NRF modeli baz alınarak geliştirilen diğer modellerden sonraki bölümlerde bahsedilecektir.

3.3 Dengeli Fazlalıksız Model (Balanced No Redundant Flow - bNRF)

Ağ üzerinde bazı algılayıcılar konumları gereği birçok algılayıcının veri gönderim yolu üzerinde bulunabilirler. Bu durum iki sonuç doğurabilir. Birincisi üretilen verinin büyük bir çoğunluğu bu düğümler üzerinden aktarılabilir. İkincisi ise çok sayıda algılayıcının baz istasyonuyla bağlantısının kurulmasında bu algılayıcılar rol alabilir. Dolayısıyla bu merkezi algılayıcılarda herhangi bir hata ya da arıza olduğunda ağın tamamını ciddi ölçüde etkileyebilecek veri ya da bağlantı kaybı problemleri meydana gelebilir. Bir başka deyişle sadece bir kaç merkezi algılayıcının herhangi bir saldırıya maruz kalması, çok sayıda merkezi olmayan algılayıcının fonksiyonelliğini yitirmesine eşdeğer hasara yol açabilir. Bölüm 3.3'te bahsedildiği gibi merkezi düğümlerin ağa etkisi karmaşık ağlar biliminde de incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda özellikle çok sayıda düşük kerteli ve az sayıda kerte derecesi yüksek düğümden oluşan ölçekten bağımsız ağların rastgele aksaklıklar karşısında dayanıklı olduğu; ancak merkezi düğümleri hedef alan saldırılar karşısında güvenliğinin hızla tehlikeye girdiği tespit edilmiştir (Albert vd. [3]). Bunun yanı sıra özellikle ağırlıklı karmaşık ağlarda (weighted complex networks)

topolojik özellikleri ve üzerinde taşıdığı akış miktarı açısından merkezi olan düğümleri hedef alan saldırılar karşısında ağ üzerinde taşınan akış trafiğinin ağın parçalanmasından çok daha önce riske girdiği görülmüştür (Dall’asta [15]). Bu bakış açısıyla merkezi noktalardaki algılayıcıların yoğun kullanımının engellenmesiyle KAA’lar için bahsedilen risklerin azaltılabileceği öngörülmüştür. Bu amaçla NRF’ye algılayıcıların üzerlerinden geçen azami toplam akış miktarını sınırlandıran kısıtlar eklenmiş ve yeni model bNRF olarak adlandırılmıştır. İlgili kısıt aşağıda gösterilmektedir;

$$\sum_{k \in N \setminus \{BS\}} \sum_{i: (i,j) \in A} f_{ij}^k \leq \alpha.S.T \quad \forall j \in N \setminus \{BS\} \quad (3.5)$$

Burada sol taraftaki toplam herhangi bir $j \in N \setminus \{BS\}$ algılayıcısına diğer algılayıcılardan gelen toplam akış miktarıdır. $S.T$ ise j ’nin ömrü boyunca ürettiği toplam veri miktarıdır. Dolayısıyla akış denge kısıtları (3.2) ve (3.5) sayesinde her algılayıcı kendi ürettiğinin en fazla $(1 + \alpha)$ katı kadar akış transferi yapabilmektedir. Böylelikle merkezi noktalardaki algılayıcıların aşırı kullanımı engellenerek bu düğümlerden kaynaklanabilecek büyük çaplı veri kaybı problemlerinin en aza indirilmesi hedeflenmiştir.

bNRF modeli enerji verimliliğinin yanı sıra algılayıcıların üzerlerinden geçen akış miktarını sınırlandırarak algılayıcıların dengeli kullanımını sağlamaktadır. Bu sayede merkezi düğümlerde meydana gelebilecek aksaklıkların bütün KAA’ya etkisinin azaltılabileceği öngörülmektedir. Fakat modelde olası bir saldırı veya arıza esnasında veri kaybını önlemeye yönelik herhangi bir önlem yer almamaktadır. Dolayısıyla muhtemel iç veya dış tehditlere maruz kalan algılayıcıların fonksiyonelliğini yitirmesi durumunda üzerlerinden veri aktaran komşu algılayıcılar için bir miktar veri kaybı kaçınılmaz olacaktır. Bir sonraki bölümde anlatılan modelde, dengeli kullanım stratejisiyle birlikte, literatürde sıklıkla kullanılan bazı güvenilirlik protokolleri de uygulanarak veri kaybı problemlerinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

3.4 Tam Fazlalıklı Model (Fully Redundant Flow - FRF)

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda çoklu yollar atama stratejileri ve çoklu kopya gönderimi yöntemlerinin ağ güvenilirliğini iyileştirmek için sıklıkla kullanıldığı ve çeşitli arıza veya saldırılar sonucu oluşan veri kaybı problemlerini azalttığı görülmüştür (Stavrou ve Pitsillides [33]). Bu sonuçlardan yola çıkarak algılayıcıların ürettikleri veriyi tek kopya halinde ilettikleri bNRF modeli geliştirilmiş ve Tam Fazlalıklı Model (FRF) önerilmiştir. FRF’de algılayıcıların üzerlerinden geçen akış miktarlarının

sınırlandırılmasının yanı sıra çoklu yol ve çoklu kopya gönderimi yöntemleri birlikte kullanılmaktadır. Bütün algılayıcıların ürettikleri veriyi iki kopya halinde; yani birincil ve ikincil akış olarak göndermeleri sağlanmıştır. Dolayısıyla modele $k \in N \setminus \{BS\}$ tarafından üretilen verinin ne kadarının i algılayıcısından j algılayıcısına gönderildiğini gösteren g_{ij}^k sürekli karar değişkeni eklenmiştir. Daha önce de bahsedildiği üzere fazladan veri gönderiminde amaç birincil akışın baz istasyonuna ulaşımında bir sorun olursa kopya veri ile bu eksikliğin telafi edilmesidir. Dolayısıyla birincil akışın takip ettiği yol üzerindeki herhangi bir algılayıcıdaki veya bağlantıdaki soruna karşı korunuyor olabilmek adına aynı kaynaklı birincil ve ikincil akışın düğüm ayrık yollardan gönderilmesi istenmektedir. Her $i \in N$ ve $k \in N \setminus \{BS\}$ düğümleri için düğüm ayrık yolların tespitinde kullanılan ikili karar değişkeni aşağıda gösterilmektedir;

$$x_i^k = \begin{cases} 1 & \text{eğer birincil akışta } k \text{ kaynaklı veri } i \text{ algılayıcısı üzerinden aktarılıyorsa} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Bu sayede aynı veri paketi kopyalarının iletimi için kullanılan yollardan herhangi birinde bir aksaklık meydana geldiğinde diğer yoldan gönderilen kopyanın bu durumdan etkilenmemesi sağlanmıştır. Modelin ayrıntıları aşağıda gösterilmektedir;

(FRF)

$$\text{maks } T \quad (3.1)$$

kısıtları altında

$$(3.2), (3.4), (3.5)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in A} g_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in A} g_{ji}^k = \begin{cases} ST & \text{eğer } i = k \text{ ise} \\ -ST & \text{eğer } i = BS \text{ ise} \\ 0 & \text{dd} \end{cases} \quad \forall i \in N, k \in N \setminus \{BS\} \quad (3.6)$$

$$\sum_{k \in N \setminus \{BS\}} \sum_{j:(j,i) \in A} PRX(f_{ji}^k + g_{ji}^k) + \sum_{k \in N \setminus \{BS\}} \sum_{i:(i,j) \in A} PTX_{ij}(f_{ij}^k + g_{ij}^k) + P.S.T \leq B$$

$$\forall i \in N \setminus \{BS\} \quad (3.7)$$

$$f_{ij}^k \leq Mx_i^k \quad \forall (i, j) \in A, k \in N \setminus \{BS\} \quad (3.8)$$

$$g_{ij}^k \leq M(1 - x_i^k) \quad \forall (i, j) \in A, k \in N \setminus \{BS\} \quad (3.9)$$

$$g_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, k \in N \setminus \{BS\} \quad (3.10)$$

$$x_i^k \in \{0, 1\} \quad \forall i, k \in N \setminus \{BS\} \quad (3.11)$$

Bu modelde birincil akış koruma kısıtlarına (3.2) ek olarak, ikincil akış için akış denge kısıtları (3.6) da mevcuttur. Enerji kısıtlarında (3.7) ise ikincil akış için harcanan enerji miktarı da dikkate alınmıştır. bNRF modelinde kullanılan (3.5) dengeli kullanım kısıtları bu modelde de yer almaktadır. (3.8) ve (3.9) düğüm ayrık yolların belirlenmesi için kullanılmaktadır. Buna göre eğer $i \in N \setminus \{BS\}$ algılayıcısı k kaynaklı birincil akışın transferi için kullanılıyorsa ($x_i^k = 1$), (3.9) kısıtı i 'den k kaynaklı ikincil akış çıkışı yasaklamaktadır ($g_{ij}^k \leq 0$). Burada M çok büyük bir sabit değer olarak alındığından söz konusu durumda f_{ij}^k 'nin değeri sınırlandırılmamaktadır. Diğer yandan $x_i^k = 0$ durumunda ise i 'nin ikincil akış tarafından kullanılması veya kullanılmaması yönünde bir zorlama getirilmemekte ve serbest bırakılmaktadır. Son olarak (3.10) ve (3.11) kısıtları işaret kısıtlarını ve ikili değişken kısıtlarını göstermektedir. Burada ikincil akışın da sürekli bir karar değişkeni ile modellenmesi sayesinde ikincil akış için de verinin fragmanlara ayrılarak çoklu yollar üzerinden baz istasyonuna gönderilmesine izin verildiğine dikkat edilmelidir. Modelde birincil ve ikincil akışların miktarlarına ve hangi düğüm ayrık yollardan gönderileceğine karar verilmektedir.

3.5 Kısmi Fazlalıklı Model (Partially Redundant Flow - PRF)

FRF modelinde çoklu yollar atama, çoklu kopya gönderimi ve algılayıcıların üzerlerinden geçen veri akışının sınırlandırılması olmak üzere üç temel güvenilirlik önlemi uygulanmaktadır. Yapılan çalışmalarda çoklu kopya gönderiminin ağ güvenilirliğini iyileştirdiği; ancak algılayıcıların sınırlı enerjisinin hızla harcanmasına sebep olduğu ve dolayısıyla ağ ömründe ciddi azalmalara yol açtığı görülmüştür (Ma vd. [22]). Bunun yanı sıra konumları gereği veri transferinde daha yoğun kullanılacak algılayıcıların sınırlandırılmasının da ağ ömrünü olumsuz yönde etkileyebileceği öngörülmektedir. Açıklamak gerekirse merkezi düğümler genellikle algılayıcıların büyük bir kısmının en enerji verimli şekilde baz istasyonuna veri gönderdikleri en kısa yollar üzerinde bulunmaktadır. Tüm algılayıcıların üzerlerinden geçen akış miktarının sınırlandırılmasıyla algılayıcıların bir kısmı daha az enerji verimli alternatif yolları kullanmaya zorlanacaktır.

Bu da ağ ömrünün azalmasına sebep olabilecektir.

Bu bölümde ağ ömrünü enbüyüklerken FRF modelinde uygulanan güvenilirlik önlemlerinden daha enerji verimli şekilde faydalanan bir karışık tam sayılı programlama modeli sunulmuştur. Özet olarak FRF’de bütün algılayıcılar ürettikleri veriyi kopyalarken PRF’de sadece “merkezi” olarak adlandırılan bir algılayıcı üzerinden ürettikleri veriyi iletmeye çalışan algılayıcıların veri kopyalamasına izin verilmektedir. Bir algılayıcının merkezi olabilmesi için diğer algılayıcıların veri transferinde yoğun olarak kullanılması ve merkezi seçilmesi ile ağ ömrünü olumlu yönde etkileyecek olması gerekir. Buna göre PRF’de uygulanan protokolda sınırlı sayıda merkezi düğüm bulunmasına izin verilmektedir. Bu çalışmada temel durum olarak en fazla bir merkezi düğümün olduğu durum incelenmiştir. Modelde merkezi düğümü belirlemek için kullanılan ikili değişken aşağıda gösterilmektedir;

$$h_i = \begin{cases} 1 & \text{eğer } i \text{ merkezi düğümse} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad \forall i \in N \setminus \{BS\}$$

Algılayıcıların üzerlerinden geçen akış miktarı FRF modelinde olduğu gibi bu modelde de sınırlandırılmıştır. Ancak eğer sistemde bir çok algılayıcının kullandığı veri iletim yollarını kısaltabilecek ve dolayısıyla ağ ömrünü iyileştirebilecek bir algılayıcı varsa bu algılayıcı merkezi düğüm olarak seçilmekte ve bu algılayıcının ilettiği akış miktarı için herhangi bir kısıtlama getirilmemektedir. Daha önce de belirtildiği gibi merkezi düğümle ilgili risklerin KAA’ya etkisini azaltabilmek amacıyla ise çoklu kopya gönderimi stratejisi kullanılmıştır. PRF’de üretilen verinin tamamının iki kopya halinde gönderilmesi yerine sadece merkezi düğümler üzerinden geçen veri paketlerinin çoğaltılması önerilmektedir. Bir başka deyişle eğer $k \in N \setminus \{BS\}$ kaynaklı bir veri paketi merkezi düğümden geçiyorsa k algılayıcısı bu paketin ikinci bir kopyasını da düğüm ayırık başka bir yoldan baz istasyonuna göndermelidir. Böylelikle algılayıcılar hem dengeli hem de enerji verimli bir şekilde kullanılacak ve sadece ağ ömründe iyileşme sağlıyorsa merkezi düğüm seçilecektir. Özellikle bilinçli saldırılar için en cazip hedef olan ve herhangi bir arıza esnasında daha büyük hasarlara yol açabilecek olan merkezi düğümün üzerinden geçen veri paketleri ise gönderilen ikincil akış ile korunmuş olacaktır. PRF modelinde birincil ve ikincil akışın hangi yollardan ne kadar gönderileceğine ve aynı zamanda merkezi düğümün hangisi olacağına karar verilmektedir. Aşağıda modelin tamamı gösterilmiştir;

