



Kablosuz Sualtı Algılayıcı Ağlarında Katmanlar Arası İletişim Ve Fırsatçı Spektrum Erişimi

Program Kodu: 1001

Proje No: 114E248

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Vehbi Çağrı GÜNGÖR

NİSAN 2018
Kayseri

Önsöz

Sualtı dünyası petrol, doğalgaz ve değerli mineraller gibi doğal kaynaklar bakımından oldukça zengin olmasına rağmen insanoğlu tarafından henüz tam olarak keşfedilememiştir. Ancak son yıllarda denizbilim veri toplanması, felaket yönetimi, deprem izleme, çevresel kirliliğin gözlemlenmesi, güvenli gemi seyri ve çoklu ortam taktik izleme gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanım alanı bulması nedeniyle kablosuz sualtı algılayıcı ağları endüstride ve akademide olağanüstü artan bir hızda ilgi odağı olmuştur. Sualtı algılayıcı ağlarının geliştirilmesi ve devreye alınmasının sağlayabileceği avantajlar anlaşılmış olmakla birlikte sualtı akustik ortamı güvenilir ve etkin kablosuz iletişim için ciddi zorluklar yaratmaktadır. Bu bağlamda, kablosuz sualtı algılayıcı ağlarında güvenilir ve etkin iletişimin sağlanması için özgün bir iletişim sistemi gerekmektedir.

Bu projede, kablosuz sualtı algılayıcı ağlarındaki yüksek ve değişken yayılım gecikmesi, yere, zamana ve frekansa bağlı olarak sualtı kanal kapasitesinin değişiklik göstermesi ve çok sınırlı enerjiye sahip sualtı algılayıcı düğümlerinin bulunması gibi ortak problemlerin adreslenmesi için konum farkında Katmanlar arası İletişim ve Fırsatçı Spektrum Erişim (KI-FSE) sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, kaynakları kısıtlı sualtı düğümleri için uygulama katmanından fiziksel katmana kadar iletişim katmanlarının yükünü azaltmakta ve performanslarını geliştirmektedir. Ayrıca, sualtı ortamında etkin spektrum kullanımını sağlamak için fırsatçı spektrum erişim tekniklerinden faydalanmaktadır.

Genel hatlarıyla incelendiğinde, TÜBİTAK tarafından desteklenen 114E248 numaralı bu projenin nihai sonucu sualtı ortamları için özgün katmanlar arası ve fırsatçı spektrum erişim esasına dayanan iletişim protokollerinin geliştirilmesi için gerekli metotların ve temel kavramların ortaya konmasıdır. Öte yandan, projeden elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak değerlendirildiğinde, kariyer ve eğitimsel faydalarına ilave olarak, proje sonuçlarıyla geniş ölçekli sualtı algılayıcı ağları kullanılarak sualtı dünyasının kapsamlı keşfinin başarımı sağlanabilecek ve sualtında bulunan doğalgaz ve petrol gibi yeni doğal kaynakların keşfedilmesi mümkün olabilecektir.

Bu projede elde edilen sonuçlar ilgili bilim alanının SCI-Expanded kapsamındaki saygın dergileri arasında yer alan *IEEE Systems Journal*, *International Journal of Communication Systems* ve *Journal of Network and Computer Applications* dergilerinde 4 adet uluslararası makalede yayınlanmıştır. Böylece, bu alandaki literatürde önemli boşluklar doldurulmuş ve gelecek çalışmalara ışık tutulmuştur. Projede çeşitli zamanlarda görev alan lisansüstü bursiyelerin akademik olarak yetişmeleri sağlanmış ve 2019 bahar döneminde savunulacak olan bir doktora tez çalışmasının önemli bir bölümü bu proje çıktılarından oluşmuştur.

114E248 nolu projeye teşekkür edilen SCI-Expanded kapsamındaki dergi yayınları:

Yayın 1: Faheem, M., Abbas, M. Z., Tuna, G., **Gungor, V. C.** 2015. "EDHRP: Energy Efficient Event Driven Hybrid Routing Protocol for Densely Deployed Wireless Sensor Networks", *Journal of Network and Computer Applications*, 58, 309-326. (Not: Bu makale, projenin ilk dönemi sonunda çıktı olarak belirtildiği için, online sistemde final raporu çıktısı olarak eklenmesine online sistem izin vermemiştir. Makale ek olarak eklenmiştir.)

Yayın 2: Faheem, M., Tuna, G., **Gungor, V. C.** 2016. "LRP: Link Quality-Aware Queue-Based Spectral Clustering Routing Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks", *International Journal of Communication Systems*, 30(12), 1-17.

Yayın 3: Tuna, G., **Gungor, V. C.** 2017. "A Survey on Deployment Techniques, Localization Algorithms, and Research Challenges for Underwater Acoustic Sensor Networks", *International Journal of Communication Systems*, 30(17), 1-21.

Yayın 4: Faheem, M., Tuna, G., **Gungor, V. C.** 2017. "QERP: Quality-of-Service (QoS) Aware Evolutionary Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks", *IEEE Systems Journal*, 1-8.

İçindekiler

Önsöz.....	ii
Tablo ve şekil listeleri.....	v
Özet.....	vi
Abstract.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	2
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	9
3.1 Hiyerarşik Ağ Mimarileri ve Eşgüdümlü Kaynak Yönetimi Tasarımı.....	11
3.2 Sualtı Akustik Ağları için Konumlandırma Yönteminin Geliştirilmesi.....	21
3.3 Sualtı Akustik İletişimde Kullanılabilecek Modülasyon Teknikleri.....	33
3.4 Konum Farkında Katmanlar Arası İletişim Ve Fırsatçı Spektrum Erişim (Kİ-FSE) Sisteminin Geliştirilmesi.....	35
4. BULGULAR.....	38
4.1 Hiyerarşik Ağ Mimarileri ve Eşgüdümlü Kaynak Yönetimi İle İlgili Performans Değerlendirmeleri.....	38
4.2 Sualtı Akustik Ağları İçin Geliştirilen Konumlandırma Yöntemi İle İlgili Performans Değerlendirmeleri.....	43
4.3 Sualtı Akustik İletişimde Kullanılabilecek Modülasyon Tekniklerinin Performans Analizi.....	45
4.4 Konum Farkında Katmanlar Arası İletişim ve Fırsatçı Spektrum Erişim (Kİ-FSE) Sistemi İle İlgili Performans Değerlendirmeleri.....	55
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	61
6. KAYNAKLAR LİSTESİ.....	62

Tablo ve şekil listeleri

Tablo 1. Benzetim parametreleri.....	18
Tablo 2. Zaman tabanlı enerji yönetimi durum tablosu.....	19
Tablo 3. Tetiklenme tabanlı enerji yönetimi durum tablosu.....	20
Tablo 4. Literatürdeki sabit konumlandırma algoritmalarının karşılaştırması.....	24
Tablo 5. Literatürdeki gezgin konumlandırma algoritmalarının karşılaştırması.....	27
Tablo 6. Literatürdeki hibrit (hem sabit hem gezgin düğümler içeren) konumlandırma algoritmalarının karşılaştırması.....	28
Tablo 7. Benzetim çalışmasında kullanılan parametreler.....	46
Tablo 8. BER ve SNR değerleri.....	50
Şekil 1. İki bölge arası veri iletimi.....	14
Şekil 2. Zaman tabanlı enerji yönetim sistemi için durum geçiş şeması.....	19
Şekil 3. Tetiklenme tabanlı enerji yönetimi için durum geçiş şeması.....	21
Şekil 4. Örnek ağ yapısı.....	30
Şekil 5. Min-max algoritması.....	32
Şekil 6. Önerilen yönlendirme algoritması ile en kısa yol algoritması enerji üretimsiz karşılaştırma (BER=1e-6).....	40
Şekil 7. En kısa yol algoritması üzerinde enerji üretim yöntemlerinin etkisi.....	41
Şekil 8. Önerilen yönlendirme algoritması üzerinde enerji üretim yöntemlerinin etkisi (Rmax=50m, BER=1e-6).....	41
Şekil 9. Önerilen ve en kısa yol algoritmalarının enerji üretimi yöntemleri ile gösterdikleri performans oranı (Rmax=50m, BER=1e-6).....	42
Şekil 10. Görev döngüsü ile hasatlama yöntemlerinin yaşam ömrüne katkısı.....	43
Şekil 11. Yardımcı donanım kullanımı ile hasatlama yöntemlerinin yaşam ömrüne katkısı..	43
Şekil 12. 100, 150 ve 200 m iletişim uzaklığı ile lokalizasyon hatası.....	45
Şekil 13. 100, 150 ve 200 m iletişim uzaklığı ile lokalizasyon paketi sayısı.....	45
Şekil 14. Farklı derinliklerde soğurum katsayısı (dB/km), frekans (kHz) ve derinlik arasındaki ilişki.....	47
Şekil 15. 100 m derinlikte farklı mesafe değerleri için A(d,f)+N (d,f)(dB) ve frekans (kHz) arasındaki ilişki.....	48
Şekil 16. (A (d, f) + N (f)) sonucu ile mesafe (m) karşı frekans (KHz).....	49
Şekil 17. A(d,f)+N (d,f)(dB), frekans (kHz) ve derinlik arasındaki ilişki.....	49
Şekil 18. Çeşitli modülasyon şemalarının BER ve Eb / NO olasılıkları.....	51
Şekil 19. Ağın 100 m mesafede farklı modülasyon teknikleri enerji tüketim oranları.....	52
Şekil 20. Ağın 1000 m mesafede farklı modülasyon teknikleri enerji tüketim oranları.....	52
Şekil 21. Ağın 1000 m derinlikte farklı modülasyon teknikleri için enerji tüketim oranları (Optimum Frekans).....	53
Şekil 22. Ağın 100 m derinlikte ve optimum frekansta farklı mesafeler ve farklı modülasyon teknikleri için enerji tüketim oranları.....	53
Şekil 23. Ağın 1000 m mesafede ve optimum frekansta farklı derinlikler ve farklı modülasyon teknikleri için enerji tüketim oranları.....	54
Şekil 24. Çevrim sayısına bağlı paket teslim oranı.....	56
Şekil 25. Düğüm yoğunluğuna bağlı gecikme (ms).....	57
Şekil 26. Düğüm yoğunluğuna bağlı olarak üretilen iş.....	57
Şekil 27. Çevrim sayısına bağlı olarak kalan enerji (J).....	58
Şekil 28. Çevrim sayısına bağlı olarak paket teslim oranı.....	59
Şekil 29. Düğüm yoğunluğu – gecikme ilişkisi.....	60
Şekil 30. Çevrim sayısı – kalan enerji ilişkisi.....	60

Özet

Dünyamızın üçte ikisinden fazlası sularla kaplıdır. Denizlerden, göllerden ve nehirlerden oluşan sualtı dünyası doğal kaynaklar (petrol, doğalgaz ve değerli mineraller) bakımından oldukça zengin olup insanoğlu tarafından henüz tam olarak keşfedilememiştir. Son yıllarda, bilimsel, çevresel, ticari ve askeri uygulamalarda kullanılmak üzere kablosuz sualtı algılayıcı ağların geliştirilmesi ve gerçekleştirilmesi noktasında endüstride ve akademide olağanüstü artan bir hızda ilgi olmuştur. Günümüzde sualtı algılayıcı ağlarının deprem izleme, denizbilim veri toplanması, felaket yönetimi, çevresel kirliliğin gözlemlenmesi, güvenli gemi seyri, çoklu ortam taktik izleme vb. alanlarda çeşitli uygulamaları bulunmaktadır. Bununla birlikte, sualtı akustik ortamı güvenilir ve etkin kablosuz iletişim için ciddi zorluklar yaratmaktadır. Bu bağlamda, güvenilir ve etkin sualtı iletişimin sağlanması için özgün bir iletişim sistemi gerekmektedir.

Bu projede, kablosuz sualtı algılayıcı ağlarının ortak problemleri olan yayılım gecikmesinin yüksek ve değişken olması, sualtı kanal kapasitesinin yere, zamana ve frekansa bağlı olarak ciddi şekilde değişiklik göstermesi ve kablosuz sualtı algılayıcı düğümlerinin çok sınırlı enerjiye sahip olması gibi problemlerin adreslenmesi için konum farkında Katmanlar arası İletişim ve Fırsatçı Spektrum Erişim (Kİ-FSE) sistemi önerilmektedir. Geliştirilen Kİ-FSE sistemi kaynakları kısıtlı sualtı elemanları için geleneksel iletişim katman modelinde uygulama katmanından fiziksel katmana kadar iletişim katmanlarının yükünü azaltacak ve performanslarını geliştirecek tam bir katmanlar arası çözümdür. Ayrıca, Kİ-FSE sistemi sualtı ortamında etkin spektrum kullanımını sağlamak için fırsatçı spektrum erişim tekniklerinden faydalanmaktadır.

Genel olarak, bu projenin nihai sonucu sualtı ortamları için özgün katmanlar arası ve fırsatçı spektrum erişim esasına dayanan iletişim protokollerinin geliştirilmesi için gerekli metotların ve temel kavramların ortaya konmasıdır. Sonuç olarak; bu projenin kariyer ve eğitimsel faydalarına ilaveten, bu projenin sonuçlarıyla mümkün kılınabilecek sağlam ve geniş ölçekli sualtı algılayıcı ağları sualtı dünyasının bilimsel, çevresel, ticari, askeri, vb. amaçlar için kapsamlı keşfini başarmayı mümkün kılacak ve sualtında bulunan yeni doğal kaynakların (petrol, doğal gaz, vb.) sualtı algılayıcı ağları tarafından keşfedilmesine önayak olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz sualtı akustik algılayıcı ağları, güvenilir iletişim

Abstract

Over two-thirds of the Earth's surface is covered with water. The underwater world, which comprises the sea, rivers, lakes, is rich in natural resources (e.g., oil, natural gas, and valuable minerals) and largely unexplored by human beings. Recently, there has been a growing interest in both academia and industry for the development and deployment of wireless underwater sensor networks (WUSNs) to better explore these environments for scientific, environmental, commercial, and military purposes. In fact, the existing and potential applications of WUSNs span a very wide range, including seismic monitoring, oceanographic data collection, disaster prevention, environmental pollution monitoring, assisted navigation, and multimedia tactical surveillance. However, the underwater acoustic environment presents significant challenges to reliable and efficient wireless communications. In this respect, a novel communication framework to provide reliable and efficient underwater communications is needed.

In this project, a location-aware Cross-layer Communications and Opportunistic Spectrum Access (CC-OSA) communications framework is proposed to address common problems of wireless underwater sensor networks, such as high and variable propagation delay, significant underwater acoustic channel capacity variations depending on location, time, and frequency, and energy limitations of underwater sensor nodes. The proposed location-aware CC-OSA framework is a complete cross-layering such that traditional communication layers from the application layer to the physical layer are unified for resource-constrained underwater nodes to decrease the communication overhead and improve the performance of traditional layered approaches. It also uses opportunistic spectrum access techniques to achieve more efficient spectrum utilization.

Overall, the ultimate outcome of this project is to lay down fundamental basis for the development of a cross-layer and opportunistic spectrum access-based communication protocol suite to realize efficient underwater communications. Overall, in addition to the career and educational benefits, the robust and scalable underwater sensor networks that are enabled by the results of this project are expected to allow the research community and commercial organizations to achieve efficient exploration of the underwater world for scientific, environmental, commercial, and military purposes as well as to discover new natural resources (oil, natural gas, and valuable minerals, etc.).

Keywords: Wireless underwater sensor networks, reliable communications.



1. GİRİŞ

Son yıllarda, bilimsel, çevresel, ticari ve askeri uygulamalarda kullanılmak üzere kablosuz sualtı algılayıcı ağların geliştirilmesi ve gerçekleştirilmesi konusunda endüstride ve akademide olağan üstü hızda artan bir ilgi olmuştur. Günümüzde sualtı algılayıcı ağlarının deprem izleme, denizbilim veri toplanması, felaket yönetimi, çevresel kirliliğin gözlemlenmesi, güvenli gemi seyri, çoklu ortam taktik izleme v.b. alanlarda çeşitli uygulamaları bulunmaktadır. Bununla birlikte, şu anda mevcut ya da tasarlanmakta olan kablosuz sualtı algılayıcı ağ uygulamalarının gerçekleştirilebilmesi sualtı algılayıcı ağların etkili ve güvenilir iletişim yeteneklerine bağlıdır.

Bu projenin temel amacı, sualtı algılayıcı ağlarının pratik uygulamalarını gerçekleştirebilmek ve bunların potansiyel avantajlarından en yüksek seviyede yararlanabilmek için kablosuz sualtı algılayıcı düğümleri için konum farkında katmanlar arası iletişim ve fırsatçı spektrum erişim teknikleri kullanarak etkin ve güvenilir sualtı kablosuz iletişimin sağlanmasıdır. Bu projenin başlıca özgün değeri; sualtı algılayıcı ağlarının iletişim problemlerinin etkili bir şekilde çözülmesini sağlayan konum farkında katmanlar arası iletişim ve fırsatçı spektrum erişim platformunun geliştirilmesi ve tasarlanmasıdır. Literatürdeki sualtı algılayıcı ağ çalışmalarının genel olarak ortak özelliği, veri aktarımı gerçekleştirebilmek üzere değişik ağ katmanları için tasarlanmış iletişim protokolleri geliştirmeleridir. Bu yönde bazı olumlu sonuçlar elde edilmiş olmasına rağmen, bu çalışmaların en temel eksikliği geleneksel ağ yapılanması ve katmanlı iletişim protokolü geliştirilmesi esasına bağlı kalınarak, uygulama, taşıma, ağ, veri bağı ve fiziksel katmanların her biri için ayrı ayrı protokollerin tasarlanmış olmasıdır. Ciddi anlamda kullanılabilir enerjinin kısıtlılığı ve sualtı akustik kanalındaki sınırlı bant genişliği, yüksek ve değişken yayılım gecikmesi, değişken kanal kapasitesi gibi sorunlar nedeniyle, bu yaklaşımlar, sualtı algılayıcı ağlar için en uygun çözümler olmaktan uzaktırlar.

Bu projede, bugüne kadarki mevcut çalışmalarda izlenen yöntemlerden farklı olarak katmanlar arası ortak tasarım göz önünde bulundurularak konum farkında katmanlar arası iletişim protokolleri geliştirilmiştir. Bu bağlamda, katmanlar arası protokol tasarımı, iletişim kaynaklarının verimli kullanılabilmesi için birbirine komşu olmayan katmanlar arasında bilgilerin paylaşımını ve işbirliğini içermektedir. Diğer bir ifadeyle, katmanlar arası protokol tasarımında iletişim sadece komşu katmanlarla sınırlı kalmaz. Bir katman, herhangi bir katmanla iletişime geçebilir. Bir katmanın değişkenleri parametre alışverişi sayesinde herhangi bir katman tarafından görülebilir. Tüm katmanlar, ortaklaşa çalışarak iletişim sırasında parametrelerin dinamik olarak en iyileme işlemi gerçekleştirirler. Ayrıca, bu projede sualtı algılayıcı ağlarındaki yere, zamana ve frekansa bağlı olarak değişen

spektrumu en etkin ve verimli bir şekilde kullanabilmek için fırsatçı spektrum erişim algoritmaları geliştirilmiştir.

Literatür taramasında mevcut protokollerin çoğunun ve basitleştirilmiş kanal ve enerji modellerine, trafik türlerine dayandığı görülmüştür. Bu bağlamda, önerilen projenin sualtı algılayıcı ağlarında akustik kanalın fiziksel yayılım karakteristiğinin literatürdeki deneyler ve farklı sualtı düğümünün donanım özellikleri temel alınarak ağ yaşam süresinin matematiksel modellerinin geliştirilmesi planlanmıştır. Bu bağlamda, projenin özgün yönü sualtı kanal ve sualtı modemlerinin enerji kullanım karakteristiğine uygun ve fırsatçı spektrum kullanımını sağlayan konum farkında katmanlar arası iletişim protokolleri geliştirilmesidir. Böylelikle, sualtı akustik kanalındaki yere, zamana ve frekansa göre değişen sualtı iletişim kaynaklarının etkin bir şekilde kullanımı hedeflenmiştir. Diğer bir önemli husus ise, bu projede sualtı algılayıcı ağ teknolojilerinin birçok farklı uygulama alanı olduğu ve uygulamaların çoğunda çok işlevli algılayıcıların büyük bir alana yayılmış olmaları göz önüne alınarak hiyerarşik bir şekilde düzenlenmiş sualtı ağ mimarileri tasarlanmıştır. Bu yaklaşımda, kaynak kısıtlı, düşük enerjili ağ elemanları farklı fiziksel ölçümlerin sualtı ortamında gözlemlenmesi gibi basit görevler yaparken, işlem gücü ve hafıza bakımından daha üstün ve daha fazla enerjili olan grup başı (cluster head) gibi ağ elemanları dinamik topoloji ve kaynak yönetimi, fırsatçı spektrum algılaması gibi daha karmaşık görevler gerçekleştirmektedir. Bu hiyerarşik mimaride kaynak bakımından zengin sualtı elemanları bilgilerin geçici olarak saklanması veya sıkıştırılması, ağ trafik yükünün yönetimi, eşgüdümlü kaynak yönetiminden sorumlu olarak diğer düşük enerjili ağ elemanlarının enerjilerini ve kaynaklarını etkili kullanmalarına yardımcı olmaktadır. Öngörülen bu hiyerarşik mimaride, işlem gücü ve hafıza bakımından daha üstün ağ elemanlarının kaynaklarını etkin bir şekilde kullanabilmek ve diğer basit elemanların değerli kaynaklarını uzun süre koruyabilmek için gruplama esasına (cluster-based) dayalı çok atlamalı ağ yönlendirme ve dağıtılmış ağ yönetim teknikleri kullanılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Sualtı dünyası petrol, doğalgaz ve değerli mineraller gibi doğal kaynaklar bakımından oldukça zengin olmasına rağmen insanoğlu tarafından henüz tam olarak keşfedilememiştir. Bu nedenle son yıllarda, bilimsel, ticari, askeri ve çevresel uygulamalarda kullanılmak üzere kablosuz sualtı algılayıcı ağlarının geliştirilmesi ve gerçekleştirilmesi konusunda endüstride ve akademide yoğun bir ilgi olmuştur (Akyildiz vd., 2005). Denizbilim veri toplanması, çevresel kirliliğin gözlemlenmesi, felaket yönetimi, güvenli gemi seyri, çoklu ortam taktik izleme sualtı algılayıcı ağlarının uygulama alanlarından bazılarıdır (Ahn vd., 2011; Akyildiz vd., 2005; Domingo, 2008; Heidemann vd., 2006; Preisig, 2007; Radosevic vd., 2011; Singh vd., 2007). Öte yandan, sualtındaki enerji kaynaklarının keşfi amacıyla sualtı algılayıcı

ağlarının kullanımı dünyadaki enerji kaynaklarının kıtlığı yakın bir gelecekte daha belirgin hale geldiğinde kritik bir öneme sahip olacaktır. Sualtı algılayıcı ağlarının en temel özelliği uygulamaya bağlı olarak gözlenmek istenen alana dağıtılan çok sayıda ve çok işlevli kablosuz sualtı algılayıcılarının cevreden aldıkları bilgiyi kısa mesafeli ve çoklu atlamalı (multihop) yöntemlerle alıcıya (sink) ileterek ortak bir uygulama hedefine yönelik olarak birlikte çalışmasıdır (Akyildiz vd., 2005). Bu özelliği ile kablosuz sualtı algılayıcı ağlar, mevcut sualtı algılama yöntemlerinin çok ötesinde bir algılama ve gözleme yeteneği sağlamaktadır. Bu nedenle, günümüzde sualtı algılayıcı ağlarının farklı amaçlara yönelik olarak çeşitli uygulamaları bulunmaktadır (Erol-Kantarci vd., 2011). Bununla birlikte, sualtı algılayıcı ağlarının pratik uygulamalarını gerçekleştirebilmek ve bunların potansiyel avantajlarından en yüksek seviyede yararlanabilmek için sualtı algılayıcı ağları için kablosuz sualtı iletişimindeki sorunların çözülmesi büyük önem taşımaktadır.

Gerek uzun iletişim mesafesi sağlanması gerekse diğer avantajları nedeniyle akustik iletişim sualtı ağlarında temel fiziksel katman teknolojisidir (Ayaz vd., 2011). Son yıllarda, literatürde sualtı akustik algılayıcı ağlar üzerine yapılan deneysel araştırmalar sualtı ağlarında bant genişliğinin çok sınırlı olduğunu (çoğu uygulamada 100 Khz' den daha az), yüksek hata oranları olduğunu (Bit Hata Oranı (BER) = 10^{-2} - 10^{-5}), karasal kablosuz iletişime göre çok değişken ve yüksek yayılım gecikmesi olduğunu (1500 m/s) ve kanal kapasitesinin yere, zamana ve frekansa bağlı olarak değiştiğini göstermektedir (Berkhovskikh vd., 1982; Pompili vd., 2009; Stojanovic, 2006; Urick, 1983; Vasilescu vd., 2005). Özellikle, sualtı kanalındaki yatay kanalların kapasitesi ve durumu dikey kanallara göre daha hızlı değişmektedir (Akyildiz vd., 2005; Berkhovskikh vd., 1982; Urick, 1983). Dolayısıyla, sualtı iletişimindeki sorunları verimli bir şekilde çözebilmek için geliştirilen algoritmaların ve protokollerin sualtı akustik ortamına özgü karakteristikleri ortaya koyan ve gerçek sualtı modemlerin özelliklerini dikkate alan modeller üzerine tasarlanmış olmaları zorunludur (Azad vd., 2011; Qarabaqi vd., 2011; Syed vd., 2008; Zorzi, vd., 2008).

Literatürdeki sualtı algılayıcı ağlarında veri aktarımı gerçekleştirebilmek için değişik ağ katmanları tasarlanmış ve bu yönde olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Casari vd., 2007; Coates, 1989; Freitag vd., 2002; Harris vd., 2007; Stojanovic vd., 2006). Ancak, gerçekleştirilen bu çalışmaların en temel eksikliği geleneksel ağ yapılanması ve katmanlı iletişim protokolü geliştirilmesi esasına bağlı kalınarak, uygulama, taşıma, ağ, veri bağı ve fiziksel katmanların her biri için ayrı ayrı protokollerin tasarlanmış olmasıdır. Ancak kullanılabilir enerjinin kısıtlılığı yanında sınırlı bant genişliği, yüksek ve değişken yayılım gecikmesi, değişken kanal kapasitesi vb. sualtı kanalındaki ciddi problemler nedeniyle, bu yaklaşımlar sualtı algılayıcı ağlarda özellikle çoklu ortam aktarımı için en uygun çözümler olmaktan uzaktırlar. Öte yandan, her bir katman için ayrı ayrı protokol tasarımı yerine

katmanlar arası ortak tasarım, katmanların birbirleriyle ilişkilerini ortaya koyarak en uygun çözümler ortaya sunulabilir. Bu nedenle, özellikle fiziksel ortamın çok uygunsuz olduğu sualtı algılayıcı ağlarda uzun yaşam süreli ve yüksek servis kalitesinde çoklu ortam aktarımı sağlanabilmesi ve dolayısıyla uygulama hedefine ulaşılabilmesi açısından konum farkında katmanlar arası ortak tasarım giderek daha çok önem kazanmaktadır.

Genel olarak, katmanlar arası protokol tasarımları, iletişim kaynaklarının verimli kullanılabilmesi için birbirine komşu olmayan katmanlar arasında bilgilerin paylaşımını ve işbirliğini içermektedir (Akyildiz vd., 2005). Bu bağlamda, fiziksel katmanın bazı parametrelerinin üst katmanların ulaşabileceği şekilde tasarlanması gerekir. Bir başka alternatif ise, bazı ağ katmanlarının bir tek modül olarak tasarlanmasıdır. İlk yaklaşımda, protokol katmanları arasında şeffaflık korunmaktadır. İkinci yaklaşımda ise, katmanlar arası etkin bilgi alışverişi nedeniyle çok daha yüksek bir sistem performansı elde edilebilir (Akyildiz vd., 2005; Sarisaray vd., 2011). Bu bağlamda, kablosuz sualtı algılayıcı ağlar üzerinde yapılan çalışmalar, kısmi olarak katmanlar arası iletişim yaklaşımını izlemeye çalışmış ve çeşitli buluşsal (heuristic) çözümler üretilmiştir (Li vd., 2008; Pompili vd., 2010; Proakis vd., 2003; Rodoplu vd., 2005). Öte yandan, bu çözümler daha çok sualtı algılayıcı ağlarında etkin enerji kullanımına odaklanmış olup servis kalitesi detayları ile ilgili iletişim problemleri tam olarak çözülememiştir. Ayrıca, mevcut protokollerin çoğunun gerçekçi olmayan kanal ve enerji kullanım modellerine ve basitleştirilmiş trafik türlerine dayandığı görülmüştür (Akyildiz vd., 2005).

Konulandırma sualtı kablosuz algılayıcı ağlarında, özellikle gezgin düğümler içermeleri durumunda kritik öneme sahiptir. Toplanan veriler konum bilgisi ile ilişkilendirilmezse, mekânsal olarak yeniden değerlendirilemez. Toplanan veriler, yalnızca düğümün bulunduğu yere referans verildiğinde anlamlı bir şekilde yorumlanabileceğinden, konumlandırma sualtı akustik ağlarına dayanan uygulamalarının başarısı için oldukça önemlidir. Hedef belirleme, düğüm izleme, yönlendirme protokolleri ve veri etiketleme dâhil olmak üzere çeşitli amaçlar için konumlandırma gereklidir (Tan vd., 2011; Hand vd., 2012). Ne yazık ki sualtı iletişimi, değişken ve uzun yayılım gecikmeleri ve çok yönlü girişim gibi sualtı kanallarının sert koşulları, Doppler distorsiyonu ve çok yüksek zayıflama gibi sualtı akustik ortamının olumsuz etkileri ile ciddi şekilde sınırlandırılmıştır (Domingo, 2009). Bu özellikler, yüksek doğruluk, hızlı yakınsama, geniş kapsama, düşük iletişim maliyetleri ve iyi ölçeklenebilirlik gibi istenen özellikleri yerine getiren verimli ve güvenilir konumlandırma tekniklerinin tasarlanması konusunda zorluklar doğurmaktadır.