(PRF)

$$\text{maks } T \quad (3.1)$$

kısıtları altında

$$(3.2)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in A} f_{ij}^k - \sum_{l:(k,l) \in A} g_{kl}^k \leq M(1 - h_j) \quad \forall j, k \in N \setminus \{BS\} : j \neq k \quad (3.12)$$

$$- \sum_{i:(i,j) \in A} f_{ij}^k + \sum_{l:(k,l) \in A} g_{kl}^k \leq M(1 - h_j) \quad \forall j, k \in N \setminus \{BS\} : j \neq k \quad (3.13)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in A} f_{ij}^k - \sum_{i:(i,BS) \in A} g_{iBS}^k \leq M(1 - h_j) \quad \forall j, k \in N \setminus \{BS\} : j \neq k \quad (3.14)$$

$$- \sum_{i:(i,j) \in A} f_{ij}^k + \sum_{i:(i,BS) \in A} g_{iBS}^k \leq M(1 - h_j) \quad \forall j, k \in N \setminus \{BS\} : j \neq k \quad (3.15)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in A} g_{ij}^k - \sum_{i:(j,i) \in A} g_{ji}^k = 0 \quad \forall j, k \in N \setminus \{BS\}, j \neq k \quad (3.16)$$

$$\sum_{k \in N \setminus \{BS\}} \sum_{i:(i,j) \in A} f_{ij}^k - \alpha.S.T \leq Mh_j \quad \forall j \in N \setminus \{BS\} \quad (3.17)$$

$$- \sum_{k \in N \setminus \{BS\}} \sum_{i:(i,j) \in A} f_{ij}^k + \alpha.S.T \leq M(1 - h_j) \quad \forall j \in N \setminus \{BS\} \quad (3.18)$$

$$\sum_{j \in N \setminus \{BS\}} h_j \leq 1 \quad (3.19)$$

$$3.4, (3.7) - (3.11)$$

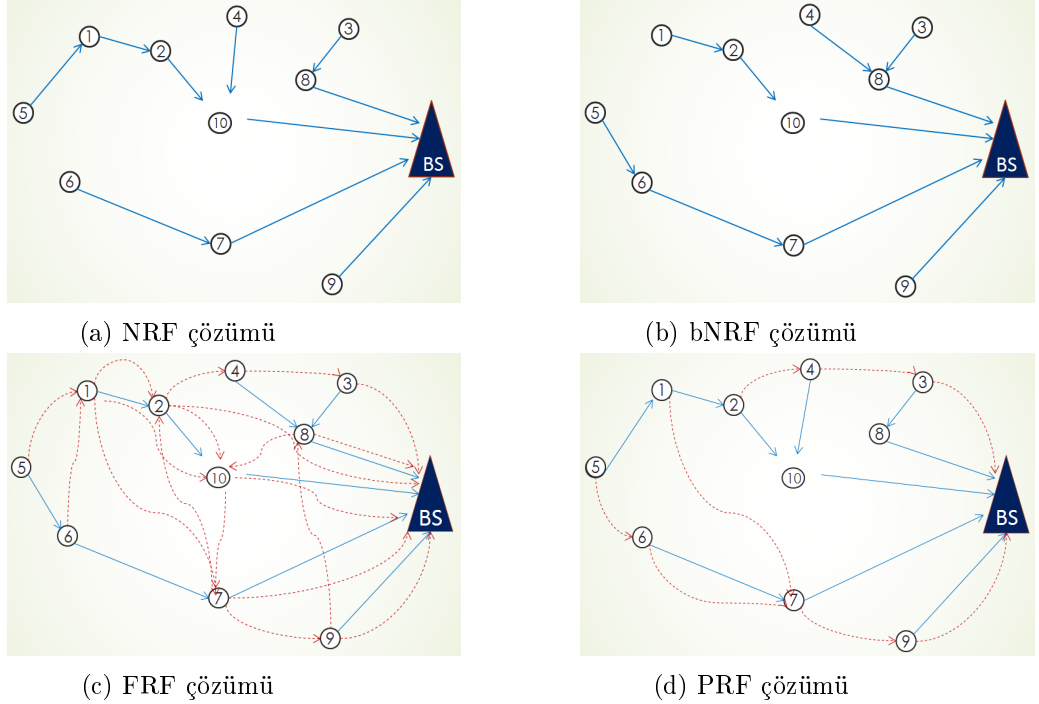
$$h_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in N \setminus \{BS\} \quad (3.20)$$

Modelin amaç fonksiyonu (3.1) ve birincil akış için akış denge kısıtları (3.2) diğer modellerle aynıdır. İkincil akış için akış denge beş kısıtla sağlanmaktadır. (3.12) ve (3.13) kısıtları sayesinde merkezi düğümden geçen her k kaynaklı birincil veri paketi kendi kaynağında kopyalanıp bir de ikincil akış olarak gönderilir. Buna göre, eğer $j \in N \setminus \{BS, k\}$ merkezi olarak seçilirse ($h_j = 1$) bu durumda j 'ye gelen k kaynaklı toplam veri miktarı k 'dan çıkan toplam ikincil akış miktarına eşit olmalıdır. (3.14) ve (3.15) ise merkezi düğümden geçen k kaynaklı birincil akış kadar ikincil akışın baz istasyonuna ulaşmasını sağlar. (3.16) ara düğümler için ikincil akış denge kısıtlarıdır. FRF modelinde kullanılan enerji kısıtları (3.7) ve düğüm ayrık yolların belirlenmesi ile ilgili kısıtlar (3.8) ve (3.9) bu modelde de kullanılmaktadır. (3.17) ve (3.18) merkezi düğümün belirlenmesinde kullanılan kısıtlardır. Modele göre bir algılayıcının merkezi

düğüm olabilmesi için üzerinden en az kendi ürettiğinin $(1 + \alpha)$ katı kadar birincil akış geçmesi gerekir. Bu kısıtlar aynı zamanda merkezi olmayan algılayıcıların üzerinden geçen akışı sınırlayarak bu algılayıcıların dengeli kullanımını da sağlamaktadır. (3.19) ise sistemde en fazla bir merkezi düğüm olmasına izin vermektedir. (3.10), (3.11) ve (3.20) işaret ve ikili değişken kısıtlarıdır.

3.6 Modellerin Bir Örnek Üzerinde Karşılaştırılması

Kullanılan stratejilerin ağ güvenilirliğine öngörülen katkılarını daha iyi anlayabilmek için on algılayıcı ve bir baz istasyonundan oluşan küçük bir örnek üzerinde tüm modeller için karşılaştırmalar yapılmıştır.

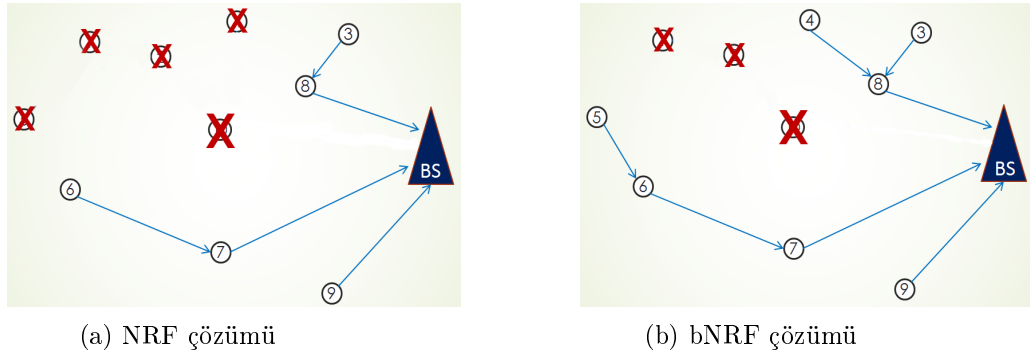


Şekil 3.1: Basit Bir Örnek üzerinde Modellerin Çözümleri

Şekil 3.1'de tüm modeller için aynı örnek üzerinde çözümler yer almaktadır. Birincil akışlar sürekli mavi çizgilerle, ikincil akışlar ise kesikli kırmızı çizgilerle gösterilmiştir. NRF çözümünde 5., 1., 2. ve 4. algılayıcılar 10. algılayıcı üzerinden ürettikleri verinin tamamını baz istasyonuna iletmektedirler. Dolayısıyla bu model için en merkezi düğüm 10. algılayıcıdır. Öte yandan bNRF modelinde kullanılan (3.5) kısıtı ile algılayıcılar üzerinden aktarılabilen veri miktarı sınırlandırıldığından, bu modelin çözümünde 4. ve 5. algılayıcılar alternatif iletim yolları üzerinden veri transferi yapmaya zorlanmıştır.

Böylelikle 10. algılayıcının yoğun kullanımı engellenerek tüm algılayıcıların veri transferinde daha dengeli kullanımı sağlanmıştır. FRF modelinde birincil akış için dengeli kullanım sağlanırken fazlalığa dayalı güvenilirlik protokolü tüm algılayıcılar için uygulandığından Şekil 3.1c'de görülen çözümde algılayıcıların tamamı aynı veri paketlerinin kopyalarını iki düğüm ayrık yol üzerinden baz istasyonuna ulaştırmaktadır. Son olarak PRF çözümünde ise 10. algılayıcı merkezi düğüm seçilmiş ve yalnızca bu algılayıcı üzerinden birincil akış gönderen 1., 2., 4. ve 5. algılayıcılar ürettikleri veriyi iki kopya halinde düğüm ayrık yollardan iletmişlerdir.

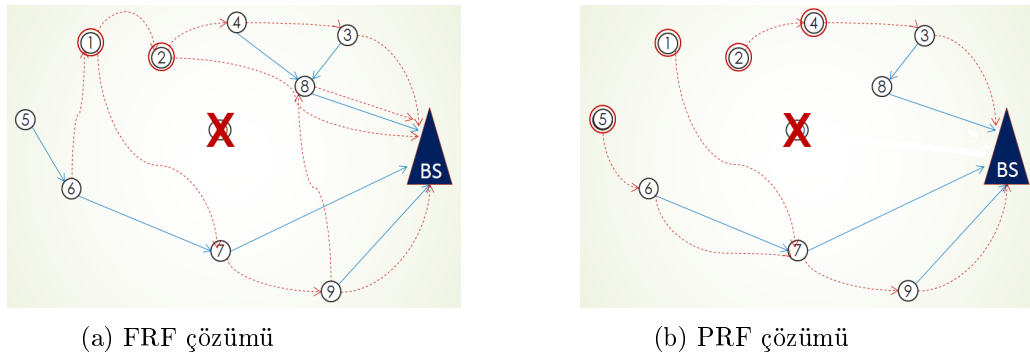
Çözümler incelendikten sonra NRF çözümünde en büyük veri kaybı problemine yol açabilecek düğümün; yani 10. algılayıcının hasar gördüğü varsayılmıştır. Bu durumda tüm çözümlerde ağda meydana gelen veri kaybı incelenmiştir. Şekil 3.2a'da görüldüğü üzere NRF çözümünde sadece 10. düğümün hasar görmesiyle algılayıcıların yarısı baz istasyonuna veri ulaştırılmamaktadır. Şekil 3.2b'de görülen bNRF çözümünde ise 10. algılayıcıya ek olarak 1. ve 2. algılayıcılar baz istasyonuna veri gönderememektedir. Dolayısıyla bNRF modelinde 4. ve 5. algılayıcıların daha enerji maliyetli yollar kullanmaları pahasına 10. algılayıcıda meydana gelen aksaklıktan etkilenmeleri engellenmiştir. Böylelikle ağda meydana gelen veri kaybı miktarı da azaltılmıştır.



Şekil 3.2: Basit Bir Örnek üzerinde NRF ve bNRF Çözümlerinde Veri Kaybı

bNRF modelinde veri kaybı miktarı NRF'ye göre azalsa da bazı algılayıcılar hasar görmemiş olmalarına rağmen ürettikleri veriyi baz istasyonuna ulaştırılmamaktadırlar. FRF ve PRF modelinde kullanılan tam ve kısmi fazlalığa dayalı güvenilirlik protokolü de bu gibi problemleri mümkün mertebe giderebilmek için kullanılmıştır. Nitekim Şekil 3.3a'da görülen FRF çözümünde 10. algılayıcı fonksiyonelliğini yitirdiğinde 1. ve 2. algılayıcıların birincil akış yolları da kullanılamaz hale gelmektedir; ancak 1. algılayıcı $1 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow BS$ yolu üzerinden, 2. algılayıcı ise $2 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow BS$ yolunu kullanarak ikincil akış gönderdiğinden herhangi bir veri kaybı olmamaktadır. Bunun yanı sıra bu çözümde 5. algılayıcı sadece birincil akış gönderebilirken diğer algılayıcıların

tamamı her iki düğüm ayrık yol üzerinden de veri aktarımı yapabilmektedir. Şekil 3.3b’de gösterilen PRF çözümünde ise merkezi düğüm seçilen 10. algılayıcıda meydana gelen hasar sonucunda 1, 2, 4 ve 5. algılayıcıların birincil akış yolları kullanılamaz hale gelmiştir. Ancak PRF modelinde sadece merkezi düğüm üzerinden veri aktarımı yapan algılayıcılar için düğüm ayrık yollar üzerinden ikincil akış gönderme zorunluluğu bulunduğundan bu çözümde 1., 2., 4. ve 5. algılayıcılar ürettikleri veri paketlerinin ikincil kopyalarını baz istasyonuna ulaştırmayı başarmışlardır. İkincil veri paketleri için 1. algılayıcı $1 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow BS$, 2. algılayıcı $2 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow BS$, 4. algılayıcı $4 \rightarrow 3 \rightarrow BS$ ve 5. algılayıcı $5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow BS$ yollarını kullanmışlardır.



Şekil 3.3: Basit Bir Örnek üzerinde FRF ve PRF Çözümlerinde Veri Kaybı

Tüm çözümler incelendiğinde, fazlalığa dayalı güvenilirlik protokolünün tüm algılayıcılar için dengeli kullanım stratejisiyle birlikte uygulanmasıyla ağda meydana gelebilecek daha büyük aksaklıklar karşısında FRF’nin ağ güvenilirliği açısından diğerlerine göre daha iyi performans sergileyeceği görülmektedir. Öte yandan bu modelde algılayıcıların tamamının ürettikleri veriyi ikişer kopya halinde göndermelerinin enerji tüketimini oldukça hızlandıracağı aşikardır. Aynı zamanda dengeli kullanım stratejisi de ağda en kısa yolların kullanımını sınırladığından, bu modelde bir çok algılayıcının en enerji verimli yolları kullanmasının engelleneceği dolayısıyla ağ ömrünün olumsuz yönde etkileneceği öngörülmektedir. Bu nedenle PRF modelinde dengeli kullanım kısıtları ağ ömrünü iyileştirebilecek bir merkezi düğüm olduğu durumda bu algılayıcı için gevşetilmiş ve aynı zamanda fazlalığa dayalı güvenilirlik protokolü de kısmi düzeyde tutulmuştur. Böylelikle bu modelin merkezi düğümün KAA’ya sağladığı avantajlardan faydalanmasına izin verilirken, güvenilirlik stratejilerinin ağ ömrüne olumsuz etkilerinin hafifletilmesi amaçlanmıştır. Ek olarak fazlalığa dayalı protokolün sadece merkezi düğüm üzerinden veri akışı sağlayan algılayıcılar için kullanılmasıyla da bu düğümün getirdiği büyük çaplı veri kaybı risklerinin mümkün mertebe giderilmesi önerilmiştir.

3.7 Geçerli Eşitsizlikler

Bu bölümde PRF modelinin çözüm süresini iyileştirmek için önerilen geçerli eşitsizlikler sunulmuştur. İlk olarak düğüm ayrık yolların seçiminde kullanılan ikili karar değişkenlerinin belirlenmesini kolaylaştırabilecek eşitsizlikler geliştirilmiştir. Bunun için ağ içerisinde bir düğümün diğerleri üzerinden veri aktaramadığı durumlar araştırılmıştır. Önerilen birinci genel eşitsizlik grubu bir gözleme dayanmaktadır. Buna göre bir algılayıcının diğer algılayıcıların veri aktarım yollarında bulunabilmesi için kapsama alanında veri paketlerini aldığı ve ilettiği en az iki komşusu olmalıdır. Bir başka deyişle eğer ağda kerte derecesi (d_i) bir olan düğümler varsa, bu algılayıcılar diğer algılayıcıların veri iletiminde kullanılmayacaktır. Bununla ilgili eşitsizlik aşağıda gösterilmektedir;

$$\sum_{k \in N \setminus \{BS\}} x_i^k = 0 \quad \forall i \in N \setminus \{BS\} : d_i = 1. \quad (3.21)$$

İkinci olarak düğüm ayrık yolların belirlenmesi ile ilgili bir kısıt geliştirilmiştir. Modele göre bir veri paketinin ikinci kopyasının üretilmesi için birincil akışın merkezi düğüm üzerinden aktarılması gerekmektedir. Ayrıca yukarıda da anlatıldığı gibi aynı kaynaklı veri paketi kopyalarının, yani birincil ve ikincil akışın, düğüm ayrık yollardan iletilmesi istenecektir. İki kopya olduğu durumda birincil kopya her zaman merkezi düğüm tarafından iletiğinden ağ üzerinde hiç bir ikincil veri paketinin merkezi düğüm üzerinden aktarılması mümkün değildir. Bu durumu modellemek için geliştirilen eşitsizlik aşağıdaki gibidir;

$$\sum_{k \in N \setminus \{BS\}} \sum_{i: (i,j) \in A} g_{ij}^k \leq M(1 - h_j) \quad \forall j \in N \setminus \{BS\}. \quad (3.22)$$

Buna göre eğer bir $j \in N \setminus \{BS\}$ algılayıcısı merkezi ise sağ taraf değeri 0 olacak ve hiç bir kaynak algılayıcının ikincil akışı j algılayıcısını kullanamayacaktır.