Literatürde birçok sualtı konumlandırma algoritması mevcuttur. Ağ topolojisi, sinyal yayılımı modelleri, cihaz yetenekleri ve konumlandırma doğruluğu gibi pek çok faktörün hesaba katılması, gürültü, yayılma kayıpları, sinyal zayıflaması, konumlandırmada yardımcı

olan, konumu bilinen düğümlerinin sayısı gibi birçok faktöre bağlıdır. Konumu bilinen düğümleri kullanan konumlandırma algoritmaları, iki ana kategoriye ayrılabilir: mesafeden bağımsız algoritmalar ve mesafe tabanlı algoritmalar. Öte yandan, işlem türüne bağlı olarak, konumlandırma algoritmaları dağıtılmış ve merkezi konumlandırma algoritmaları olarak gruplandırılabilir. Dağıtılmış konumlandırma algoritmaları, sualtı kablosuz algılayıcı ağları uygulamalarının çoğu tarafından çevrimiçi sualtı izleme sistemleri için uygun olduğundan tercih edilir. Yine de, sualtı algılayıcı düğümlerinde işlem yapılmasını gerektirirler (Erol-Kantarci, Mouftah ve Oktug, 2010). Dağıtılmış ve merkezleştirilmiş konumlandırma algoritmaları, öngörü tabanlı ve kestirim tabanlı algoritmalar olarak iki kategoriye ayrılabilir. Öngörü tabanlı konumlandırma algoritmaları genellikle gezgin sualtı kablosuz algılayıcı ağlarında kullanılır ve bunların doğruluğu kullanılan düğüm hareketlilik modeline bağlıdır. Genellikle, tüm konumlandırma algoritmalarının performansı, dört ana faktöre, yani iletişim menziline, ilk referansa, başlangıç referans düğümünün konumuna ve düğüm sayısı sayısına bağlıdır.

Konumlandırma teknikleri sualtı kablosuz algılayıcı ağlarında önemli bir rol oynamasına rağmen büyük yayılma gecikmeleri, sesin değişken hızı ve bant genişliği kısıtlamaları konumlandırma teknikleri için bir dizi benzersiz zorluk ortaya çıkarmaktadır. Sualtı kablosuz algılayıcı ağlarında kullanılan konumlandırma yaklaşımlarının çoğu referans düğüm kullanımını zorunlu kılmaktadır (Erol-Kantarci, Mouftah ve Oktug, 2010; Tan vd., 2011). Diğer bir zorluk, sualtı algılayıcı düğümleri, sualtı akımları, rüzgârlar ve deniz taşıtlarının faaliyetleri gibi kontrol edilemeyen nedenlerden dolayı kaçınılmaz olarak sürüklenir. Referans düğümleri olarak işlev gören yüzey şamandıralarının konumları, GPS güncellemeleri ile tam olarak konumlandırılabilirdiği halde, su altındaki su altı düğümlerinin yerleri kesin olarak belirlenemez (Erol-Kantarci, Mouftah ve Oktug, 2010; Tan vd., 2011) ve bu da konumlandırma doğruluğunu etkiler. Öte yandan, özellikle liman veya denize yakın sualtı ortamlarında bazı yansımalar olabilir. Bunlar, uzaklık ölçümlerinin doğruluğunu etkileyebilir, çünkü bunlardan yansıyan sinyaller, açık görüş hattı sinyalleri ile karıştırılabilir. Son olarak, GPS'in sualtı düğümlerin zamanlarını senkronize etmek için kullanılamamasından kaynaklanan düğümler arası senkronizasyonun zorluğu konumlandırma algoritmalarının başarımını etkilemektedir. Yukarıda belirtilen zorluklar göz önüne alındığında konumlandırma algoritmalarının performanslarının göreceli olarak değerlendirilmesi hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için uygulama gereksinimlerine bağlı olarak bir yol gösterici olma niteliği taşımaktadır. Konumlandırma algoritmalarının verimliliğini ve performansını değerlendirmek için genellikle iletişim maliyeti, kapsam, zaman ve doğruluk gibi yaygın kullanılan performans metrikleri tercih edilmektedir. İletişim maliyeti konumlandırma algoritmalarının enerji verimliliğini ölçmek için kullanılır ve konumlandırma

tahminini gerçekleştirmek için düğüm başına iletilen ortalama mesaj sayısı cinsinden tanımlanmaktadır (Tan vd., 2011). Kapsam ise başarılı bir şekilde konumlandırılmış olan algılayıcı düğümlerin oranının bir ölçüsüyken, zaman ise istenen kapsama ulaşmak için kullanılan süreyi nicelleştirir. Öte yandan, bu metrikler arasında en önemlilerden birisi de normal bir düğümün tahmini ve gerçek konumları arasındaki hatanın bir ölçüsü olan doğruluktur.

Sualtı kablosuz algılayıcı ağlarında uygulamalarının yapısına ve ağ mimarisine bağlı olarak farklılık gösterdiğinden, protokollerin yönlendirilmesi uygulama başarımı açısından önem taşımaktadır. (Yan, Shi ve Cui, 2008) 'de sualtı kablosuz algılayıcı ağlarında sorunsuz veri teslimi sağlamak için DBR (Depth-Based Routing) olarak adlandırılan derinlik tabanlı bir yönlendirme protokolü önerilmiştir. DBR'de, gözlenen bilgiler düğümlerin yerel derinlik bilgilerine göre yönlendirilir. DBR, yönlendirme sırasında düğümler arasında uygun bağlantı kalitesini dikkate alan bir mekanizmaya sahip olmadığı için, her atlamada bilgi tutma süresi ve yüksek enerji tüketimi nedeniyle ağ gecikmesine ek olarak aşırı yeniden yönlendirmeye bağlı olarak kontrol mesajı ek yükü yaratmaktadır. Bu nedenle küçük boyutlu ağlar için daha uygundur. (Wahid ve Kim, 2012)'de sualtı kablosuz algılayıcı ağları için EEDBR (Energy-Efficient Depth Based Routing) olarak adlandırılan enerji verimli derinlik tabanlı bir yönlendirme protokolü önerilmektedir. EEDBR'nin bilgi edinme aşamasında, her bir algılayıcı düğümü, kalan enerjisini ve derinliğini komşularıyla paylaşır. Veri iletme aşamasında, her gönderici, veri paketlerine komşu düğümlerinin bir listesini içerir. Yönlendirme seti olarak adlandırılan komşu düğümlerin kümesi, toplayıcı düğüme doğru bilgi taşımak için komşu düğümlerin derinliğine göre seçilir. EEDBR, veri teslimi ve enerji tüketimi açısından iyi performans gösterir ve algılayıcı düğümlerin konumlandırılmasını gerektirmez. Bununla birlikte, veri paketlerini aldıktan sonra, yönlendirme düğümleri paketleri belirli bir süre boyunca tutar ve bu da ağdaki gecikmeyi artırır. (Domingo, 2009)'da, su altı ortamları için zaman-kritik olmayan, uzun süreli izleme uygulamaları için dağıtılmış bir yönlendirme protokolü önerilmiştir. Önerilen yönlendirme protokolü, gereksiz bilgileri ortadan kaldırmak için bir veri toplama tekniğini kullanır, yönlendirme mesaj değişimlerini proaktif olarak azaltır ve taşmayı önler. Ağ verimini önemli ölçüde artırırken ve ağ yükünü azaltarak çok yüksek bir paket dağıtım oranı (PDR) sağlar. Bununla birlikte, yoğun dağıtımlarda, veri trafiği yükünü eşit olarak dağıtamaz ve bellek taşması sorunlarını gideremez. (Huang vd., 2011)'de yeni bir kırpma mekanizması kullanılarak yönlendirme işlemlerinin enerji tüketiminin en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Önerilen kırpma mekanizması, iletilen veri paketlerinin ek yayılmasını önleyerek PDR'yi önemli ölçüde artırır. Bununla birlikte, ağda çok sayıda yedekli veri paketinin iletilmesi nedeniyle önemli miktarda enerji tüketir. Ayrıca, algılayıcı düğümleri arasında son derece güvenilir bağlantıların korunması başarısız olur ve dolayısıyla ağda aşırı

yeniden yönlendirme yaşanır. (Zhou vd., 2011)'de, sualtı uygulamaları için en az ağ gecikmesi sağlayabilmek için bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşım, veri iletim sağlamlığını bir kaynak düğümden toplayıcı düğüme doğru geliştirmek için çok yollu yönlendirmeye dayanır. Ancak, bu çok yollu yönlendirme alt katmanlarda, ağda düğüm arabellek taşması sorununa yol açan gereksiz veri paketlerini artırır. Ayrıca, sualtı akustik algılayıcı ağlarında dinamik ayarlama gücü mekanizmasının dikkate alınmaması nedeniyle boşluklarda ve gölge bölgelerinde yeni veri yollarından yararlanamamaktadır. Çok yollu başka bir enerji verimli yönlendirme yaklaşımı ise (Xu, Li ve Min, 2012)'da önerilmiştir. Yaklaşım, yeniden iletim denemelerini ortadan kaldırmak ve güvenilirlik seviyesini artırmak için çok yollu iletişimlerini etkin bir şekilde uyarlar. İletim maliyetini azaltmak için, istenen paket hata oranını garanti eden çok sayıda yol sayısına karar vermek için toplam paket hata oranını hesaplar. Bununla birlikte, önerilen yaklaşım, yüksek bellek taşması problemine neden olabilmektedir. Ayrıca, dinamik veri trafiği yük dağılımı göz önüne alınmadığı için, çapraz katmanlardaki düğümler hızla enerjisini tüketmektedir. Böylece, büyük miktarlarda veri paketleri boşluklardan dolayı kaybolabilmektedir.

Yönlendirme tablosu karmaşıklığı, düğüm hataları ve yönlendirme ek yüklerini ele alan katman tabanlı dağıtımlı yönlendirme protokolü (Ayaz vd., 2012)'de önerilmiştir. Önerilen protokol, sualtı kablosuz algılayıcı ağlarında veri paketlerini taşımak için temas başına yönlendirme fikrini kullanmaktadır ve hem yoğun hem de seyrek dağıtımlarda PDR'yi önemli ölçüde artırmaktadır. Ancak, özellikle büyük boyutlu ağlarda, her yeni aşamada yeni bir düğüme katılma sırasında ve bir kaynak düğümün diğer düğümlerden yanıt alamadığı bir durumda, kayda değer bir süre beklemek zorundadır. Bu nedenle, ağ gecikmesi, kaynak düğümden ağdaki hedefe doğru doğrusal olarak artar. (Zhang, Li ve Chen, 2013)'de sualtı akustik algılayıcı ağları için bir bağlantı-durum tabanlı adaptif geribildirim yönlendirme protokolü önerilmiştir. Önerilen protokol, sualtı algılayıcı düğümlerinin üç boyutlu yönünü ve veri iletim yollarını etkili bir şekilde almak için ışın genişliğinin etkisini dikkate almaktadır. Sualtı algılayıcı düğümlerinin güç tüketimini azaltabilir ve sık sık yönlendirme tablosu güncellemelerinden kaynaklanan enerji tüketimini önler. Bununla birlikte, kullanılan senkronizasyon yöntemi nedeniyle kontrol ve veri paketi çarpışmaları yaşanabilir. (Wahid, Lee ve Kim, 2014)'de sualtı akustik algılayıcı ağları için R-ERP2R olarak adlandırılan güvenilir ve enerji verimli bir yönlendirme protokolü önerilmiştir. Önerilen protokol, algılayıcı düğümleri arasındaki enerji tüketimini dengelemek amacıyla bir yönlendirme ölçütü olarak mesafeyi kullanmaktadır. Ayrıca, gerekli güvenilirliği sağlamak için bağlantı kalitesini yönlendirme düğümlerine yönlendirir ve ağ ömrünü uzatmak için yönlendirme düğümlerinin kalan enerjisini hesaba katar. Bununla birlikte, başarıyı düşebilir ve seyrek ağ dağıtımlarında, bağlantı düğümlerinin bağlantı kalitesinin ve artık enerjisinin doğru bir şekilde ölçülmesini

sağlayamaz. (Ali, Jung ve Faye, 2014)'te, algılayıcı düğümlerin hareketlerini, uçtan uca gecikmeyi ve enerji tüketimini ele almak için katman katman tabanlı açılı tabanlı bir yönlendirme protokolü önerilmektedir. Bu amaç için, herhangi bir açık konum bilgisi veya yapılandırma kullanılmadan, her düğüm, veri paketlerini toplayıcı düğüme doğru yönlendirmek için veri akışını hesaplayabilir. Taşkın tabanlı bir tekniğe dayanmakla birlikte, zorlu sualtı ortamlarından ağır güvenilirliğini arttırmasına rağmen, tüm ağ üzerinden gereksiz veri akışını önlemek için uygun açıları hesaplayamaz. Böylece, asgari enerji tüketiminin etkinliğini düşürür. (Javaid vd., 2015)'de gecikmeye duyarlı bir yönlendirme yaklaşımı önermektedir. Önerilen yaklaşım, iletim kayıplarını ve alınan sinyalin hızını hesaplamak için en uygun ağırlık fonksiyonu kullanmaktadır. Düşük derinlikli bölgelerde verimli veri iletim performansı ve minimum rölatif iletimler sağlar ve toplam ağ girişinde küçük bir azalma ile uçtan uca gecikmeyi azaltır. Bununla birlikte, enerji yükünü ağda eşit olarak dağıtmamaktadır. (Yang, Ssu ve Yang, 2015)'de, sualtı kablosuz algılayıcı ağları için enerji verimli bir gecikme-farkında yönlendirme protokolü önerilmektedir. Önerilen protokol, uzak bant genişliği ilişkisine dayanmakta ve kesintili bağlantı sorunlarını etkili bir şekilde ele almaktadır. Uyarlanabilir enerji verimli bir yönlendirme düğümü seçim mekanizmasını içerir ve çarpışma oranlarını azaltır. Bununla birlikte, kanal müdahalesine ilişkin sorunları arttırmaktadır. Ayrıca, ağ yüksek oranda veri fazlalığıyla karşılaşabilmektedir. (Yu, Yao ve Liu, 2015)'de uyarlamalı atlamalı vektör tabanlı bir yönlendirme protokolü önerilmiştir. Önerilen protokolda, bir iletim işlemi sırasında, sanal veri iletim hattının yarıçapı, veri paketlerinin iletim aralığını kısıtlamak için sıçrama değiştirilir. Ayrıca, enerji verimliliği için, iletim gücü ayarlanabilir. Önerilen protokol mevcut düğümden hedef düğüme olan mesafeye göre yönlendirme düğümlerini seçer. Bu nedenle, uçtan uca gecikmeleri etkili bir şekilde azaltır. Son olarak, seyrek bölgelerde bile iletim güvenilirliğini garanti eder ve yoğun bölgelerde çift paketleri azaltır. (Jiang vd., 2016)'da önerilen coğrafi yönlendirme ve uzamsal bölümlenmeye dayalı yaklaşımlarda, tüm sualtı ağı ilk önce küçük küp alanlarına bölünmüştür. Daha sonra, veri paketleri bir küp alanındaki bir sonraki atlama düğümleri olarak en uygun algılayıcı düğümlerini seçerek küp boşluk birimi olarak gönderilir. Öte yandan, daha uzun yollar ve daha büyük gecikme pahasına önerilen teklifler daha fazla güzergâh kullanarak daha az enerji harcayabilmektedir. (Tariq vd., 2016)'de, sualtı kablosuz algılayıcı ağları için basınç sensörü tabanlı güvenilir yönlendirme protokolü önerilmiştir. Önerilen protokol, veri iletimi için tek bir güvenilir düğümü seçmek için derinlik mesafesi ve artık enerji seviyesi ile birlikte bağlantı kalitesi tahmincisinin sağladığı bir dizi metriktan faydalanır. Bununla birlikte, her bir algılayıcı düğümü etkili bir sonraki sıçrama noktasını bulmak için önemli bir süre boyunca bilgi tutar, böylece minimum gecikmenin etkinliğini azaltır. Ayrıca, önerilen protokol ağdaki veri paketlerini iletirken girişim sorunlarını dikkate almamaktadır. (Coutinho vd.,

2016)'da veri paketlerini yönlendirmek için coğrafi ve fırsatçı bir yönlendirme protokolü önerilmiştir. Boş bölgelerin üstesinden gelmek için, boşluk düğümlerini yeni derinliklere taşıyan derinlik ayarına dayalı topoloji kontrol yaklaşımı sunmaktadır. Önerilen yönlendirme protokolü, hem seyrek hem de yoğun ağ dağıtımlarında ağ performansını önemli ölçüde artırır. Bununla birlikte, boşluk bölgelerinde güzergâh bulmak için önemli miktarda enerji ve her sıçramada bekleme süresi tüketir. (Goyal, Dave ve Verma, 2016)'da sualtı kablosuz algılayıcı ağlarında veri toplanması için iç ve kümeler arası iletişim mimarisi önerilmiştir. Önerilen mimari, kümeleme noktalarını etkin bir şekilde seçmek ve küme boyutunu tahmin etmek için bulanık yaklaşım kullanır. Bu yaklaşımı kullanan ağ, ağ ömrünü uzatmak için algılayıcı düğümleri ve kümeler arasında enerji verimli veri iletimi sağlayabilmektedir. Önerilen mimari, enerji tüketimi, uçtan uca paket gecikme ve PDR açısından iyi bir performans gösterse de, yoğun bir şekilde dağıtılmış senaryoda uygulandığında uygun küme boyutu, yük dengeleme ve veri yedeklemesi gibi temel sorunları ele alamamaktadır.

Bu projede, şu anda mevcut ya da tasarlanmakta olan kablosuz sualtı algılayıcı ağ uygulamalarının verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi ve sualtı iletişim problemlerinin etkili bir şekilde çözülmesi için katmanlar arası ve fırsatçı spektrum erişim esasına dayanan iletişim platformu geliştirilmiştir. Geliştirilen bu platform, kablosuz sualtı algılayıcı ağlarındaki ciddi anlamda kullanılabilir enerjinin kısıtlılığı ve sualtı kanalındaki problemleri dikkate alarak her bir katman için ayrı ayrı protokol tasarımı yerine konum farkında katmanlar arası ortak tasarım ve katmanların birbirleriyle ilişkilerini ortaya koyan eniyileştirme yöntemi sunmaktadır. Ayrıca, bu platform, konum farkında fırsatçı spektrum erişim tekniklerini kullanarak sualtında yere, zamana ve frekansa bağlı iletişim kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmayı hedeflemiştir.

Bu literatür özetinin sonucu olarak, sualtı algılayıcı ağlarında çeşitli servis kalitesi kriterlerini karşılayan ve mümkün olduğunca düşük enerji harcayarak ağına yaşam süresini uzatan konum farkında katmanlar arası sualtı algılayıcı ağ protokollerinin geliştirilmesi gereği açıkça görülmektedir. Ayrıca, sualtı algılayıcı ağlarındaki yere, zamana ve frekansa bağlı olarak değişen spektrumunu en etkin ve verimli bir şekilde kullanabilmek için konum farkında fırsatçı spektrum erişim algoritmalarına ihtiyaç vardır. Sonuç olarak, bu projede sualtı akustik algılayıcı ağları için geliştirilen özgün katmanlar arası ve fırsatçı spektrum erişim esasına dayanan iletişim platformu sualtı algılayıcı ağların pratik uygulamalarında iletişim sorunlarını çözmeye yönelik yeni yöntemler içermekte ve geliştirilen iletişim protokolleri ve performans gösterimleri bu alandaki ilk çözümler arasında yer almaktadır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Literatür taraması ve sualtı akustik kanal modeline göre yapılan analizler sualtında etkili ve güvenilir iletişimin önündeki en temel problemlerin sualtı ağlarında bant genişliğinin

sınırlı olması, yüksek hata oranları, yüksek ve değişken yayılım gecikmesi, kanal kapasitesinin yere, zamana frekansa ve suyun kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre ciddi değişiklikler göstermesi ve sualtı kanalındaki yatay kanalların kapasitesi ve durumunun dikey kanallara göre daha hızlı değişmesi olduğunu göstermiştir. Sualtı akustik kanalının fiziksel karakteristiği ile ilgili yol kaybı, sinyal-gürültü oranı (SNR) gibi temel parametreler Urick ve Thorp akustik kanal modellerine göre modellenmiştir (Akyildiz vd., 2005; Coates, 1989; Urick, 1983). Bu modellere göre, sualtı akustik kanallarında yol kaybı (path loss) sinyalin frekansına ve iletişim mesafesine bağlıdır. Sualtı algılayıcı ağlarında yol kaybı yanında gönderilen iletişim sinyali dağılım kaybına (spreading loss) maruz kalmaktadır. Bu bağlamda, belli bir frekansa (f) ve uzaklığa (d) bağlı toplam yol kaybı (1) ile ifade edilebilir.

$$10 \log A(d, f) = k \cdot 10 \log (d) + d \cdot 10 \log \alpha(f) \quad (1)$$

(1) numaralı eşitlikteki ilk terim geometrik yayılımı ikinci terim ise soğurum kaybını (absorption loss) temsil etmektedir. Soğurum katsayısı ($\alpha(f)$) Thorp modeli kullanılarak frekansa bağlı bir matematiksel fonksiyon olarak ifade edilebilir. Ayrıca, girdap, rüzgâr, termal gürültü, dalga hareketi gibi çeşitli çevresel nedenlerin etkisi ile sualtı ortamında gürültü frekansa bağlı güç spektrum yoğunluğuna sahiptir. Bu gibi nedenlerle, sualtı akustik kanallarında uzaklık arttıkça iletişim için mevcut bant genişliğinin giderek azaldığı görülür. Urick ve Thorp modellerine göre, belirli bir f frekansına ve d uzaklığına bağlı sinyal-gürültü oranı (2) ile ifade edilebilir (Coates, 1989; Urick, 1983).

$$\text{SNR}(d, f) = P_T / [A(d, f) \cdot N(f) \cdot \Delta f] \quad (2)$$

(2) numaralı eşitlikte P_T gönderici gücü (transmitted power), $A(d, f)$ toplam yol kaybını (path loss), $N(f)$ gürültü güç spektrum yoğunluğunu, Δf ise alıcıdaki gürültü bant genişliğini ifade etmektedir. Bu eşitlikte $A(d, f) \cdot N(f)$ çarpımı sinyal-gürültü oranının frekansa bağlı kısmını ifade etmektedir.

Detaylı literatür taraması sonucunda; sualtında etkili ve güvenilir iletişimin önünde duran ve sualtı algılayıcı ağlara özgü en temel sorunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Sualtı ağlarında bant genişliği çok sınırlı olup, çoğu uygulamada 100 Khz' den daha azdır.
- Yüksek hata oranları ($\text{BER} = 10^{-2}$ - 10^{-5}) elde edilmektedir.
- Değişken ve yüksek yayılım gecikmesi (1500 m/s) bulunmaktadır.
- Kanal kapasitesi yere, zamana frekansa ve suyun kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre ciddi değişiklikler göstermektedir.
- Sualtı kanalındaki yatay kanalların kapasitesi ve durumu dikey kanallara göre daha hızlı değişmektedir.

- Sualtı düğümlerinin biten bataryalarını değiştirebilmek veya yeniden doldurmak yüksek maliyet gerektirdiğinden iletişim protokollerin enerji etkinliğinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Bu proje, sualtı algılayıcı ağlara özgü iletişim problemlerini çözebilmek için; kablosuz sualtı algılayıcı ağlarındaki ciddi anlamda kullanılabilir enerjinin kısıtlılığı ve sualtı kanalındaki problemleri dikkate alarak katmanlar arası ortak tasarım ve katmanların birbirleriyle ilişkilerini ortaya koyan eniyileştirme yöntemi sunmaktadır. Ayrıca, bu platform, fırsatçı spektrum erişim tekniklerini kullanarak sualtında yere, zamana ve frekansa bağlı iletişim kaynaklarının etkin bir şekilde kullanımını hedeflemiştir. Bu genel amaç ve hedefler dikkate alınarak geliştirilmiş olan tüm yöntemler takip eden alt bölümlerde ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

3.1 Hiyerarşik Ağ Mimarileri ve Eşgüdümlü Kaynak Yönetimi Tasarımı

Bu aşama kapsamında, sualtı algılayıcı ağ teknolojilerinin birçok farklı uygulama alanı olduğu ve uygulamaların çoğunda çok işlevli algılayıcıların büyük bir alana yayılmış olmaları göz önüne alınarak hiyerarşik bir şekilde düzenlenmiş sualtı ağ mimarileri tasarlanmaya başlanmıştır. Önerilen bu yaklaşımda, kaynak kısıtlı, düşük enerjili ağ elemanları basit görevler yaparken (örneğin farklı fiziksel ölçümlerin sualtı ortamında gözlemlenmesi gibi), işlem gücü ve hafıza bakımından daha üstün ve daha fazla enerjili olan ağ elemanları daha karmaşık görevlerden (dinamik topoloji ve kaynak yönetimi, fırsatçı spektrum algılaması, vb.) sorumludur. Hiyerarşik mimarinin kaynak bakımından zengin ağ elemanlarının kaynaklarının daha etkin kullanımını sağladığı ve bu yaklaşımın kısıtlı kaynaklara sahip elemanların ömrünü uzattığı ispatlanmıştır (Casari vd., 2007). Bu yaklaşım dolaylı olarak ağ ömrünün uzatılmasını da sağlamaktadır. Literatürde bu yaklaşımı hayata geçirmek için gruplama esasına (cluster-based) ve konum bilgisine dayalı çok atlamalı ağ yönlendirme ve dağıtılmış ağ yönetim teknikleri kullanılmaktadır. Bu doğrultuda bu iş paketi kapsamında, kablosuz sualtı algılayıcı ağlarında enerji etkin güvenilir bir iletişim platformu sağlayabilmek için gruplama esasına dayalı enerji kullanımı yönünden etkin bir hibrit yönlendirme protokolü geliştirilmiştir.

Önerilen yaklaşımda algılayıcı düğümlerinin, birden fazla veri toplayıcının rastgele olarak yerleştirildiği ve bütün düğümlerin iletişim mesafesi ve enerji bakımından benzer yeteneklere sahip olduğu, ancak veri toplayıcının düğümlere göre enerji ve iletişim mesafesi açısından üstün olduğu kabul edilmektedir. Son bir varsayım olarak düğümlerin bir konumlandırma yeteneğine de sahip olduğu varsayımı güdülmektedir.

Ana hedefleri ağ ömrünü uzatmak, paket teslim oranını yükseltmek, gecikmeyi azaltmak ve ilave kontrol mesajlarının önüne geçmek olan hibrit yönlendirme protokolü alt bileşenlerden oluşmaktadır. Bütün düğümlerin birbirine erişebildiği kablosuz olarak

erişebildiği varsayımı altında düğümler seti $G (U, E, R)$ olarak gösterilmektedir. U $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$ olarak gösterilen düğümler setini, E aynı dağıtım bölgesinde düğümler arasında muhtemel kenarları, R ise ilgili düğümün iletişim yarıçapını göstermektedir. δ_{th} mesafe eşik değeri olarak kabul edilirse k ve l düğümleri arası mesafe matematiksel olarak $k \in l$, $\delta(k, l) \leq \delta_{th}$ gösterilebilir.

Önerilen yaklaşımı meydana getiren bileşenlerden birincisi olan gruplandırma algoritmasında (ANCF) dağıtım sonrasında R_i bölgesindeki N_{K-S} düğümün düğüm id leri ve RE_i enerji değerleriyle birlikte hello_msg mesajları yayınlayarak birbirleriyle iletişimi başlattıkları kabul edilmektedir. Bölgedeki N_{K-P} düğümleri hello_msg mesajlarını aldıktan sonra (6) ve (7)'i göz önüne alarak aktif düğüm grup formasyon değerlerini hesaplamakta ve yönlendirme tablolarını güncellemektedirler. Belirli bir T_i zaman aralığı sonrasında R_i bölgesindeki N_{K-N} düğümün düğüm id leriyle birlikte declaration_msg mesajları yayınlar. En yüksek aktif düğüm formasyon değerine sahip olan düğüm grup başı (CH) olarak atanır. Bir CH atandığı zaman her bir üye düğüme haberleşme zamanı ayırımını gerçekleştirir.

$$ANCF_{(node)} = \frac{RE_i}{\left(\sum_{i=1}^n DN^{2/4} / D_{maxi} \right)^2 + \left(\rho - \left(\frac{DE_i}{100} \right) \right)^2}, \quad \forall_{ANCF: \theta_{i \rightarrow N_j}} (3)$$

(3) numaralı denklemde RE_i sürekli olarak çalışabilmesi için düğüm başının gereksinim duyduğu enerji, DE_i olay yerine olan mesafe, $DN^{2/4}$ komşulara olan mesafe, ρ bölgedeki düğüm yoğunluğu, $\theta_{i \rightarrow CH_i}$ açısı, R_{CH_i} adım sayısıdır. Önceki adımda $R_{i(previous)}$ grup başı olan düğümden kaçınmak için düğüm başı seçim olasılığı (4)'de belirtilmiştir.

$$R_{CH_i} = \begin{cases} \frac{K_{CH_i}}{N_{N_i} - K_{CH_i} * \left(r_i \text{ mode } \frac{N_{K_i}}{K_{CH_i}} \right)} \alpha_i(t) = 1 \\ 0 \alpha_i(t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

(4) numaralı denklemde N_{K_i} grup sayısını, N_{N_i} düğüm sayısını, α_i belirlenecek fonksiyonu, r_i şu anki adım sayısını, K_{CH_i} düğüm numarasını göstermektedir. Bir bitlik veri paketini belirli bir mesafede taşıyabilmek için harcanması gereken enerji (5), (6), (7) ile ifade edilmektedir.

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) (5)$$

$$E_{amp}(d) \begin{cases} l * E_{elec} + l * e_{fs} * d^2, d < d_0 \\ l * E_{elec} + l * e_{mp} * d^4 \wedge, d \geq d_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-elec}(l) = l * E_{elec} \quad (7)$$

Yukarıdaki denklemlerde E_{elec} , e_{fs} ve e_{mp} gönderme/alma parametreleri olup, e_{fs} ve e_{mp} açık alan ve çok yollu zayıflama modeli değerlerini göstermektedir. Tüm ağda düğüm başı atanacak düğümler aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.

$$ANCF_n = \sum_{i=1}^n ANCF_{i+m}^1 + ANCF_{i+m}^2 + ANCF_{i+m}^3 \dots \dots \dots + ANCF_{i+m}^n \quad (8)$$

$$ANCF_n = \sum_{i=1}^n ANCF_i^1 + ANCF_{i+1}^2 + ANCF_{i+2}^3 \dots \dots \dots + ANCF_{i+m}^n \quad (9)$$

$$ANCF_n = \sum_{i=1}^n ANCF_1^1 + ANCF_2^2 + ANCF_3^3 \dots \dots \dots + ANCF_{i+m}^n \quad (10)$$

$$ANCF_n = \sum_{i=1}^n ANCF_{i+m}^n \quad (11)$$

Önerilen yaklaşımda aktif düğüm seçim algoritması (ANSV) gerçekleşen olay ve gerçekleşen olaya yakın olan grup başının yakınında bulunan aktif düğümlerin atanmasından sorumludur. Bu atama görevi grup başı tarafından gerçekleştirilir.

ER_{i+1} olay bölgesindeki düğüm sayısı NC_{K-S} ile gösterilmektedir. ENC_{K-P} belirli bir T_i zamanındaki hello_msg mesajlarının ilintili olduğu düğümlerin sayısıdır. Bölgedeki ENC_{K-P} düğümleri hello_msg mesajlarını aldıktan sonra $ER E_i$ enerji değerini, EDE_i minimum iletim mesafesini hesaplar ve bu bilgiyi grup başlarına iletir. Belirli bir T_i zaman aralığında üye düğümlerden bütün mesajları aldıktan sonra her bir düğüm başı (12) ve (13)'ü kullanarak aktif düğüm seçim değerlerini hesaplar.

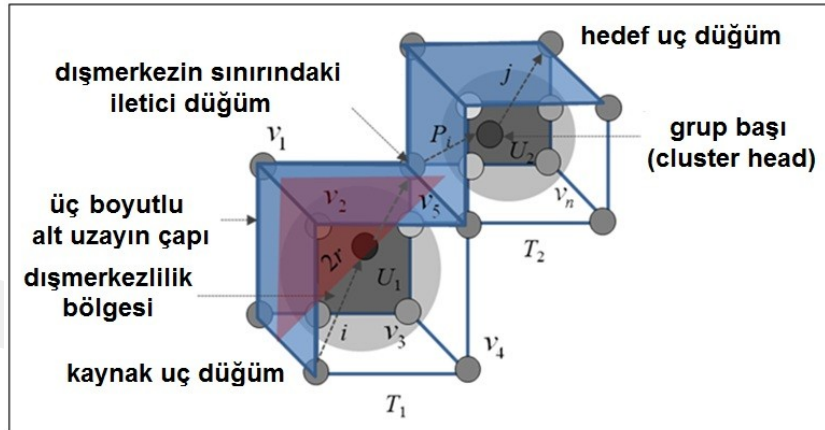
$$ANSV_{(node)} = ER \frac{E_i * \zeta}{\zeta \zeta \zeta} \zeta, \quad \forall_{ANSA: E\theta_{\zeta \rightarrow CHI} \vee \zeta N_j \rightarrow CHI}$$

(12) numaralı denklemde $ER E_i$ sürekli olarak çalışabilmesi için düğümün işlevlerini yerine getirebilmesi için gereksinim duyduğu enerji, EDE_i düğümün olay yerine olan mesafe, $EDCH^{2/4}$ düğümün grup başına olan olan minimum iletim mesafesi, ρ bölgedeki düğüm yoğunluğu, $E\theta_{\zeta \rightarrow CHI}$ açı, ER_{CH_i} adım sayısı ve ES_c ise bölgedeki belirli bir sayıda düğüm tarafından sağlanan kapsama alanıdır. Önceki adımda $R_{i(previous)}$ aktif olan düğümden kaçınmak için aktif düğüm seçimi olasılığı (13)'de belirtilmiştir.

$$R_{N_i} = \begin{cases} \frac{K_{N_i}}{N_{N_i} - K_{N_i} * \left(r_i \cdot \text{mode} \frac{N_{K_i}}{K_{N_i}} \right)} \alpha_i(t) = 1 \\ 0 \alpha_i(t) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Yukarıdaki denklemde N_{N_i} düğüm sayısını, α_i belirlenecek fonksiyonu, r_i şu anki adım sayısını, N_{K_i} düğümlerin sayısını, K_{N_i} aktif düğüm numarasını göstermektedir.

Şekil 1, önerilen gruplandırma yaklaşımına göre bir sualtı algılayıcı ağını meydana getiren 3 boyutlu alt uzaylar arası iletişim yaklaşımını göstermektedir. Her bir üç boyutlu uzayda grup başı düğümlerin verilerini iletecekleri düğüm olup ilgili bölge içinde tüm veri iletiminden sorumludur. Önerilen yaklaşımda düğümler ile grup başı arasındaki mesafenin yönlendirme maliyetine etkilerini incelendiğinde bu mesafenin kısa tutulması ilgili bölge içi yönlendirme maliyetini azalttığı gözlenmiştir.



Şekil 1. İki bölge arası veri iletimi.

Sistemin performansının ve verimliliğinin etkili derecede artırılması için sadece tek yöntem kullanılması yeterli olmamaktadır. Bundan dolayı sisteme hem enerji verimli bir yönlendirme algoritması hem de algılayıcı üzerinde enerji üretimi yöntemleri uygulayabilmek için araştırma gerçekleştirilmiştir. Öncelikle önerilen yönlendirme algoritması ile en kısa yol yönlendirme algoritması performans açısından karşılaştırılmış, daha sonra enerji üretim yöntemleriyle birlikte performanslarının nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Önerilen yönlendirme algoritmasının modellenmesinde algılayıcı ağı, $G(N,A)$ yönlendirilmiş ağ topolojisi olarak tanımlanmıştır. Kablosuz algılayıcı ağın ömrünü artırmak, algılayıcıların harcayacağı maksimum enerjiyi minimize etmek olarak ta düşünülebilir. Bu şekilde, en uygun yönlendirme

kararları verme problemi lineer programlama modeli olarak aşağıdaki şekilde formüle edilebilir:

Kümeler:

N : Düğüm (algılayıcı) kümesi

A : Kenar (bağlantı) kümesi

$\delta^{+i(j):j}$ düğümüne giren kenarların kümesi, yani, baş düğümü j olan kenarlar kümesidir.

$\delta^{-i(j):j}$ düğümünden çıkan kenarların kümesi, yani, kuyruk düğümü j olan kenarlar kümesidir.

İndisler:

i : A kümesindeki kenarları indisler, $i \in \{1, \dots, m\}$

j : N kümesindeki düğümleri indisler, $j \in \{0, 1, \dots, n\}$

k : gönderilen ya da alınan paketteki kaynak algılayıcıyı ifade eder, $k \in N \cup \{0\}$. Not: Toplayıcı merkez düğüm hiçbir pakette kaynak olamaz.

l : $\delta^{+i(j)}$ veya $\delta^{-i(j)}$ kümelerini indisler.

Parametreler:

t_i : i kenarı kullanılarak harcanan gönderim enerjisi. Yani, eğer $i=(u, v)$ ise t_i , u algılayıcısının v algılayıcısına paket göndermek için harcadığı enerjidir.

r_i : i kenarı kullanılarak harcanan alma enerjisi. Yani, eğer $i=(u, v)$ ise t_i , v algılayıcısının u algılayıcısından gelen paket almak için harcadığı enerjidir.

p_j : j algılayıcısı tarafından algılanacak olan olayın oluşmasınınbağıl olasılığıdır. Not:

Tüm olasılıkların toplamı 1 kabul edildi, $\sum_{j=1}^n p_j = 1$.

Karar Değişkenleri:

x_{ik} : Kaynağı k algılayıcısı olan ve i kenarı üzerinden gönderilecek olan paketlerin oranını belirtir. Not: $0 \leq x_{ik} \leq 1, \forall i, k$.

θ : Düğümlerin $(1, \dots, n)$ harcayacağı maksimum enerji değeri.

Formül:

Minimum değeri bul θ (14)

Aşağıdaki kısıtlara bağlı olarak:

$$\theta \geq \sum_{k=1}^n \zeta_k \quad \forall j \in N, \quad (15)$$

$$\sum_{l \in \delta^{+i(j)} x_{lk} = \sum_{l \in \delta^{-i(j)} x_{lk}} \zeta_l \quad \forall j \in N \setminus \{0\},$$

$$\forall k \in N \setminus \{0\}, \quad (16)$$

$$j \neq k,$$

$$\sum_{l \in \delta^{-i(k)} x_{lk} = 1 \zeta_l \quad \forall k \in N \setminus \{0\}, \quad (17)$$

$$\sum_{l \in \delta^{+i(0)} x_{lk} = 1 \zeta_l \quad \forall k \in N \setminus \{0\}, \quad (18)$$

$$0 \leq x_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in A, \quad (19)$$

$$\theta \geq 0 \quad \forall k \in N \setminus \{0\} \quad (20)$$

Amaç fonksiyonu (14), harcanan maksimum enerjinin minimum olduğu durumu bulmaktadır. (15) numaralı kısıt, her bir algılayıcının ayrı ayrı toplam enerji tüketiminden fazla olmasını sağlamaktadır. Böylece θ , maksimum enerji tüketimini belirtmektedir. (16)-(18) kısıtları, paket trafiğini dengelemektedir. (16) numaralı kısıt, ara düğümlerin aldıkları tüm paketleri göndermesi gerektiğini belirtmektedir. (17) numaralı kısıt herhangi bir düğümden çıkan trafiğin toplamının %100 olması gerektiğini belirtmektedir (alıcı hariç). (18) numaralı kısıt ise herhangi bir düğümden gelen ve alıcıya giren trafiğin toplamının %100 olması gerektiğini belirtmektedir. Giren ve çıkan trafik oranlarının toplamının %100 olması için, (19) numaralı kısıt bu oranların 0 ile 1 arasında olması gerektiğini belirtmektedir. Son olarak, (20) numaralı kısıt, karar değişkeni θ 'nın sıfırdan küçük olmaması gerektiğini belirtmektedir.

Bu algoritmada, bir düğüm aldığı paketlerin hepsini belirli tek bir düğüme iletmek yerine, trafiğin durumuna göre farklı düğümlere iletebilmektedir. Ayrıca bu formülde, kaynak düğümler birbirinden ayrılmaktadır. Diğer bir deyişle, farklı kaynak düğümlerden gelen paketler için farklı yönlendirme kararları kullanılabilir. Bu iki özellik hazırlanan algoritmanın esnek bir şekilde çalışabilmesini sağlamaktadır.

Geliştirilen algoritmanın performans karşılaştırması yapılabilmesi için ayrıca sualtı kanal koşullarını dikkate alan en kısa yol algoritması tasarlanmıştır. Bu en kısa yol algoritması ağdaki geçilen düğüm sayısını en düşük yapacak şekilde değil, düğümler arasındaki mesafe dikkate alınarak, kaynak düğümden alıcıya kadar en kısa mesafe bulunacak şekilde tasarlanmıştır. Düğümler arasındaki mesafeler ağ oluşturulurken belirlenmiştir. İki düğüm arasındaki gönderim gücü, gönderici algılayıcının gönderim menzili (R_{max}) içindeki diğer algılayıcılar ile aradaki mesafeye göre hesaplanmaktadır. Bundan dolayı daha kısa mesafe, daha az gönderim gücü gerektirmektedir. IBM Cplex kütüphanesi,

düğümler arasındaki mesafe bilgileri kullanılarak, tüm algılayıcılardan alıcıya olan en kısa mesafeyi bulmak için kullanılmıştır.

Sualtı algılayıcı ağlarında düğüm ömrü, algılayıcı düğümlerin pil ömrü ile sınırlıdır. Eğer pil biterse yenisiyle değiştirilmeli ya da şarj edilmelidir. Ancak sualtı koşulları ve uygulama senaryoları göz önüne alındığında sualtı algılayıcı ağlarda bu işlem oldukça maliyetli ve zor bir işlemdir. Pil ömrünü uzatacak tedbirler almak ağ ömrü için oldukça önemlidir. Algılayıcı üzerinde enerji üretim metotları kullanmak, algılayıcının pil ömrünü artıracaktır. Çünkü üretilen enerji birim zamanda algılayıcının pilinden harcanan enerji miktarını azaltacaktır. Bu çalışmada hidrokinetik türbin, hidrofön ve piezoelektrik manivela enerji üretim metotları incelenmiştir.

Önemli bir enerji kaynağı olarak değerlendirilebilecek olan okyanus akıntıları, hava akıntılarında daha yavaş ama suyun yoğunluğundan dolayı daha ağır olan ve çok büyük bir enerji kaynağı olan devasa miktarlardaki suyu okyanuslar arasında taşımaktadır. Hidrokinetik türbinler, su akıntılarında enerji üretebilmektedir. Bu çalışmada, modelleme noktasında İstanbul boğazındaki akıntı değerleri (Jarosz vd, 2011) benzetim çalışmalarında kullanılmıştır. Enerji değeri için ilgili formül (Parker 2015)'den alınmıştır:

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (21)$$

Yukarıdaki formülde C_p türbin verimliliğini, ρ su yoğunluğunu (kg/dm^3), A türbinin alanını (m^2), v ise su akıntı hızını (m/s) göstermektedir.

Sualtı ortamda, deniz hayvanları arasındaki iletişim, su araçlarının çıkardığı sesler gibi birçok gürültü kaynağı mevcuttur. Hidrofön kullanılarak, sualtı ortamdaki gürültüden enerji üretmek mümkündür. Sualtındaki gürültüden hidrofön ile elde edilecek enerji miktarı (22) ile hesaplanabilir (Bereketli ve Bilgen 2012):

$$P = 0.7 n \frac{10^{(RL+RVS)/10}}{4 R_p} - P_{Hyd} \quad (22)$$

$P(w)$, n tane hidrofön kullanarak %70 verimle üretilen enerji, $RL(\text{dB})$ kaynak seviyesi, $RVS(\text{dB})$ hidrofönün alınan gerilim hassasiyeti, $R_p(\Omega)$ hidrofönün direnci, $P_{Hyd}(w)$ hidrofönün enerji üretirken harcadığı enerjidir. Bu çalışmada, High-Tech firmasının ön kuvvetlendiricili HTI-92-WB hidrofönü kullanılmıştır, parametre değerleri RVS değeri -151dB re $1\text{V}/\mu\text{Pa}$, ve R_p değeri 125Ω . Ön kuvvetlendiricili HTI-92-WB için P_{Hyd} değeri $7.5\text{e-}3\text{w}$ olarak alınmıştır. RL değeri (23) ile hesaplanabilir (Bereketli ve Bilgen 2012).

$$RL = SL - AL \quad (23)$$

AL , sönüm seviyesi, (25) ile hesaplanabilir (Bereketli ve Bilgen 2012).

$$AL=20 \log_{10} R + \alpha(f) R \quad (24)$$

$R(m)$ kaynağa olan mesafedir. Soğurma katsayısı $\alpha(f)(dB/m)$, frekans f ile orantılıdır (Felemban ve Felemban 2013).

Sualtı akustik vericinin (hidrofon) kaynak seviyesi, SL (dB re 1 μPa , 1 m'de) (25) ile hesaplanabilir (Bereketli & Bilgen 2012).

$$SL=170.8+10 \log_{10} P_{elec} +10 \log_{10} \eta + DI \quad (25)$$

$P_{elec}(w)$ kaynak seviyesi için kullanılan güçtür. DI (dB) yönelme göstergesi, bu çalışmada her yöne yayılım seçilmiştir ($DI=0 dB$). η , sonar vericinin elektroakustik güç dönüştürme verimliliğidir, alabileceği değerler 0.2 ve 0.7 arasında değişir. Bu çalışmada 0.7 seçilmiştir. 170.8dB, çok yönlü vericiden 1 m / watt için kaynak seviyesidir (Sherman ve Butler, 2008).

Piezoelektrik mikroeletromekanik sistemler (MEMS), malzeme üzerinde oluşturulan gerilimden elektrik üretmek için geliştirilmiştir. Piezoelektrik manivela sistemleri bu prensip ile çalışır ve akıntıya paralel duran manivelanın dikey hareketinden enerji üretir (Kim vd., 2012). $P_{e,max}$ (watt), piezoelektrik manivela sisteminden üretilebilecek maksimum enerji düzeyini ifade eder ve (26) ile hesaplanır (Kim vd., 2012).

$$P_{e,max}(\omega_n) = \frac{m Y^2 \omega_n^3}{16 \zeta_m} \quad (26)$$

Bu eşitlikte, m , piezoelektrik malzemenin kütlesini ifade eder. Y , titreme hareketinin miktarını ifade eder. ζ_m piezoelektrik malzemenin mekanik sönüm oranıdır, ω_n ise manivela titreşiminin hareket frekansıdır. Benzetimler için kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmektedir. Benzetim çalışmasında, ağ ömrü herhangi bir algılayıcının pilinin bitmesiyle sınırlandırılmıştır. Yani herhangi bir algılayıcının pili biterse ağ işlevsiz olarak kabul edilmiştir.

Tablo 1. Benzetim parametreleri.

Parametre	Değer
Algılayıcı Düşüm Sayısı	[50 100 150 200 250]
BER	[1e-3 1e-6 1e-9]
Kurulum alanı	250m.x 250m x 50m
Paket boyutu	1600 bit
Veri hızı	15 Kbps
Deniz suyu Parametreleri	Değer

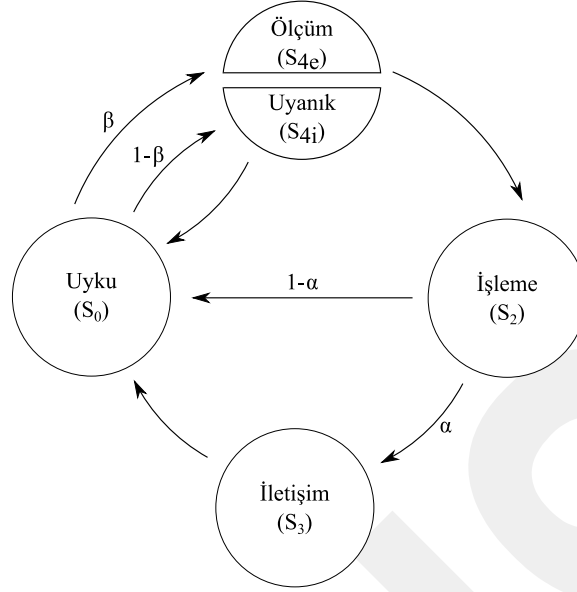
Sıcaklık	15 °C
Tuzluluk	35 PSU (Pratik Tuzluluk Birimi)
pH (Asidite)	8
Pratik Yayılma Katsayısı	1.5

Genel olarak, enerji hasatlama yöntemleri düğümüne sağlanabilecek enerji miktarını arttırmayı amaçlamaktadır. Sağlanan bu enerji miktarının verimli bir şekilde kullanılması da düğüm yaşam ömrü için önemlidir. Bu amaçla, bu çalışma çerçevesinde zaman tabanlı ve tetiklenme tabanlı iki adet enerji yönetim metodu kullanılmıştır. Bu metodlarda ağ düğümünü için gerçekleştirilecek işlemler birer durum olarak tanımlanmış, her bir durum için hangi donanım biriminin kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Böylece, ihtiyaç duyulmayan donanım birimleri kapatılarak enerji tasarrufu ileri seviyeye taşınabilmektedir. Durumlar arası geçiş olasılıkları ise yarı-Markov zinciri kullanılarak ifade edilmiştir. Zaman tabanlı enerji yönetimi ağ düğümünün önceden tanımlanmış görev döngüsünün belirttiği oranda uyutularak enerji tüketiminin azaltılmasını amaçlamaktadır. Bu yönetim şeklinde kullanılan düğüm durumları ve donanım birimlerinin durumu Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Zaman tabanlı enerji yönetimi durum tablosu.

Düğüm durumu	Donanım durumları		
	Radyo	İşlemci	Algılayıcı
S ₀	Kapalı	Kapalı	Kapalı
S ₁	-	-	-
S ₂	Kapalı	Açık	Açık
S ₃	TX	Açık	Kapalı
S ₄	Kapalı	Uyku	Açık
S ₅	RX	Açık	Kapalı

Şekil 2'de ise zaman tabanlı enerji yönetiminde düğüm durumları arası geçiş şeması görünmektedir.



Şekil 2. Zaman tabanlı enerji yönetim sistemi için durum geçiş şeması.

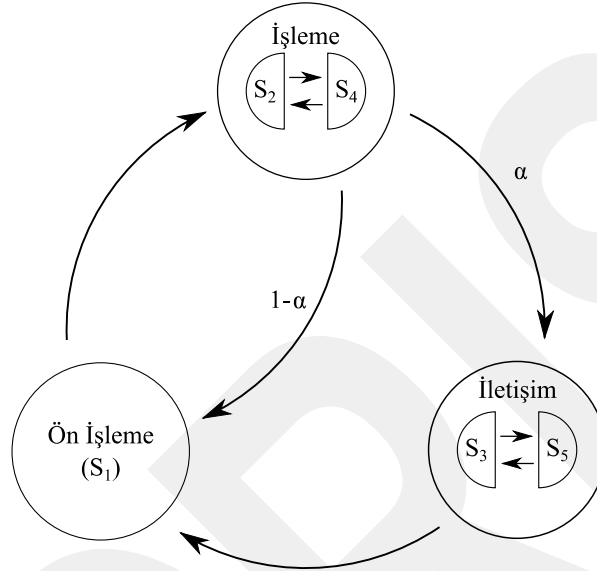
Şekil 5'te β değeri ölçüm yapılmasını gerektiren bir durum olup olmaması olasılığını göstermektedir. Olayın olması durumunda düğüm uyku durumundan ölçüm durumuna, aksi takdirde uyanık duruma geçmektedir. Şekildeki α değeri ise ölçülen ve işlenen bilgilerin kök düğüme gönderilmeye değer olup olmaması olasılığını göstermektedir. Yapılan ölçüm önemli bir bilgi içeriyorsa düğüm işleme modundan iletişim moduna, aksi takdirde uyku moduna geçmektedir.

Tetiklenme tabanlı enerji yönetimde ise düğüme sadece ölçüm yapılmasını gerektiren durumun var olup olmadığını ölçen az enerji tüketimine sahip ek bir donanım eklenmekte, ölçüm yapılacak şartların oluşması durumunda ise ana donanım uyandırılarak ölçümün gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Örneğin, hareketli objelerin kamera görüntüsü aktaran bir ağ düğümünün sürekli açık olması yerine, hareketin varlığını tespit edecek basit bir hareket algılayıcı sensör kullanılarak kamera ve ana işlemcinin sadece hareket var iken kullanılması sağlanabilir. Tablo 3'te tetiklenme tabanlı enerji yönetimde kullanılan durumlar gösterilmektedir.

Tablo 3. Tetiklenme tabanlı enerji yönetimi durum tablosu.

Düğüm durumu	Donanım durumları			
	Ek donanım	Radyo	İşlemci	Algılayıcı
S_0	-	-	-	-
S_1	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
S_2	Açık	Kapalı	Açık	Açık
S_3	Açık	TX	Açık	Kapalı
S_4	Açık	Kapalı	Uyku	Açık
S_5	Açık	RX	Açık	Kapalı

Tetiklenme tabanlı enerji yönetimindeki durum geçiş şeması ise Şekil 3'de gösterilmektedir. Şekil 3'deki ön işleme durumu uyku durumunun yerine kullanılmaktadır. Bu sayede, zaman tabanlı enerji yönetimde düğüm uyku durumundayken yapılması gereken olası ölçümlerin kaçırılması ihtimali ortadan kaldırılmaktadır.



Şekil 3. Tetiklenme tabanlı enerji yönetimi için durum geçiş şeması.

3.2 Sualtı Akustik Ağları için Konumlandırma Yönteminin Geliştirilmesi

Sualtı kablosuz akustik algılayıcı ağları, sualtı düğümlerinin sualtında üç boyutlu şekilde yerleştirilmesi ile oluşan ve bu algılayıcıların topladıkları verileri su yüzeyinde bulunan bir veri toplayıcısına ilettikleri ağlardır. Bu ağlarda, sualtı düğümlerinin konumları sualtındaki güçlü akıntılar nedeniyle dinamik olarak değişebilmektedir. Sualtında bulunan düğümlerin konumlarının doğru bir şekilde belirlenmesi, toplanan verinin sualtında nereden geldiğini gösterdiği için sualtı uygulamaların başarıya ulaşması açısından çok önem taşımaktadır.

Bu aşamada, ilk olarak literatürde mevcut kablosuz sualtı algılayıcı ağ uygulamaları için geliştirilmiş konumlandırma yöntemleri incelenerek mevcut protokollerinin farklı performans kriterlerine göre karşılaştırmalı sınıflandırılması yapılmıştır. Bu inceleme sonucunda, sualtı kablosuz algılayıcı düğümlerinin konumlandırılması için etkin üç boyutlu konumlandırma yöntemi üzerinde çalışılmaya başlanmıştır.

Konumlandırma, kablosuz sualtı kablosuz algılayıcı ağlarında kritik öneme sahiptir. Eğer toplanan veri, konum bilgisi ile etiketlenilemez ya da ilişkilendirilemezse anlamlı bir bilgiye dönüştürülemeyebilir. Bu nedenle düğümlerin konum bilgisinin elde edilebilmesi oldukça önemli olup toplanan verinin anlamlandırılabilmesi ve değerlendirilebilmesini sağlar. Konumlandırma hedef tespiti, düğüm izleme, yönlendirme protokolleri ve veri etiketleme gibi

birçok amaç için zorunludur (Tan vd., 2011; Han vd., 2012; Domingo, 2009; Heidemann, Stojanovic ve Zorzi, 2012). Ancak sualtı iletişim sualtı kanallarındaki değişken ve uzun gecikme süreleri, çok yönlü girişim ve oldukça yüksek sönmüleme gibi bozucu etkiler ve sert ortam koşulları nedeniyle ciddi derecede kısıtlıdır (Domingo, 2009). Bu gibi karakteristik özellikler yüksek doğruluk, hızlı toplanma, geniş alan kapsama, düşük iletişim maliyetleri ve iyi ölçeklenebilirlik gibi arzulanan hedeflerin elde edilebilmesine yönelik olarak etkin ve güvenilir konumlandırma tekniklerinin tasarımını zorlaştırır.

Kablosuz sualtı algılayıcı ağlarının farklı uygulama senaryoları için kritik öneme sahip olmasına rağmen, literatürde karasal kablosuz algılayıcı ağlarına göre daha az konumlandırma algoritması bulunmaktadır. Bunun yanında mevcut karasal uygulamalardaki yaklaşımlar sualtı algılayıcı ağlarının uygulama senaryolarındaki farklılıklar, ortam koşulları ve iletişim kanallarındaki farklılıklar dolayısıyla sualtı algılayıcı ağlarında kullanılamamaktadır. Kablosuz sualtı algılayıcı ağlarında konumlandırma probleminin ana zorlukları aşağıda verilmektedir:

- **Referans/Konumlandırma Yardımcısı İşaretçi Düşümlerin Dağıtımı:** Karasal ağlarda olduğu gibi kablosuz sualtı algılayıcı ağlarında da konumlandırma algoritmalarının çoğu referans olarak kullanılacak konumlandırma yardımcı düğümlere ihtiyaç duyar. Öte yandan bu oldukça zordur. Çünkü su yüzeyindeki şamandıralar dışında deniz/okyanus yüzeyinde de konumlandırmaya yardımcı olacak işaretçilerin dağıtımı gereklidir (Erol-Kantarci, Mouftah ve Oktug, 2010).
- **Düğüm Hareketliliği:** Karasal uygulamaların genelinden farklı olarak sualtı algılayıcı ağlarındaki düğümler sualtı akıntıları, dalgalar, rüzgârlar ve denizcilik aktiviteleri gibi kontrol edilemeyen nedenlerle kaçınılmaz olarak hareketlidir. Ayrıca, harici karasal konumlandırma uygulamalarındaki en büyük yardımcı olan Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) sualtı uygulamalarında kullanılamamaktadır (Erol-Kantarci, Mouftah ve Oktug, 2011).
- **Sinyal Yansıması:** Limanlarda ve kıyıya yakın yüzeylerde sinyal yansıması olabilir. B mesafe ölçümlerinin doğruluğunu etkileyebilir.
- **Düşümler Arası Zaman Eşleştirmesi:** Karasal uygulamalardaki zaman eşleştirmesindeki en büyük yardımcı olan GPS sinyalleri sualtı algılayıcı ağlarında kullanılamamaktadır.

Kablosuz sualtı algılayıcı ağ mimarileri uzamsal kapsama ve düğümlerin hareket kabiliyetine bağlı olarak iki boyutlu (2D)/üç boyutlu (3D) ve sabit/hareketli/hibrit olarak gruplandırılmaktadır (Pompili, Melodia ve Akyildiz, 2009). Temelde konumu bilinen işaretçi düğümlerin yardımına ve düğümler arası mesafelerin tespitine dayalı olan konumlandırma problemine literatürde farklı algoritma ve teknikler ile yaklaşmıştır. Ağ topolojisi, sinyal

yayımlı modelleri, aygıt kabiliyetleri, enerji gereksinimleri gibi birçok faktör konumlandırma probleminde önemli olup, konumlandırma hassasiyeti, gürültü, iletişim mesafesi, yayılım kayıpları, zayıflama, işaretçi düğüm sayısı, işaretçi düğümlerin yerleşimi, konumlandırılacak düğümün göreceli konumu, düğüm hareket modeli gibi faktörlere bağlıdır. Buna ilave olarak zamanlama mekanizması ve periyodu da etkilidir (Ramezani vd., 2015).

Konumlandırmaya yardımcı olan referans noktalar olan işaretçi düğümlerin kullanımına dayalı olan konumlandırma algoritmaları mesafe tabanlı ve mesafeden bağımsız olmak üzere iki temel kategoriye ayrılabilir. Öte yandan, işlem tipine bağlı olarak konumlandırma algoritmaları dağıtık ve merkezi konumlandırma algoritmaları olarak ikiye ayrılabilir. Çoğu sualtı uygulamasında çevrimiçi sualtı izleme sistemlerine uygun oldukları için dağıtık konumlandırma algoritmaları tercih edilmektedir. Bununla birlikte, bu algoritmalar sualtı algılayıcı düğümleri üzerinde veri işleme gerektirmektedirler (Erol-Kantarci, Mouftah ve Oktug, 2010). Hem dağıtık hem de merkezi konumlandırma algoritmalarında kestirim araçları/yaklaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde (Erol-Kantarci, Mouftah ve Oktug, 2010; Tan vd., 2011; Han vd., 2012; Erol-Kantarci, Mouftah ve Oktug, 2011) irdelendiği üzere sualtı konumlandırma algoritmaları sabit konumlandırma algoritmaları, gezgin konumlandırma algoritmaları ve hibrit konumlandırma algoritmaları olarak üç temel kategoriye ayrılabilir. Tablo 4, 5 ve 6 mevcut konumlandırma algoritmalarının karşılaştırmasını sunmaktadır.

- **Sabit Konumlandırma Algoritmaları:** Bu algoritmalarda tüm sualtı algılayıcı düğümlerinin hareket kabiliyeti olmayan statik düğümler olduğu kabul edilir. Bu nedenle düğümler ya okyanus tabanına ya da sabit konumlardaki şamandıralara monte edilmiştir.
- **Gezgin Konumlandırma Algoritmaları:** Bu algoritmalarda tüm düğümlerin gezgin olduğu kabul edilir. Bu nedenle düğümler ya hareket etme kabiliyetine sahiptir ya da akıntılarla serbestçe sürüklenebilirler.
- **Hibrit Konumlandırma Algoritmaları:** Bu algoritmalarda hem hareketsiz hem de gezgin düğümler bulunduğu kabul edilir.

Konumlandırma algoritmalarından bağımsız olarak, bütün konumlandırma algoritmalarında yüksek konumlandırma hassasiyeti, hızlı işlem, düşük iletişim maliyeti, %100'e yakın kapsama ve kolay uygulanabilme arzulan özellikler arasındadır. Konumlandırma algoritmalarının önemli bir gereksinimi olan konumları belli olan ve konumlandırmada yardımcı olan işaretçi düğümlerin dağıtımını önemlidir. Dağıtım sırasında işaretçi düğümler sabit, konumu belli olan noktalara yerleştirilebileceği gibi GPS ve GLONASS gibi küresel konumlandırma sistemleri ya da bir konumlandırma sunucusu aracılığıyla konumlarını öğrenebilmelerini sağlayan özel donanımlarla donatılabilirler.