Son olarak sistemde hangi düğümlerin merkezi olup olamayacağı incelenmiştir. Problemden bir algılayıcının merkezi düğüm seçilebilmesi için kendi ürettiğinin en az $(1 + \alpha)$ katı kadar veri aktarması gerekmektedir. Dolayısıyla kerte derecesi bir olan düğümler başka düğümlerin veri transferinde kullanılmadığından merkezi düğüm de seçilememektedir. İlgili eşitsizlik aşağıdaki gibidir;

$$\sum_{j \in N \setminus \{BS\}: d_j=1} h_j = 0. \quad (3.23)$$

Geliştirilen eşitsizlik gruplarından (3.22) merkezi düğüm seçilen her durumda geçerlidir. Öte yandan (3.21) ve (3.23) ise ağda kerte derecesi bir olan düğümler varsa kullanılabilir. Bu durumda modele eklenmesi gereken eşitsizlik sayısı menziline bir komşusu bulunan algılayıcı sayısı ile orantılıdır. Dolayısıyla farklı topolojik özelliklere sahip ağlarda (3.21) ve (3.23) eşitsizliklerinin çözüm süresine etkilerinin farklı olabileceği öngörülmektedir.

4. PERFORMANS ANALİZİ

4.1 Örnek Kümesinin Oluşturulması

Üzerinde çalışılan veri kümesi dairesel bir alana yerleştirilen, merkezden uzaklığı düzgün dağılıma göre belirlenen algılayıcılardan oluşan KAA örnekleri içermektedir. Ağ üzerinde baz istasyonu da benzer şekilde düzgün dağılıma göre yerleştirilmektedir. Gözlem alanının büyüklüğü KAA'daki algılayıcı sayısı ile doğru orantılıdır. Ağ örnekleri oluşturmak için kullanılan algoritma aşağıda gösterilmiştir;

Algoritma 1 KAA'da Algılayıcıların Rastgele Konumlandırılması Algoritması 1

Girdi: Düğüm kümesi N , düğüm sayısı $NODES$

Çıktı: PTX Matrisi, A Ayrıt kümesi

```
sc ← 100
β ← 0,9
area ← (√(sc/2))2πNODES // Gözlem alanının büyüklüğünü hesapla.
radius ← √(area/π)
p ← 1
Her  $i \in N$  için //Algılayıcıların düzlemde x ve y koordinatlarını belirle.
    ph ← 2πrandom()
    r ← 10pradius√random()
    xci ← rsin(ph)
    yci ← rcos(ph)
Her  $i \in N$  için //Algılayıcılar arasındaki mesafeyi hesapla.
    Her  $j \in N$  için
        Eğer  $i \leq j$  ise
            dij ← √((xci - xcj)2 + (yci - ycj)2)
            dij ← dji
            Eğer dij ≤ β10pradius ise
                aij ← 1
                aji ← aij
    Her  $i, j \in A$  için //Birim veri iletim enerjilerini hesapla.
        Eğer  $j \leq i$  ise
            PTXij ← 50 + 10-2dij2
        Eğer  $j \neq BS$  ise
            PTXji ← PTXij
```

Oluşturulan KAA'daki algılayıcıların menzilleri birbirine eşittir ve gözlem alanının çapının 0,45 katına eşit olduğu kabul edilmiştir. Her (i, j) ayrıtı için enerji sarfiyatı cinsinden veri transferi maliyetini ifade eden PTX_{ij} değerleri $50 + 10^{-2}d_{ij}^2$ formülü kullanılarak belirlenmektedir. Buna göre bir $i \in N \setminus \{BS\}$ algılayıcısının başka bir $j \in N \setminus \{i\}$ düğümüne veri iletmeye durumunda harcayacağı birim enerji d_{ij}^2 ile doğru

orantılıdır. Dolayısıyla i için iletim mesafesi uzadıkça harcanacak enerji artacaktır. Veri kümesinin genel topolojik özellikleri Tablo 4.1'de gösterilmektedir. Bu çalışmada ele alınan KAA örnekleri en az 21 en fazla 81 algılayıcıdan oluşmaktadır. Her ağ büyüklüğü için 10 ayrı örnek üretilmiştir.

Tablo 4.1: Örnek Kümesinin Özellikleri

Düğüm Sayısı	Minimum Ayrıt Sayısı	Maksimum Ayrıt Sayısı	Ortalama Ayrıt Sayısı
21	182	264	216
31	439	527	489
41	664	995	781
51	1111	1378	1246
61	1670	1897	1797
71	2377	2786	2575
81	3002	3620	3291

4.2 Parametreler

Tüm modellerin çözümlerinde kullanılan parametrelerin sayısal değerleri Tablo 4.2'de gösterilmektedir.

Tablo 4.2: Parametre Değerleri

Parametre	Kullanılan Değer
B	10^6
P	1
S	1
PRX	50
PTX_{ij}	$50 + 10^{-2}d_{ij}^2$
α	$0,05(s(N) - 1)S$ eğer $s(N) \leq 61$ 3 eğer $s(N) > 61$
M	$B/\min\{PTX_{iBS} : (i, BS) \in A\}$
Çözüm süresi limiti	4 saat

Çalışmada B , P , S ve PRX parametreleri sabit alınırken diğer parametreler örneklerin bazı topolojik özelliklerine göre belirlenmektedir. Örneğin her (i, j) algılayıcı çifti için PTX_{ij} değeri, (i, j) ayrıtımın uzunluğunun karesiyle (d_{ij}^2) doğru orantılıdır. Algılayıcıların iletebilecekleri azami veri miktarını kontrol etmek için kullanılan α parametresi ise düğüm sayısı 61'in altında olan ağlarda algılayıcı sayısına göre ölçeklendirilmiştir. Bu sayede (3.5), (3.17), (3.18) dengeli kullanım ve merkezi düğüm seçme kısıtlarının farklı büyüklükte örnekler için mümkün mertebe aynı etkiyi oluşturmaları

amaçlanmıştır. Açıklamak gerekirse α parametresinin tüm ağlar için sabit alındığı durumda büyük örnekler için daha sıkı olabilecek olan bu kısıtlar küçük ağlar için oldukça esnek olabilir. Aynı zamanda büyük ağlar için dengeli kullanım sağlarken küçük ağlar için bu durum geçerli olmayabilir. Bu nedenlerden dolayı çalışmada α değeri belirlenirken bNRF ve FRF modellerinde algılayıcıların üzerlerinden aktarılabilecek maksimum akış miktarının baz istasyonunda toplanan akışın %5'ine eşit olması sağlanmıştır. PRF modeli için ise sadece merkezi düğümden geçen toplam veri miktarının baz istasyonunda toplanan akışın tamamının %5'inden fazla olmasına izin verilmiştir. Bir örnekle açıklamak gerekirse 31 algılayıcıdan oluşan KAA'larda merkezi olmayan bir algılayıcı üzerinden kendi ürettiği miktar dışında en fazla 1,5 algılayıcının ürettiği kadar akış iletebilirken bu değer 41 algılayıcılı ağlar için 2 olmaktadır. bNRF ve FRF'de ise herhangi bir merkezi düğüm bulunmadığından bu durum tüm algılayıcılar için geçerlidir. Sonuç olarak ağ büyüdükçe algılayıcıların üzerlerinden daha çok akış geçmesine izin verilmektedir. Ancak ağdaki düğüm sayısı arttıkça sistemdeki alternatif yolların da çoğalmasıyla bahsedilen kısıtlar daha esnek hale gelmektedir. Bu durumun özellikle büyük ağlarda PRF çözümlerinde ikincil akış gönderme pahasına merkezi düğüm kullanarak veri iletim yollarını kısaltan algılayıcıların sayısını azaltacağı öngörülmüştür. Örneğin 81 düğümlü ağlarda α değerinin benzer şekilde ölçeklendirilmesiyle her algılayıcının kendi ürettiğinin dört katına kadar komşularından gelen veriyi aktarmasına izin verilecektir. Dolayısıyla bir çok örnekte merkezi düğüme ihtiyaç duyulmayacağı düşünülmüştür. Çalışmada büyük ağlar için de merkezi düğümün ağ performansına etkisini incelemek istediğimizden düğüm sayısı 61'den büyük olan ağlarda α değeri sabitlenmiş ve 3 alınmıştır. M parametresinin ise ağ üzerinde bir algılayıcının gönderebileceği en büyük olurlu akıştan küçük olmaması gerekmektedir. Bu nedenle bu parametre, baz istasyonuna en yakın konumdaki algılayıcının tüm enerjisini veri iletmek için harcadığında gönderebileceği azami akış miktarı olarak belirlenmiştir. Yani $i^* = \operatorname{argmin}_{i \in N} d_{iBS}$ için $M = \frac{B}{PTX_{iBS}}$ olarak seçilmiştir. Son olarak tüm modeller için çözüm süresi 4 saat ile sınırlandırılmıştır.

4.3 Geçerli Eşitsizliklerin Etkisi

Bölüm 3.7'de de bahsedildiği üzere (3.21) ve (3.23) geçerli eşitsizlikleri eğer ağda kerte derecesi bir olan düğümler varsa kullanılabilir. Bu sebeple eşitsizlikler bahsedilen topolojik özelliklerle alakalıdır ve bazı özel durumlarda faydalıdır. Dolayısıyla çalışmada bu geçerli eşitsizliklerin çözüm süresine etkisinden bahsedilmemiştir. (3.22) eşitsizliği

ise modelde merkezi düğüm seçilmesi durumunda her zaman kullanılabilir daha genel bir kısıttır. Eşitsizliğin çözüm süresine etkisini gözlemlemek için mevcut örnek kümesi içerisinde 21, 31 ve 41 düğümlü ağlar üzerinde CPLEX 12.4 ticari çözücüsü kullanılarak küçük bir analiz yapılmıştır. (3.22) eşitsizliğinin kullanılmadığı PRF_0 ve kullanıldığı PRF_1 modellerinin aynı ağ örnekleri için çözüm süreleri karşılaştırılmıştır. Çözüm süreleri ayrı ayrı incelendiğinde 21 düğümlü ağlarda iki, 31 düğümlü ağlarda dört örnek haricinde PRF_1 modelinin optimal çözüme çok daha hızlı ulaştığı görülmüştür. Ayrıca PRF_0 modelinin 31 düğümlü ağlarda bir ve 41 düğümlü ağlarda ise dört örnekte 4 saat sınırı içerisinde deterministik optimizasyonla çözüme ulaşamadığı görülmüştür. PRF_1 modeli ise sadece 41 düğümlü bir örnekte çözüm süresi limitine takılmıştır. Bu örnekler için saniye cinsinden çözüm sürelerinin tamamı Ekler A'daki Tablo A.1'de yer almaktadır. 4 saat içerisinde deterministik optimizasyonla çözülebilen örnekler için ağ büyüklüğüne göre saniye cinsinden ortalama çözüm süreleri, aralarındaki oransal farklarla birlikte Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3: PRF_0 ve PRF_1 için Ortalama Çözüm Süreleri

Düğüm Sayısı	PRF_0 (sn)	PRF_1 (sn)	Fark (%)
21	17,25	11,19	35,14
31	52,67	53,18	-0,98
41	595,82	175,25	70,59

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda (3.22) geçerli eşitsizliğinin örneklerin genelinde çözüm süresini oldukça azalttığı görülmüştür. Bu nedenle çalışmanın devamında PRF_1 modeli kullanılmıştır. Kolaylık sağlama için sonraki bölümlerde bu model PRF olarak isimlendirilecektir.

4.4 Uygun Ticari Çözücünün Seçilmesi

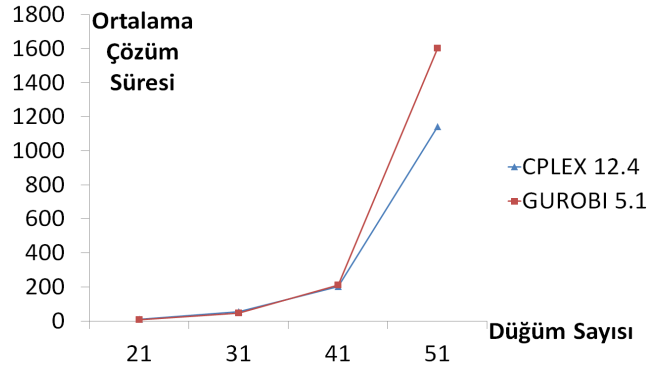
Geliştirilen modellerden en hızlı şekilde sonuç alabilmek için GUROBI 5.1 ve CPLEX 12.4 ticari çözücüler kullanılarak farklı büyüklüklerde ağ örnekleri üzerinde testler yapılmış ve her iki ticari çözücü için çözüm süreleri karşılaştırılmıştır. Baz istasyonu ile birlikte en az 21 en fazla 51 düğümden oluşan ağlar üzerinde çalışılmış ve her ağ büyüklüğü için 10'ar örnek kullanılmıştır. Elde edilen çözüm sürelerinin tamamı Ekler A'da Tablo A.2 ve A.3'te gösterilmektedir. Tüm örnekler arasında 41 düğümlü bir örneğin çözüm süresi her iki çözücüde de 4 saat zaman limitine ulaştığı için bu örneğin çözüm süresi ortalama hesaplarında ve karşılaştırmalarda kullanılmamıştır. Elde edilen sonuçlara göre 39 örneğin 29'unda GUROBI 5.1'in daha hızlı optimum sonuca ulaştığı

görülmüş; ancak problemde düğüm sayısı arttıkça CPLEX 12.4'ün daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir. Tablo 4.4'te PRF modeli için ortalama çözüm süresi değerleri ve Şekil 4.1'de bu değerlerin grafiksel gösterimi yer almaktadır. Burada gösterilen Fark (%) değerleri $\frac{t_{GUROBI} - t_{CPLEX}}{t_{GUROBI}} \times 100$ ilişkisi kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.4: GUROBI 5.1 ve CPLEX 12.4 Ortalama Çözüm Süreleri

Düğüm Sayısı	CPLEX 12.4	GUROBI 5.1	Fark (%)
21	11,23	7,12	-57,6
31	53,77	46,72	-15,1
41	202,33	209,89	3,6
51	1142,88	1603,02	28,7

Tablo 4.4 ve Şekil 4.1'de görüldüğü üzere 21 düğümlü ağlarda GUROBI 5.1 için ortalama çözüm süresi %57,6 daha kısayken, ağ büyüdükçe bu fark azalmakta ve 51 düğümlü örneklerde CPLEX 12.4, optimum çözüme %28,7 daha hızlı ulaşmaktadır. Geliştirdiğimiz modellerin performansını daha büyük örneklerde de incelemek istediğimizden çalışmaya CPLEX 12.4 ticari çözücüsü kullanılarak devam edilmesine karar verilmiştir.