Konumu bilinmeyen bir sualtı algılayıcı düğümünün konumunun tespit edilebilmesi için konumlandırma algoritmalarının çoğu konumu belirli olan yer işaretçisi düğümler ile ilgili düğüm arasındaki mesafe veya açı bilgilerini ya da her ikisini de kullanır. Açı ölçümlerine dayalı olan konumlandırma algoritmaları trigonometrik prensiplere dayalı iken mesafeye dayalı olan algoritmalar ise düğümler arasındaki mesafe ve dairelerin kesişme noktalarının birleşmesine dayalıdır. Üç boyutlu kablosuz sualtı algılayıcı ağlarında ise derinlik bilgisinin elde edilebilmesi için basınç algılayıcılar kullanılır.

Karasal kablosuz algılayıcı ağlarında mesafe ve açı ölçümleri Alınan Sinyal Gücü İndikatörü (RSSI), Varış Zamanı (ToA), Varış Zamanı Farkı (TDoA) ve Varış Açısı (AOA) yöntemleriyle elde edilmektedir. Öte yandan, sualtı algılayıcı ağlarında ToA ve TDoA tercih edilmektedir. RSSI sualtı ortamının zamanla değişen özellikleri ve sinyal gücünün mesafeye orantılı olarak değişmemesi nedeniyle uygun bir yöntem değildir. AoA ise pahalı ve büyük yönlü antenler gerektirmektedir. Hem araştırmacılar hem de saha elemanları konumlandırma algoritmalarının başarımını belirleyebilmek ve uygun konumlandırma yaklaşımını seçebilmek için performans metrikleri kullanılmaktadır. Konumlandırma algoritmalarının etkinlik ve performansın değerlendirmede kullanılan önemli performans metrikleri aşağıda verilmektedir.

- **İletişim maliyeti:** Konumlandırma algoritmalarının enerji etkinliğinin bir ölçüsüdür. Bir düğümün konumlandırılabilmesi için gönderilmesi gereken ortalama mesaj sayısının gösterir (Tan ve diğerleri, 2011).
- **Kapsama:** Başarıyla konumlandırılan düğümlerin oransal ölçüsüdür.
- **Süre:** İstenilen konumlandırma kapsamını elde etmek için gereken zaman veya tekrarlama sayısıdır.
- **Doğruluk:** Konumlandırma hatasının ölçülebilmesini sağlar. Genellikle, konumu belirlenen düğümün kestirilen ve gerçek konumları arasındaki Öklid mesafesidir.

Tablo 4. Literatürdeki sabit konumlandırma algoritmalarının karşılaştırması.

Algoritma	Mesafe Ölçüm Metodu	İşaretçi Düğüm Tipi	Mesaj Tipi	Avantajları	Dezavantajları
Area Localization Scheme (Chandrasekhar ve Seah, 2007)	Mesafe bağımsız	Sabit işaretçiler	Aktif	Düşükhesaplama maliyeti ve ortalama konumlandırma süresi	Kısıtlı konumlandırma kapsamı, düşük konumlandırma hassasiyeti ve yüksek enerji tüketimi

Hyperbola-based Approach (Bian, Venkatesan ve Li, 2009)	TDoA	Sabit işaretçiler	Aktif	Yüksek konumlandırma hassasiyeti, orta derece konumlandırma kapsamı ve düşük hesaplama maliyeti	Geniş ölçekli ağlara uygun olmama ve yüksek enerji tüketimi
Probabilistic Localization Approach (Bian, Venkatesan ve Li, 2010)	Tam olarak açıklanmamış	Sabit işaretçiler	Aktif	Yüksek konumlandırma hassasiyeti, orta derece konumlandırma kapsamı, düşük hesaplama maliyeti ve düşük enerji tüketimi	Geniş ölçekli ağlara uygun olmama
Asymmetrical Round Trip-Based Localization Approach (Liu ve diğerleri, 2010)	Sinyal gidiş geliş zamanı	Sabit işaretçiler	Aktif	Geniş konumlandırma kapsamı, yüksek konumlandırma hassasiyeti ve düşük hesaplama maliyeti	Uzun konumlandırma süresi ve yüksek enerji tüketimi
Underwater Silent Positioning Scheme (Cheng, Shu ve Liang, 2007; Cheng ve diğerleri, 2008)	TDoA	Sabit işaretçiler	Sessiz (Pasif)	Yüksek konumlandırma hassasiyeti, düşük hesaplama maliyeti, düşük enerji tüketimi ve kısa konumlandırma süresi	Kısıtlı konumlandırma kapsamı nedeniyle geniş ölçekli ağlara uygun olmama
Underwater Sensor Positioning Scheme (Cheng ve diğerleri, 2008; Teymorian ve diğerleri, 2009)	Tam olarak açıklanmamış	Sabit işaretçiler	Sessiz (Pasif)	Düşük hesaplama maliyeti ve kısa konumlandırma süresi	Yüksek enerji tüketimi, düşük konumlandırma hassasiyeti ve geniş ölçekli ağlara uygun olmama
Ray Bending-Based Localization Algorithm (Ameer ve Jacob, 2010)	ToA	Sabit işaretçiler	Aktif	Ortalama konumlandırma süresi, yüksek konumlandırma hassasiyeti, düşük hesaplama maliyeti ve düşük enerji tüketimi	Kısıtlı konumlandırma kapsamı nedeniyle geniş ölçekli ağlara uygun olmama
Localization Scheme for Large Scale Underwater Networks (Cheng ve diğerleri, 2009)	TDoA	Sabit işaretçiler	Aktif	Geniş konumlandırma kapsamı ve düşük hesaplama maliyeti	Uzun konumlandırma süresi, düşük konumlandırma hassasiyeti ve yüksek enerji tüketimi
Maximum Likelihood Source Localization (Ma ve Hu, 2009)	Mesafe bağımsız	Algılayıcı dizisi	Aktif	Geniş konumlandırma kapsamı, ortalama konumlandırma süresi, yüksek konumlandırma hassasiyeti ve düşük hesaplama maliyeti	Yüksek enerji tüketimi

Reactive Localization Technique (Watfa ve diğerleri, 2010)	Tam olarak açıklanmış	Şamandıralar	Aktif	Düşük enerji tüketimi ve çok sayıda düğüm içeren ağlarda iyi konumlandırma hassasiyeti	Kısıtlı konumlandırma kapsamı, uzun konumlandırma süresi ve yüksek hesaplama maliyeti
Hierarchical Localization Approach (Zhou, Cui ve Zhou, 2007; Zhou, Cui ve Zhou, 2010)	ToA	Şamandıralar ve sualtı yer işaretçi düğümler	Aktif	Geniş konumlandırma kapsamı	Uzun konumlandırma süresi, düşük konumlandırma hassasiyeti, yüksek hesaplama maliyeti ve yüksek enerji tüketimi
Node Discovery Protocol and Localization (Othman, Adams ve Tsimenidis, 2006; Othman, 2008)	Tam olarak açıklanmış	Yer işaretçiden bağımsız	Aktif	Geniş konumlandırma kapsamı	Uzun konumlandırma süresi, düşük konumlandırma hassasiyeti, yüksek hesaplama maliyeti ve yüksek enerji tüketimi
Anchor-Free Localization Algorithm (Guo ve Liu, 2013)	Sinyal varış zamanı	Yer işaretçiden bağımsız	Aktif	Geniş konumlandırma kapsamı, enerji etkinliği ve hem statik hem de dinamik ağlara uygunluk	Konumlandırma hassasiyeti diğer hareketlilik varsa düğüm hızına bağlı
Principal Components Analyses (PCA) Based Probabilistic Localization Approach (Lee, Qu ve Huang, 2013)	Sinyal ölçümü	Yer işaretçiden bağımsız	Aktif/Sessiz (Pasif)	PCA yaklaşımıyla iyileştirilmiş konumlandırma hassasiyeti ve yansıyan sinyaller ile çok yolu iletişimden etkilenmemesi	Yüksek hesaplama maliyeti
On-Demand Asynchronous Localization Scheme (Carroll ve diğerleri, 2014)	Sinyal gidiş geliş zamanı	Yer işaretçi düğümler, AUV'ler	Aktif/Sessiz (Pasif)	İki farklı konumlandırma yaklaşımıyla yüksek ya da ortalama konumlandırma hassasiyeti sağlanması	Çarpışmaları ele alan mekanizma eksikliği
Surface Based Anchor-Free localization Algorithm (SBR-AL) (Emokpae ve Younis, 2011)	ToA	Yer işaretçiden bağımsız	Aktif	İyi konumlandırma hassasiyeti	Su yüzeyindeki koşulların konumlandırma hatasındaki yüksek etkisi
Underwater Reflection-Enabled Acoustic-Based Localization (Emokpae ve diğerleri, 2014)	AoA	Yer işaretçiden bağımsız bir konumlandırma yaklaşımıyla coğrafi olarak konumlandırılmış düğümler	Aktif	İyi konumlandırma hassasiyeti	Yönlü piezoelektrik sualtı dönüştürücü gereksinimi
Multi-Anchor	Tam olarak	Şamandıralar,	Aktif	Yüksek konumlandırma	Yüksek hesaplama

Nodes Collaborative Localization (Zhang ve diğerleri, 2014)	açıklanmamış	Yer işaretçi düğümler ve Sıradan düğümler		oranı, düşük konumlandırma hatası ve düşük enerji tüketimi	maliyeti
Fine-grained Localization Algorithm (Kulhandjian ve Melodia, 2014)	ToA	Sabit işaretçiler	Aktif	Yüksek konumlandırma hassasiyeti, geniş konumlandırma kapsamı, düşük iletişim maliyeti ve düşük enerji tüketimi	Çok yönlü iletişimin konumlandırma hassasiyeti üzerindeki etkisi
Multi-Objective Localization (Yu, Xiao ve Zhou, 2014)	Mevcut değil	Manyetik algılayıcı dizisi	Sessiz (Pasif)	Yüksek konumlandırma hassasiyetine dayanıklılık	Üç eksenli manyetometre gereksinimi

Tablo 5. Literatürdeki gezgin konumlandırma algoritmalarının karşılaştırması.

Algoritma	Mesafe Ölçüm Metodu	İşaretçi Düğüm Tipi	Mesaj Tipi	Avantajları	Dezavantajları
Energy-Efficient Ranging for Post-Facto Self-Localization (Mirza ve Schurgers, 2008a)	ToA	Yer işaretçiden bağımsız	Aktif	Geniş konumlandırma kapsamı ve düşük hesaplama maliyeti	Uzun konumlandırma süresi ve yüksek enerji tüketimi
Motion-Aware Self Localization (Mirza ve Schurgers, 2008b)	ToA	Yer işaretçiden bağımsız	Aktif	Geniş konumlandırma kapsamı ve düşük hesaplama maliyeti	Uzun konumlandırma süresi, ortalama konumlandırma hassasiyeti ve yüksek enerji tüketimi
Collaborative Localization (Mirza ve Schurgers, 2007)	ToA	Yer işaretçiden bağımsız	Aktif	Kısa konumlandırma süresi, düşük hesaplama maliyeti ve düşük enerji tüketimi	Kısıtlı konumlandırma kapsamı ve ortalama konumlandırma hassasiyeti
Absolute Positioning (Kussat, Chadwell ve Zimmerman, 2005)	TDoA	GPS ile konumlandırılmış hidrofona	Aktif	Kısa konumlandırma süresi ve düşük hesaplama maliyeti	Kısıtlı konumlandırma kapsamı, düşük konumlandırma hassasiyeti ve yüksek enerji tüketimi
3-D Underwater Target Tracking (Isbitiren ve Akan, 2011)	TDoA	Hareket eden yer işaretçi düğümler	Aktif	Geniş konumlandırma kapsamı, kısa konumlandırma süresi, düşük hesaplama maliyeti ve düşük enerji tüketimi	Konumlandırma hassasiyeti yüksekliği uygulamaya bağlı
AUV-Aided Localization (Erol, Vieira ve Gerla, 2007a)	ToA	AUV'ler	Sessiz (Pasif)	Düşük hesaplama maliyeti	Uzun konumlandırma süresi
Dive'N'Rise (DNR) Positioning (Erol, Vieira ve Gerla, 2007b)	ToA	Dalıp çıkan yer işaretçileri	Sessiz (Pasif)	Düşük hesaplama maliyeti	Uzun konumlandırma süresi

Scalable Localization scheme with Mobility Prediction (Zhou, Cui ve Bagtzoglou, 2008)	ToA	Şamandıralar ve yer işaretçi düğümler	Aktif	Geniş konumlandırma kapsamı	Uzun konumlandırma süresi, düşük konumlandırma hassasiyeti ve yüksek hesaplama maliyeti
Multi-stage AUV-aided Localization (Waldmeyer, Tan ve Seah, 2011)	ToA	AUV'ler	Sessiz (Pasif)	Geniş konumlandırma kapsamı, kısa konumlandırma süresi, yüksek konumlandırma hassasiyeti ve düşük hesaplama maliyeti	Yüksek enerji tüketimi
Multi-Stage Localization Protocol Using Mobile Beacons (Erol ve diğerleri, 2008)	ToA	Gezgin düğümler	Sessiz (Pasif)	Geniş konumlandırma kapsamı, kısa konumlandırma süresi ve düşük hesaplama maliyeti	Ortalama konumlandırma hassasiyeti ve yüksek enerji tüketimi
Time of Arrival based Tracked Synchronization (Yi ve diğerleri, 2014)	ToA	İşaretçi düğümler, Gezgin düğümler	Aktif	İyi konumlandırma hassasiyeti ve iki yönlü iletişim yeteneği olmayan düğümler kullanımına izin vermesi	Hassas saat ve dahili ölçüm birimi kullanımı gereksinimi
Real-Time Collaborative Tracking (Mirza ve diğerleri, 2014)	Uçuş zamanı (ToF)	İşaretçi düğümler, Gezgin düğümler	Aktif	Düşük enerji tüketimi, düşük iletişim yükü ve konumlandırma bilgisinin füzyonu	Konumlandırma hassasiyetinin işaretçi düğümler ile olan direkt iletişime ve düğüm konumlandırma süresine bağlı olması
Distributed Localization Scheme Based on Mobility Prediction (Zhu ve diğerleri, 2014)	Tam olarak açıklanmamış	Şamandıralar, İşaretçi düğümler	Aktif	Düşük iletişim maliyeti ve iyi hassasiyet	Konumlandırma kapsamı düğüm yoğunluğu ve bazı ön kabullere bağlı

Tablo 6. Literatürdeki hibrit (hem sabit hem gezgin düğümler içeren) konumlandırma algoritmalarının karşılaştırması.

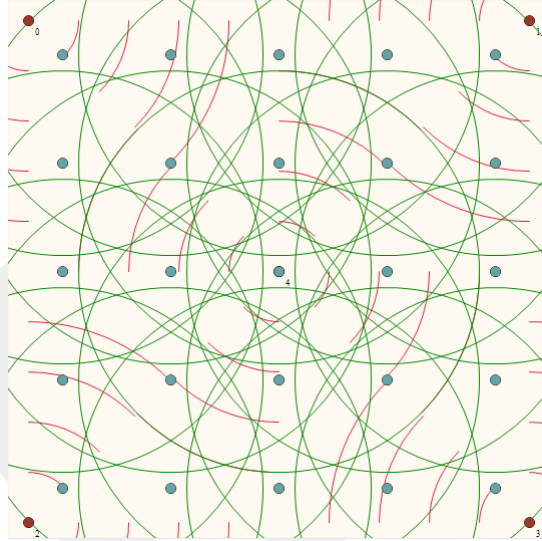
Algoritma	Mesafe Ölçüm Metodu	İşaretçi Düğüm Tipi	Mesaj Tipi	Avantajları	Dezavantajları
Silent Localization of Underwater Sensors Using Magnetometers (Callmer, Sklund ve Gustafsson, 2010)	Mesafe bağımsız	Yer işaretçiden bağımsız	Sessiz (Pasif)	Geniş konumlandırma kapsamı, kısa konumlandırma süresi, düşük enerji tüketimi ve düşük hesaplama maliyeti	Düşük konumlandırma hassasiyeti
Localization Scheme with	Mesafe bağımsız	Bir adet gezgin yer	Sessiz (Pasif)	Geniş konumlandırma kapsamı ve düşük hesaplama	Yüksek enerji tüketimi

a Mobile Beacon and a Pressure Sensor (Lee ve Kim, 2010)		işaretçi		ama maliyeti	
3D Multi-Power Area Localization Scheme (Zhou ve diğerleri, 2009a; Zhou ve diğerleri, 2009b)	Mesafe bağımsız	Şamandıral arve gezgin çıkarılabilir alıcı vericiler	Sessiz (Pasif)	Genişkonumlandırma kapsamıve düşükhesapl ama maliyeti	Düşükkonumlandırma hassasiyetiveyüksek enerji tüketimi
Time-Synchronization Free Localization (Cheng ve diğerleri, 2009)	ToA	Şamandıral ar	Aktif	Genişkonumlandırma kapsamıve düşükhesaplama maliyeti	Uzunkonumlandırma süresi, düşükkonumlandırma hassasiyeti veyüksekenerji tüketimi
Localization with Directional Beacons (LDB) (Luo ve diğerleri, 2010)	Mesafe bağımsız	AUV'ler	Sessiz (Pasif)	Düşükhesaplama maliyetivedüşükenerji tüketimi	Kısıtlıkonumlandırma kapsamı, uzunkonumlandırma süresi vedüşükkonumlandırma hassasiyeti
Directional Beacons for Localization (UDB) (Luo ve diğerleri, 2008)	Mesafe bağımsız	AUV'ler	Sessiz (Pasif)	Düşükhesaplama maliyetivedüşükenerji tüketimi	Kısıtlıkonumlandırma kapsamı, uzunkonumlandırma süresi vedüşükkonumlandırma hassasiyeti
Cooperative Underwater Localization (Caiti ve diğerleri, 2013)	Sinyal gidiş geliş zamanı ve USBLölçümleri	AUV'ler	Sessiz (Pasif)	Genişletilmiş Kalman Filtresi kullanımıyla hata artışının kısıtlanması ve konumlandırma hatasının azaltılması	Kısıtlıkonumlandırma kapsamı, yüksekhesaplama maliyeti ve dahili ölçüm birimi ve gelişmiş yön bulma sistemleri kullanımını gerektirme

Bu aşamanın temel amacı sualtı akustik ağlarda konum farkında iletişim sistemlerinin geliştirilmesi için ihtiyaç duyulan konumlandırma yöntemini gerçekleştirmektir. Yöntem sayesinde, ağdaki düğümlerin tamamının düşük hata oranı ve düşük ek enerji ihtiyacı gerektirecek şekilde konumlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Sualtında bulunan düğümlerin konumlarının doğru bir şekilde belirlenmesi, toplanan verinin sualtında nereden geldiğini gösterdiği için sualtı uygulamaların başarıya ulaşması açısından çok önem taşımaktadır. Sualtı akustik ağlarda GPS gibi yardımcı sinyaller sualtında ilerleyemediği için düğümlerin konumlarının belirlenmesinde, konumu bilinen referans noktalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu referans noktalar kullanılarak multilaterasyon yöntemiyle gerçekleştirilecek konum belirleme uygulamalarında ise kanal karakteristiği önem arz etmektedir. Sualtı akustik kanal modellerinde görüldüğü üzere, sönümlenme katsayısı derinlik ile de bağlantılıdır. Dolayısıyla, farklı derinlik, uzaklık ve frekans değerleri için kanal modeli farklı yol kaybı

değerleri sunabilecektir. Bu durum, gerçekleştirilecek lokalizasyon uygulamalarında gözönüne alınmalıdır.

Bu aşama kapsamında sualtı kablosuz akustik algılayıcı ağ düğümlerinin konumunun belirlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, belirlenen konum bilgilerinin içerdiği hata oranı, konumlama için harcanan enerji miktarı ve düğümlerin ne kadarının konumlandırma kapsamına girdiği incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, 540x540 metrelik iki boyutlu bir alanda 200 adet hareketli düğüm ve değişken sayıda sabit referans düğümler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Konumlandırmanın iki boyutta gerçekleştirilmesinin sebebi sualtı ortamında üçüncü eksen olan derinlik değerinin basınç ölçümü yardımıyla kolaylıkla gerçekleştirilebiliyor olmasıdır. Şekil 4'de referans düğümler ve onların sahip olduğu maksimum iletişim uzaklığını gösteren örnek bir ağ yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4. Örnek ağ yapısı.

Çalışma kapsamında konum belirleme ve belirlenen konumun her bir zaman diliminde düğümün yaptığı harekete bağlı olarak güncellenmesi için Kalman filtresi kullanılmıştır. Kalman filtresi konum tahmini yapabilmek için önceki zaman dilimindeki konum bilgisine, düğümlerin yaptığı hareket bilgisine, şimdiki zaman dilimindeki referans düğümlere olan uzaklık bilgisi ve referans düğümlerin konum bilgisinin bilinmesini gerektirmektedir. Filtrenin önceki zaman dilimindeki konum bilgisine ihtiyaç duymasının sebebi, temel olarak Bayes filtresi yapısına sahip olması ve dolayısıyla yeni tahminlerin önceki tahminlere dayalı olarak gerçekleştiriliyor olmasıdır. Bu nedenle, filtrenin ihtiyaç duyduğu değerlerin başında önceki zaman dilimindeki konum tahmini gelmektedir. İhtiyaç duyulan diğer bir parametre olan düğümlerin yaptığı hareket bilgisi ivmeölçer ve jiroskop gibi algılayıcılar yardımıyla ölçülebilmektedir. Referans düğümlerin konum bilgisi ise bu düğümler sabit olduğu için ağı oluşturulma anında ağa önceden tanımlı olarak verilebilmektedir. Bu bilginin hareketli

düğümlere iletilmesi ise değerlerin referans düğümlerden hareketli düğümlere gönderilen lokalizasyon paketlerine eklenmesi yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Son olarak, referans düğüm ile hareketli düğümler arasındaki uzaklık bilgisi multilaterasyon için kullanılmaktadır.

Takip eden paragraflarda bu aşamada uygulanan Kalman filtresinin kullandığı matematiksel formüller ve adımları anlatılmaktadır. Kullanılan filtre olasılıksal bir yapıya sahiptir. Yani, tahmin edilen konumlar kesin bir koordinat belirtmek yerine farklı koordinatlardan oluşan olasılıksal bir dağılım içermektedir. Bu dağılımın ortalama (μ) ve standart sapma (Σ) değerleri tahminlerin gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır. Kalman filtresi ile konum belirlenmesi temel olarak 2 adımdan oluşmaktadır. İlk adım tahmin, ikinci adım ise tahmin iyileştirmesi olarak adlandırılmaktadır. Tahmin adımında, önceki zaman diliminde elde edilmiş olan ortalama ve standart sapma değerleri ile, iki ekseninde doğrusal hız olarak tanımlanan düğümün yaptığı hareket bilgisi kullanılmaktadır. Yapılan hareketin matematiksel modeli aşağıda belirtilmektedir. Dolayısıyla, yeni μ matrisinin (X) belirlenmesi tek bir matris çarpımı işlemiyle gerçekleştirilmektedir. Tahmin adımının diğer işlemi olan yeni Σ matrisinin (P) belirlenmesi içinse aşağıdaki matematiksel işlem gerçekleştirilmektedir.

$$X = F \cdot X \quad (27)$$

$$P = F \cdot P \cdot F^T + Q \quad (28)$$

Yukarıdaki denklemlerde X matrisi durum matrisi olarak adlandırılmakta ve algılayıcı düğümün iki ekseninde konum bilgisine ek olarak iki ekseninde hız bilgisini içermektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (29)$$

F matrisi ise ağ düğümlerinin hareket modelini oluşturmaktadır. İki boyutlu bir düzlemde bu matris aşağıdaki değerleri almaktadır.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 1 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Denklemden dt değeri birim zamanı ifade etmektedir. Böylece her bir eksenindeki yeni konum, önceki konum ile o eksenindeki hız değeri ve geçen sürenin çarpımının toplamına eşit olmaktadır. Son olarak, Q hareket modelinin sahip olduğu gürültüyü modellemek için kullanılmaktadır. Bu matris aşağıdaki değerlere sahiptir.

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{dt^3}{3}q & 0 & \frac{dt^2}{2}q & 0 \\ 0 & \frac{dt^3}{3}q & 0 & \frac{dt^2}{2}q \\ \frac{dt^2}{2}q & 0 & dt*q & 0 \\ 0 & \frac{dt^2}{2}q & 0 & dt*q \end{bmatrix} \quad (31)$$

Matriste kullanılan q değeri (kovaryans) 0.1 olarak kabul edilmiştir.

Tahmin edilen değerler belirlendikten sonra, bu değerlerin doğruluğunun artırılması için tahmin iyileştirme adımı gerçekleştirilmektedir. Bu adımda, referans noktalara olan uzaklık bilgileri kullanılarak multilateration ve min-max yöntemi ile düğümün konumuna dair ikinci bir tahminde bulunulmakta, önceki adımda yapılan tahmin ile bu tahmin değerleri Kalman kazancı değeri kullanılarak birleştirilmektedir. Aşağıdaki denklemler tahmin iyileştirme için gerçekleştirilen matematiksel işlemleri göstermektedir.

$$Y = Z - H \cdot X \quad (32)$$

$$S = H \cdot P \cdot H^T + R \quad (33)$$

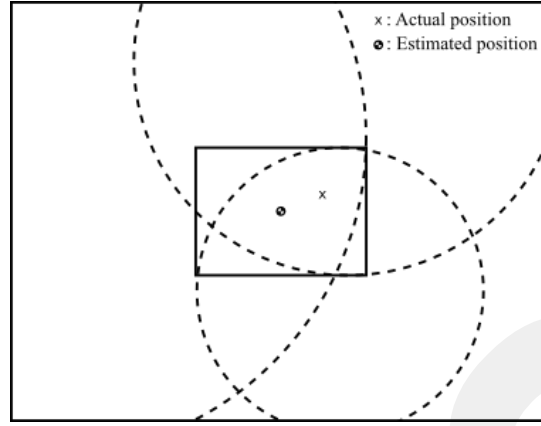
$$K = P \cdot H^T \cdot S^{-1} \quad (34)$$

$$X = X + K \cdot Y \quad (35)$$

$$P = (I - K \cdot H) \cdot P \quad (36)$$

İlk adımda Z matrisi yapılan harici ölçüm değerlerini, H matrisi ise Jakobiyen matrisini temsil etmektedir. Bu adımda yapılan işlem kısaca harici ölçümler ile önceki adımda yapılan tahmin arasındaki hata miktarını bulmaktır. Harici ölçüm değerlerinin belirlenmesinde min-max yöntemi kullanılmaktadır.

Şekil 5'de bir düğümün referans düğümlere olan uzaklığına göre çizilmiş olan çemberler görünmektedir. İdeal bir ortamda, bu çemberlerin tek bir kesişim noktası bulunmakta ve bu nokta düğümün konumu olarak kabul edilebilmektedir. Fakat sualtı kanalının gösterdiği zamana bağlı karakteristik değişiklikler veya kullanılan donanımın içereceği ölçüm hata değerlerinden dolayı tek bir kesişim noktasından ziyade bir kesişim bölgesi elde edilebilmektedir. Min-max yöntemi ise bu kesişim alanı kullanılarak belirlenecek tahmini konum koordinatlarını sağlamaktadır. Bu yöntemin tercih edilmesinin sebebi ise, metodun sağladığı kabul edilebilir hata oranına karşılık işlem yükü olarak hafif olmasıdır. Kullanılan kablosuz düğümlerin kısıtlı enerji kaynağı ve kısa yaşam ömrü düşünüldüğünde, işlem yükünün azlığı büyük önem arz etmektedir.



Şekil 5. Min-max algoritması.

Min-max yönteminde çemberlerin oluşturduğu kesişim alanını kapsayan en küçük dörtgen bulunmakta, bu dörtgenin ağırlık merkezi ise tahmin edilen düğüm konumu olarak kabul edilmektedir. Örneğin, dörtgenin sol kenarının yatay eksenindeki konumunun belirlenmesi için çemberlerin en sol uçlarından en sağda olanın konumu kullanılmaktadır. Diğer üç kenar için de aynı işlem tekrarlanmaktadır. Unutulmamalıdır ki, koordinat sisteminin merkezi ağın sol üst köşesinde kabul edilmekte ve sağ yön pozitif y eksenini, aşağı yön ise pozitif x eksenini temsil etmektedir.

İkinci ve üçüncü adımlarda ise Kalman kazancını bulmak için işlemler gerçekleştirilmektedir. İkinci adımda kullanılan R matrisi harici ölçümlerin sahip olduğu gürültüyü modellemek için kullanılmaktadır.

$$R = \begin{bmatrix} r_x^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_y^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{v_x}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{v_y}^2 \end{bmatrix} \quad (37)$$

R matrisinde r_x , r_y , r_{v_x} ve r_{v_y} için sırasıyla 0.05, 0.05, 0.1 ve 0.1 değerleri kullanılmıştır.

Kalman kazancı belirlendikten sonraki iki adımda ise düğüm durumunu ifade eden μ (X) ve Σ (P) değerleri güncellenmektedir. Böylece Kalman Filtresi yardımıyla konum tahmini gerçekleştirilmiş olmaktadır.

3.3 Sualtı Akustik İletişimde Kullanılabilecek Modülasyon Teknikleri

Sualtı iletişim sistemleri, her biri bazı avantaj ve dezavantajlara sahip radyo frekansı (RF), optik ve akustik gibi farklı iletişim teknolojileri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Optik iletişim, saçılma problemi nedeniyle sualtı veri iletişimi için uygun değildir, buna karşılık RF iletişiminin sınırlı yayılma ve yüksek yol kaybı gibi başka sorunları vardır. Dahası, iletken deniz suyu yoluyla, radyo dalgaları uzun mesafeleri sadece çok düşük frekanslarda

yayılabilir. Ancak RF iletişimi, yüksek iletim gücüne sahip büyük antenlerin kullanılmasını gerektirir. RF iletişim kanalları ile karşılaştırıldığında, sualtı akustik kanalları büyük iletim gecikmesi, mesafe ve frekansa bağlı iletim kaybı ve ciddi çoklu yol etkisi ile karakterizedir ve bu özellikler su altı iletişim sistemlerinin performansını önemli ölçüde etkiler ve mevcut kanal kapasitesini kısıtlar. İletim kaybı doğrudan mesafeye bağlı olduğundan sualtı iletişim kanalının mevcut bant genişliği yayılma mesafesiyle sınırlıdır. Öte yandan, sabit veri oranları tercih edilirse, bant genişliği maksimum çalışma aralığı ve kanal koşulları ile sınırlandırılır ve bu nedenle kanalların kullanım oranı çok oldukça düşük olur. Bu amaçla, makul modülasyon modelleri ve gelişmiş sinyal işleme teknikleri, alıcıların algılama performansını geliştirirken, güvenilir sualtı iletişimi sağlamak ve bant genişliğinin kullanım oranını iyileştirmek için en iyi çözümlerden biridir.