Şekil 4.1: GUROBI 5.1 ve CPLEX 12.4 Çözüm Süreleri

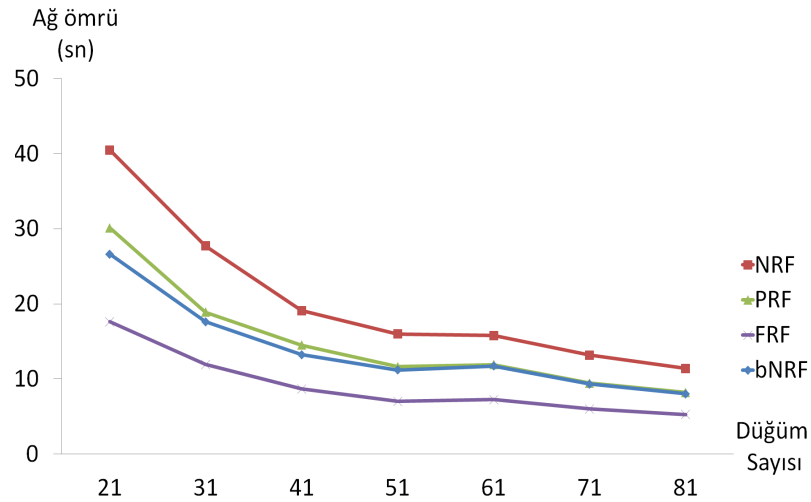
4.5 Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde tüm modeller için elde edilen çözümler kullanılarak çeşitli performans kriterleri doğrultusunda sonuçlar karşılaştırılmıştır. Öncelikle tüm modeller aynı örnek kümesi üzerinde çözdürülmüş ve elde edilen optimal ağ ömrü değerleri karşılaştırılmıştır. Bu sayede modellerle ulaşılabilecek optimum ağ ömrü değerleri incelenmiş ve kullanılan güvenilirlik stratejilerinin ağ ömrüne etkisi gözlemlenmiştir. Daha sonra modellerin algılayıcıların dengeli kullanımına etkisi ve enerjinin ne derece verimli kullanıldığının

analizi için ağ ömrü sonunda hala kullanılmamış enerjisi olan algılayıcıların arasında en fazla artan enerjiye sahip algılayıcı için kalan enerji miktarı ile algılayıcı başına düşen ortalama artan enerji değerleri incelenmiştir. Son olarak dengeli kullanım ve fazladan veri gönderimi neticesinde ağ güvenilirliğinin ne şekilde etkilendiği incelenmiştir. Burada belli oranda algılayıcının işlerliğini kaybetmesi durumunda baz istasyonuna iletelebilen veri miktarları analiz edilmiştir.

4.5.1 Ağ Ömrü

İlk olarak çalışmada geliştirilen dört modelin (NRF, bNRF, PRF, FRF) aynı örnek kümesi üzerinde çözümleri alınmış ve her ağ büyüklüğü için ortalama ağ ömrü karşılaştırmaları yapılmıştır. Ortalama değerler Ekler A Tablo A.4'te gösterildiği gibidir. Şekil 4.2'de farklı ağ büyüklükleri için her modelin ortalama ağ ömrü değerlerinin nasıl değiştiği daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 4.2: Ağ Büyüklüğüne göre Ortalama Ağ Ömrü Değerleri

Sonuçlar incelendiğinde tüm modellerin ortalama ağ ömrü değerlerinin ağ büyüklüğü arttıkça azaldığı görülmüştür. Bu durumun ağ büyüdükçe gözlem alanı da büyürken algılayıcılara sağlanan başlangıç enerji değerinin (B) aynı kalmasından kaynaklandığı söylenebilir. Algoritma 1'de görüldüğü üzere kullanılan örnek kümesinde algılayıcıların yerleştirildiği alanın büyüklüğü düğüm sayısı ile doğru orantılıdır. Gözlem alanı büyüdükçe algılayıcıların baz istasyonuna ortalama uzaklığı da büyümektedir. Ek olarak algılayıcı sayısının artmasıyla ağ üzerinde taşınan veri miktarının da büyümesi bir diğer sebep olarak görülmektedir. KAA büyüdükçe algılayıcıların sahip oldukları enerji ile daha uzun mesafelere daha fazla veri iletmek durumunda kalmaları normaldir. NRF için ağ ömrü artan ağ büyüklüğüyle daha hızlı azalmış gibi görünse de Ekler A

Tablo A.5'te gösterilen oransal azalmalar incelendiğinde tüm modeller için bu değerlerin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir.

NRF modelinde herhangi bir güvenilirlik önlemi yer almadığından ve ağın enerjisinin tamamı sadece tek kopya veri iletimi için harcandığından bu modelin ortalama ağ ömrü sonuçları verilen parametreler altında ulaşılabilecek en büyük ortalama ağ ömrü değerleri olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla ağ ömrü karşılaştırmaları NRF modelinin sonuçları baz alınarak yapılmıştır.

Güvenilirlik protokollerinin kullanıldığı diğer üç model için ağ ömründe görülen ortalama azalma oranları tespit edilmiştir. Burada her bir model için elde edilen ortalama ağ ömrünün NRF ile elde edilen ortalama değerden yüzde ne kadar daha az olduğuna bakılmıştır. Örneğin PRF için bu değer $\frac{T_{NRF}-T_{PRF}}{T_{NRF}}$ olarak hesaplanmaktadır. Tablo 4.5 incelendiğinde ağ büyüklüğünden bağımsız olarak her model için ortalama azalma oranlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Tüm ağ büyüklükleri için genel ortalamalar alındığında ise dengeli kullanım stratejisinin kullanıldığı bNRF modelinde yaklaşık %30,9 oranında bir düşüş olduğu gözlenmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken “dengeli kullanım” kısıtlamasının ağın ömrünü değil; olası aksaklıklara karşı meydana gelebilecek olumsuz etkinin boyutunu azaltmak için önerilmiş olmasıdır. Kastedilen “dengeli kullanım” algılayıcıların enerjilerinin dengeli kullanımı değil; algılayıcıların başka algılayıcılar için kullanım oranlarının dengelenmesidir. Dolayısıyla bu sonuç dengeli kullanım stratejisinin ağ ömrüne öngörülen etkisini doğrulamaktadır. Hem dengeli kullanım hem de çoklu yollarla çoklu kopya gönderiminin uygulandığı FRF modelinde bu değerlerin %55,2 civarında olduğu görülmüştür. PRF modelinde ise önerilen güvenilirlik protokollerin çok daha enerji verimli kullanılmasıyla azalma oranının yaklaşık %27,1 olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.5: NRF Baz Alındığında Ortalama Ağ Ömrü Azalma Oranları

Düğüm Sayısı	bNRF	PRF	FRF
21	%34,2	%25,6	%56,5
31	%36,5	%31,9	%57,0
41	%30,7	%24,0	%54,6
51	%30,0	%27,2	%56,1
61	%25,6	%24,6	%54,4
71	%29,3	%28,4	%54,4
81	%29,7	%28,0	%53,7
Genel Ortalama	%30,9	%27,1	%55,2

Elde edilen sonuçlara bakıldığında PRF ve bNRF'nin ortalama ağ ömrü değerlerinin oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durum PRF modelinin ağın topolojik

özelliklerine göre sadece gerektiği takdirde merkezi düğüm seçmesinden kaynaklanmaktadır. Açıklamak gerekirse, Bölüm 3.5'te bahsedildiği üzere PRF modelinde eğer yoğun kullanımıyla algılayıcıların iletim yollarını kısaltarak ağ ömrünü iyileştirebilecek bir düğüm varsa merkezi düğüm seçilmektedir. Aksi takdirde model herhangi bir merkezi düğüme ihtiyaç duymamaktadır. Bu gibi durumlarda ağda sadece dengeli kullanım sağlanmakta, merkezi düğüm seçilmediği için hiç bir algılayıcı ikincil akış üretmemektedir. Dolayısıyla merkezi düğüme ihtiyaç olmayan durumlarda PRF modeli aslında bNRF'ye indirgenmektedir. Örnek çözümleri ayrı ayrı incelendiğinde 21 düğümlü ağ örneklerinde dokuz, 31 - 71 düğümlü ağ örneklerinde yedişer, 81 düğümlü örneklerin ise tamamında merkezi düğüm seçilmiştir. Diğer örneklerde elde edilen sonuçlar bNRF modeliyle aynıdır. Dolayısıyla bNRF ve PRF modelleri arasındaki yüzdesel fark ihtiyaç halinde kullanılan merkezi düğümün ağ ömrüne etkisi olarak nitelendirilebilir. Gerektiği takdirde sadece bir merkezi düğüm kullanımının ağ ömrüne sağladığı katkıyı daha iyi gözlemleyebilmek amacıyla merkezi düğüme ihtiyaç duyulan PRF çözümleri ile aynı örnekler için bNRF çözümleri karşılaştırılmıştır. Her ağ büyüklüğü için ortalama değerler hesaplanmış ve $\frac{T_{PRF}-T_{bNRF}}{T_{bNRF}} \times 100$ formülü kullanılarak yüzdesel fark tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.6'da gösterilmektedir.

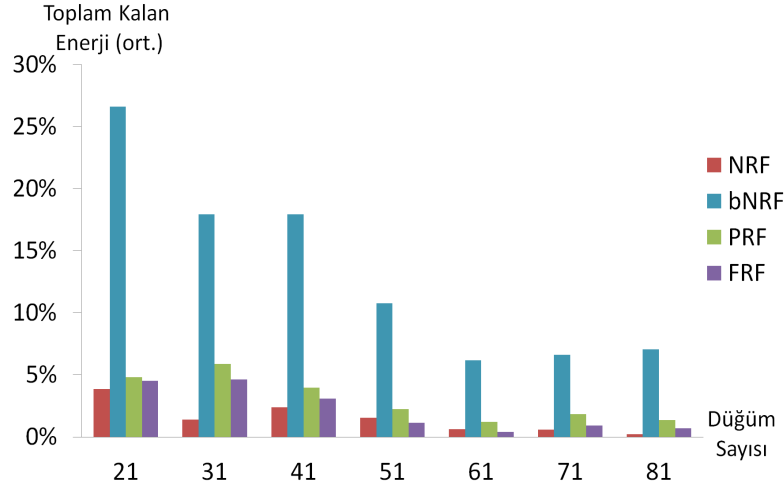
Tablo 4.6: Merkezi Düğüm Kullanımının Ağ Ömrüne Etkisi

Düğüm Sayısı	21	31	41	51	61	71	81
Fark	%15,08	%11,65	%20,40	%6,51	%2,13	%2,00	%2,37

Sonuçlar incelendiğinde özellikle 41 düğümlü ağlardan sonra yüzdesel farkın oldukça azaldığı görülmektedir. Ağ büyüklüğü arttıkça bir merkezi düğüm ile elde edilen iyileşmenin azalması aslında beklenen bir durumdur. Açıklamak gerekirse küçük ağlar için bir merkezi düğümün yoğun kullanımıyla algılayıcıların büyük bir çoğunluğunun veri iletim yolları kısaltılabilirken, düğüm sayısı arttıkça tek bir merkezi düğümün kullanımı aynı etkiyi yaratamayabilir. Bu nedenle özellikle daha büyük ağlar için birden fazla merkezi düğüme izin verildiği takdirde daha büyük bir iyileşme elde edileceği öngörülmektedir. Bu çalışmada bir merkezi düğüme izin verilen durum incelendiğinden, birden fazla merkezi düğümün olduğu durumla ilgili herhangi bir analiz yapılmamıştır. Bu örnekler için genel ortalama incelendiğinde ise sadece bir merkezi düğüm kullanıldığında ağ ömründe %8,59 civarında bir iyileşme olduğu gözlenmektedir.

4.5.2 Toplam ve Maksimum Kalan Enerji Oranı

Ağ ömrü karşılaştırmalarından sonra modellerin enerji verimliliği incelenmiştir. Bölüm 3.1’de bahsedildiği üzere enerjisi tükenen ilk algılayıcının fonksiyonelliğini yitirmesiyle ağ ömrünün tamamlandığı varsayılmaktadır. Dolayısıyla ağ ömrü tamamlandıktan sonra bazı algılayıcılarda halen bir miktar enerji bulunabilmektedir. Bu bölümde iki tür karşılaştırma yapılmıştır. Öncelikle, enerjinin ne derece verimli kullanıldığını ölçebilmek için her örnekte ağ ömrü tamamlandıktan sonra kalan toplam enerjinin tüm ağın enerji bütçesine oranı hesaplanmıştır. Şekil 4.3’te her ağ büyüklüğü için ortalama toplam kalan enerji (TKE) oranları gösterilmektedir.



Şekil 4.3: Ağ Büyüklüğüne göre Ortalama TKE Oranları

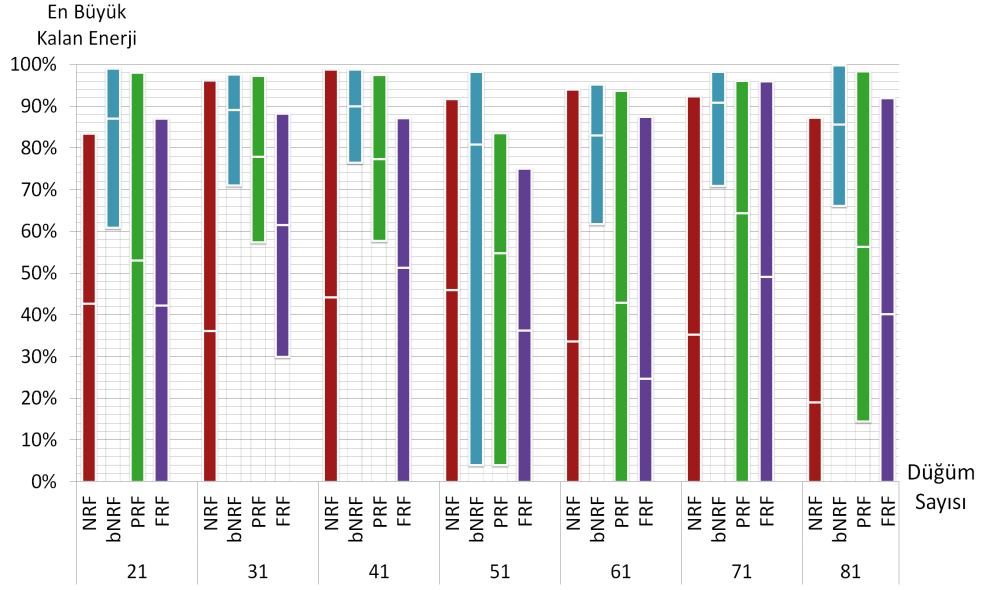
Sonuçlar genel olarak incelendiğinde ortalama TKE oranlarının ağ büyüklüğü arttıkça tüm modeller için azaldığı görülmektedir. Bu durumun ağdaki düğüm sayısı arttıkça algılayıcıların kullanabilecekleri alternatif yolların artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ağ büyüdükçe artan ayrıt sayısı ile birlikte veri iletim yollarında bulunan düğümlerin enerjilerinin tükenmesi halinde algılayıcıların kullanabilecekleri alternatif yolların sayısı da artmaktadır. Dolayısıyla ağdaki alternatif yolların artmasıyla komşularının enerjileri tükendiği için veri gönderemeyen algılayıcıların sayısı azalmaktadır. Bu sayede ağın sahip olduğu enerji daha verimli kullanılabilir.

Modeller için TKE oranları ayrı ayrı incelendiğinde NRF modelinin beklenildiği üzere bu performans ölçütü açısından en enerji verimli model olduğu görülmüştür. NRF modeli için en büyük ortalama TKE miktarı 21 düğümlü ağlar üzerindedir ve %4 civarındadır. Tüm ağ büyüklükleri için genel ortalama ise %1,5 civarında bulunmuştur. Ağ ömrü tamamlandıktan sonra ağda en çok kalan enerji bulunduran model ise bNRF’dir. Tüm ağ büyüklükleri için genel ortalamaya bakıldığında bu modelin TKE oranlarının %26

ile %7 arasında yer aldığı, ortalama TKE oranının ise %13 olduğu tespit edilmiştir. NRF ve bNRF modellerinin ortalama TKE oranları arasındaki fark bNRF’de kullanılan dengeli kullanım stratejisinin ağ ömrüne birebir etkisini göstermektedir. Dolayısıyla bu sonuçlar doğrultusunda sadece dengeli kullanımdan kaynaklanan TKE oranlarındaki ortalama %11,5 azalmanın, bir önceki bölümde bahsedildiği üzere ağ ömründe ortalama %30,9’luk bir düşüşe yol açtığı söylenebilir.

FRF ve PRF modellerinin sonuçları incelendiğinde bu modellerin bNRF modeline göre çok daha enerji verimli çalıştığı gözlenmiştir. Her iki modelde de en büyük ortalama TKE oranlarının 31 düğümlü ağlarda, sırasıyla %5 ve %6 civarında olduğu görülmüştür. Genel ortalamalar ise FRF modeli için %2,04, PRF modeli için %3,04 olarak hesaplanmıştır. Her iki modelde de bNRF’de olduğu gibi dengeli kullanım kısıtları bulunmasına rağmen bu modellerin TKE oranları NRF modelinin TKE oranlarına çok daha yakındır. Bu durum birincil akış için kullanılan dengeli kullanım kısıtlarının ikincil akış için geçerli olmamasından kaynaklanmaktadır. Dengeli kullanım koşulunda ikincil akışın dikkate alınmamasının nedeni bu koşulun amacının tek bir algılayıcıda gerçekleşen olası aksaklıkların ağdaki yansımaları azaltmaya çalışmak olmasıdır. Zira ikincil akışın varlığında alternatif yolların kullanılabilmesi nedeniyle bu tarz aksaklıklar önemsiz kalabilecektir. Dolayısıyla bu modellerde ikincil akış için benzer kısıtlara ihtiyaç duyulmamıştır. Bu sayede konumları gereği daha yoğun kullanılabilen; ancak dengeli kullanım kısıtlarından dolayı birincil akış gönderimi için yeterince kullanılmayan düğümler ikincil akış iletiminde kullanılmaktadır. Böylelikle bNRF modelinde dengeli kullanım koşulundan dolayı algılayıcılarda kalan enerjinin, PRF ve FRF modellerinde çoklu kopya gönderimi stratejisi için harcanmasıyla ağın enerji verimliliği iyileştirilmiştir.

Enerji verimliliğini daha derinlemesine incelemek için TKE oranlarının yanı sıra ağ üzerinde algılayıcıların sahip olduğu maksimum kalan enerji (MKE) miktarı da incelenmiştir. Bunun için her örnekte en az enerji harcayan algılayıcı tespit edilmiş ve bu algılayıcının kalan enerjisinin B enerji bütçesine oranı hesaplanmıştır. Elde edilen oranlar Ekler A Tablo A.6’da yer almaktadır. Sonuçları daha iyi inceleyebilmek için Şekil 4.4’teki grafik oluşturulmuştur. Grafikteki sütunlar aynı ağ büyüklüğüne sahip örnek çözümleri arasında en büyük, en küçük ve ortalama MKE oranlarını tüm modeller için göstermektedir. Daha net açıklamak gerekirse Şekil 4.4’e göre 31 algılayıcıdan oluşan bir KAA’da NRF ile yapılan analizlerde çözdürülen 10 örnekte en az birinde bütün algılayıcılar enerjilerinin tamamını tüketmiş ($MKE = 0$) ve yine en az bir örnekte de en büyük kalan enerji oranı %96 olmuştur. Bu örnekler için ortalama MKE oranı ise %36 civarındadır.



Şekil 4.4: Ağ Büyüklüğüne göre En Büyük Kalan Enerji Oranları

Sonuçlar incelendiğinde en enerji verimli çalışan NRF modelinin çözümlerinde bile enerjisinin büyük bir kısmını harcayamayan algılayıcıların olduğu görülmüştür. Her model için tüm ağ büyüklüklerinde elde edilen en büyük MKE oranlarının %70'in üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Modeller kendi aralarında kıyaslandığında ise tüm ağ büyüklüklerinde en büyük MKE oranlarına bNRF çözümlerinde rastlanmıştır. Ayrıca bNRF modelinin MKE aralığının diğer modellere göre çok daha dar olduğu gözlenmiştir. Tüm ağ büyüklükleri için bNRF ile elde edilen en büyük MKE oranları %95 civarındayken, 51 düğümlü ağlar haricinde en küçük MKE oranlarının %60'ın üzerinde olduğu tespit edilmiştir. 51 düğümlü ağlarda ise bu değer %5 civarındadır. Sonuç olarak bNRF modeli çözümlerinin hiç birinde ağın enerjisinin tamamının tüketildiği örneklere rastlanmamıştır. PRF model çözümlerine bakıldığında ise 21, 51-71 düğümlü ağlarda ağın enerjisinin tamamının harcandığı örneklere rastlanırken, 31 ve 41 düğümlü ağlarda en küçük MKE oranının %57, 81 düğümlü ağlarda ise %14 civarında olduğu tespit edilmiştir. Modellerin çözümleri ayrı ayrı incelendiğinde 70 ağ örneği arasında NRF çözümlerinin 24'ünde, FRF çözümlerinin 17'sinde ve PRF çözümlerinin ise sadece 5'inde enerjinin tamamının tüketildiği tespit edilmiştir. Ortalama MKE oranları incelendiğinde ise NRF ve FRF modellerinin genelde birbirine yakın olduğu bNRF modelinden sonra en büyük değerlere de PRF'de rastlandığı görülmüştür. Genel bir değerlendirme yapmak gerekirse NRF modeli dahil üzere bir çok çözümde enerjisinin büyük çoğunluğunu kullanamayan düğümler olduğu görülmüş; ancak bu gibi çözümlere bNRF ve daha sonra PRF'de rastlanmıştır.

Sonuç olarak MKE oranları ile ilgili elde edilen sonuçların TKE analizini destekler

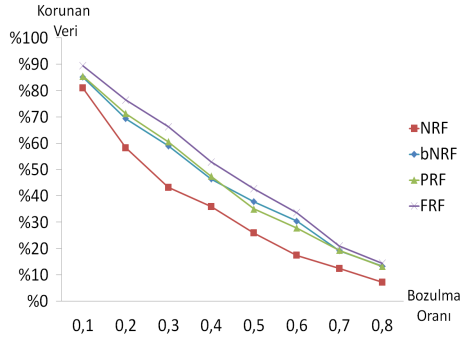
nitelikte olduğu görülmüştür. Her iki analiz sonucunda da bNRF modelinin enerji verimliliğinin diğer modellere göre çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir. En enerji verimli model olan NRF modeliyle karşılaştırıldığında, FRF modelinin her iki analizde de enerji verimliliği açısından oldukça yakın performans sergilediği gözlenmiştir. PRF modelinin ise bNRF'ye kıyasla çok daha enerji verimli çalıştığı; ancak çözümlerin çoğunda FRF çözümlerine göre daha fazla kalan enerji bulundurduğu görülmüştür.

4.5.3 Ağ Güvenilirliği

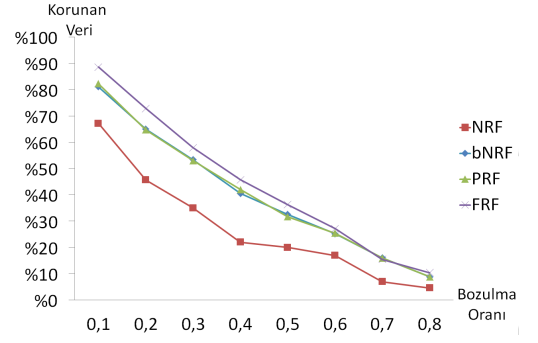
Şu ana kadar yapılan analizlerde modellerin performansı ağ ömrü ve enerji verimliliği açısından incelenmiş; uygulanan stratejilerin etkileri tespit edilmiştir. Bu bölümde ise modeller ağ güvenilirliği açısından ele alınmıştır. Bu amaçla olası dış ve iç tehditler sonucunda belirli oranlarda algılayıcının fonksiyonelliğini tamamen yitirdiği senaryolar üretilmiştir. Senaryolarda en az %10 en fazla %80 oranında rastgele seçilen algılayıcının ağ ömrünün en başında işlerliklerini yitirdiği varsayılmıştır. Bahsedilen oranlar çalışmada algılayıcıların bozulma oranları şeklinde ifade edilmektedir ve ağdaki kullanılmayan düğüm sayısının toplam düğüm sayısına oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Her bir model için ağın güvenilirlik değerini ölçebilmek amacıyla üretilen arıza senaryoları gerçekleştiğinde baz istasyonuna ulaşabilen; yani korunan veri miktarları tespit edilmiştir. Ancak her ağ örneği için modellerin ağ ömrü sonuçları farklılık gösterdiğinden baz istasyonunda toplanan veri miktarları da birbirinden oldukça farklıdır. Sonuçları daha sağlıklı değerlendirebilmek amacıyla korunan veri miktarının, veri kaybı olmadığında toplanan veri miktarına oranı hesaplanmıştır. Bu işlem tüm bozulma oranları için tekrarlanmıştır.

İlk olarak farklı ağ büyüklükleri için verilen bozulma oranları karşısında korunan veri oranı değerleri incelenmiştir. Ekler A'da farklı ağ büyüklükleri için ortalama korunan veri oranlarının gösterildiği Tablo A.7-9 mevcuttur. Şekil 4.5'te ise tüm ağ büyüklükleri için bu değerlerin grafiksel gösterimi yer almaktadır.

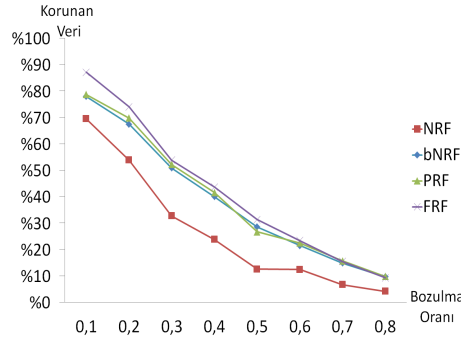
NRF modelinin korunan veri oranları, herhangi bir güvenilirlik stratejisi uygulanmadığında optimum ağ ömrüne sahip KAA'nın güvenilirlik performansını yansıtmaktadır. Dolayısıyla tüm ağ büyüklükleri için en düşük korunan veri oranlarına bu modelde rastlanmıştır. Küçük bozulma oranlarında bile ağ örneklerinde ciddi ölçüde veri kaybı problemlerinin olduğu görülmüştür. Örneğin 61, 71 ve 81 düğümlü ağlarda algılayıcıların %10'unun fonksiyonelliğini yitirdiği durumlarda bile yaklaşık %35 civarında veri kaybı problemleri tespit edilmiştir. bNRF ve PRF modellerinin sonuçları incelendiğinde ise tüm ağ büyüklüklerinde korunan veri oranlarının bu iki model için



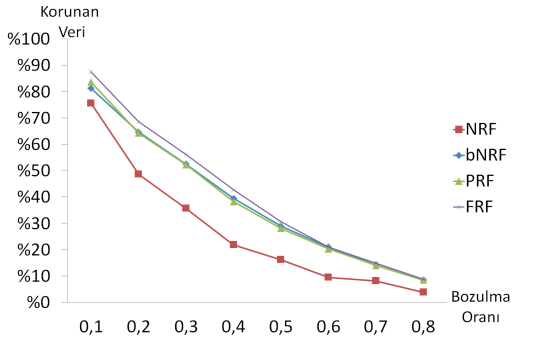
(a) 21 düğümlü ağlar



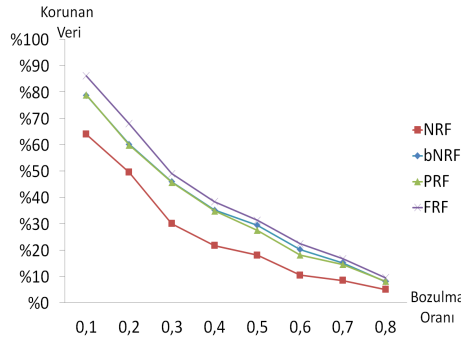
(b) 31 düğümlü ağlar



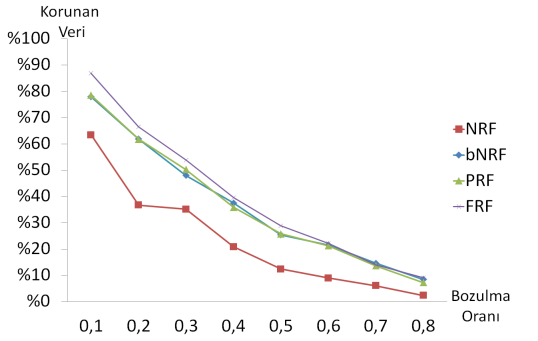
(c) 41 düğümlü ağlar



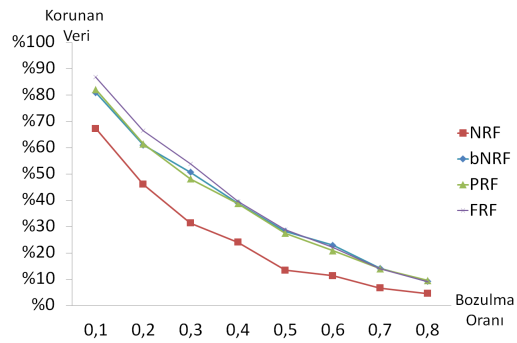
(d) 51 düğümlü ağlar



(e) 61 düğümlü ağlar



(f) 71 düğümlü ağlar

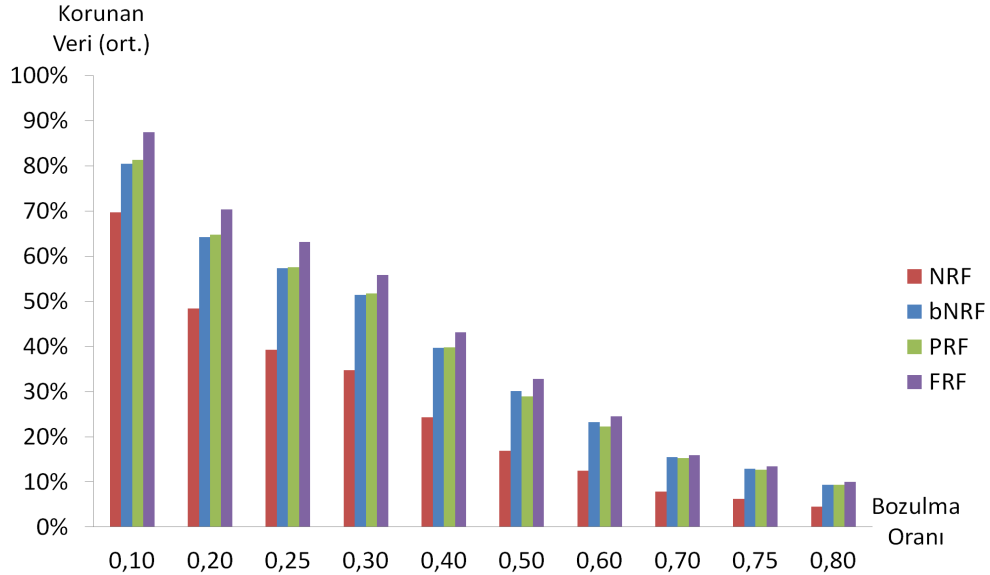


(g) 81 düğümlü ağlar

Şekil 4.5: Farklı Ağ Büyüklükleri için Ortalama Korunan Veri Oranları

genelde birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir. FRF modelinin korunan veri oranlarının ise tüm ağ büyüklüklerinde bNRF ve PRF modeline göre bir miktar daha yüksek görülmüştür.

Şekil 4.5'teki grafiklerin tamamı incelendiğinde modellerin tüm ağ büyüklükleri için ortalama korunan veri oranlarının birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Dolayısıyla genel tabloyu daha iyi görebilmek amacıyla Şekil 4.6'da görülen grafik hazırlanmıştır. Bu grafikte aynı bozulma oranları için tüm modellerin korunan veri oranlarının genel ortalamaları kullanılmıştır. Daha açık ifade etmek gerekirse örneğin 0,2 bozulma oranı için kullanılan değer tüm örneklerde bu bozulma oranında elde edilen korunan veri oranlarının genel ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Bu işlem tüm korunan veri oranları ve modeller için tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçların tamamı aynı zamanda Ekler A Tablo A.14'te de gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Ortalama Korunan Veri Oranları

Ayrıca modellerde kullanılan stratejilerin ağ güvenilirliğine katkılarını daha net görebilmek için herhangi bir güvenilirlik protokolünün uygulanmadığı NRF modeli baz alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Tablo 4.7'de de bu karşılaştırmalar sonucu elde edilen farklar yer almaktadır. Herhangi bir $j \in \{bNRF, PRF, FRF\}$ modelinin b bozulma oranında korunan veri oranı k_j^b için bu değerler hesaplanırken $k_j^b - k_{NRF}^b$ formülü kullanılmıştır.