Son yıllarda, sualtında akustik iletişim, çok kanallı iletişim, alternatif modülasyon stratejileri yoğun ilgi çekmesine ve bu alandaki sayısız çalışmalara rağmen, sualtı akustik ağlarda yaşam süresini doğrudan etkileyen sınırlı enerji kaynaklarıdır. Ayrıca, sualtı akustik modemlerin güvenilirliğini ve performansını arttırmak için, menzil, hız ve kanal karmaşıklığını dikkate alan yüksek doğruluklu kanal modellerinin artan entegrasyonuna ihtiyaç duyulduğu iyi bilinmektedir. Buna ek olarak, sualtı akustik ağlarında güvenilirliği ve enerji verimliliğini arttırmak için gürültü azaltma göz önünde bulundurulmalıdır. Dağıtılmış akustik iletişim sistemlerinde, farklı kullanıcılar farklı sayıda paralel veri akışını iletebilir ve dağıtılmış verici / alıcı çiftleri çok farklı Doppler çarpıklıklarına maruz kalabilir. Bu nedenle, yeni sinyal alıcı/modem mimarilerinin tasarlanması ve geliştirilmesi su altı akustik haberleşmesi için çok büyük önem arz etmektedir. Sualtı akustik ağlarında bazı modülasyon teknikleri çoğu sualtı senaryosunda iyi çalışsa da, bazıları enerji tüketimi açısından çok maliyetli olabilmektedir. Bu nedenle iletişime başlamadan önce en uygun modülasyon tekniğinin seçilmesi, sınırlı enerji kaynaklarının korunmasında ve ağ ömrünün uzatılmasında son derece yararlı olabilir. Bazı modülasyon tekniklerinin zorluğu temel olarak karmaşık olmalarında ve bazı düşük maliyetli sualtı iletişim sistemlerinde yatar ve bu da kullanım için uygun değildir.

Sualtı akustik iletişim kanalları mekansal ve zamansal olarak hızlı değişmektedir. Bu bağlamda, iletim parametrelerini kanal varyasyonlarıyla eşleştirerek, en uygun modülasyonu seçmek, su altı iletişim sistemlerinin etkinliğini ve bant genişliği oranının optimizasyonunu iyileştirmek için bir seçenek olabilir. Çoklu taşıyıcı iletime dayanarak, her bir alt kanalın gücü, dinamik bant genişliği yönetimi sağlamak için alıcının Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) değeri tarafından tahsis edilir. Bazı durumlarda, verici kanalın SNR değeri yüksek olduğunda daha fazla güç dağıtır; aksi halde daha az güç dağıtır. SNR değeri belirtilen kesme eşiğinden az olursa, verici herhangi bir sinyal iletmez (Radosevic vd., 2014). (Radosevic vd., 2014) 'de açıklandığı gibi, güvenilir ve enerji verimli su altı akustik iletişiminin sağlanması, temel olarak

uyarlamalı bir fiziksel katmanın tasarımına ve geliştirilmesine dayanır. Bu nedenle, veri oranlarını ve modülasyon şemalarını kanal koşullarına uyarlayan sualtı akustik modemler, hem fiziksel hem de MAC katmanlarında kanal kapasitesini ve iletişim verimliliğini en üst düzeye çıkarmanın temel çözümünü oluşturur. Sualtı akustik modemler, İkili Faz Kaymalı Anahtarlama (BPSK), 8 Faz Kaymalı Anahtarlama (8-PSK), 16 Faz Kaymalı Anahtarlama (16-PSK), 32 Faz Kaydırmalı Anahtarlama (32-PSK) gibi mevcut modülasyon türleri arasında en uygun modülasyonu seçebilir (Radosevic vd., 2014).

Güvenilir iletişim sağlamak için, en kötü durumdaki kanal koşulları için uygun modem parametreleri seçilmelidir; bununla birlikte, bu genellikle pratik olarak mümkün olandan daha düşük veri hızlarında iletişim sağlar. Bu durum, sualtı akustik modemlerinin yüksek iletim gücü nedeniyle, daha düşük bir veri hızı, bit başına tüketilen enerjide önemli bir artışa yol açar. Doppler etkisi, sualtı akustik iletişim sistemlerinin tasarımında da önemli bir rol oynar. Bunun yanı sıra, sualtı akustik kanallarında yüksek SNR değerleri elde etmek oldukça zordur. Öte yandan, sualtı akustik iletişimde güvenilirlik ve spektral etkinliğin, iletişim bağlantılarında zamanla değişen koşullar altında en uygun fazlalık tahsisi önerilerek birlikte ele alınabileceği gösterilmiştir. Ek olarak, zamanı tersine çevirme ve pasif faz birleştirme teknikleri, (Stojanovic ve Freitag, 2013; Shu vd., 2016) 'te açıklandığı gibi performans iyileştirmesi için yararlı olabilir.

Kablosuz iletimin yayın niteliğinden yararlanan işbirlikçi veri iletişimi, mekânsal çeşitliliği dağıtılmış bir şekilde gerçekleştirebilir. Bu ihtiyaca değinmek için, işbirlikçi iletimin fiziksel katman yönlerine odaklanan sualtı akustik iletişimine ilişkin genel bir bakış (Al-Dharrab, Uysal, ve Duman, 2013)'da sunulmuştur. Ancak, düşük ses hızı nedeniyle, işbirlikçi sualtı akustik iletişim sistemlerinde, coğrafi olarak dağılmış birimlerden alınan sinyaller arasında önemli ölçüde gecikme yaşayabilir. Literatürde kanıtlandığı gibi, protokol yığınının farklı katmanlarında iyi tanımlanmış bir dizi işlevle çeşitli sistemlerin ve uygulama gereksinimlerinin uyarlanması ve tatmin edilmesinde esneklik önemli olduğundan, modüler yapılar, ortaya çıkan protokol tasarımlarının ve geliştirmelerin dağıtımı ve platform bağımsızlığı için taşınabilirliğin sağlanmasıyla farklı katmanlarda gerçek zamanlı yeniden yapılandırma sağlayarak başarılı olabilirler (Demirors vd., 2015).

3.4 Konum Farkında Katmanlar Arası İletişim Ve Fırsatçı Spektrum Erişim (Kİ-FSE) Sisteminin Geliştirilmesi

Sualtı akustik kanalındaki yere, zamana ve frekansa bağlı sualtı iletişim kaynaklarının etkin bir şekilde kullanımını hedefleyen katmanlar arası iletişim ve fırsatçı spektrum erişim (Kİ-FSE) platformunun geliştirilmesi ve tasarlanması projenin önemli adımlarından birisidir. Kİ-FSE platformunu gerçekleştirebilmek için öncelikle, kablosuz sualtı algılayıcı ağlarında değişik katmanların sorumluluk ve işlemlerinin bir listesi çıkarılmıştır. Bu, ortak

sorumlulukların ve işlemlerin ortaya konması ve katmanlar arası iletişim sisteminin işlemlerinin ana hatlarıyla belirlenmesini sağlayacaktır. Bu alt adımın hemen ardından ağ kapasite ve yoğunluğu, düğüm sayısı, ağ düzenlemeleri, gönderici güç ayarı, ağ sıklığı durumları, fiziksel kanal parametreleri ve uygulama hedefleri gibi kablosuz algılayıcı ağların temel belirteçlerini matematiksel düzleme taşıyacak bir çerçeve modelinin tasarım ve geliştirilmesine başlanılmıştır. Bu çerçeve model, erişim, hata ve sıklık kontrolü gibi temel protokol işlevlerini göz önünde bulundurarak; enerji kullanımı, ağ ve kanal kapasiteleri, veri aktarımı güvenilirliği gibi parametrelerin alt ve üst sınırlarına bağlı eniyileştirme sisteminin temellerini oluşturacaktır. Son alt adım ise katmanlar arası protokolün detaylandırılması ve parametrelerinin belirlenmesi olacaktır.

Bu aşamada, ilk olarak literatürde kablosuz sualtı algılayıcı ağ uygulamaları için geliştirilmiş katmanlar arası iletişim yöntemleri incelenerek mevcut protokollerinin farklı performans kriterlerine göre karşılaştırmalı sınıflandırılması yapılmıştır. Bu inceleme sonucunda, konum farkında katmanlar arası iletişim ve fırsatçı spektrum erişim (Kİ-FSE) sisteminin tasarımına başlanmıştır. Bu bağlamda, sualtı ortamında ağ kapasite ve yoğunluğu, düğüm sayısı, ağ düzenlemeleri, fiziksel kanal parametreleri ve uygulama hedeflerini dikkate alan yönlendirme algoritması üzerine odaklanılmıştır.

Sualtı kablosuz algılayıcı ağlarının ve özellikle sualtı akustik algılayıcı ağlarının gerçek saha uygulamalarının başarıyla gerçekleştirilebilmesi için enerji etkin iletişim yaklaşımlarının önemli olduğu bir gerçektir. Bu bağlamda tıkanıklıklarını önüne geçmek için genişletilmiş tampon bellek kullanımı, olası kümeleme ve yönlendirme hataları yaşanması durumlarının yönlendirme algoritmasında göz önünde bulundurulması, düşük gecikmeyle yolların tekrar oluşturulması güvenilir veri teslimatı için enerji tüketimi hususları önemlidir. Dolayısıyla bağlantı kalitesi farkındalığı sağlayan kuyruk tabanlı spektrum kümelemesine dayalı yönlendirme protokolü geliştirilmiştir. Geliştirilen yönlendirme protokolünün ana bileşenlerinden birisi olan enerji etkin spektrum kümeleme algoritması değişken kalitede bağlantılar üzerinden bile güvenilir veri toplama sağlayabilmektedir. Bu algoritmada, ağ genelinde enerji yükü dağılımının orantılı olabilmesi için düğümlerin bağlanabilirliklerini dikkate alan enerji etkin küme başı seçimi algoritması önemli bir rol oynamaktadır. Geliştirilen enerji etkin yönlendirme algoritması ağaç benzeri bir yapıya dayalı olup sualtı akustik algılayıcı ağlarında güvenilir veri toplama gerçekleştirilebilmesi için yenilikçi bir yaklaşım sergilemektedir. Geliştirilen kümeleme yaklaşımı, uzun yıllardır eniyileme ve yerel uygunluk problemlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan meta sezgisel yaklaşımların bir formu olan ve hem teorik hem de pratik çalışmalarda çok iyi sonuçlar veren evrimsel algoritmalara [14, 15] dayalıdır. Evrimsel algoritmalarda, uygunluk fonksiyonu kalitesini ölçümünden sorumlu olduğundan en iyi kaliteye sahip olanın başlangıç popülasyonunun çözümü olarak seçilmesi

olasıdır. Sahip oldukları üstünlüklerle evrimsel algoritmalar sualtı ortamları gibi oldukça değişken ve öngörülemeyen ortamlara ilişkin karmaşık problemlerin çözümü için uygun çözümler sunmaktadır.

Sualtı akustik algılayıcı ağının operasyonel ömrünün maksimize edilmesi için seçilen yol üzerindeki düğümlerin toplam iletişim gücünün azaltılması ve düğümler arasında yükün dengelenmesi önemlidir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen yüksek kararlı kümeleme mimarisi gereksiz tekrar gönderimleri ve gecikmeyi azaltmakta, sualtı akustik algılayıcı ağındaki enerji dengelemesini sağlayabilmek için kalan enerjiyi ise en iyi seviyede tutmayı amaçlamaktadır. Dağıtık bir mimariye sahip olması nedeniyle bu yaklaşım oldukça zor koşullara sahip sualtı ortamında bile veri trafiği yükünün başarılı bir şekilde dengeli dağılımını gerçekleştirebilmektedir. Literatürdeki yaklaşımlarla kıyaslandığında önerilen yaklaşım hem çok daha az enerji tüketmekte hem de başarılı paket teslimatı için iletişim gecikmesini azaltmaktadır. Önerilen yaklaşımın literatürdeki yaklaşımlara göre üstünlük sergilemeyen tek özelliği kullanılan en kısa kuyruk stratejisinden kaynaklanan işlem yükü fazlalığıdır.

Geliştirilen yönlendirme yaklaşımında ağ modeli yönsüz graf olarak modellenmektedir. $g(v, e)$ yönsüz grafında \mathbf{w} ağırlığı, $\mathbf{v} \{Sn_1, Sn_2, \dots, Sn_n\}$ ile gösterilen sualtı algılayıcı düğümler setinin köşeleri, $e = \dot{i} \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ ise düğümler arasındaki tüm bağlı kenarlar setini temsil etmektedir. Yaklaşımımızda, algoritmanın tasarımını kolaylaştırmak için 3 boyutlu ağ 2 boyuta dönüştürülmektedir. Ağ modeli \mathbf{m} katmandan oluşmakta olup, ağda veri toplayıcı (sink), düğümler arasında veri aktarımından sorumlu olan röle düğümler ve algılayıcı düğümleri bulunmaktadır. Tüm algılayıcı düğümler ve röle düğümler farklı derinlik seviyelerine rastgele olarak yerleştirilmektedir. Bütün algılayıcı düğümleri sualtı olayları hakkında veri toplama ve topladıkları veriyi veri toplayıcıya röle düğümler aracılığıyla aktarmadan sorumludur. Röle düğümlerin görevi hedefe ulaşan yolu belirlemek ve paketi yol üzerindeki sonraki düğüme iletmektir. Bütün röle düğümleri sakla ve ilet yaklaşımını kullanmaktadır. Diğer düğümlerden farklı olarak veri toplayıcı hem akustik modem hem de radyo modeme sahip olup, sualtı düğümlerle haberleşebildiği gibi kıyıda bulunan merkez nokta ile de haberleşebilmektedir. Yaklaşımımızda kullanılan ağ modelinde her bir algılayıcı düğümün hem kendi konumunu hem de yüzeyde bulunan veri toplayıcının konumunu bildiği kabul edilmektedir. Su ile sürüklenmeleri haricinde düğümler hareketsizdir. Akustik kanal simetrik olup, belli bir Öklit mesafesi ya da Sinyal-Gürültü oranı için Sn_i den Sn_j ye aktarım için gereken enerji ile Sn_j den Sn_i ye aktarım için gereken enerji eşittir. Bütün düğümler iletim gücünü dinamik olarak ayarlayabilir. Veri toplayıcı üstün özelliklere sahip bir düğüm olup çarpışma olmaksızın birçok paketi aynı anda alabilir. Düğümler arasında paket çarpışmasının önüne geçmek için Carrier Sense Multiple Access (CSMA) mekanizması varsayılmaktadır.

Her bir düğüm bir küme başı setinin üyesi olabilmektedir. Time Division Multiplex Access (TDMA) mekanizması ile her bir kümeye farklı zaman aralıkları tahsis edilmektedir.

Başlangıçta algılayıcı düğümlerin dağıtımından sonra yüzeyde bulunan şamandıralar kümeleme sürecini başlatmak için iletişim mesafelerindeki komşu düğümlere Hello mesajı gönderir. Hello mesajı gönderici düğüm kimliğini ve kalan enerjisi içerir. Bu mesajı alan her bir düğüm gönderici düğüme bir alındı mesajı gönderir. Alındı mesajında alıcı düğümün kimliği, kalan enerjisi, alınan sinyal gücü ve gönderici düğümlerle arasındaki mesafe bilgisi bulunur. Eğer alındı mesajı belirli bir t_i süresinde alınamazsa gönderici düğüm maksimum 2 mesaj daha gönderir. Eğer birden fazla Hello mesajı alınırsa ilki dışındakiler düşürülür. Her bir çevrimde bu süreç tekrar eder.

Gerçekleştirilen kümeleme algoritması algılayıcı düğümlerini benzerlik değerlerine göre çoklu kuyruklara ayırmak için şamandıralar tarafından koşturulmaktadır. Daha sonra rasgele sayı üretici kullanılarak başlangıç popülasyonu oluşturulur ve her bir düğüm uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirilir. Mevcut popülasyonda σ_0 yeterli enerjisi olmayan işlevsiz düğümleri, σ_1 ise aktif düğümleri göstermektedir. Her bir düğüm uygunluk seviyesine göre azalan sırada uygun kuyruklara yerleştirilir. Kuyruk çapı D uzunluğu ise L kabul edilirse kuyruk sisteminin enerji tüketimi nümerik olarak (38) ile ifade edilebilir.

$$Q_{cost} = cost \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \left(\sum_{QDC} C_{1i}(D_i) L_i + \sum_{QPC} C_{2i}(P_i) + \sum_{QOC} C_{3i}(O_i) + \sum_{QRC} C_{4i}(R_i) \right)^{Q_j} \quad (38)$$

(38)'de QDC , QSC , QPC , QOC ve QRC sırasıyla kuyruğun tasarım, depolama, işlem, ek yük ve onarım maliyetini göstermektedir. $C_{1i} L_i$ uzunluğuna ve D_i çapına sahip kuyruğun tasarım maliyetini, $C_{2i}(P_i)$ adet düğüme sahip i th kuyruğun işlem yükünü, $C_{3i}(O_i)$ i th kuyruğun ek işlem yükünü, $C_{4i}(R_i)$ ise bir algılayıcı düğümünde sorun olduğunda kuyruğun tekrar oluşturulmasının maliyetini göstermektedir. Nihai amaç, kümeleme algoritmasındaki tüm kuyruk sisteminin enerji tüketim maliyetini minimum yapmaktır.

$$Fit(cost)_{C_i} = \min \left(\sum_{i=1}^k Q_{cost}^i + C_i T_x + R_x \right) \quad (39)$$

Denklemden Q_{cost}^i i th. kuyruğun maliyetini, C_i ise küme seti oluşturulması için gereken gönderim ve alma enerjisinin maliyetini göstermektedir. Daha sonra, sonlanma kriteri tam kümeleme çözümünü gerçekleştirene kadar seçim, geçiş ve mutasyon operatörlerinin her bir düğüme uygulanması döngüsü tekrar eder. C_j küme seti içinden belirli bir C_i kümesinin R_i bölgesinde en yüksek ağırlıkla seçilmesi (40) ile ifade edilebilir.

$$\rho_{C(i)} = Fit_{C_i} / \sum_{j=1}^n Fit_{C_j} \quad (40)$$

S_{ni} düğümünün C_i kümesinde minimum gecikme ve kalan enerjiyle yüksek ağırlıkla seçilmesi (41) ile ifade edilebilir.

$$\rho_{S_{ni}} = Fit_{S_{ni}} / \sum_{j=1}^n Fit_{S_{nj}} \quad (41)$$

Tüm ağda enerji tüketimini azaltmayı amaçlayan yaklaşımımız sualtı akustik algılayıcı ağında küme başı ataması yaparken hem küme içi hem de kümeler arası hesaplamalarda harcanan enerjinin azaltılmasını amaçlar.

4. BULGULAR

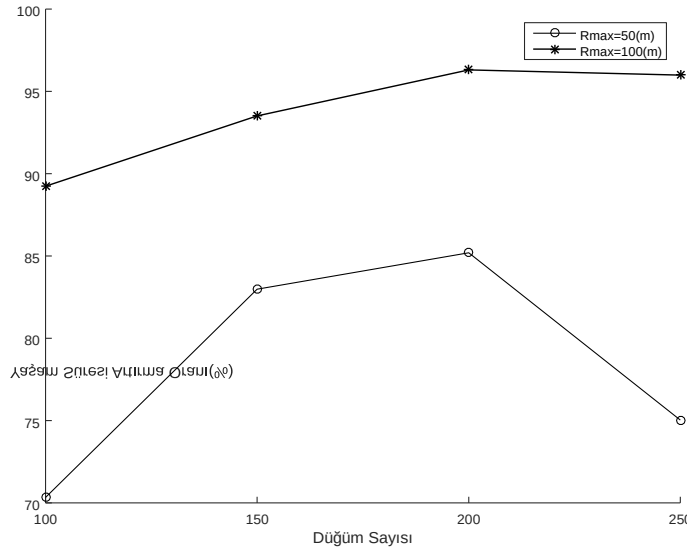
4.1 Hiyerarşik Ağ Mimarileri ve Eşgüdümlü Kaynak Yönetimi İle İlgili Performans Değerlendirmeleri

Bölüm 3.1' de detayları verilen algoritmada, bir düğüm aldığı paketlerin hepsini belirli tek bir düğüme iletmek yerine, trafiğin durumuna göre farklı düğümlere iletebilmektedir. Ayrıca kaynak düğümler birbirinden ayrılmaktadır. Diğer bir deyişle, farklı kaynak düğümlerden gelen paketler için farklı yönlendirme kararları kullanılabilir. Bu iki özellik hazırlanan algoritmanın esnek bir şekilde çalışabilmesini sağlamaktadır. Geliştirilen algoritmanın performans karşılaştırması yapılabilmesi için ayrıca sualtı kanal koşullarını dikkate alan en kısa yol algoritması tasarlanmıştır. Bu en kısa yol algoritması ağdaki geçilen düğüm sayısını en düşük yapacak şekilde değil, düğümler arasındaki mesafe dikkate alınarak, kaynak düğümden alıcıya kadar en kısa mesafe bulunacak şekilde tasarlanmıştır. Düğümler arasındaki mesafeler ağ oluşturulurken belirlenmiştir. İki düğüm arasındaki gönderim gücü, gönderici algılayıcının gönderim menzili (R_{max}) içindeki diğer algılayıcılar ile aradaki mesafeye göre hesaplanmaktadır. Bundan dolayı daha kısa mesafe, daha az gönderim gücü gerektirmektedir. IBM Cplex kütüphanesi, düğümler arasındaki mesafe bilgileri kullanılarak, tüm algılayıcılardan alıcıya olan en kısa mesafeyi bulmak için kullanılmıştır.

Sualtı algılayıcı ağlarında düğüm ömrü, algılayıcı düğümlerin pil ömrü ile sınırlıdır. Eğer pil biterse yenisiyle değiştirilmeli ya da şarj edilmelidir. Ancak sualtı koşulları ve uygulama senaryoları göz önüne alındığında sualtı algılayıcı ağlarda bu işlem oldukça maliyetli ve zor bir işlemdir. Pil ömrünü uzatacak tedbirler almak ağ ömrü için oldukça önemlidir. Algılayıcı üzerinde enerji üretim metotları kullanmak, algılayıcının pil ömrünü artıracaktır. Çünkü üretilen enerji birim zamanda algılayıcının pilinden harcanan enerji miktarını azaltacaktır. Bu çalışmada hidrokinetik türbin, hidrofön ve piezoelektrik manivela enerji üretim metotları incelenmiştir.

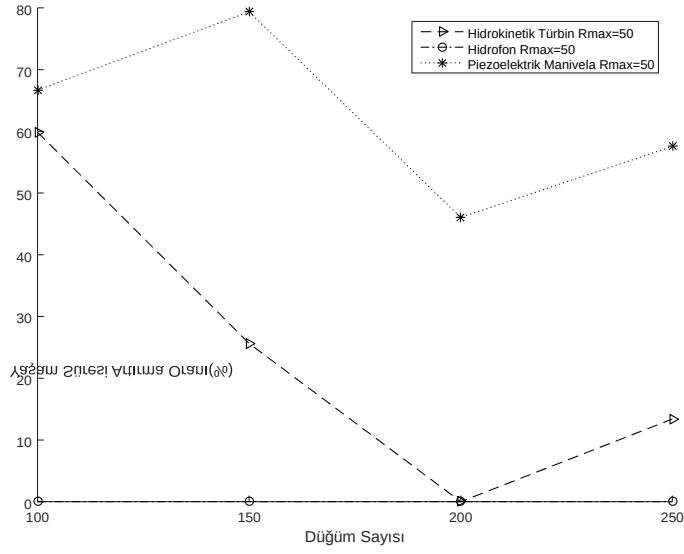
Şekil 6, önerilen algoritma ile en kısa yol algoritmalarının enerji üretimi olmadan yapılan benzetim çalışmasının sonuçlarını göstermektedir. Şekilde, önerilen algoritmanın, en kısa yol algoritmasına oranına göre yaşam süresinin ne kadar arttığının yüzdesi ifade

edilmiştir. Önerilen algoritma, en kısa yol algoritmasına karşı genel bir üstünlük sağlamıştır. Bunun nedeni, önerilen algoritmanın en az enerji gerektiren yönlendirmeyi araştırmasına karşın, en kısa yol algoritmasının ise uzaklık olarak en kısa yolu bulmasıdır. Çünkü en kısa mesafe her zaman en az enerji gerektiren mesafe değildir. Özellikle algılayıcı düğümlerin daha uzak mesafelere ulaşmak için harcayacağı enerji, mesafenin artışıyla doğrusal orantılı değil, üstel olarak artmaktadır. Yani mesafeyi kısaltmak için daha uzak bir düğüme ulaşmaya çalışmak, harcanacak enerjiyi daha fazla artırabilmektedir. Bundan dolayı önerilen algoritma enerjiyi dikkate aldığı için, yönlendirme konusunda enerji verimliliği açısından daha doğru kararlar vermektedir. Bundan dolayı önerilen algoritma $R_{max} = 100m$ için en kısa yol algoritmasına göre %90 civarında daha uzun ömür sağlamaktadır.



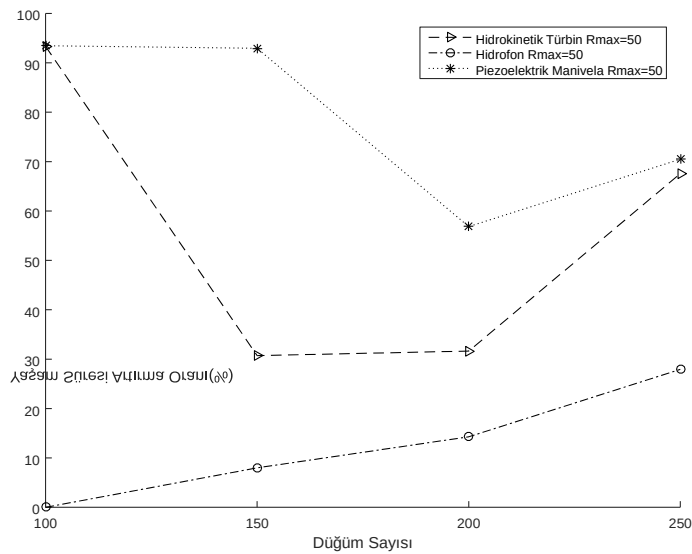
Şekil 6. Önerilen yönlendirme algoritması ile en kısa yol algoritması enerji üretimsiz karşılaştırma ($BER=1e-6$).

İki algoritmanın performansları karşılaştırıldıktan sonra, araştırılan enerji üretimi yöntemleriyle birlikte nasıl bir performans sergileyeceklerinin incelemesi yapılmıştır. Şekil 7, en kısa yol algoritmasının, enerji üretim yöntemleri ile birlikte çalıştırıldığında ağ ömründeki artış miktarının oranını göstermektedir. Şekilde, en kısa yol algoritmasının, enerji üretim yöntemleriyle ayrı ayrı olarak, enerji üretimi olmayan duruma göre ağ ömründe % olarak ne kadar artış sağladığı gösterilmektedir. En kısa yol algoritması yönlendirmede harcanan enerjiyi değil, düğümler arasındaki uzaklığı dikkate aldığı için, az enerji üretimi olan yöntemlerde yeterince faydalanamamaktadır. Görülebileceği üzere hidrof fon yöntemi, enerji üretimi olmayan duruma göre belirgin bir fayda sağlayamamıştır. Çünkü bu yöntem diğer yöntemler içinde enerji üretiminin en düşük olduğu yöntemdir.



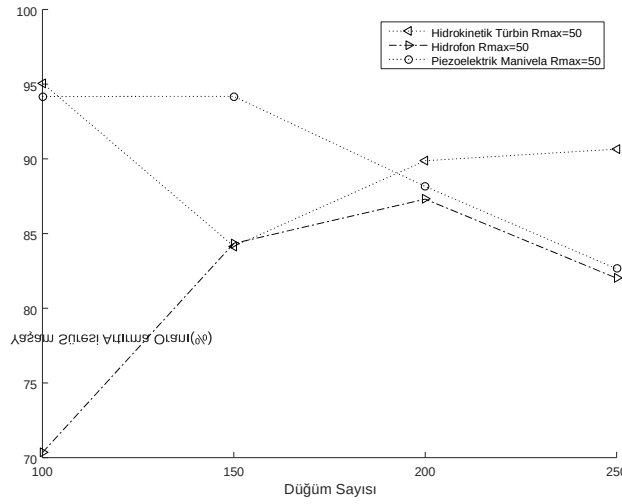
Şekil 7. En kısa yol algoritması üzerinde enerji üretim yöntemlerinin etkisi (Rmax=50m, BER=1e-6).

Şekil 8, önerilen yönlendirme algoritmasının, enerji üretim yöntemleriyle birlikte çalıştığında ağ ömründeki artış miktarının oranını göstermektedir. Yani enerji üretim yöntemi kullanıldığında ağ ömrünün aynı algoritmanın enerji üretim yöntemi kullanılmadan elde ettiği ağ ömrüne göre % olarak ne kadar artış sağladığı görülmektedir. Önerilen yönlendirme algoritması, yönlendirme tercihi yaparken kullanılacak enerjiyi dikkate aldığı için, sistemde üretilen enerjinin en iyi şekilde kullanılması sağlanmaktadır. Örneğin, en kısa yol algoritmasında ağ ömrü üzerinde hiçbir değişiklik sağlamayan hidrofon yöntemi ile %30'a varan artış sağlanmıştır.



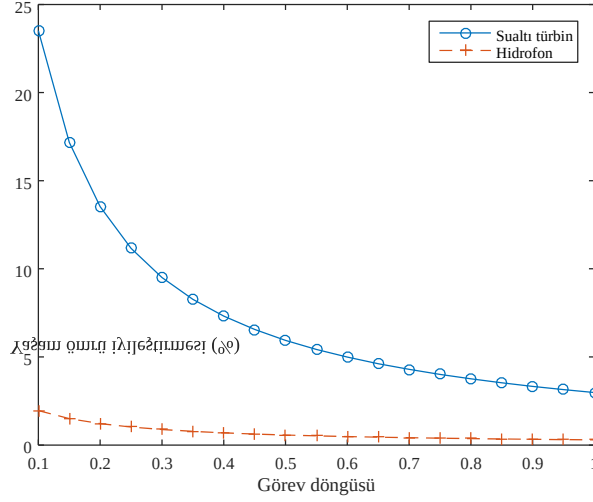
Şekil 8. Önerilen yönlendirme algoritması üzerinde enerji üretim yöntemlerinin etkisi (Rmax=50m, BER=1e-6).

Şekil 9, önerilen yönlendirme algoritmasının ve en kısa yol algoritmasının enerji üretim yöntemleri ile verdikleri sonuçların oranını göstermektedir. Yani önerilen yönlendirme algoritmasının herhangi bir enerji üretim yöntemiyle elde ettiği ağ ömrü ile aynı enerji üretim yöntemiyle en kısa yol algoritmasının elde ettiği ağ ömrünün % olarak karşılaştırılmasıdır. Görülebileceği üzere, önerilen yönlendirme algoritması, en kötü durumda bile en kısa yol algoritmasının sağladığı ağ ömründen %70 daha fazla ağ ömrü sağlamaktadır.