İlk olarak NRF modelinin sonuçları incelendiğinde küçük bozulma oranlarının bile ağ güvenilirliğini ciddi ölçüde etkilediği gözlenmiştir. Nitekim Şekil 4.6'da da görüldüğü üzere ağdaki verinin yarısının kaybolması için algılayıcıların sadece %20'sinin işlevliğini yitirmesi yeterli olmaktadır. Bu da herhangi bir savunma mekanizmasına sahip olmayan

ağların az sayıda düğüm tahribatıyla kolaylıkla parçalanabileceğini doğrulamaktadır.

Tablo 4.7: Modellerin Korunan Veri Oranlarına Katkısı

Bozulma Oranı	bNRF-NRF	PRF-NRF	FRF-NRF
0,10	%10,8	%11,7	%17,8
0,20	%15,8	%16,4	%22,0
0,25	%18,0	%18,3	%23,9
0,30	%16,7	%17,0	%21,1
0,40	%15,4	%15,5	%18,9
0,50	%13,2	%12,0	%15,9
0,60	%10,8	%9,9	%12,1
0,70	%7,6	%7,4	%8,0
0,75	%6,7	%6,5	%7,1
0,80	%4,9	%4,8	%5,5
Genel ortalama	%12,0	%11,9	%15,2

bNRF ve NRF modelleri karşılaştırıldığında bNRF modelinin NRF'ye göre ağ güvenilirliğine yaklaşık %12 oranında bir katkı sağladığı görülmüştür. Bu sonuç merkezi düğümlerden kaynaklanan risklerin ağ güvenilirliğine öngörülen etkisini doğrulamaktadır. bNRF ve PRF modelleri karşılaştırıldığında ise tüm bozulma oranları için oldukça yakın performans sergiledikleri görülmüştür. Daha önce de anlatıldığı üzere PRF modelinde dengeli kullanım kısıtının geçerli olmadığı merkezi düğüm üzerinden geçen akışın kısmi fazlalığa dayalı protokolle korunması amaçlanmıştır. Nitekim elde edilen sonuçlar merkezi düğümden kaynaklanabilecek risklerin bu şekilde giderildiğini göstermektedir.

FRF modelinin sonuçları dengeli kullanım ve fazlalığa dayalı güvenilirlik stratejisinin birlikte kullanımının ağ güvenilirliğine katkısını göstermektedir. Genel ortalamalara bakıldığında FRF modelinin korunan veri oranlarının NRF modeline göre %15,2 daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu oran bNRF ve PRF modellerinin bozulma oranları farkından yaklaşık %3,3 oranında daha yüksektir.

Sonuçlar genel olarak incelendiğinde küçük bozulma oranları için FRF modelinin sonuçları ile bNRF ve PRF modellerinin sonuçları arasındaki fark daha büyükken, bozulma oranları arttıkça değerlerin birbirine yaklaştığı ve %70 - %80 arası oranlarda hemen hemen aynı değerlere ulaştıkları görülmüştür. Çözümler ayrıntılı incelendiğinde büyük bozulma oranları için ağ üzerinde hasar görmemiş ve ürettiği veriyi baz istasyonuna direk gönderen algılayıcıların veri paketlerinin korunduğu görülmüştür. Dolayısıyla büyük oranda algılayıcının fonksiyonelliğini yitirdiği durumlarda fazlalığa dayalı protokolden ziyade dengeli kullanım stratejisinin daha etkili olduğu söylenebilir.

Son olarak önerilen güvenilirlik protokollerinin ağ güvenilirliğini ortalamada ne kadar iyileştirdiğini tespit edebilmek için Tablo 4.8’de görülen oranlar kullanılmıştır. Tablo 4.8’de gösterilen değerler ilgili bozulma oranı b için k_{NRF}^b ile normalize edilerek hesaplanmıştır. Genel ortalamalar incelendiğinde bNRF, PRF ve FRF modellerinin ağ güvenilirliğini sırasıyla %38,4, %38,0 ve %42,7 oranında iyileştirdiği görülmüştür.

Tablo 4.8: Ağ Güvenilirliğinde İyileşme Oranları

Bozulma Oranı	$\frac{bNRF-NRF}{NRF}$	$\frac{PRF-NRF}{NRF}$	$\frac{FRF-NRF}{NRF}$
0,10	%13,4	%14,4	%20,4
0,20	%24,6	%25,3	%31,3
0,25	%31,5	%31,8	%37,9
0,30	%32,5	%32,9	%37,8
0,40	%38,8	%39,0	%43,7
0,50	%43,8	% 41,5	%48,5
0,60	%46,5	% 44,3	%49,4
0,70	%48,9	% 48,4	%50,3
0,75	%51,7	% 50,8	%53,3
0,80	%51,8	%51,4	% 54,9
Genel Ortalama	%38,4	%38,0	%42,7

4.5.4 Genel Değerlendirme

Yapılan analizler sonucunda herhangi bir savunma mekanizması kullanılmayan NRF modelinin en büyük ağ ömrü sonuçlarını elde ettiği; ancak çeşitli iç ve dış tehditlere karşı oldukça savunmasız olduğu tespit edilmiştir. Güvenilirlik stratejilerinin en yoğun kullanıldığı FRF modelinin ise ağda belirli oranlarda algılayıcıların fonksiyonelliğini yitirdiği durumlarda NRF modeline göre çok daha dayanıklı olduğu; ancak güvenilirlik stratejilerinin ağa sağladığı ek enerji sarfiyatından dolayı ağ ömrününün çok daha kısa sürede tamamlandığı tespit edilmiştir. Nitekim elde edilen sonuçlara bakıldığında FRF’nin ağ güvenilirliğini NRF’ye göre %42,7 iyileştirildiği görülmüştür. Öte yandan FRF modelinde ağ ömrü değerlerinde ortalama %55,2 oranında bir düşüş tespit edilmiştir. Sadece dengeli kullanım stratejisinin yer aldığı bNRF modelinde ise NRF modeline göre ağ ömründe %30,9 oranında bir azalma görülürken, ağ güvenilirliğinde %38,4 oranında bir iyileşme gözlenmiştir. Benzer şekilde dengeli kullanım stratejisinin kısmi fazlalığa dayalı protokolle birlikte uygulandığı PRF modelinde ağ güvenilirliğinin %38 oranında iyileştirildiği görülmüştür. Bunun yanı sıra bu modelde ağ ömründe %27,1’lik bir azalma olmuştur. Tüm değerler Tablo 4.9’da kısaca özetlenmiştir.

bNRF ve PRF modellerinin FRF modeliyle ağ güvenilirliğindeki iyileşme oranları incelendiğinde sadece %4 civarında bir fark olduğu görülmüştür. Ancak ağ ömrü

Tablo 4.9: Elde Edilen Genel Sonuçlar

	bNRF	PRF	FRF
Ağ Ömrü (↓)	%30,9	%27,1	%55,2
Ağ Güvenilirliği (↑)	%38,4	%38	%42,7

oranları incelendiğinde sırasıyla %24,3 ve %28,1 oranlarında farklar olduğu tespit edilmiştir. bNRF ve PRF modelleri karşılaştırıldığında ise ağ güvenilirliği açısından performanslarının oldukça yakın olduğu, PRF'nin yaklaşık %3,8 oranında daha yüksek ağ ömrü değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Aradaki fark ağda sadece bir düğümün merkezi olarak seçilmesinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla daha fazla sayıda merkezi düğümün, PRF modelinde olduğu gibi kontrollü şekilde KAA'da bulundurulmasının ağ ömrüne katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

5. SEZGİSEL YÖNTEM

Yapılan incelemeler sonucunda ağ büyüklüğü arttıkça PRF modelinin çözüm süresinin de üstel şekilde arttığı görülmüştür. Bu nedenle çalışmada 4 saatlik çözüm süresi limiti içerisinde şu ana kadar en fazla 81 düğümlü ağlar için optimum sonuçlar elde edilebilmiştir. Bu bölümde PRF modelinin çözüm süresini kısaltma amacıyla geliştirilen bir sezgisel yöntem anlatılacaktır. Yöntemin ayrıntıları, elde edilen sonuçlar ve süre karşılaştırmaları aşağıda anlatılmaktadır.

5.1 Sezgisel Yöntem

Bölüm 3.5'te ayrıntılı şekilde bahsedildiği üzere PRF modelinde hangi yollardan ne kadar birincil akış gönderileceğine, eğer ağ ömrünü iyileştirecekse hangi algılayıcının merkezi düğüm seçileceğine ve bu durumda hangi yollardan ne kadar ikincil akış gönderileceğine karar verilmektedir. KAA'da, yoğun kullanımıyla ağ ömrüne katkı sağlayabilecek bir düğüm yoksa merkezi düğüm seçilmemektedir. PRF modelinin merkezi düğüm kullanmadığı durumlarda ise sadece birincil akış üreten algılayıcılar dengeli kullanım kısıtları altında veri transferi yapmaktadırlar ve ağda kısmi fazlalığa dayalı güvenilirlik protokolü uygulanmamaktadır. Dolayısıyla Bölüm 4.5.1'de de anlatıldığı üzere merkezi düğüme ihtiyaç duyulmayan durumlarda PRF modeli bNRF'ye dönüşmektedir. Önerilen sezgisel yöntemde de bNRF ve PRF modelleri arasındaki bahsedilen ilişkisinden yararlanılmıştır.

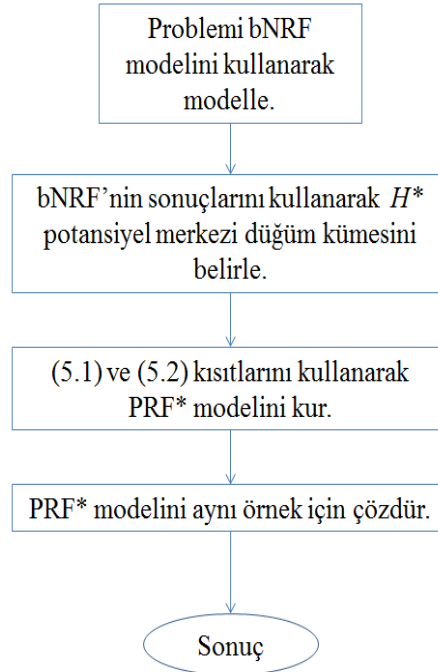
Geliştirilen yöntem dört temel aşamadan oluşmaktadır. Yöntemin tüm aşamaları Şekil 5.1'de gösterilmiştir. İlk aşamada bNRF modeli kullanılmıştır. Bir doğrusal programlama modeli olan bNRF'nin optimal çözümü büyük ağlarda bile oldukça hızlı bir şekilde bulunabilmektedir. Dolayısıyla öncelikle söz konusu örnek için bNRF modelinin çözdürülmesinden sonra, çözüm içerisinde dengeli kullanım kısıtları altında en yoğun kullanılan; yani kendi ürettiklerinin $(1+\alpha)$ katı kadar veri ileten düğümler tespit edilmektedir. Bu düğümler ağ ömrünü iyileştirebilecek potansiyel merkezi düğümler olarak kabul edilmiştir. Açıklamak gerekirse, bir düğümün merkezi olabilmesi için konumu gereği yoğun kullanımıyla ağ ömrüne fayda sağlaması gerekmektedir. Modellerin tamamında ağ ömrü en büyükleğinden, eğer ağda böyle bir düğüm varsa bu düğümün bNRF modelinde de en yoğun şekilde kullanılıyor olması gerektiği kanısına varılmıştır. Dengeli kullanım sınırında veri transferi yapan algılayıcıların, daha az kullanılan algılayıcılara göre ağ ömrüne sağlayacağı potansiyel katkının daha büyük olacağı varsayılmıştır. Bu doğrultuda seçilen potansiyel merkezi düğümler

dördüncü aşamada PRF modelinin merkezi düğüm seçmesini kolaylaştırmak için kullanılmıştır. Dolayısıyla son aşamada kullanılan PRF modelinin (3.19) kısıtında bir değişiklik yapılmıştır ve modele yeni bir kısıt eklenmiştir. Yeni model PRF* olarak isimlendirilmiştir. Yeni kısıtlar aşağıda gösterilmektedir;

$$\sum_{j \in H^* \setminus \{BS\}} h_j \leq 1 \quad (5.1)$$

$$\sum_{j \in N \setminus (H^* \cup BS)} h_j = 0 \quad (5.2)$$

Burada H^* , kümesi bNRF modelinden elde edilen ve yüksek kullanım oranları nedeniyle merkezi düğüm olma potansiyeline sahip düğümlerin kümesini ifade etmektedir. (5.1) kısıtı, PRF* modelinin sadece potansiyel merkezi düğümler arasından seçim yapmasına izin vermektedir. (5.2) kısıtı ise diğer düğümlerin merkezi düğüm ikili değişkenlerini sıfırlamak için modele eklenmiştir. Kullanılan yeni kısıtlarla ağda merkezi düğüm seçilebilecek algılayıcıların sayısını azaltarak modelin optimum çözüme daha hızlı ulaşabilmesi amaçlanmıştır. Sezgisel yöntemin son aşamasında bu modelin çözdürülmesiyle sonuca ulaşılmaktadır.



Şekil 5.1: Sezgisel Yöntem

5.2 Performans Analizi

Geliştirilen yöntemin performansını incelemek için 61, 71 ve 81 düğümlü ağlar üzerinde bir analiz yapılmıştır. Sezgisel yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar PRF modelinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şu ana kadar elde edilen sonuçların biri hariç hepsinde sezgisel yöntemin optimum çözüme ulaştığı tespit edilmiştir. Çözüm sürelerini karşılaştırmak için ise 61, 71 ve 81 düğümlü tüm örneklerin bNRF, PRF* ve PRF çözüm sürelerini içeren Tablo 5.1, 5.2 ve 5.3 oluşturulmuştur. Çözüm süreleri saniye cinsinden gösterilmiştir. Bu analizde de 4 saat çözüm süresi sınırı kullanılmıştır.

Çözüm süresi karşılaştırmaları yapılırken sezgisel yöntemin toplam çözüm süresi bNRF ve PRF* modellerinin çözüm sürelerinin toplamına eşit kabul edilmiştir. Tablolarda da görüldüğü üzere ağ büyüklüğü arttıkça sezgisel yöntemin ve PRF modelinin çözüm sürelerinde büyük oranda artış olduğu görülmüştür. Elde edilen veriyi daha sağlıklı inceleyebilmek amacıyla öncelikle her ağ büyüklüğü için ayrı ayrı karşılaştırmalar yapılmıştır.

Tablo 5.1: 61 Düğümlü Ağlarda Sezgisel Yöntem ve PRF Çözüm Süreleri

Düğüm Sayısı	61 (saniye)		
Örnek #	bNRF	PRF*	PRF
1	25,6	1612,1	1389,5
2	26,0	1311,5	1406,1
3	26,0	1254,5	2556,9
4	26,7	1302,7	1749,8
5	23,6	814,3	922,2
6	21,8	5201,2	4367,6
7	26,5	6099,0	14607,9
8	24,5	1548,1	14629
9	21,9	6081,8	7418,9
10	25,3	978,0	1739,1

61 düğümlü örnekler üzerinde elde edilen PRF ve sezgisel yöntemin çözüm süreleri karşılaştırıldığında 7. ve 8. örneklerde PRF modeli 4 saat zaman limitine takılırken, sezgisel yöntemin bu örneklerde çok daha kısa sürede optimal çözüme ulaştığı tespit edilmiştir. 1. ve 6. örneklerde ise PRF modelinin sezgisel yöntemle göre bir miktar daha kısa sürede optimal çözümü bulduğu görülmüştür. Sezgisel yöntemin bazı örneklerde daha yavaş çalışmasının sebebinin olurlu bölgenin yeni kısıtlarla daha farklı sınırlandırılmasıyla PRF* modelinin optimal çözüme daha uzak bir çözümden başlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer örneklerin tamamında sezgisel yöntemin çözüm süresinin çok daha kısa olduğu gözlenmiştir. Genel ortalamalar

incelendiğinde PRF modelinin ortalama çözüm süresinin 5078,7, saniye ve sezgisel yöntemin ortalama çözüm süresinin ise 2645,1 saniye olduğu görülmektedir. Sezgisel yöntemin çözüm süresinde bNRF modeli için harcanan süre ortalama %1.6 civarındadır. Sonuç olarak sezgisel yöntemin PRF modeline göre ortalama %48,4 daha hızlı olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 5.2: 71 Düğümlü Ağlarda Sezgisel Yöntem ve PRF Çözüm Süreleri

Düğüm Sayısı Örnek #	71 (saniye)		
	bNRF	PRF*	PRF
1	42,0	1718,0	2959,7
2	40,5	14813,5	14813,1
3	39,6	3618,74	4562,8
4	36,7	7861,87	10369,6
5	42,2	14704,4	5279,2
6	40,8	3154,4	7378,7
7	40,6	7280,9	14694,5
8	42,8	3505,71	11331,19
9	43,6	5114,0	7107,72
10	43,2	3709,7	5186,0

71 düğümlü örnekler için çözüm istatistikleri Tablo 5.2’de olduğu gibidir. Buna göre her iki yöntemle de 2. örnekte 4 saat çözüm süresi içerisinde deterministik optimizasyonla optimum çözüme ulaşamamıştır. 5. örnekte sezgisel yöntemle PRF modeli daha hızlı çözüme ulaşırken 7. örnekte ise sezgisel yöntemin çözüm süresinin PRF modeline göre oldukça kısa olduğu görülmüştür. Diğer örneklerin tamamında sezgisel yöntemin daha hızlı çalıştığı tespit edilmiştir. 2. örnek hesaba katılmadan genel ortalamalar hesaplandığında PRF modelinin yaklaşık 7652,1 saniyede ve sezgisel yöntemin ise yaklaşık 5629,7 saniyede optimal çözüme ulaştığı görülmüştür. Benzer şekilde bNRF modeli için harcanan süre sezgisel yöntemin toplam çözüm süresininin sadece %1’ini oluşturmaktadır. Sonuç olarak bu örnekler için sezgisel modelin PRF modeline göre %26 oranında daha hızlı çalıştığı tespit edilmiştir.

Tablo 5.3’te gösterildiği gibi 81 düğümlü örneklerde PRF modeli 1-3, 5, 6 ve 9 numaralı örneklerde 4 saat zaman limitine takılmıştır. Sezgisel yöntem ise bu örnekler arasında 2, 3, 5 ve 6. örneklerde benzer şekilde 4 saat limitine takılırken 1. ve 9. örneklerde çok daha kısa sürede optimum çözüme ulaşmıştır. Ancak 6. örnekte PRF modeli 4 saatin sonunda optimum çözüme ulaşırken sezgisel yöntem herhangi bir olurlu tam sayılı çözüm elde edememiştir. Bunun sebebinin de benzer şekilde sezgisel yöntemin PRF modeline göre optima daha uzak bir noktadan çözüme başlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Her iki yöntemin de 4 saat zaman limitine takıldığı

Tablo 5.3: 81 Dügümlü Ağlarda Sezgisel Yöntem ve PRF Çözüm Süreleri

Dügüm Sayısı Örnek #	81 (saniye)		
	bNRF	PRF*	PRF
1	67,2	9130,0	14885,0
2	59,1	14804,4	14806,5
3	65,5	14859,9	14859,0
4	63,8	5776,2	10995,3
5	63,8	14846,2	14975,6
6	61,2	14813,0	14824,6
7	58,6	6095,0	12512,5
8	63,6	8920,2	13757,5
9	59,2	3217,4	14845,2
10	60,1	5299,9	5389,8

örnekler kullanılmadan elde edilen ortalamalara bakıldığında PRF modeli ortalama 13185,1 saniyede, sezgisel yöntem ise 9838,4 saniyede optimum çözüme ulaşmıştır. Dolayısıyla 81 düğümlü örneklerde PRF modelinin sezgisel yöntemle göre %25,4 oranında daha hızlı olduğu tespit edilmiştir. Bu örneklerde de sezgisel yöntemin sadece %0,08'i bNRF modelinin çözümü için harcanmıştır.

Sonuçlar genel olarak incelendiğinde 30 örneğin 29'unda sezgisel yöntemin PRF modelinin bulunduğu optimum sonuçlara ulaştığı, bir örnekte çözüm süresi limiti içerisinde herhangi bir olurlu tam sayılı çözüm elde edemediği tespit edilmiştir. Her iki yöntemin de çözüm süresi sınırına ulaştığı örnekler haricinde tüm örnekler üzerinde karşılaştırmalar yapıldığında sezgisel yöntemin PRF modeline oranla genel ortalama %34,6 daha hızlı çalıştığı tespit edilmiştir.

6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışmada homojen KAA'larda ağ ömrünü en büyüklerken aynı zamanda ağ güvenilirliğini iyileştirmeyi amaçlayan PRF modeli geliştirilmiştir. Bunun için öncelikle sadece ağ ömrünün en büyüklendiği ve herhangi bir güvenilirlik stratejisinin kullanılmadığı NRF isimli temel bir model kurulmuştur. Çalışmada ele alınan problem bir ağ akış problemi olarak modellenmiştir. NRF modelinde algılayıcıların ürettikleri verinin tamamını baz istasyonuna en enerji verimli şekilde ulaştırmaları sağlanmıştır. Daha sonra karmaşık ağlar literatüründen de faydalanılarak ağda konumlarından dolayı yoğun kullanılan merkezi düğümlerin ağ güvenilirliği açısından yaratabileceği riskler göz önünde bulundurulmuş ve bu riskleri gidermeyi amaçlayan bNRF modeli geliştirilmiştir. Bu model, NRF modeline algılayıcıların veri iletiminde dengeli kullanımını sağlayan kısıtların eklenmesiyle oluşturulmuştur. Bahsedilen kısıtlarla her algılayıcının üzerinden iletebilecek toplam veri miktarı sınırlandırılmış ve merkezi konumdaki algılayıcıların yoğun kullanımı engellenmiştir. Bu sayede merkezi düğümlerde meydana gelebilecek bir aksaklık durumunda oluşabilecek büyük çaplı veri kaybı problemlerinin önlenmesi amaçlanmıştır. Ardından, dengeli kullanım stratejisinin yanı sıra fazlalığa dayalı protokolle de ağ güvenilirliğinin desteklediği FRF modeli kurulmuştur. Bu modelde her algılayıcı kullandığı veri iletim yolu üzerinde herhangi bir aksaklık meydana gelmesi ihtimaline karşı ürettiği verinin ikinci kopyasını bir başka düğüm ayrık yoldan da baz istasyonuna göndermektedir. Aynı zamanda birincil kopya akışı için dengeli kullanım kısıtları da bu modelde geçerlidir. Ancak çalışmada her iki güvenilirlik stratejisinin de ağ ömrünü olumsuz yönde etkileyeceği öngörülmüştür. Bu nedenle son olarak ağ güvenilirliğini dengeli kullanım ve kısmi fazlalığa dayalı güvenilirlik protokolüyle iyileştirmeyi amaçlayan daha enerji verimli PRF modeli sunulmuştur. Geliştirilen yeni protokolde en kısa yollar üzerinde bulunan merkezi düğümlerin konumları gereği sağladıkları avantajlardan faydalanırken, bu düğümlerde çeşitli aksaklıklar meydana geldiğinde oluşabilecek büyük çaplı veri kaybı problemlerini önlemek amacıyla kısmi fazlalığa dayalı güvenilirlik protokolü kullanılmıştır. Bu çalışmada tek merkezi düğümün olduğu temel durum ele alınmış ve PRF modelinde en fazla bir merkezi düğüme izin verilmiştir. Modelde algılayıcılar dengeli kullanılmaktadır ve mutlaka merkezi bir düğüm seçilmek zorunda değildir. Ancak ağ üzerinde yoğun kullanımıyla algılayıcıların veri iletim yollarını kısaltarak ağ ömrünü iyileştirecek bir düğüm varsa bu algılayıcının merkezi olarak seçilmesine izin verilmektedir. Bununla beraber merkezi düğümde bir hasar oluştuğunda üzerinden akan veriyi korumak adına sadece merkezi düğüm üzerinden veri aktaran algılayıcıların ürettikleri veriyi kopyalayıp ikincil akış olarak başka düğüm ayrık yollardan göndermesi sağlanmıştır.

Performans analizinde tüm modeller ağ ömrü, toplam ve en büyük kalan enerji miktarı ile (korunan veri) ağ güvenilirliği açısından ele alınmıştır. Geliştirilen protokollerin performansı incelenirken, en büyük ağ ömrü değerlerine ulaşan ve herhangi bir savunma mekanizması kullanılmadığından enerjinin en verimli şekilde harcandığı NRF modeli baz alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde bNRF, PRF ve FRF modellerinin ağ ömründe sırasıyla %30,9, %27,1 ve %55,2 oranında azalmaya yol açtığı görülmüştür. Bunun yanı sıra kalan enerji değerleri incelendiğinde bNRF sonuçlarının diğer modellere göre daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla modellerde görülen enerji verimliliği ile ilgili problemlerin genel olarak dengeli kullanım kısıtlarından kaynaklandığı söylenebilir. PRF ve FRF modellerinde ikincil akış için dengeli kullanım kısıtları yer almadığından bu kısıtların enerji verimliliğine olumsuz etkisi bir miktar tolere edilmiştir. Ağ güvenilirliği ile ilgili yapılan analizlerde ağ üzerinde %10-%80 oranları arasında algılayıcının işlerliğini yitirdiği senaryolar üretilmiş ve bu senaryolarda baz istasyonuna ulaşabilen; yani korunan veri oranları hesaplanmıştır. Genel bir değerlendirme yapıldığında bNRF, PRF ve FRF modellerinin ağ güvenilirliğine sağladığı iyileşmelerin sırasıyla %38,4, %38 ve %42,7 civarında olduğu görülmüştür.

Özetlemek gerekirse NRF modelinden sonra en uzun ağ ömrü değerlerine PRF modelinde rastlanmıştır. PRF modeli ağ ömründe %27,1'lik bir azalma pahasına ağ güvenilirliğini %38 oranında iyileştirmektedir. bNRF modeli için ise ağ güvenilirliğinde %38,4 oranında iyileşme, ağ ömründe %30,9 oranında kısalmaya mal olmaktadır. bNRF ve PRF modellerinin ağ ömrü oranları arasındaki fark %3,8 civarındadır. Bu fark PRF modelinde merkezi düğüm kullanımının ağ ömrüne birebir katkısını göstermektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda PRF modelinde kısmi fazlalığa dayanan güvenilirlik protokolünün kullanılmasıyla yoğun kullanılan merkezi düğümün yarattığı büyük veri kaybı riskleri giderilirken, merkezi düğümün ağ ömrüne sağladığı avantajlardan faydalandığı gözlenmiştir. FRF modelinin sonuçları incelendiğinde ise modelin ağ güvenilirliğine sağladığı %42,2 oranında iyileşme, ağ ömründe %55,2 oranında düşüşe yol açmaktadır. PRF ve FRF modellerinin korunan veri oranları arasındaki farkın sadece %4,2 civarında olduğu görülmüştür. Modellerin ağ ömrü oranları arasındaki fark ise %28,1 civarındadır. Sonuç olarak PRF modeli, FRF modelinin ağ ömrü değerlerinde görülen azalmanın yaklaşık yarısı kadar bir azalmayla FRF modelinin sağladığı güvenilirlik seviyesine oldukça yakın bir oranda ağ güvenilirliği sağlamaktadır. Nitekim FRF modeli baz alınarak bir kıyaslama yapıldığında PRF ağ güvenilirliğinde %8 oranında bir azalma pahasına %39 daha uzun ağ ömrüne sahip çözümler elde etmektedir.

Modellerin performans analizinin ardından PRF modelinin daha büyük ağlarda çözüm

süresinin kısaltılabilmesi için optimizasyon tabanlı sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde problem aşamalı olarak çözdürülmektedir. İlk olarak bNRF modeli kullanılmaktadır. Daha sonra bNRF'nin çözümlerinde dengeli kullanım sınırına dayanan; yani kısıtlar altında en yoğun kullanılan algılayıcılar tespit edilmektedir. Bu algılayıcılar potansiyel merkezi düğüm kümesine dahil edilmektedir. Bir sonraki aşamada kullanılan PRF modelinin merkezi düğüm seçimini kolaylaştırabilmek için seçimin sadece bu küme içerisinden yapılması sağlanmaktadır. PRF modeline bununla ilgili yeni kısıtlar eklendikten sonra model çözdürülmekte ve optimum sonuca ulaşılmaktadır. Yapılan analizler sonucunda sezgisel yöntemin genel ortalama PRF modeline optimum çözüme %34,6 oranında daha hızlı ulaştığı görülmüştür.

Bu çalışmada homojen ağlar üzerinde en fazla bir merkezi düğüme izin verilen durum incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında tek bir merkezi düğümün bile ağ ömründe iyileşme sağladığı görülmüştür. Dolayısıyla çalışmanın devamı niteliğinde birden fazla merkezi düğümün olduğu durumlar incelenebilir. Ayrıca bu çalışmada merkezilik tanımı algılayıcıların üzerlerinden gönderilen akış miktarı ile ilgilidir. Alternatif merkezilik tanımlarının kullanıldığı benzer modeller de geliştirilebilir. Bir örnek vermek gerekirse ağdaki her algılayıcının veri iletiminde diğer algılayıcıların kaçının iletim yolları üzerinde bulunduğu tespit edilerek, veri transferinde diğer algılayıcılara en çok hizmet eden algılayıcı merkezi düğüm seçilebilir. Son olarak algılayıcıların enerji seviyesi, kapsama alanı gibi özelliklerinin farklı olduğu heterojen ağlar üzerinde benzer bir çalışma da yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Akkaya, K., ve Younis, M., A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, **3**(3), 325–349, 2005.
- [2] Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. ve Cayirci, E., Wireless sensor networks: a survey, *Computer networks*, **38**(4) 393–422, 2002.
- [3] Albert, R., Jeong, H. ve Barabási, A.L., Error and attack tolerance of complex networks, *Nature*, **406**(6794), 378–382, 2000.
- [4] Albert, R. ve Barabási, A.L., Statistical Mechanics of Complex Networks, *Rev. Mod. Phys.*, **74**(1), 47–97, 2002.
- [5] Alfieri, A., Bianco, A., Brandimarte, P. ve Chiasserini, C.F., Maximizing system lifetime in wireless sensor networks, *European Journal of Operational Research*, **181**(1) 390–402, 2007.
- [6] Al-Karaki, J.N. ve Kamal, A.E., Routing techniques in wireless sensor networks: a survey, *IEEE Wireless Communications* **11**(6) 6–28, 2004. DOI: 10.1109/MWC.2004.1368893.
- [7] Al-Wakeel, S.S. ve Al-Swailem, S.A., PRSA: A path redundancy based security algorithm for wireless sensor networks, In Wireless Communications and Networking Conference, *WCNC 2007*, 4156–4160, March, 2007.
- [8] Antoniou, P. ve Pitsillides, A., Wireless Sensor Networks Control: Drawing Inspiration from Complex Systems, *Med-Hoc-Net Ionian Academy*, 2007.
- [9] Barabási, A.L. ve Albert, R., Emergence of Scaling in Random Networks, *Science*, **286**, 509–512, 1999.
- [10] Bhardwaj, M. ve Chandrakasan, A.P., Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments, *Proceedings of Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, **3**, 1587-1596, 2002.