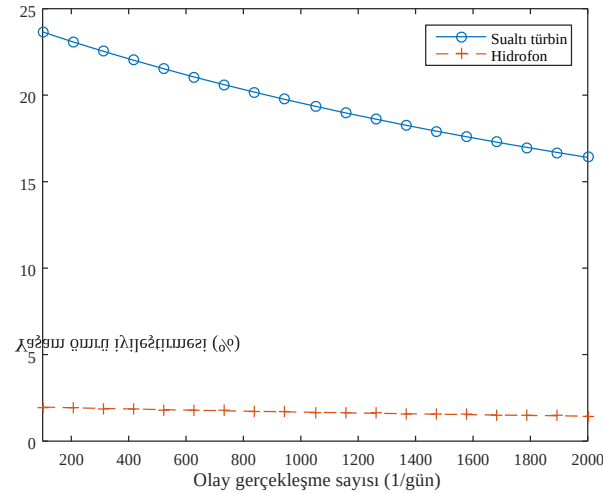
Şekil 9. Önerilen ve en kısa yol algoritmalarının enerji üretimi yöntemleri ile gösterdikleri performans oranı (Rmax=50m, BER=1e-6).

Sonuç olarak, sistemin daha verimli ve etkin çalışabilmesi için kullanılan yöntemlerin çeşitli olması, sistemin kalitesini daha fazla artıracaktır. Bu göz önünde bulundurularak, tasarlanan sistemde hem verimli bir yönlendirme algoritması hem de algılayıcıların pil ömrünü uzatacak enerji üretim yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Benzetim sonucunda elde edilen grafiklerden görülebileceği gibi ağın ömrü önemli derecede artmıştır. Ayrıca, performans değerlendirme çalışmalarında enerji hasatlama yöntemleri kullanılarak yaşam süresine yapılan katkı incelenmiştir. Şekil 10'da ağ düğümü 5 sn'lik döngü periyodunu farklı görev döngüsü değerlerinde tamamladığında hasatlama yöntemlerinin yaptığı katkı görünmektedir. Uyku süresinin daha uzun olduğu düşük görev döngüsü değerlerinde ortalama güç tüketimi daha az seviyede olduğundan dolayı, hasatlama yöntemlerinin katkısı bu değerlerde daha yüksek olmaktadır.



Şekil 10. Görev döngüsü ile hasatlama yöntemlerinin yaşam ömrüne katkısı.

Şekil 11'de ise düğümün uyuma-uyanma döngüsü yapması yerine, ölçüm yapılan değerlerde önemli bir değişim olup olmadığını takip eden, olması durumunda düğümü uyandıran az güç tüketimine sahip ek donanım kullanılması durumunda hasat yöntemlerinin sağladığı katkı görünmektedir. Benzer şekilde, yüksek olay gerçekleşme sayısı ana donanımın uyanık bulunması gereken toplam süreyi uzattığı için ortalama enerji tüketimi artmakta, hasatlamanın yaptığı katkı azalmaktadır. Sonuç olarak, sualtı enerji hasatlama yöntemlerinin ağır ömrünün uzatılmasında önemli bir potansiyele sahip olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 11. Yardımcı donanım kullanımı ile hasatlama yöntemlerinin yaşam ömrüne katkısı.

4.2 Sualtı Akustik Ağları İçin Geliştirilen Konumlandırma Yöntemi ile İlgili Performans Değerlendirmeleri

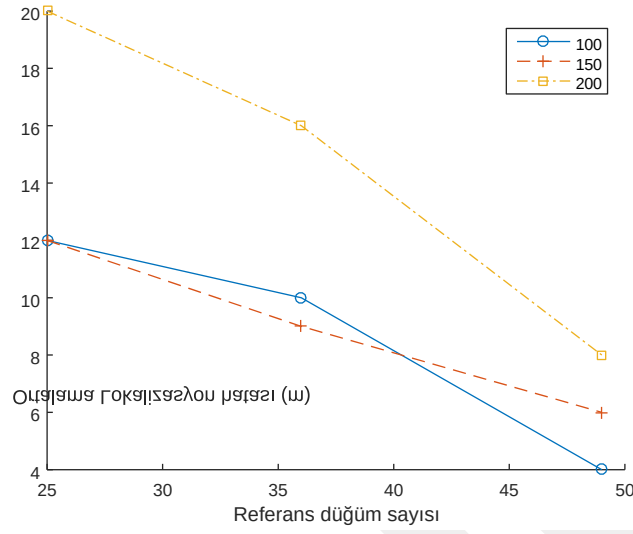
Bu aşama kapsamında sualtı kablosuz akustik algılayıcı ağ düğümlerinin konumunun belirlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, belirlenen konum bilgilerinin içerdiği

hata oranı, konumlama için harcanan enerji miktarı ve düğümlerin ne kadarının konumlandırma kapsamına girdiği incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, 540 x 540 metrelik iki boyutlu bir alanda 200 adet hareketli düğüm ve değişken sayıda sabit referans düğümler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Konumlandırmanın iki boyutta gerçekleştirilmesinin sebebi sualtı ortamında üçüncü eksen olan derinlik değerinin basınç ölçümü yardımıyla kolaylıkla gerçekleştirilebiliyor olmasıdır.

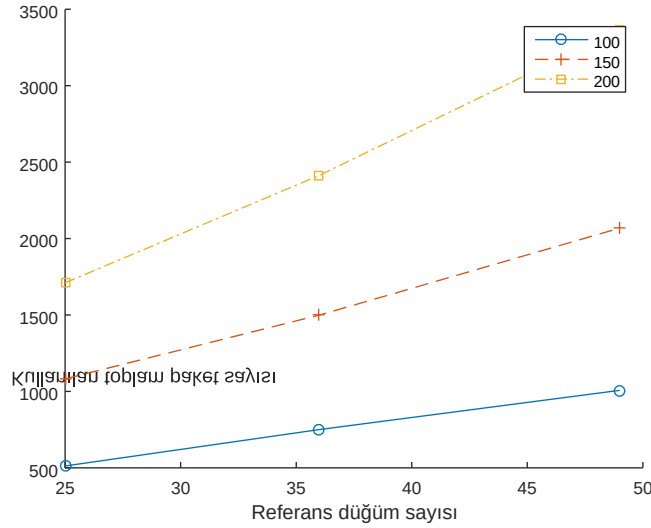
Gerçekleştirilen performans değerlendirmelerinden elde edilen sonuçlar Şekil 12 ve Şekil 13'de gösterilmektedir. Grafiklerde gösterilen kullanılan minimum referans düğüm sayısı ve bu düğümlerin sahip olduğu maksimum iletişim uzaklığı hareketli sensör düğümlerinin tüm hareket alanını kapsayacak şekilde seçilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, referans düğüm sayısının sensör düğümlerine oranının artması beklenildiği şekilde konumlama hatasını önemli ölçüde düşürmektedir. Bu sonuçların elde edilmesinde sırasıyla 25, 36 ve 49 referans düğüm noktası ile 200 hareketli algılayıcı düğüm kullanılmıştır.

Referans/algılayıcı düğüm oranına ek olarak, grafiklerde görülmektedir ki referans düğümlerin maksimum iletişim uzaklığının artırılması hatanın da artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, hareketli sensörlerin konumlandırılmasında bu sensörleri en küçük iletişim uzaklığına sahip, mümkün olan en fazla sayıda referans düğüm kullanılması en iyi sonuçları vermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, bu durum 4 m'lik ortalama hata değeri ile konumlama sağlayan 49 referans düğüm (yaklaşık 0.25 algılayıcı/referans düğüm oranı) ve 100 m referans düğüm iletişim uzaklığı kullanılması durumunda gerçekleşmektedir.

Konumlandırma hatasına ek olarak, konumlandırma için transferi gerçekleştirilen paket sayısı değerleri Şekil 13'de gösterilmektedir. Lokalizasyon için kullanılan paket sayısı referans düğüm sayısı ve referans düğümlerin maksimum iletişim uzaklığı ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Daha fazla paket kullanımının daha fazla enerji gerektireceğinden dolayı, aşağıdaki grafiklerdeki değerler de önceki grafiklerden elde edilen sonuçları destekler niteliktedir. Dolayısıyla lokalizasyon tüm düğümleri kapsayacak en az sayıda ve en az iletişim uzaklığına sahip referans düğümler aracılığıyla gerçekleştirilmelidir. Sonuç olarak, uygulanan hareketli düğümleri konumlandırma tekniği sualtında 4 metreye kadar düşebilen ortalama hata değerine ulaşabilmektedir.



Şekil 12. 100, 150 ve 200 m iletişim uzaklığı ile lokalizasyon hatası.



Şekil 13. 100, 150 ve 200 m iletişim uzaklığı ile lokalizasyon paketi sayısı.

4.3 Sualtı Akustik İletişimde Kullanılabilecek Modülasyon Tekniklerinin Performans Analizi

Bu bölümde, çeşitli sualtı modülasyon şemaları arasında adil bir karşılaştırma yapmak için proje çalışmalarında kullanılan yöntem sunulmaktadır. Gerçekleştirilen benzetim çalışmasında, HAM.NODE adlı ticari, modüler bir hidro akustik modem kullanılmıştır. Benzetim çalışmasında kullanılan parametreler Tablo 7'de listelenmiştir. Benzetim çalışmamızın ana amacı, farklı modülasyon şemaları için bir su altı ağının en uygun iletim gücünü belirlemektir. Benzetim çalışmasında, BER, derinlik ve mesafe girdi olarak kullanılmakta, çıktı olarak en uygun aktarım gücü seçilmiştir.

Sualtı ortamının çeşitli derinlik ve mesafeleri için absorpsiyon katsayısı değerlerini bulmak için (Felemban ve Felemban, 2013)'te de önerildiği gibi Ainslie ve McColm modelleri kullanılmıştır. Sualtı ortamlarındaki soğurma katsayısı (42) kullanılarak hesaplanabilir.

$$a(f) = y_1 \frac{f_1 \cdot f^2}{f_1 + f^2} + y_2 \frac{f_2 \cdot f^2}{f_2 + f^2} + y_3 f^2 \quad a(f) = y_1 \frac{f_1 \cdot f^2}{f_1 + f^2} + y_2 \frac{f_2 \cdot f^2}{f_2 + f^2} + y_3 f^2 \quad (42)$$

$$f_1 = 0.78 \left(\frac{S}{35} \right)^{1/2} \quad (43)$$

$$f_2 = 42 e^{\frac{T}{17}} \quad (44)$$

$$Y_1 = 0.106 e^{\frac{pH-8}{0.56}} \quad (45)$$

$$Y_2 = 0.52 \left(1 + \frac{T}{43} \right) \left(\frac{S}{35} \right) e^{-\frac{d}{6}} \quad (46)$$

$$Y_3 = 0.00049 e^{-\left(\frac{T}{27} + \frac{d}{17} \right)} \quad (47)$$

Burada S tuzluluk miktarını yansıtmaktadır. T, Celcius cinsinden sıcaklığı, d m cinsinden derinliği temsil eder ve pH ise asittir. Bu çalışmada pH 8'e ayarlanmış ve S de 35'e

ayarlanmıştır. $a(f) = y_1 \frac{f_1 \cdot f^2}{f_1 + f^2} + y_2 \frac{f_2 \cdot f^2}{f_2 + f^2} + y_3 f^2$

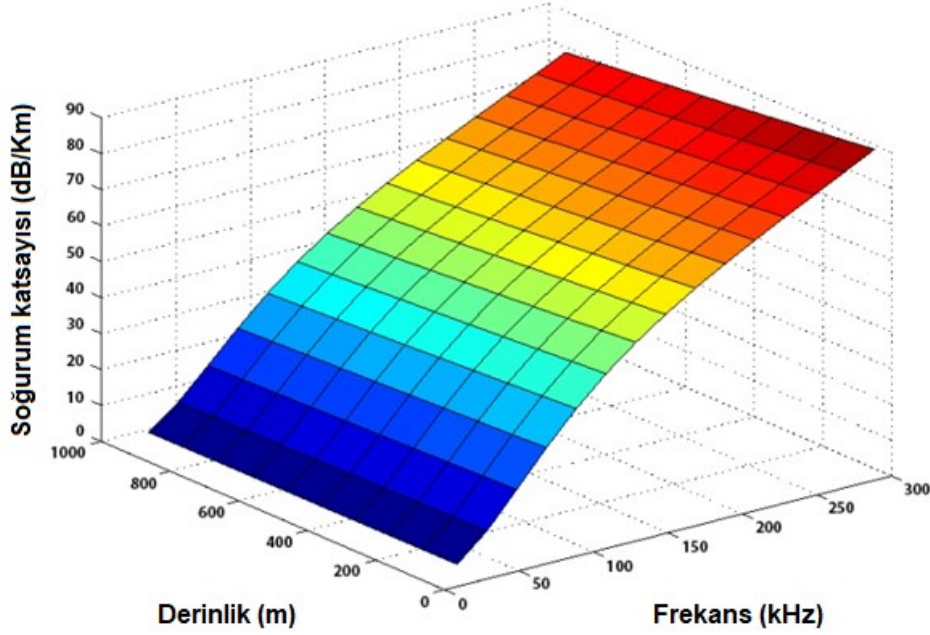
$$a(f) = \frac{0.11 f_2}{1 + f_2} + \frac{44 f_2}{4100 + f_2} + 3.0 \times 10^{-4} f^2 + 3.3 \times 10^{-3} \frac{dB}{km} (1)$$

Tablo 7. Benzetim çalışmasında kullanılan parametreler.

Parameter	Values
K	1.5
Gürültü bant genişliği (Bn)	1 KHz
Rüzgar hızı (w)	0 m/s
Taşıma aktivite faktörü (s)	0.5
Asitlik (pH)	8
Tuzluluk (S)	35 ppt
Veri hızı (R)	2 Kbps
Sıcaklık (T)	15 C ⁰
R _{max}	30 km
Bit hata oranı (BER)	10 ⁻⁷ , 10 ⁻⁶ , 10 ⁻³ , 10 ⁻¹
Derinlik	100, 300, 500, 1000 (m)
Mesafe	100, 300, 500, 1000 (m)
Frekans	0-200 KHz

Şekil 14'te gösterildiği gibi, sualtı ortamlarında emilim katsayısı, frekans artışıyla artar ve dolayısıyla su altı iletişimi için daha yüksek frekansların kullanımını sınırlar. Ayrıca derinlik

artışı ile emilim katsayısı azalır. Emilim katsayısı, iletişim frekansındaki artışla iletim kaybındaki artışı tetiklese de, düşük frekanslarda iletimi çok fazla etkilemez. Bu nedenle, düşük frekanslarda iletim kaybı üzerindeki mesafenin etkisi çok sınırlıdır. Ayrıca, derinlik artışı ile hem emilim kaybı hem de iletim kaybı azalır.

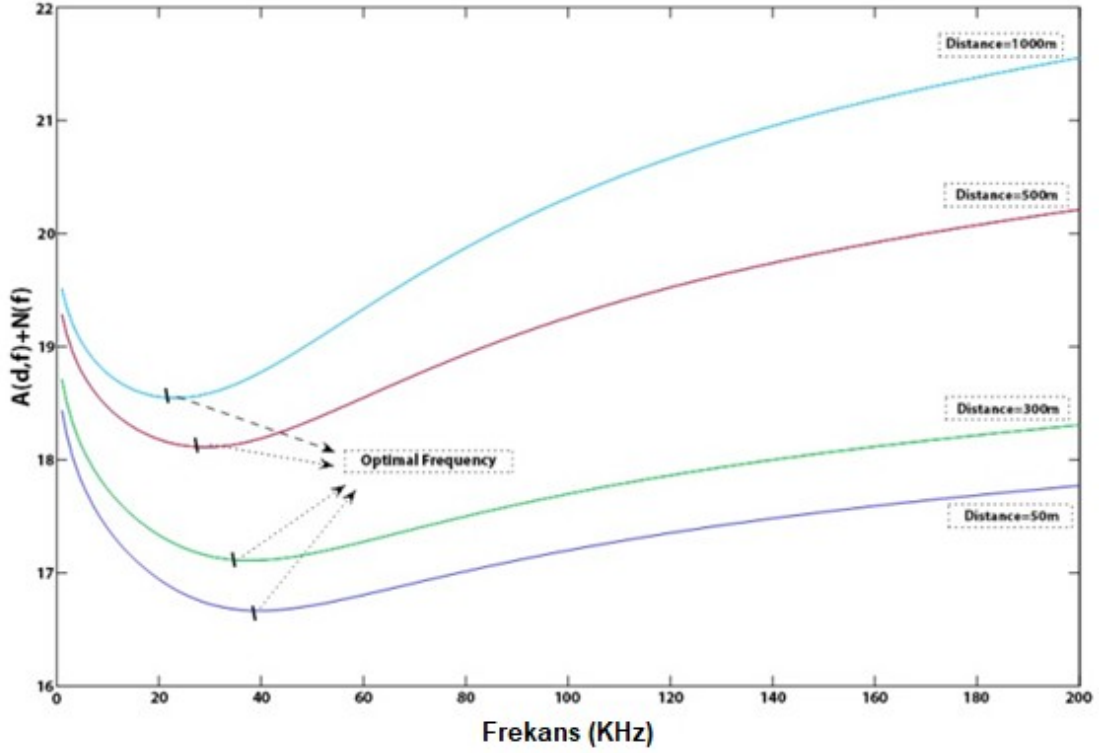


Şekil 14. Farklı derinliklerde soğurum katsayısı (dB/km), frekans (kHz) ve derinlik arasındaki ilişki.

$A(d, f)$, akustik iletişimde yol kaybı, su ortamından ve enerji yayılmasından kaynaklanan emilimden kaynaklanır. Yayılma sinyallerinin zayıflatılması esas olarak kurulan bağlantının mesafesine bağlıdır. Akustik enerjinin ısıya dönüşmesinden dolayı yüksek frekanslı sinyallerin emilim kaybına daha hassas olduğunu akılda tutmak gerekir. $A(d, f)$, iletim mesafesi d ve frekans f 'nin bir fonksiyonudur ve (48) kullanılarak hesaplanabilir.

$$A(d, f) = K \log(d) + \alpha(f) d 10^{-3} \quad (48)$$

$\alpha(f)$ 'nin su ortamının emme katsayısı olduğu ve K 'nin enerji yayılmasının neden olduğu yayılma faktörü olduğu durum. K için yaygın olarak kullanılan değerler, silindirik yayılma için 10, küresel yayılma için 20 ve pratik yayılma için 15'dir. Şekil 15'de, 100 metre derinlikte, 10^{-3} BER değerine sahip, 50, 100, 500 ve 1000 metre mesafedeki iletişim için AN çarpımı ($A(d, f) + N(f)$) görülmektedir. Kendi özelliğinden dolayı ortam gürültüsü, 20-40 KHz frekanslarında minimum değerlerine ulaşır. Bununla birlikte, akustik sinyaller en iyi 15-30 KHz'de sadece düşük frekanslarda yayılır. Bu nedenle, mevcut bant genişliği oldukça sınırlıdır.



Şekil 15. 100 m derinlikte farklı mesafe değerleri için $A(d,f)+N(d,f)$ (dB) ve frekans (kHz) arasındaki ilişki.

Bu çalışmada sualtı ortamının benzetimini yapabilmek için pasif sonar sistemi kullanılmıştır. Pasif sonar sistemi için ortam gürültüsünün güç spektral yoğunluğu (dB) desibel cinsinden (49) kullanılarak hesaplanabilir.

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_{th}(f) + N_w(f) \quad (49)$$

Denklemden N_t , türbülans kaynaklı gürültüyü temsil eder, N_s , yüzey-gemi gürültüsünü temsil eder, N , termal gürültü ve N_w kırılma dalgalarıdır (rüzgarla) ve şöyle elde edilebilirler:

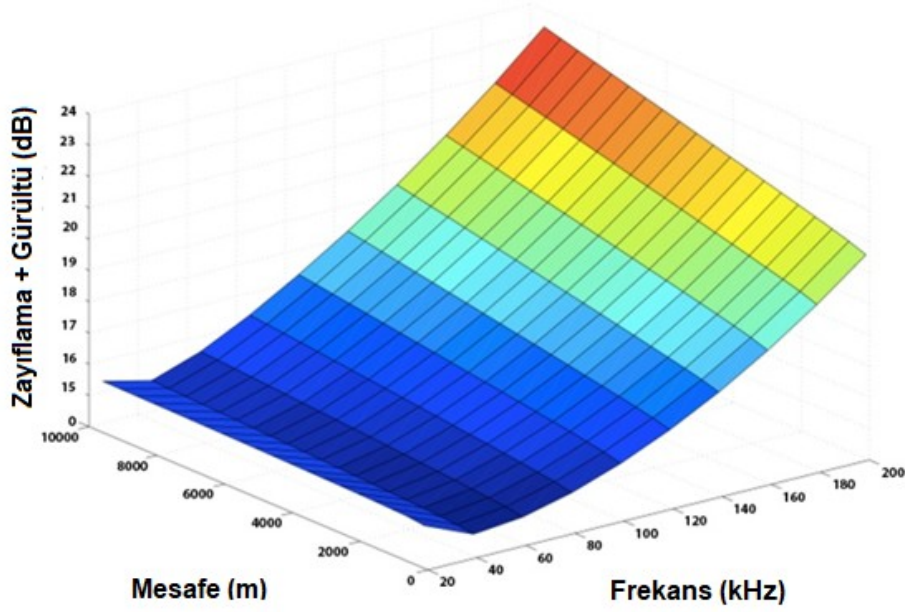
$$10\log(N_t(f)) = 17 + 30\log(f) \quad (50)$$

$$10\log(N_s(f)) = 40 + 20(S - 0.5) + 26\log(f) - 60\log(f + 0.03) \quad (51)$$

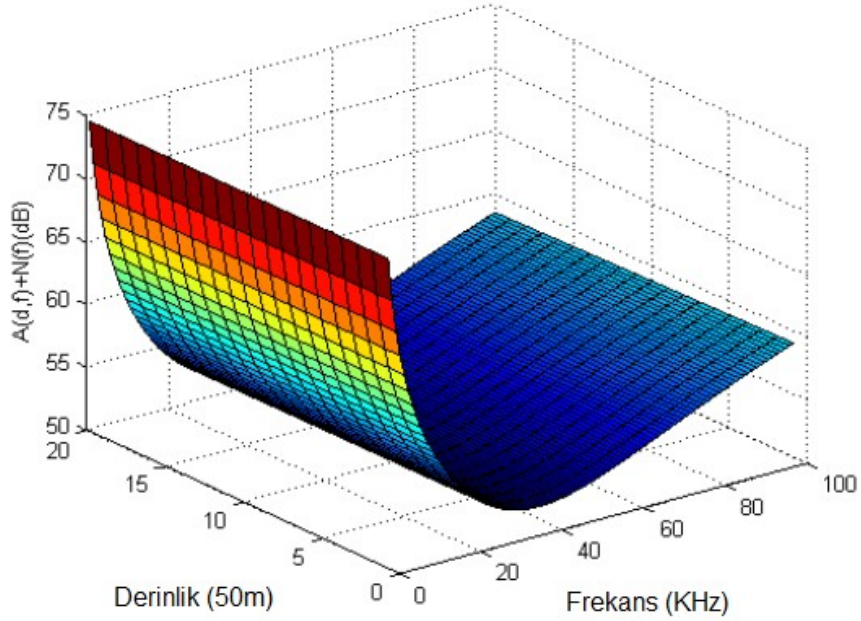
$$10\log(N_{th}(f)) = -15 + 20\log(f) \quad (52)$$

$$10\log(N_w(f)) = 50 + 7.5w^{1/2} + 20\log(f) - 40\log(f + 0.4) \quad (53)$$

Akustik dalgaların geometrik yayılması ve enerji yayılması, akustik iletişimde yol kaybı $A(d, f)$ 'nin ana nedenidir. Ek olarak, kabarcıklar, kayalar ve diğer su altı gövdeleriyle karşılaştıklarında akustik sinyaller dağılır. Şu önemlidir ki yol kaybı iletim aralığına bağlıdır. Akustik sinyalin daha yüksek zayıflaması, daha yüksek iletim kaybına yol açar, böylece iletişim kalitesi bozulur. Bunu daha iyi açıklamak için, AN çarpımının 3 boyutlu grafiği desibel (dB), mesafe (m) ve frekans (kHz) türünde Şekil 16'da gösterilmektedir. $A(d,f)+N(d,f)$ (dB), frekans (kHz) ve derinlik arasındaki ilişki ise Şekil 17'de gösterilmektedir.



Şekil 16. $(A(d, f) + N(f))$ sonucu ile mesafe (m) karşı frekans (KHz).



Şekil 17. $A(d,f)+N(d,f)$ (dB), frekans (kHz) ve derinlik arasındaki ilişki.

BER, iletişim kalitesini gösteren ana göstergedir ve 10^{-10} 'dan daha düşük tutulması beklenir. Farklı modülasyon teknikleri için (54), (55) ve (56) kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_b^{16QAM} = \frac{3}{2k} \text{erfc } \dot{\iota} P_b^{16QAM} = \frac{3}{2k} \text{erfc } \dot{\iota} \quad P_b^{16QAM} = \frac{3}{2k} \text{erfc } \dot{\iota} \quad (54)$$

$$P_b^{16QAM} = \frac{4}{k} * \left(1 - \frac{1}{8}\right) * 1 \operatorname{erfc} \dot{P}_b^{64QAM} = \frac{4}{k} * \left(1 - \frac{1}{8}\right) * 1 \operatorname{erfc} \dot{P}_b^{64QAM} = \frac{4}{k} * \left(1 - \frac{1}{8}\right) * 1 \operatorname{erfc} \dot{P}_b^{64QAM}$$

$$P_b^{64QAM} = \frac{4}{k} * \left(1 - \frac{1}{8}\right) * 1 \operatorname{erfc} \dot{P}_b^{M-PSK} = \frac{1}{k} 2Q \left(\sqrt{2} \gamma_s \sin \frac{\pi}{M} \right) \quad (55)$$

$$P_b^{QPSK,8PSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) P_b^{QPSK,8PSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) P_b^{QPSK,8PSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$$

$$P_b^{BPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (56)$$

P_b bit hata oranı olasılığını temsil eder, $k \log 2M$, $\gamma_s = E_s / N_0$ ve E_b / N_0 , gürültü başına güç spektral yoğunluk oranı için enerjidir ve (57) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\frac{E_b}{N_0} = SNR \frac{B_n}{R} \frac{E_b}{N_0} = SNR \frac{B_n}{R} \quad (57)$$

B_n, Hz cinsinden gürültü bant genişliğidir, R Kbps veri hızıdır ve SNR (58) kullanılarak bulunabilir.

$$SNR = 10^{SNR(d,f)/10} \quad (58)$$

Tablo 8'de B_n'nin 1 KHz ve R'nin 2 Kbps olduğu varsayılarak hesaplanan belirli BER değerleri için SNR değerlerini listelenmektedir. Şekil 18, çeşitli modülasyon şemaları için log ölçeğinde BER değerlerinin olasılığını göstermektedir (Bit Oranı başına SNR - E_b / N₀).

Tablo 8. BER ve SNR değerleri.

BER	SNR
10 ⁻¹	4.8919
10 ⁻³	13.532
10 ⁻⁶	17.4120
10 ⁻⁷	18.1147

Alınan sinyal gücünün ses kaynağı seviyesi, (Felemban ve Felemban, 2013)'te de verildiği şekilde (59) kullanılarak hesaplanabilir.

$$SL(d,f) = A(d,f) + N(f) + SNR - DI \quad (59)$$

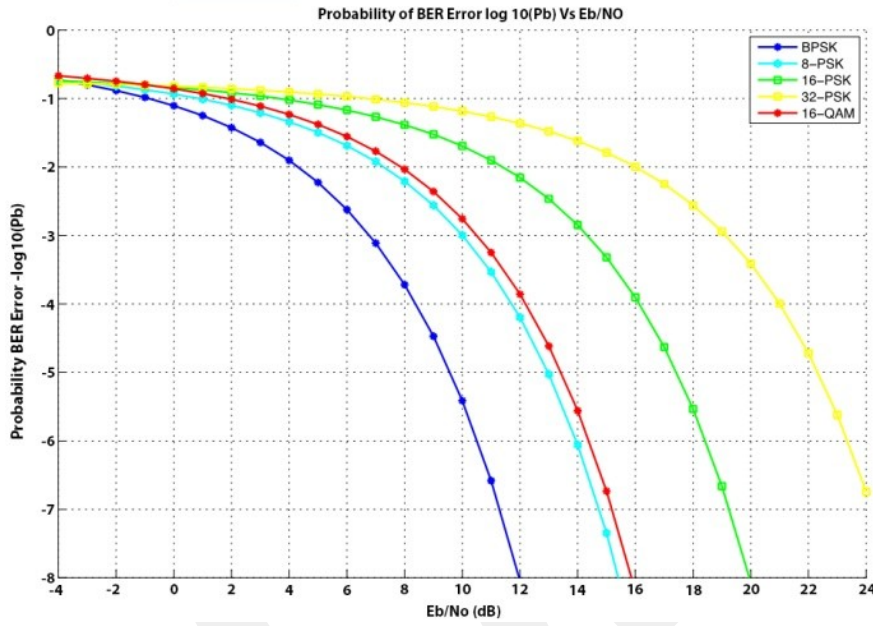
DI, yönlülük indeksi anlamına gelir ve bu çalışmada 360 derecelik kabul edildiğinden, DI 0 kabul edilmiştir. Buna ek olarak, yayılan sinyalin yoğunluğunun önceden tanımlanmış bazı referans yoğunluklarına oranı (60) kullanılarak bulunabilir.

$$SL(d,f) = 10 \log(I/I_0) \quad (60)$$

I_0 Referans yoğunluğu $0,67 * 10^{-18}$ şeklinde referans bir değerle gösterilir ve yayılan sinyalin yoğunluğu (61) kullanılarak elde edilebilen iletim gücüne (P_{tx}) bağlı olarak Watt / m cinsinden gösterilir.

$$SNR(d, f) = \frac{P_{tx}}{A(d, f)N(f)\Delta f'} \quad (61)$$

Burada P_{tx} iletim gücünü, I_0 ise referans yoğunluğunu temsil eder. Varsayılan değeri $0.67 * 10^{-18}$ 'dir ve yayılan sinyalin yoğunluğunu Watt / m cinsinden temsil edilir.

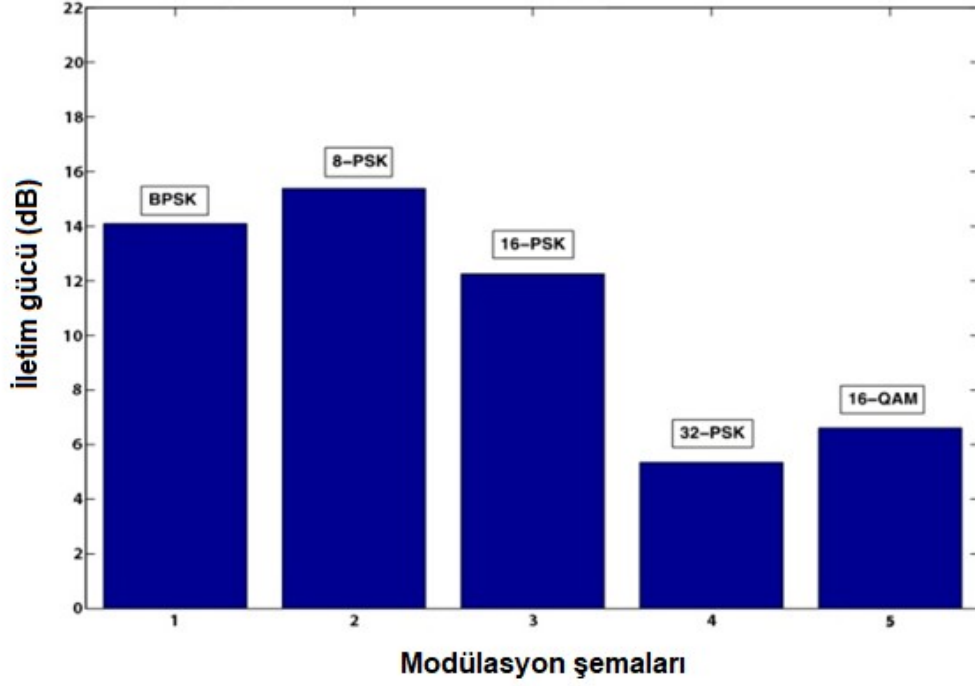


Şekil 18. Çeşitli modülasyon şemalarının BER ve Eb / NO olasılıkları.

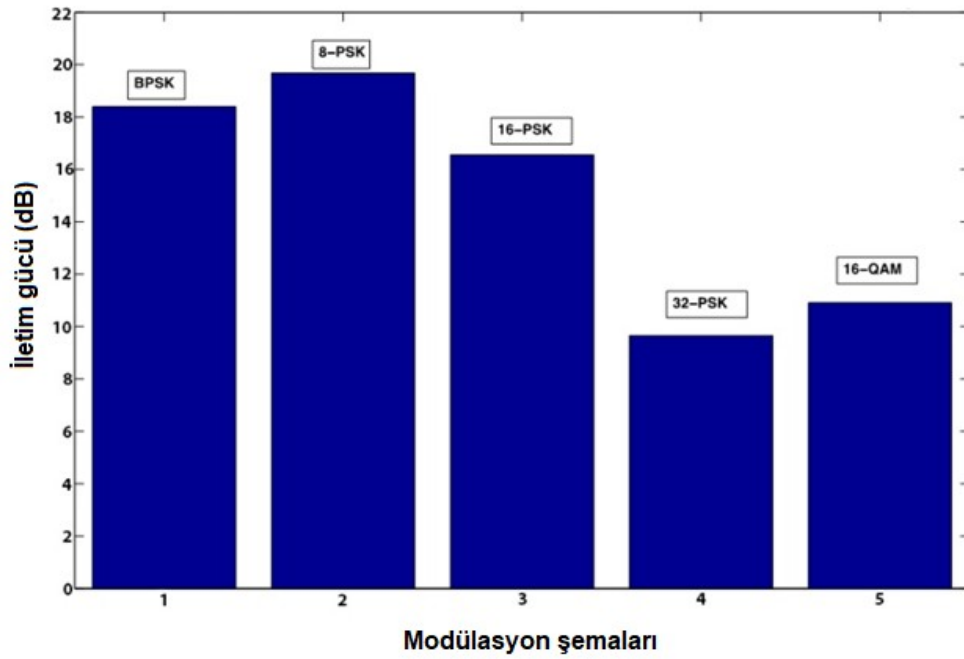
Ağın tek atlama için iletim gücü, Şekil 19'da gösterilmiştir. Ağın enerji tüketiminin, seçilen modülasyon şemasına bağlı olduğu ve 8-PSK kullanıldığında ağın en yüksek miktarda tüketildiği görülmektedir. Öte yandan, 32-PSK kullanıldığında optimum enerji tüketimi elde edilmiştir. Şekil 20'de gösterildiği gibi, 1000 m mesafe için Şekil 21'e benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlarda görüldüğü üzere mesafe arttığı için enerji tüketim oranlarında da belirli bir artış meydana gelmiştir. Çeşitli modülasyon teknikleri için 1000 m. derinlikte ve optimum frekans değerinde ağın tek atlama için harcanan iletim gücü ise Şekil 21'de gösterilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi, 10^{-7} gibi bazı BER değerleri için, iletim gücü tüm modülasyon teknikleri için hemen hemen aynıdır. Öte yandan, BER 10^{-3} veya 10^{-1} olduğunda, 32-PSK ve 16-QAM diğer tüm şemalardan daha iyi performans göstermiştir.

Modülasyon tekniklerinin farklı mesafelerdeki enerji tüketimi açısından genel performansları Şekil 22'de gösterilmiştir. Gönderen ve alıcı arasındaki mesafe azaldıkça

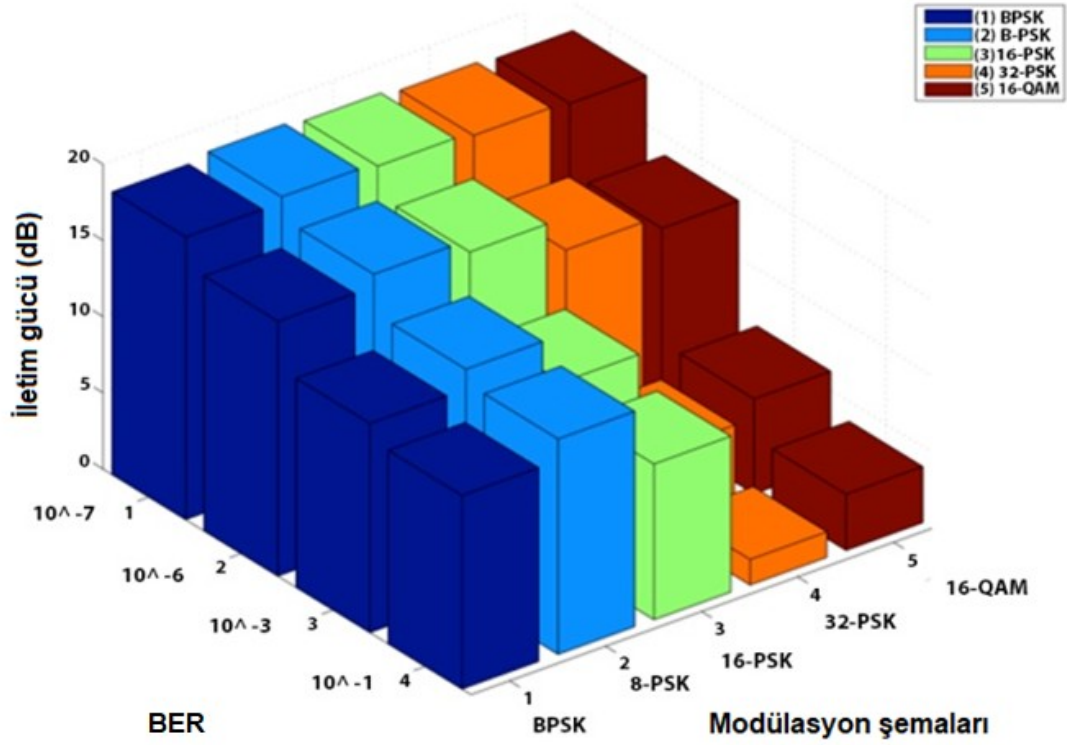
enerji tüketiminin azaldığı görülebilir. 32-PSK ve 16-QAM, diğer tekniklerle karşılaştırıldığında tüm mesafelerde en iyi performansı göstermiştir.



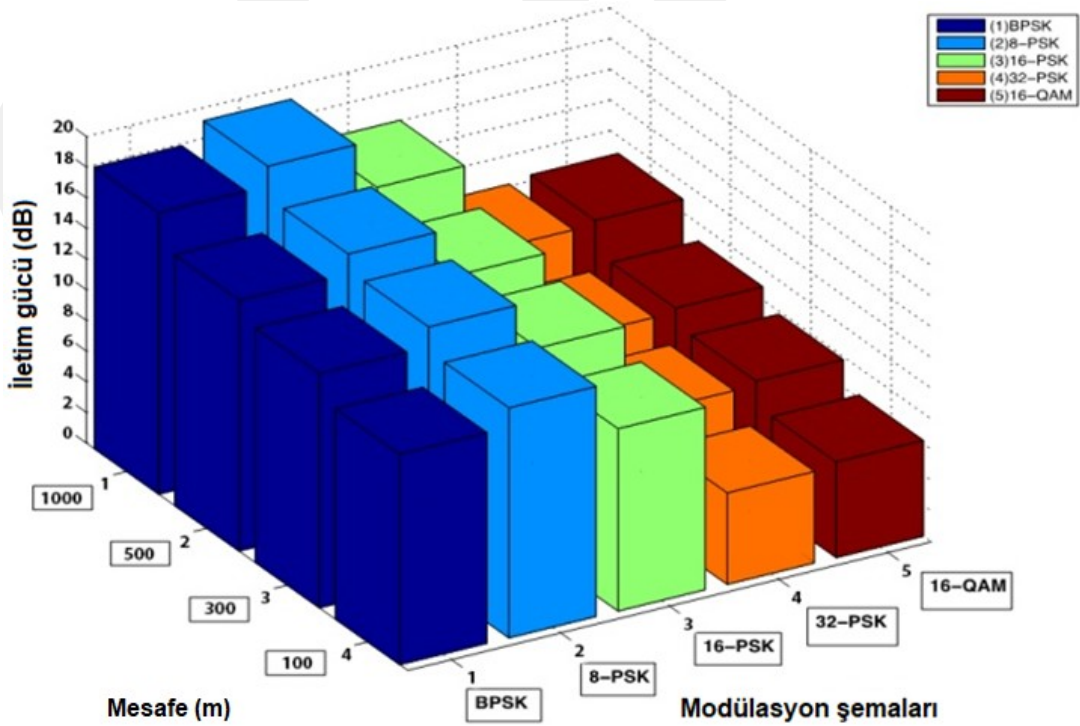
Şekil 19. Ağın 100 m mesafede farklı modülasyon teknikleri enerji tüketim oranları.



Şekil 20. Ağın 1000 m mesafede farklı modülasyon teknikleri enerji tüketim oranları.



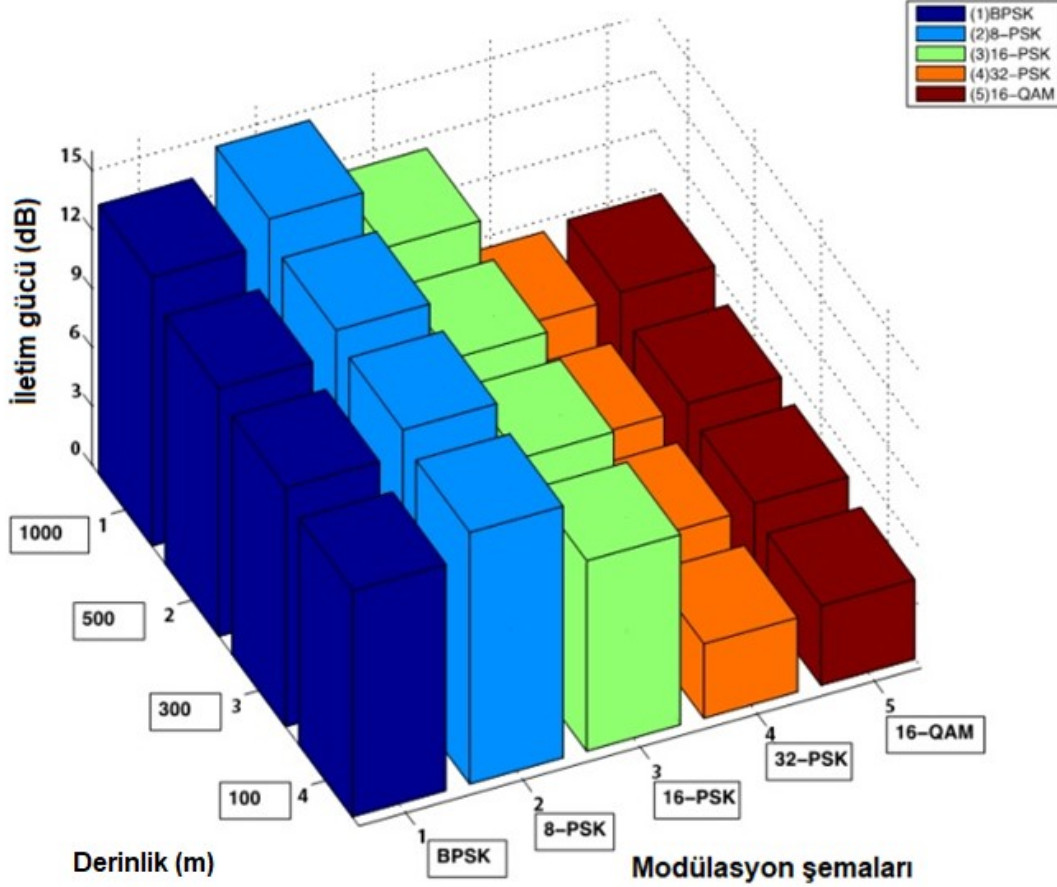
Şekil 21. Ağın 1000 m derinlikte farklı modülasyon teknikleri için enerji tüketim oranları (Optimum Frekans).



Şekil 22. Ağın 100 m derinlikte ve optimum frekansta farklı mesafeler ve farklı modülasyon

teknikleri için enerji tüketim oranları.

Son olarak, 1000 m mesafede farklı derinlikler için tek bir paket gönderirken oluşan durum Şekil 23'de gösterilmiştir. Ağın derinliği azaldıkça, toplam enerji tüketiminin azaldığı ve 32-PSK ve 16-QAM'ın tüm derinliklerde diğer modülasyon tekniklerinden daha iyi performans gösterdiği açık bir şekilde gözlenmektedir.



Şekil 23. Ağın 1000 m mesafede ve optimum frekansta farklı derinlikler ve farklı modülasyon teknikleri için enerji tüketim oranları.

Farklı frekans ve uzaklık değerleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar sualtı akustik kanalında gönderici ve alıcı arasındaki uzaklık azaldıkça, çarpımının minimum noktası (farklı soğurum) ve genişliği (farklı bant genişliği) önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Literatürde elde edilmiş sonuçlarla (Stojanovic, 2006) benzer doğrultuda elde edilen bir diğer sonuç ise, gönderici ve alıcı arasındaki uzaklık azaldıkça en uygun iletişim bant genişliğinin arttığını ve yüksek frekanslara doğru kaydığını göstermiştir. Ancak, bu uzaklık arttıkça en uygun bant genişliğinin azaldığı ve düşük frekanslara doğru yöneldiği görülmüştür. Sonuç olarak, sualtı kablosuz algılayıcı ağlarında kısa iletişim mesafelerinde

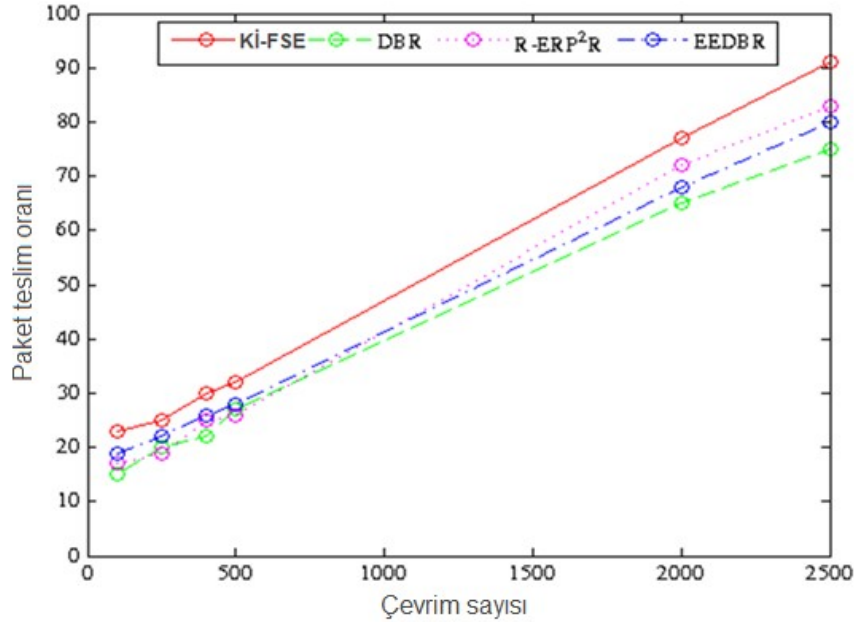
daha geniş bant genişliğinin ve daha yüksek link kapasitesinin elde edilebilmesi mümkündür. Ayrıca, gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sualtı kablosuz algılayıcı ağlarında çoklu atlamalı iletim yaklaşımlarının tek atlamalı yaklaşımlara göre hem enerji harcaması hem de daha hızlı iletişim bağlamında avantajlarını ortaya koymuştur.

4.4 Konum Farkında Katmanlar Arası İletişim ve Fırsatçı Spektrum Erişim (KI-FSE) Sistemi İle İlgili Performans Değerlendirmeleri

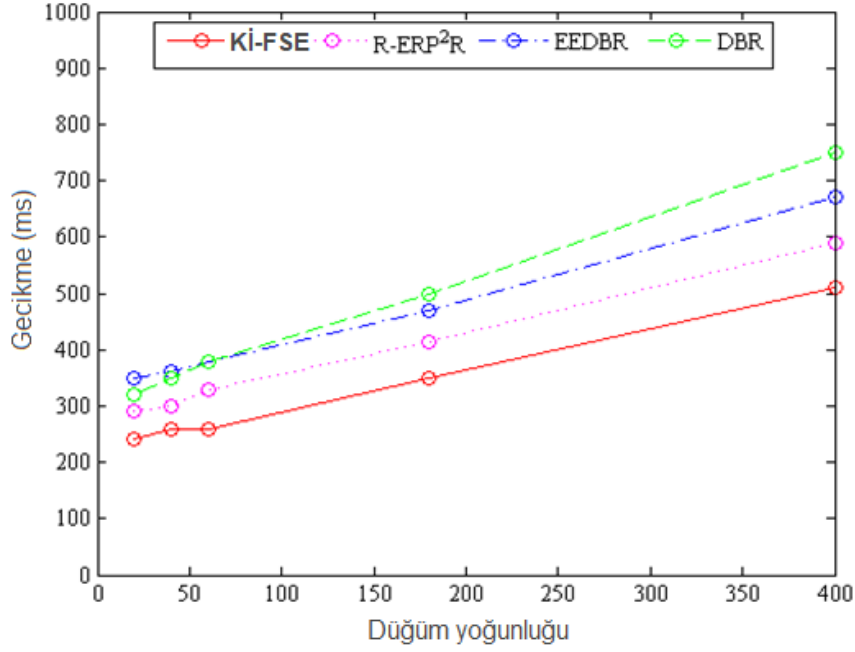
Proje kapsamında geliştirilen KI-FSE sistemi sualtı akustik kanalında yere, zamana ve frekansa bağlı olarak sualtı iletişim kaynaklarının etkin bir şekilde kullanımını hedeflemektedir. Ağ kapasite ve yoğunluğu, düğüm sayısı, ağ düzenlemeleri, gönderici güç ayarı, ağ sıkışıklığı durumları, fiziksel kanal parametreleri ve uygulama hedefleri gibi temel belirteçleri göz önünde bulunduran sistem, verimli enerji kullanımı, ağ ve kanal kapasiteleri ve veri aktarımı güvenilirliği gibi parametreleri en iyi düzeyde tutmayı amaçlamaktadır. Bu bölümde, literatürde bulunan protokoller R-ERP2R (Wahid, Lee ve Kim, 2014), EEDBR (Wahid ve Kim, 2012) ve DBR (Yan, Shi ve Cui, 2008) ile ortak bir uygulama senaryosunda paket teslim oranı, gecikme, üretilen iş ve kalan enerji kriterlerine göre MATLAB tabanlı benzetim ortamında yapılan kıyaslamaların sonuçları sunulmakta ve yorumlanmaktadır. Toplayıcı düğüm tarafından başarılı bir şekilde alınan paketlerin sayısı ile kaynak düğümler tarafından gönderilenler arasındaki oran olarak paket teslim oranıdır. Gecikme, bir paketin bir kaynak düğümünden herhangi bir hedef düğüme ulaşması için geçen zamandır. Üretilen iş, belirli bir zamanda (saniyede bit) işlenen veri paketlerinin sayısıdır. Kalan enerji, veri paketlerinin düğümler tarafından başarılı bir şekilde iletilmesi sırasında tüketilen enerjiden sonra kalan enerjinin miktarıdır.

Benzetim çalışması, boyutları $1000 \times 1000 \times 100$ (uzunluk \times genişlik \times yükseklik) olan, düğümleri farklı derinliklerde rasgele dağıtılmış üç boyutlu bir algılayıcı ağı ile gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmasında sualtı algılayıcı düğümlerinin toplam sayısı 50 ila 400 arasındadır. Toplayıcı düğüm deniz yüzeyinde bulunmaktadır. Taşıyıcı frekansı, 20 bit / saniye'lik bant genişliği verimliliği için 40 kHz'dir. Tüm algılayıcı düğümleri aynı özelliklerdedir ve her birinin 120 metrelik algılama aralığına sahip bir mikrofon ve iletişim alanı ile akustik iletişim yetenekleri olduğu varsayılmıştır. Uzak alan mesafesi, başlangıçtaki enerji değeriyle 80 metreye ayarlanmıştır. Dağıtım bölgesinin alt kısmında konumlandırılan toplam 5 algılayıcı düğümü, kaynak düğümler olarak seçilmiştir. Ağda, her kaynak düğümü her 10 saniyede bir paket oluşturmaktadır. Veri paketlerinin boyutu 32 bayt olarak belirlenmiştir. Bir paket oluşturulduğu anda, toplayıcı düğüm haricinde tüm düğümler arasında rastgele seçilen bir kaynak düğümü ile ilişkilendirilir. Tüm paketlerin hedefi, her bir benzetim çevriminde toplayıcı düğümdür. Alım enerji harcaması 0,24 watt'tır ve iletim enerjisi, taşıyıcı frekansının

seçilen değeri ve bant genişliği: 1.5 watt olmak üzere iletim elektroniklerini en üst düzeyde tutmak için düşük seviyeli iletim için en az 1 watt olmak üzere iki seviyeden oluşmaktadır. Boştaki güç ve uyku gücü sırasıyla 0,064 watt ve 3×10^{-6} watt olarak ayarlanmıştır. Akustik yayılma modeli faktörleri, örneğin °C, tuzluluk, asitlik ve silindirik yayılma katsayısı faktörü sıcaklık değerleri sırasıyla 35, 8, 22 ve 10 olarak belirlenmiştir. Hello paket aralığı 13s olarak ayarlanmıştır. Her 13 saniyeden sonra, sinyal-gürültü oranı, mesafe ve bağlantı değerleri hesaplanmakta ve kalan enerji bilgileri, yönlendirme tablolarını güncellemek için komşu düğümler arasında paylaşılmaktadır. Her bir protokol için benzetim çalışması 50 kez gerçekleştirilmiş ve ortalama değerler kıyaslama çalışmasında kullanılmıştır. Benzetim çalışmasının ilk aşamasında Kİ-FSE ile diğer üç protokol arasında paket teslim oranı performansı açısından kıyaslama gerçekleştirilmiştir. İlgili kıyaslama sonucu Şekil 24'te verilmektedir. EEDBR'nin paket teslim oranı performansı, DBR ve R-ERP²R protokollerinden daha iyidir. Bunun nedeni, bir güzergâh hatası durumunda alternatif veri yollarını takip ederek bilgi taşıma yeteneğini kullanmasıdır. Öte yandan, büyük ağlarda EEDBR'nin paket teslim oranı diğer protokollerden daha kötüdür. Kİ-FSE'nin paket teslim oranı diğer protokollerden daha iyidir. Şekil 25'de gösterildiği gibi R-ERP²R'nin performansı gecikme performansı Kİ-FSE dışında hem EEDBR hem de DBR'den biraz daha iyidir.

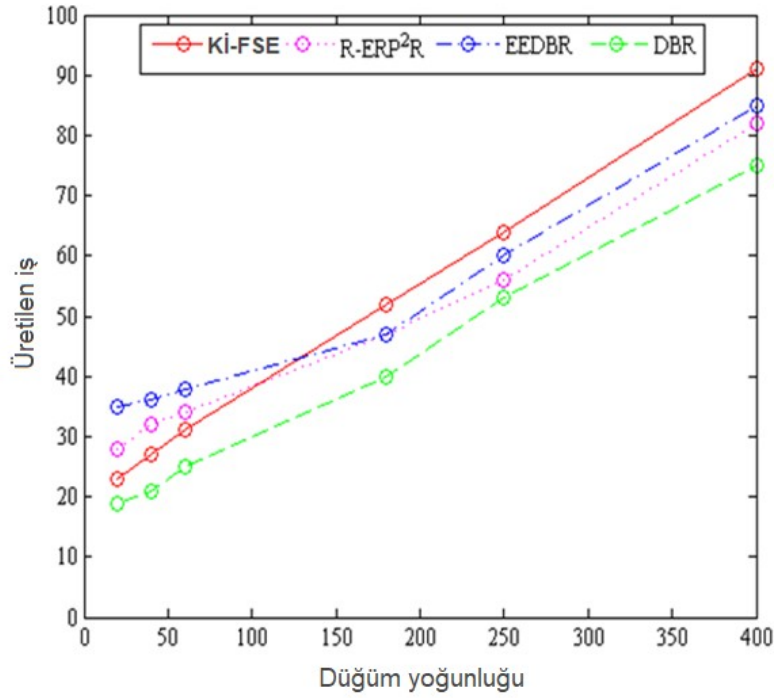


Şekil 24. Çevrim sayısına bağlı paket teslim oranı.

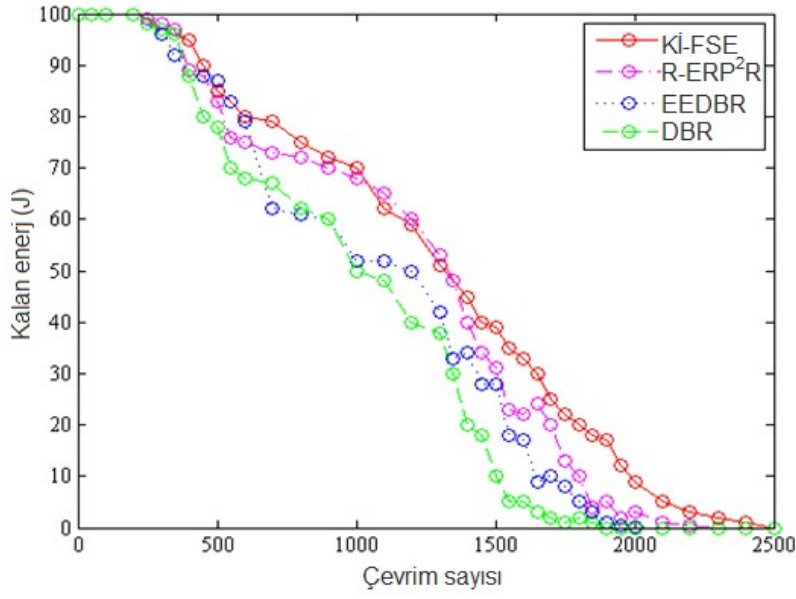


Şekil 25. Düğüm yoğunluğuna bağlı gecikme (ms).

Şekil 26’da gösterildiği gibi üretilen iş performansı açısından belirgin bir artışı olmamakla birlikte R-ERP²R’nin enerji verimliliği de oldukça iyidir. Şekil 27 Ki-FSE ile diğer protokollerin kalan enerji profillerini göstermektedir. Şekillerde görülebileceği gibi yüksek paket teslim oranı, verim ve kalıcılığı artıran enerji bakımından, Ki-FSE’nin performansı diğer protokollerden daha iyidir.



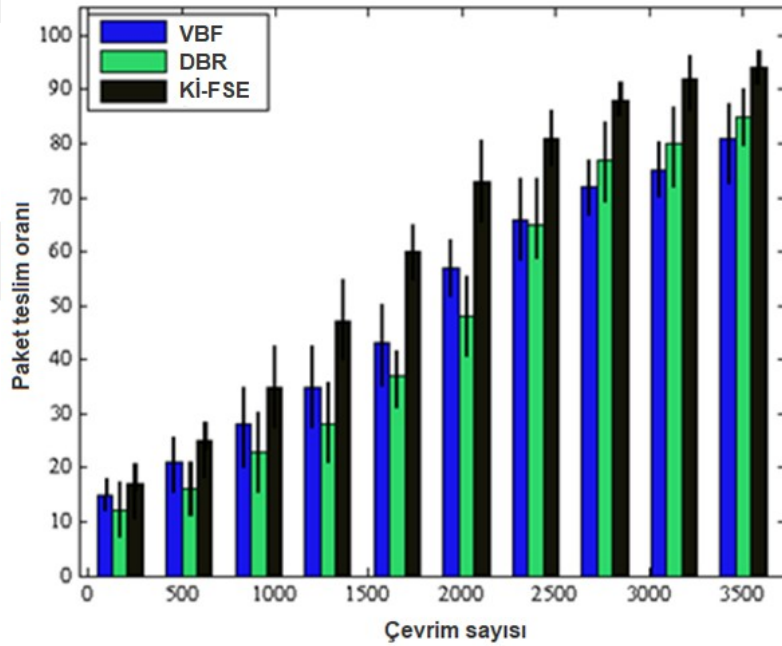
Şekil 26. Düğüm yoğunluğuna bağlı olarak üretilen iş.



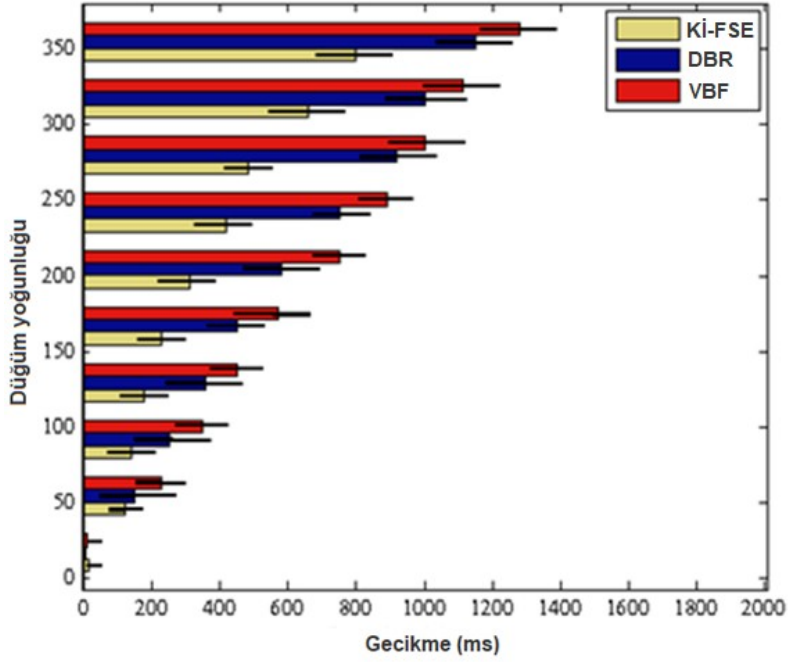
Şekil 27. Çevrim sayısına bağlı olarak kalan enerji (J).