- [11] Chang, J.H. ve Tassiulas, L., Routing for maximum system lifetime in wireless ad-hoc networks, *37th Annu. Allerton Conf. Communication, Control, and Computing*, Monticello, IL, September 1999.
- [12] Chang, J.H. ve Tassiulas, L., Energy conserving routing in wireless adhoc networks, *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*, 22—31, March 2000.
- [13] Chang, J.H. ve Tassiulas, L., Maximum lifetime routing in wireless sensor networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, **12**(4), 609–619, 2004.
- [14] Cheng, Z., Perillo, M. ve Heinzelman, W.B., General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **7**(4), 484—497, 2008.
- [15] Dall’Asta, L., Barrat, A., Barthélemy, M. ve Vespignani, A., Vulnerability of weighted networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, **2006**(04), P04006, 2006.
- [16] Deng, J., Han, R. ve Mishra, S., INSENS: Intrusion-tolerant routing for wireless sensor networks, *Computer Communications*, **29**(2), 216–230, 2006.
- [17] Djukic, P. ve Valaee, S., Minimum energy fault tolerant sensor networks, *Proceedings of GlobeCom Conference*, 22–26, December 2004.
- [18] Hong, B. ve Prasanna, V.K., Constrained flow optimization with applications to data gathering in sensor networks, *Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks*, Springer Berlin Heidelberg, Germany, 187–200, 2004.
- [19] Kalpakis, K., Dasgupta, K. ve Namjoshi, P., Maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks, *Proceedings of IEEE Networks*, **2**, 685–696, 2002.
- [20] Karlof, C., Li, Y.P. ve Polastre, J., ARRIVE: Algorithm for robust routing in volatile environments. *Technical report UCB/CSD-03-1233 University of California*, 2003.
- [21] Krishnamachari, B. ve Ordóñez, F., Analysis of energy-efficient, fair routing in wireless sensor networks through non-linear optimization, *Vehicular Technology Conference*, **5**, 2844–2848, 2003.
- [22] Ma, R., Xing, L. ve Michel, H.E., Fault-intrusion tolerant techniques in wireless sensor networks. *Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on Dependable, Autonomic and Secure Computing*, 85–94, September 2006.

- [23] Ma, R., Xing, L. ve Michel, H.E., A new mechanism for achieving secure and reliable data transmission in wireless sensor networks. *Proceedings of the IEEE Conference on Technologies for Homeland Security*, Woburn, MA, 274–279, May 2007.
- [24] Nasser, N. ve Chen, Y., SEEM: Secure and energy-efficient multipath routing protocol for wireless sensor networks, *Computer Communications*, **30**(11), 2401–2412, 2007.
- [25] Newman, M., The Structure and Function of Complex Networks, *SIAM Review*, **45**(2), 167–256, 2003.
- [26] Ordóñez, F. ve Krishnamachari, B., Optimal information extraction in energy-limited wireless sensor networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **22**(6), 1121–1129, August 2004.
- [27] Ouadjaout, A., Challal, Y., Lasla, N. ve Bagaa, M., SEIF: secure and efficient intrusion-fault tolerant routing protocol for wireless sensor networks, *Proceedings of the Third International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES)*, 503–508, March 2008.
- [28] Perillo, M.A. ve Heinzelman, W.B., Optimal sensor management under energy and reliability constraints, *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference March 2003*, **3**, 1621–1626, March 2003.
- [29] Ruela, A.S., Cabral, R.S., Aguiño, A.L.L. ve Guimaraes, F.G., Evolutionary Design of Wireless Sensor Networks Based on Complex Networks, *5th Int. Conf. On Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, 237–242, 2009.
- [30] Sadagopan, N. ve Krishnamachari, B., Maximizing data extraction in energy-limited sensor networks, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, **1**(1), 123–147, 2005.
- [31] Sharma, G. ve Mazumdar, R., Hybrid Sensor Networks: A Small World, *MobHoc'05*, Cicago, ABD, 2005.
- [32] Shi, E. ve Perrig, A., Designing secure sensor networks, *IEEE Wireless Communications* **11**(6), 38–43, 2004.
- [33] Stavrou, E. ve Pitsillides, A., A survey on secure multipath routing protocols in WSNs, *Computer Networks*, **54**(13), 2215–2238, 2010.

- [34] Watts, D.J. ve Strogatz, S.J., Collective Dynamics of Small-World Networks, Nature, **393**, 440–42, 1998.

EKLER

A. Veriler

Tablo A.1: PRF_0 ve PRF_1 için Saniye Cinsinden Çözüm Süreleri

Düğüm Sayısı	21		31		41	
Örnek #	PRF_0	PRF_1	PRF_0	PRF_1	PRF_0	PRF_1
1	11,18	10,09	14429,33	58,01	1583,33	261,10
2	23,45	11,05	55,41	58,66	594,43	204,87
3	27,95	11,73	51,44	40,81	434,51	193,85
4	13	10,64	49,68	48,40	669,65	141,09
5	11,25	11,69	52,47	54,65	187,37	140,50
6	9,88	9,75	70,15	63,77	105,61	110,11
7	12,98	11,19	39,20	44,74	14458,40	466,27
8	37,54	10,18	48,54	54,13	14455,00	14456,03
9	12,55	11,72	14429,74	62,21	14737,57	130,16
10	12,67	13,82	54,44	60,33	14548,91	193,05

Tablo A.2: 21 ve 31 Düğümlü Ağlarda GUROBI 5.1 ve CPLEX 12.4 için Saniye Cinsinden Çözüm Süreleri

Düğüm Sayısı	21		31	
Örnek #	GUROBI 5.1	CPLEX 12.4	GUROBI 5.1	CPLEX 12.4
1	5,92	10,09	40,79	58,01
2	7,61	11,05	56,16	58,66
3	6,60	11,73	47,46	40,81
4	5,74	10,64	47,74	48,40
5	8,09	11,69	53,61	54,65
6	6,45	9,75	46,70	63,77
7	7,02	11,19	28,35	44,74
8	6,30	10,18	48,94	54,13
9	8,69	11,72	49,39	62,21
10	8,81	13,82	48,09	60,33

Tablo A.3: 41 ve 51 Dügümlü Ağlarda GUROBI 5.1 ve CPLEX 12.4 için Saniye Cinsinden Çözüm Süreleri

Düğüm Sayısı Örnek #	41		51	
	GUROBI 5.1	CPLEX 12.4	GUROBI 5.1	CPLEX 12.4
1	219,19	261,10	1853,21	1980,42
2	295,94	204,87	389,08	627,22
3	164,70	193,85	413,36	775,10
4	151,04	141,09	768,13	1189,15
5	124,58	140,50	8890,07	3823,64
6	107,14	110,11	440,70	585,58
7	494,59	466,27	900,02	803,85
8	14427,08	14456,03	738,74	634,76
9	117,43	130,16	161,19	240,87
10	214,44	193,05	1475,72	768,22

Tablo A.4: Ortalama Ağ Ömrü Değerleri

Düğüm Sayısı	NRF	bNRF	PRF	FRF
21	40,50	26,63	30,12	17,62
31	27,73	17,62	18,88	11,92
41	19,10	13,24	14,52	8,68
51	15,99	11,18	11,65	7,01
61	15,77	11,74	11,89	7,25
71	13,18	9,31	9,44	6,01
81	11,39	8,01	8,20	5,28

Tablo A.5: Ağ Ömründe Ortalama Azalma Oranları

Düğüm Sayısı	NRF (%)	bNRF (%)	PRF (%)	FRF (%)
31	31,53	33,84	37,32	32,38
41	52,83	50,29	51,80	50,74
51	60,52	58,00	61,33	60,20
61	61,05	55,92	60,53	58,84
71	67,46	65,03	68,67	65,89
81	71,86	69,92	72,78	70,05

Tablo A.5'te tüm modeller için ağ büyüklüğü arttıkça ağ ömründe meydana gelen oransal azalmalar gösterilmektedir. Hesaplamalarda tüm modeller için 21 düğümlü ağlarda elde edilen ortalama ağ ömrü değerleri baz alınmıştır. Bir örnekle açıklamak gerekirse, $bNRF_d, d \in \{21, 31, 41, 51, 61, 71, 81\}$ düğüme sahip ağlarda bNRF için ortalama ağ ömrü değerini gösterdiğinde 51 düğümlü ağlar için %58 azalma oranı $\frac{bNRF_{21}-bNRF_{51}}{bNRF_{21}} \times 100$ formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo A.6: En Büyük, En Küçük ve Ortalama MKE Oranları

Düğüm Sayısı	Model	En Küçük	Ortalama	En Büyük
21	NRF	%0	%42,68	%83,45
	bNRF	%60,95	% 87,11	%99,04
	PRF	%0	%53,07	%98,08
	FRF	%0	%42,30	% 87,07
31	NRF	%0	%36,11	%96,27
	bNRF	%71,01	%89,08	%97,62
	PRF	%57,46	%77,93	%97,27
	FRF	%29,96	%61,53	%88,25
41	NRF	%0	%44,22	%98,84
	bNRF	%76,46	% 89,96	% 98,85
	PRF	%57,71	% 77,33	% 97,50
	FRF	%0	% 51,30	% 87,12
51	NRF	%0	%45,95	%91,79
	bNRF	%3,99	%80,89	%98,24
	PRF	%3,99	%54,81	%83,53
	FRF	%0	%36,30	%75,06
61	NRF	%0,00	%33,62	%94,08
	bNRF	%61,72	%83,01	%95,26
	PRF	%0	%42,87	%93,68
	FRF	%0	%24,69	%87,46
71	NRF	%0	%35,32	%92,39
	bNRF	%70,89	%90,87	%98,29
	PRF	%0	%64,43	%96,13
	FRF	%0	%49,11	%96,04
81	NRF	%0	% 19,02	%87,23
	bNRF	%66,12	% 85,66	%99,81
	PRF	%14,48	% 56,28	%98,39
	FRF	%0	%40,15	%91,99

Tablo A.7: 21 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları

Bozulma Oranı	NRF (%)	bNRF (%)	PRF (%)	FRF (%)
0,10	80,9	85,0	85,5	89,4
0,20	58,2	69,3	71,3	76,4
0,25	51,0	65,4	64,8	69,3
0,30	43,2	58,9	60,5	66,2
0,40	35,9	46,4	47,4	52,9
0,50	25,9	37,7	35,0	42,6
0,60	17,4	30,4	27,8	33,6
0,70	12,4	19,1	19,3	21,0
0,75	10,6	17,1	16,4	19,1
0,80	7,2	13,2	13,2	14,4

Tablo A.8: 31 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları

Bozulma Oranı	NRF (%)	bNRF (%)	PRF (%)	FRF (%)
0,10	67,1	81,1	82,2	88,6
0,20	45,6	65,0	64,7	72,8
0,25	42,4	61,8	63,4	67,9
0,30	35,0	53,4	53,0	57,9
0,40	22,0	40,5	42,0	45,7
0,50	19,9	32,5	31,7	36,3
0,60	16,9	25,2	25,4	27,1
0,70	7,0	16,1	16,0	15,4
0,75	8,2	15,3	15,1	15,9
0,80	4,6	8,8	8,8	10,4

Tablo A.9: 41 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları

Bozulma Oranı	NRF (%)	bNRF (%)	PRF (%)	FRF (%)
0,10	69,5	78,0	78,7	87,1
0,20	53,8	67,5	69,8	74,0
0,25	41,3	54,2	57,1	63,9
0,30	32,7	50,8	52,2	53,8
0,40	23,8	40,0	41,5	43,6
0,50	12,5	28,5	26,7	31,3
0,60	12,4	21,5	22,4	23,3
0,70	6,6	14,8	15,7	15,4
0,75	5,7	12,4	13,1	12,8
0,80	4,1	9,6	9,8	9,3

Tablo A.10: 51 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları

Bozulma Oranı	NRF (%)	bNRF (%)	PRF (%)	FRF (%)
0,10	69,5	78,0	78,7	87,1
0,20	53,8	67,5	69,8	74,0
0,25	41,3	54,2	57,1	63,9
0,30	32,7	50,8	52,2	53,8
0,40	23,8	40,0	41,5	43,6
0,50	12,5	28,5	26,7	31,3
0,60	12,4	21,5	22,4	23,3
0,70	6,6	14,8	15,7	15,4
0,75	5,7	12,4	13,1	12,8
0,80	4,1	9,6	9,8	9,3

Tablo A.11: 61 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları

Bozulma Oranı	NRF (%)	bNRF (%)	PRF (%)	FRF (%)
0,10	63,9	78,8	78,9	86,1
0,20	49,5	60,2	59,9	68,0
0,25	36,4	52,0	51,1	58,8
0,30	30,0	45,9	45,7	49,0
0,40	21,7	35,2	34,8	38,3
0,50	18,0	29,4	27,5	31,3
0,60	10,4	20,2	18,1	22,3
0,70	8,5	15,2	14,6	16,7
0,75	6,1	12,2	11,2	12,6
0,80	5,1	8,0	8,1	9,5

Tablo A.12: 71 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları

Bozulma Oranı	NRF (%)	bNRF (%)	PRF (%)	FRF (%)
0,10	63,4	77,9	78,5	86,9
0,20	36,7	61,8	61,8	66,5
0,25	29,0	53,1	53,5	58,8
0,30	35,2	48,0	50,3	53,8
0,40	20,9	37,5	35,9	39,6
0,50	12,4	25,4	25,8	28,8
0,60	8,9	21,5	21,2	22,2
0,70	6,0	14,6	13,7	13,9
0,75	5,0	12,3	11,1	12,0
0,80	2,4	8,5	7,3	9,0

Tablo A.13: 81 Dügümlü Ağlarda Ortalama Korunan Veri Oranları

Bozulma Oranı	NRF (%)	bNRF (%)	PRF (%)	FRF (%)
0,10	67,3	81,0	82,2	86,9
0,20	46,1	61,0	61,5	66,5
0,25	34,8	55,5	55,6	58,8
0,30	31,3	50,7	48,1	53,8
0,40	24,0	39,0	38,8	39,6
0,50	13,4	28,2	27,5	28,8
0,60	11,4	23,0	20,9	22,2
0,70	6,7	14,1	14,1	13,9
0,75	5,0	11,6	13,0	12,0
0,80	4,6	9,2	9,6	9,0

Tablo A.14: Ortalama Korunan Veri Oranları

Bozulma Oranı	NRF (%)	bNRF (%)	PRF (%)	FRF (%)
0,10	69,7	80,4	81,4	87,5
0,20	48,4	64,2	64,7	70,4
0,25	39,3	57,3	57,6	63,2
0,30	34,7	51,5	51,7	55,8
0,40	24,3	39,7	39,8	43,2
0,50	16,9	30,1	28,9	32,8
0,60	12,4	23,2	22,3	24,5
0,70	7,9	15,5	15,3	15,9
0,75	6,3	12,9	12,7	13,4
0,80	4,5	9,4	9,3	10,0

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ŞENDİL, Melek
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 18.07.1988 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 05553358039
e-mail : msendil@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Y. Lisans	TOBB ETÜ Endüstri Mühendisliği	2014
Lisans	Bilkent Üniversitesi Endüstri Mühendisliği	2010
Lise	Ankara Atatürk Anadolu Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-2013	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
9/2010-1/2011	GIPTA A.Ş.	Üretim Planlama Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce (İyi)

Yayınlar

Şendil, M., Altın-Kayhan, A. , “Topoloji Kontrolü ile Kablosuz Algılayıcı Ağ Güvenliğinin İyileştirilmesi”, International IIE Conference ve YA/EM 33. Ulusal Kongresi, İstanbul, June 26-28, 2013.

Şendil, M., Altın-Kayhan, A. , “Improving Wireless Sensor Network Reliability by Topology Control”, 26th European Conference on Operational Research, Rome, Italy, July 1-4, 2013.