Sualtı kablosuz algılayıcı ağlarında ölçeklenebilir ve verimli yönlendirme hizmetleri sağlamak zordur. Radyo sinyalleri sualtı ortamında verimli bir iletişim sağlayamadığı için akustik kanallar tercih edilir. Ancak, radyo frekans kanalları ile karşılaştırıldığında, akustik kanallar çok daha düşük bant genişlikleri ve daha fazla yayılma gecikmesi özelliklerine sahiptir. İkinci olarak, sualtı algılayıcı düğümleri su akımları ile pasif olarak hareket ettikçe çok dinamik bir topoloji ortaya çıkmaktadır. Son olarak, iletişimde yüksek hata oranları ile karşılaşabilmektedir. Bütün bu özellikler, ağ protokolü tasarımında birçok zorluğu beraberinde getirmektedir. Bu zorlukları ele almak için önerilmiş yönlendirme protokolleri bulunmakla birlikte, çoğu, bir ağdaki tüm algılayıcı düğümlerinin tam boyutlu konum bilgisini gerektirmektedir. Bu nedenle önceki bölümlerde de belirtildiği gibi literatürde alternatif yaklaşımlar da sunulmaktadır. Örneğin, DBR (Yan, Shi ve Cui, 2006), algılayıcı düğümlerinin tam boyutlu konum bilgisi gerektirmez. Bunun yerine, her sualtı algılayıcı düğümünde bulunabilecek ucuz bir derinlik sensörü elde edilebilecek yerel derinlik bilgilerine ihtiyaç duyar. Böylece, bir konumlandırma hizmetinin yardımı olmadan ağ dinamiklerini verimli bir şekilde ele alabilmektedir. Bir diğer alternatif yaklaşım ise ölçeklenebilir ve enerji verimli bir yönlendirme sağlamayı amaçlayan vektör tabanlı iletme protokolü olan VBF (Vector-Based Forwarding) (Xie, Cui ve Lao, 2006)'dir. VBF esas olarak konum tabanlı bir yönlendirme yaklaşımıdır. Kaynağa hedeften "vektör" e yakın düğümler iletiyi iletir. Bu şekilde, düğümlerin sadece küçük bir kısmı yönlendirme sürecine katılmış olur. VBF enerji tüketimini azaltmasını dağıtılmış bir kendini uyarılma algoritması kullanmaktadır. DBR ve VBF protokolleriyle KI-FSE'nin başarımlarını kıyaslamasını yapmak için gerçekleştirilen ikinci benzetim çalışmasında

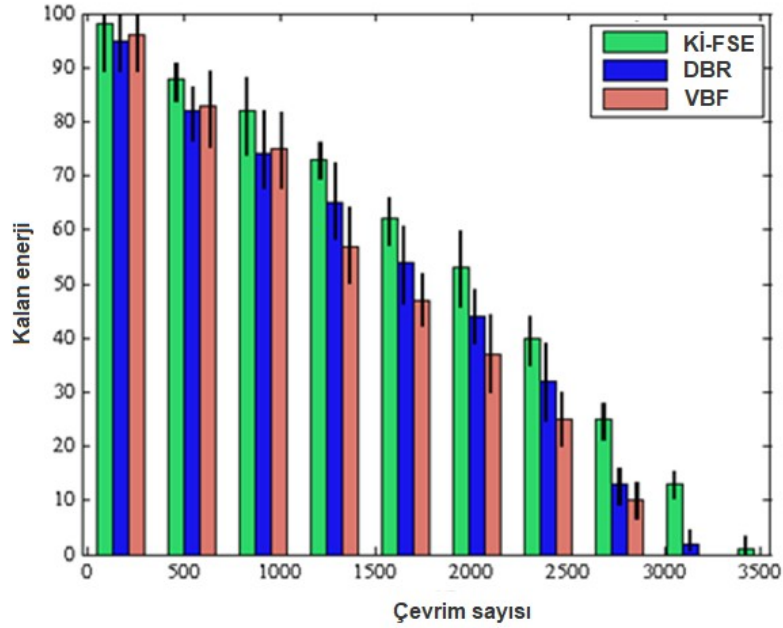
MATLAB kullanılmıştır. % 95 güven aralığı ile gerçekleştirilen 53 set benzetim çalışmasının sonuçları Batch Mean yöntemi (Fishman ve Yarberr, 1997) ile değerlendirilmiştir. Benzetim çalışması, boyutları 1000 × 1000 × 100 (uzunluk × genişlik × yükseklik) olan, düğümleri farklı derinliklerde rasgele dağıtılmış üç boyutlu bir algılayıcı ağı ile gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmasında sualtı algılayıcı düğümlerinin toplam sayısı 350'dir. Toplayıcı düğüm deniz yüzeyinde bulunmaktadır. Taşıyıcı frekansı, 20 bit / saniye'lik bant genişliği verimliliği için 40 kHz'dir. Tüm algılayıcı düğümleri aynı özelliklerdedir ve her birinin 120 metrelik algılama aralığına sahip bir mikrofon ve iletişim alanı ile akustik iletişim yetenekleri olduğu varsayılmıştır. Her bir algılayıcı düğümünün maksimum iletişim mesafesi 50 metreye ayarlanmışken ortalama iletişim mesafesi 40 metreye ayarlanmıştır. Maksimum veri hızı, paket uzunluğu ve kontrol paketi boyutu sırasıyla 15 Kbps, 1024 bit ve 28 bit olup, diğer tüm parametreler bu bölümdeki ilk benzetim çalışmasıyla aynıdır. Benzetim çalışması sonuçları Şekil 28, 29 ve 30'a sunulmaktadır. Şekil 28'de görülebileceği gibi tüm yönlendirme şemalarında paket teslim oranı, çevrim sayısına bağlı olarak doğrusal olarak artmaktadır. Öte yandan, tüm bölgelerde Kİ-FSE'nin paket teslim oranı DBR ve VBF'den daha iyidir. Şekil 29'da görülebileceği gibi tüm protokollerin gecikme performansı düğüm sayısındaki artışla birlikte azalmaktadır. Genel olarak bakıldığında Kİ-FSE'nin gecikme performansı, hem DBR hem de VBF protokollerinden daha iyidir. Şekil 30'da gösterildiği gibi, başlangıçta, VBF enerji tüketim etkinliği açısından DBR'den daha iyidir. Ancak çevrim sayısı arttıkça DBR'nin kalan enerji performansı VBF'den daha iyidir. Diğer taraftan, artık enerji performansı açısından Kİ-FSE, hem DBR hem de VBF'den daha iyidir.



Şekil 28. Çevrim sayısına bağlı olarak paket teslim oranı.



Şekil 29. Düğüm yoğunluğu – gecikme ilişkisi.



Şekil 30. Çevrim sayısı – kalan enerji ilişkisi.

Benzetim çalışmasında elde edilen yüksek paket teslim oranı, etkin kalan enerji oranı ve düşük gecikme değerleri ışığında Ki-FSE'nin yönlendirme performansının DBR ve VBF'den daha iyi olduğu ifade edilebilir. Hem DBR hem de VBF yönlendirme protokolleri büyük ağlarda aşırı mesaj yeniden iletim oranı ve düğümlerin neden olduğu veri paketi kayıpları nedeniyle daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır. VBF'de, algılayıcı düğümleri arasındaki kararsız bağlantı kalitesi, hızlı enerji tükenmesiyle sonuçlanır. Büyük

ağlarda DBR kararlılığını koruyamamakta ve daha az kalan enerji ile bir sonraki atlama düğümlerini seçmekte ve toplayıcı düğüme ulaşamadığı veya geç ulaşıldığında kayda değer miktarda veri paketi kaybolmakta veya kullanılamaz hale gelmektedir. Son olarak, hem DBR hem de VBF'de, kaynak düğümü ve toplayıcı düğüm arasındaki çok sayıda atlama daha fazla gecikmeye yol açmaktadır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Sualtı algılayıcı ağları bilimsel, akademik, ticari ve askeri alanlarda farklı uygulama türlerinde kullanım alanı bulmakla birlikte, sualtı akustik ortamı güvenilir ve etkin kablosuz iletişim için ciddi zorluklar taşımaktadır. Bu bağlamda, güvenilir ve etkin sualtı iletişimin sağlanması için özgün bir iletişim sistemi gerekmektedir. Bu projede, kablosuz sualtı algılayıcı ağlarının ortak problemleri olan yayılım gecikmesinin yüksek ve değişken olması, sualtı kanal kapasitesinin yere, zamana ve frekansa bağlı olarak ciddi şekilde değişiklik göstermesi ve kablosuz sualtı algılayıcı düğümlerinin çok sınırlı enerjiye sahip olması gibi problemlerin adreslenmesi için konum farkında Katmanlar arası İletişim ve Fırsatçı Spektrum Erişim (Kİ-FSE) sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen Kİ-FSE sistemi kaynakları kısıtlı sualtı elemanları için geleneksel iletişim katman modelinde uygulama katmanından fiziksel katmana kadar iletişim katmanlarının yükünü azaltmakta ve performanslarını yükseltmektedir. Ayrıca, Kİ-FSE sistemi sualtı ortamında etkin spektrum kullanımını sağlamak için fırsatçı spektrum erişim tekniklerinden faydalanmaktadır.

Genel olarak, bu projenin nihai sonucu sualtı ortamları için özgün katmanlar arası ve fırsatçı spektrum erişim esasına dayanan iletişim protokollerinin geliştirilmesi için gerekli metodların ve temel kavramların ortaya konmasıdır. Böylece geniş ölçekli sualtı algılayıcı ağları kullanılarak sualtı dünyasının kapsamlı keşfi ve yeni doğal kaynakların tespiti mümkün olabilecektir. Ayrıca, gerçekleştirilen projenin kariyer ve eğitimsel fayda boyutlarında birçok katma değeri bulunmaktadır. Bu proje ile elde edilen bilimsel, teknolojik, ekonomik ve sosyal kazanımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Proje çıktılarından elde edilen, SCI-Expanded kapsamındaki dergilerde yapılan yayınlar:
 - **Yayın 1:** Faheem, M., Abbas, M. Z., Tuna, G., **Gungor, V. C.** 2015. "EDHRP: Energy Efficient Event Driven Hybrid Routing Protocol for Densely Deployed Wireless Sensor Networks", *Journal of Network and Computer Applications*, 58, 309-326. (Not: Bu makale, projenin ilk dönemi sonunda çıktı olarak belirtildiği için, online sistemde final raporu çıktısı olarak eklenmesine online sistem izin vermemiştir. Makale ek olarak eklenmiştir.)
 - **Yayın 2:** Faheem, M., Tuna, G., **Gungor, V. C.** 2016. "LRP: Link Quality-Aware Queue-Based Spectral Clustering Routing Protocol for Underwater Acoustic

Sensor Networks”, *International Journal of Communication Systems*, 30(12), 1-17.

- **Yayın 3:** Tuna, G., Gungor, V. C. 2017. “A Survey on Deployment Techniques, Localization Algorithms, and Research Challenges for Underwater Acoustic Sensor Networks”, *International Journal of Communication Systems*, 30(17), 1-21.
- **Yayın 4:** Faheem, M., Tuna, G., Gungor, V. C. 2017. “QERP: Quality-of-Service (QoS) Aware Evolutionary Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks”, *IEEE Systems Journal*, 1-8.
- Bu projede sualtı akustik algılayıcı ağları için geliştirilen özgün katmanlar arası ve fırsatçı spektrum erişim esasına dayanan iletişim platformu sualtı algılayıcı ağların pratik uygulamalarında iletişim sorunlarını çözmeye yönelik yeni yöntemler içermekte ve geliştirilen iletişim protokolleri ve performans gösterimleri bu alandaki ilk çözümler arasında yer almaktadır.
- Proje yürütücüsü Doç. Dr. V. Çağrı Güngör, projeyi yürüttüğü dönemde yapmış olduğu araştırma çalışmalarının ve yayın çıktılarının katkılarıyla “2015-Bilim Kahramanları Yılın Bilim İnsanı”, “2017-BAGEP Üstün Başarılı Genç Bilim İnsanı”, “2017-TÜBİTAK Teşvik Ödülü” ödüllerinin sahibi olmuştur.
- Projede çeşitli zamanlarda görev alan lisansüstü bursiyelerin akademik olarak yetişmeleri sağlanmış ve 2019 bahar döneminde savunulacak olan bir doktora tez çalışmasının önemli bir bölümü bu proje çıktılarından oluşmuştur.
- Projede sualtı haberleşme protokol tasarım ve geliştirme faaliyetlerinde kullanılmak üzere bilgisayar alımı ve proje ekibine finansal desteklerin sağlanmasında TÜBİTAK tarafından verilen bu destek oldukça önemli olmuştur. Ayrıca, projede çeşitli zamanlarda görev alan lisansüstü bursiyelere burs ödemesi yapılmasında TÜBİTAK’ın bu projedeki bursiyer kalemi kullanılmıştır.

6. KAYNAKLAR LİSTESİ

Ahn, J., Syed, A., Krishnamachari, B., & Heidemann, J. 2011. "Design and Analysis of a Propagation Delay Tolerant ALOHA Protocol for Underwater Networks," *Ad Hoc Networks*, 9(5), 752–766.

Akyildiz, I. F., Pompili, D., & Melodia, T. 2005. "Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges," *Ad Hoc Networks*, 3(3), 257–279.

Al-Dharrab, S., Uysal, M., & Duman, T. (2013). “Cooperative underwater acoustic communications”, *IEEE Communications Magazine*, 51(7), 146-153.

Ali, T., Jung, L. T., & Faye, I. 2014. "End-to-End Delay and Energy Efficient Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks", *Wireless Personal Communications*, 79(1), 339-361.

Ameer, P. M., & Jacob, L. 2010. "Localization using ray tracing for underwater acoustic sensor networks". *IEEE Communications Letters*, 14(10), 930-932.

Ayaz, M., Baig, I., Abdullah, A., & Faye, I. 2011. "A survey on routing techniques in underwater wireless sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications*, 34(2011), 1908-1927.

Ayaz, M., Abdullah, A., Faye, I., & Batira, Y. 2012. "An efficient Dynamic Addressing based routing protocol for Underwater Wireless Sensor Networks", *Computer Communications*, 35(4), 475-486.

Azad, S., Casari, P., Petrioli, C., Petrocchia, R., & Zorzi, M. 2011. "On the Impact of the Environment on MAC and Routing in Shallow Water Scenarios," *Proc. IEEE OCEANS*, 1-8.

Bereketli, A., & Bilgen, S., 2012. Remotely Powered Underwater Acoustic Sensor Networks. *IEEE Sensors Journal*, 12(12), 3467–3472.

Berkhovskikh, L., & Lysanov, Y. 1982. *Fundamentals of Ocean Acoustics*. Springer

Bian, T., Venkatesan, R., & Li, C. 2009. "Design and evaluation of a new localization scheme for underwater acoustic sensor Networks". In *Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE* (pp. 1-5). IEEE.

Bian, T., Venkatesan, R., & Li, C. 2010. "An improved localization method using error probability distribution for underwater sensor networks". In *Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.

Caiti, A., Calabrò, V., Fabbri, T., Fenucci, D., & Munafò, A. 2013. "Underwater communication and distributed localization of AUV teams". In *OCEANS-Bergen, 2013 MTS/IEEE* (pp. 1-8). IEEE.

Callmer, J., Skoglund, M., & Gustafsson, F. 2010. "Silent localization of underwater sensors using magnetometers". *Eurasip Journal on Advances in signal processing*, 2010(1), 1.

Carroll, P., Zhou, S., Mahmood, K., Zhou, H., Xu, X., & Cui, J. H. 2012. "On-demand asynchronous localization for underwater sensor networks". In 2012 Oceans (pp. 1-4). IEEE.

Casari, P., Marella, S., & Zorzi, M. 2007. "A Comparison Of Multiple Access Techniques In Clustered Underwater Acoustic Networks," Proc. OCEANS 2007 – Europe, 1-6.

Chandrasekhar, V., & Seah, W. 2007. "An area localization scheme for underwater sensor networks". In OCEANS 2006-Asia Pacific (pp. 1-8). IEEE.

Cheng, W., Teymorian, A. Y., Ma, L., Cheng, X., Lu, X., & Lu, Z. 2008. "Underwater localization in sparse 3D acoustic sensor networks". In INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE. IEEE.

Cheng, W., Thaeler, A., Cheng, X., Liu, F., Lu, X., & Lu, Z. 2009. "Time-synchronization free localization in large scale underwater acoustic sensor networks". In Distributed Computing Systems Workshops, 2009. ICDCS Workshops' 09. 29th IEEE International Conference on (pp. 80-87). IEEE.

Cheng, X., Shu, H. S. H., & Liang, Q. 2007. "A range-difference based self-positioning scheme for underwater acoustic sensor networks". In Wireless Algorithms, Systems and Applications, 2007. WASA 2007. International Conference on (pp. 38-43). IEEE.

Cheng, X., Shu, H., Liang, Q., & Du, D. H. C. 2008. "Silent positioning in underwater acoustic sensor networks". IEEE Transactions on vehicular technology, 57(3), 1756-1766.

Coates, R. F. W. 1989. Underwater Acoustic Systems. Toronto: John Wiley & Sons Canada, Limited.

Coutinho, R. W., Boukerche, A., Vieira, L. F., & Loureiro, A. A. 2016. "Geographic and Opportunistic Routing for Underwater Sensor Networks", IEEE Transactions on Computers, 65, 548-561.

Dasgupta D., & Michalewicz, Z, 2013. "Evolutionary Algorithms in Engineering Applications," Berlin, Germany: Springer Science & Business Media.

Demirors, E., Sklivanitis, G., Melodia, T., Batalama, S. and Pados, D. (2015). "Software-defined underwater acoustic networks: toward a high-rate real-time reconfigurable modem", IEEE Communications Magazine, 53(11), 64-71.

Domingo, M.C. 2008. "Overview of Channel Models for Underwater Wireless Communication Networks," Elsevier Physical Communication, 1(3), 163-182.

Domingo, M. C. 2009. "Optimal placement of wireless nodes in underwater wireless sensor networks with shadow zones". In Proceedings of the 2nd IFIP conference on Wireless days (pp. 24-29).

Domingo, M. 2009. "A Distributed Energy-Aware Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks. Wireless Personal Communications", 57(4), 607-627.

Emokpae, L., & Younis, M. 2011. "Surface based anchor-free localization algorithm for underwater sensor networks". In 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC) (pp. 1-5). IEEE.

Emokpae, L. E., DiBenedetto, S., Potteiger, B., & Younis, M. 2014. "Ureal: underwater reflection-enabled acoustic-based localization". IEEE Sensors Journal, 14(11), 3915-3925.

Erol, M., Vieira, L. F. M., & Gerla, M. 2007. "AUV-aided localization for underwater sensor networks". In Wireless Algorithms, Systems and Applications, 2007. WASA 2007. International Conference on (pp. 44-54). IEEE.

Erol, M., Vieira, L. F., & Gerla, M. 2007. "Localization with Dive'N' Rise (DNR) beacons for underwater acoustic sensor networks". In Proceedings of the second workshop on Underwater networks (pp. 97-100). ACM.

Erol, M., Vieira, L. F., Caruso, A., Paparella, F., Gerla, M., & Oktug, S. 2008. "Multi stage underwater sensor localization using mobile beacons". In Sensor Technologies and Applications, 2008. SENSORCOMM'08. Second International Conference on (pp. 710-714). IEEE.

Erol-Kantarci, M., Mouftah, H. T., & Oktug, S. 2010. "Localization techniques for underwater acoustic sensor Networks". IEEE Communications Magazine, 48(12), 152-158.

Erol-Kantarci, M., Mouftah, H. T., & Oktug, S. 2011. "A survey of architectures and localization techniques for underwater acoustic sensor networks". IEEE Communications Surveys & Tutorials, 13(3), 487-502.

Felemban, M., & Felemban, E., 2013. Energy-delay tradeoffs for Underwater Acoustic Sensor Networks. 2013 First International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom) (pp.45-49).

Fishman, G. S., & Yarberr, L. S. 1997. "An implementation of the batch means method", *INFORMS Journal on Computing*, 9, 296-310.

Freitag, L., Stojanovic, M., Grund, M., & Singh, I. 2002. "Acoustic Communications For Regional Undersea Observatories", *Proc. Oceanology International*.

Goyal, N., Dave, M., & Verma, A. K. 2016. "Energy Efficient Architecture for Intra and Inter Cluster Communication for Underwater Wireless Sensor Networks", *Wireless Personal Communications*, 89(2), 687-707.

Guo, Y., & Liu, Y. 2013. "Localization for anchor-free underwater sensor networks". *Computers & Electrical Engineering*, 39(6), 1812-1821.

Harris, A.F., & Zorzi, M. 2007. "Energy-Efficient Routing Protocol Design Considerations For Underwater Networks," *Proc. IEEE Conf. Sensor, Mesh Ad Hoc Commun. Netw. (SECON)*.

Han, G., Jiang, J., Shu, L., Xu, Y., & Wang, F. 2012. "Localization algorithms of underwater wireless sensor networks: A survey". *Sensors*, 12(2), 2026-2061.

Heidemann, J., Stojanovic, M., & Zorzi, M. 2012. "Underwater sensor networks: applications, advances and challenges". *Phil. Trans. R. Soc. A*, 370(1958), 158-175.

Heidemann, J., Ye, W., Willis, J., Syed, A., & Li, Y. 2006. "Research Challenges And Applications For Underwater Sensor Networking," *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1, 228-235.

Huang, C. J., Wang, Y. W., Liao, H. H., Lin, C. F., Hu, K. W., & Chang, T. Y. 2011. "A power-efficient routing protocol for underwater wireless sensor Networks". *Applied Soft Computing*, 11(2), 2348-2355.

Ilyas, N., Alghamdi, T. A., Farooq, M. N., Mehboob, B., Sadiq, A. H., Qasim, U., ... & Javaid, N. 2015. "AEDG: AUV-aided Efficient Data Gathering Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks". *Procedia Computer Science*, 52, 568-575.

Isbitiren, G., & Akan, O. B. 2011. "Three-dimensional underwater target tracking with acoustic sensor networks". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(8), 3897-3906.

Jarosz, E. vd., 2011. On flow variability in the Bosphorus Strait. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(8), pp.1–17.

Javaid, N., Jafri, M. R., Ahmed, S., Jamil, M., Khan, Z. A., Qasim, U., & Al-Saleh, S. S. 2015. "Delay-Sensitive Routing Schemes for Underwater Acoustic Sensor Networks", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(3), 532676.

Jiang, J., Han, G., Guo, H., Shu, L., & Rodrigues, J. J. P. C. 2016. "Geographic multipath routing based on geospatial division in duty-cycled underwater wireless sensor Networks", *Journal of Network and Computer Applications*, 59, 4-13.

Kartha, J. J., Jabbar, A., Baburaj, A., & Jacob, L. 2015. "Maximum lifetime routing in underwater sensor networks using mobile sink for delay-tolerant applications". *TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference* (pp. 1-6). IEEE.

Kilfoyle, D. B., & Baggeroer, A. B. 2000. "The state of the art in underwater acoustic telemetry". *IEEE Journal of oceanic engineering*, 25(1), 4-27.

Kim, S.-G., Priya, S., Kanno, I., 2012. Piezoelectric MEMS for energy harvesting. *MRS Bulletin*, 37(11), pp.1039–1050.

Kulhandjian, H., & Melodia, T. 2014. "A low-cost distributed networked localization and time synchronization framework for underwater acoustic testbeds". In *Underwater Communications and Networking (UComms)*, 2014 (pp. 1-5). IEEE.

Kussat, N. H., Chadwell, C. D., & Zimmerman, R. 2005. "Absolute positioning of an autonomous underwater vehicle using GPS and acoustic measurements". *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(1), 153-164.

Lee, K. C., Ou, J. S., & Huang, M. C. 2009. "Underwater acoustic localization by principal components analyses based probabilistic approach". *Applied Acoustics*, 70(9), 1168-1174.

Lee, S., & Kim, K. 2010. "Localization with a mobile beacon in underwater sensor Networks". In *Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, 2010 IEEE/IFIP 8th International Conference on (pp. 316-319). IEEE.

Li, B., Zhou, S., Stojanovic, M., Freitag, L., Willett, P. 2008. "Multicarrier Communication over Underwater Acoustic Channels with Nonuniform Doppler Shifts," IEEE Journal of Oceanic Engineering, 33(2), 198-209.

Liu, B., Chen, H., Zhong, Z., & Poor, H. V. 2010. "Asymmetrical round trip based synchronization-free localization in large-scale underwater sensor networks". IEEE Transactions on Wireless Communications, 9(11), 3532-3542.

Luo, H., Zhao, Y., Guo, Z., Liu, S., Chen, P., & Ni, L. M. 2008. "UDB: Using directional beacons for localization in underwater sensor networks". In Parallel and Distributed Systems, 2008. ICPADS'08. 14th IEEE International Conference on (pp. 551-558). IEEE.

Luo, H., Guo, Z., Dong, W., Hong, F., & Zhao, Y. 2010. "LDB: Localization with directional beacons for sparse 3D underwater acoustic sensor Networks". Journal of networks, 5(1), 28-38.

Ma, Y., & Hu, Y. H. 2009. "ML source localization theory in an underwater wireless sensor array network". In 2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (pp. 1-4). IEEE.

Mirza, D., & Schurgers, C. 2007. "Collaborative localization for fleets of underwater drifters". In OCEANS 2007 (pp. 1-6). IEEE.

Mirza, D., & Schurgers, C. 2008. "Energy-efficient ranging for post-facto self-localization in mobile underwater Networks". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 26(9), 1697-1707.

Mirza, D., & Schurgers, C. 2008. "Motion-aware self-localization for underwater networks". In Proceedings of the third ACM international workshop on Underwater Networks (pp. 51-58). ACM.

Mirza, D., Naughton, P., Schurgers, C., & Kastner, R. 2015. "Real-time collaborative tracking for underwater networked systems". Ad Hoc Networks, 34, 196-210.

Nowshien, N., Karmakar, G., & Kamruzzaman, J. 2016. "PRADD: A path reliability-aware data delivery protocol for underwater acoustic sensor networks". Journal of Network and Computer Applications.

Othman, A. K., Adams, A. E., & Tsimenidis, C. C. 2006. "Node discovery protocol and localization for distributed underwater acoustic networks". In Advanced Int'l Conference on Telecommunications and Int'l Conference on Internet and Web Applications and Services (AICT-ICIW'06) (pp. 93-93). IEEE.

Othman, A. K. 2008. "GPS-less localization protocol for underwater acoustic Networks". In 2008 5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN'08) (pp. 1-6). IEEE.

Parker, A., 2015. Deep ocean currents energy resources – A case study of Australia. World Journal of Modelling and Simulation, 11(3), pp.163–173.

Pompili, D., Melodia, T., & Akyildiz, I. F. 2009. "Three-dimensional and two-dimensional deployment analysis for underwater acoustic sensor networks". Ad Hoc Networks, 7(4), 778-790.

Pompili, D., Melodia, T., & Akyildiz, I.F. 2009. "A CDMA-based Medium Access Control for Underwater Acoustic Sensor Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, 8(4), 1899-1909.

Pompili, D., & Akyildiz, I. F. 2010. "A Multimedia Cross-layer Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, 9(9), 2924-2933.

Preisig, J. 2007. "Acoustic Propagation Considerations for Underwater Acoustic Communications Network Development," SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev., 11(4), 2-10.

Proakis, J., Rice, J. A., Sozer, E. M., & Stojanovic, M. 2003. "Shallow Water Acoustic Networks," in Encyclopedia of Telecommunications, John Wiley and Sons.

Qarabaqi, P., & Stojanovic, M. 2011. "Adaptive Power control for underwater acoustic communications," Proc. IEEE OCEANS, 1-7.

Radosevic, A., Duman, T. M., Proakis, J. G., Stojanovic, M. 2011. "Channel Prediction for Adaptive Modulation in Underwater Acoustic Communications," Proc. IEEE OCEANS, 1-5.

Radosevic, A., Ahmed, R., Duman, T., Proakis, J., & Stojanovic, M. (2014). Adaptive OFDM Modulation for Underwater Acoustic Communications: Design Considerations and Experimental Results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(2), pp.357-370.

Ramezani, H., Fazel, F., Stojanovic, M., & Leus, G. 2015. "Collision tolerant and collision free packet scheduling for underwater acoustic localization". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(5), 2584-2595.

Rodoplu, V., & Park, M. K. 2005. "An Energy-Efficient MAC Protocol for Underwater Wireless Acoustic Networks," *Proc. IEEE/MTS OCEANS 2005*, 2, 1198-1203.

Sarisaray, P., Gungor, V.C., Harmanci, E., & Bayderre, S. 2011. "Quality-Aware Image Transmission over Underwater Multimedia Sensor Networks," *Ad Hoc Networks*, 9(7), 1287-1301.

Shakeel, U., Javaid, N., Ejaz, M., Zarar, S., Hafeez, T., & M. 2015. "Improved Interference Aware EEDBR Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks". 2015 10th International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA).

Sherman, C.H. & Butler, J.L., 2008. *Transducer and arrays for underwater sound*, Springer-Verlag New York.

Shokouhifar, M., & Jalali, A., 2015. "A new evolutionary based application specific routing protocol for clustered wireless sensor networks. *AEU Int J Electron*, vol. 69, pp. 432–441.

Shu, X., Wang, H., Yang, X., & Wang, J. (2016). "Chaotic modulations and performance analysis for digital underwater acoustic communications", *Applied Acoustics*, 105, 200-208.

Singh, S., Grund, M., Bingham, B., Eustice, R., Singh, H., & Freitag, L. 2006. "Underwater Acoustic Navigation with the WHOI Micro-Modem," *Proc. IEEE/MTS OCEANS Conference and Exhibition*, 1–4.

Souiki, S., Hadjila, M., & Feham, M. 2015. "Energy efficient routing for Mobile underwater wireless sensor Networks". 2015 12th International Symposium on Programming and Systems (ISPS).

Sozer, E.M., Proakis, J.G., Stojanovic, M., Rice, J.A., Benson, A., & Hatch, M. 1999. "Direct Sequence Spread Spectrum based Modem for Underwater Acoustic Communication and Channel Measurements," Proc. MTS/IEEE OCEANS'99, 1, 228-233.

Stojanovic, M. 2006. "On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel," Proc the 1st ACM international workshop on Underwater networks (WUWnet).

Stojanovic, M., & Freitag, L. 2006. "Multichannel Detection for Wideband Underwater Acoustic CDMA Communications," IEEE Journal of Oceanic Engineering, 31(3), 685–695.

Stojanovic, M., & Preisig, J. 2009. "Underwater Acoustic Communication Channels: Propagation Models and Statistical Characterization," IEEE Communications Magazine, 47(1), 84-89.

Stojanovic, M., & Freitag, L. (2013). "Recent Trends in Underwater Acoustic Communications", Marine Technology Society Journal, 47(5), 45-50.

Syed, A., Ye, W., & Heidemann, J. 2008. "Comparison and Evaluation of the T-Lohi MAC for Underwater Acoustic Sensor Networks," IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 26(9), 1731–1743.

Tan, H. P., Diamant, R., Seah, W. K., & Waldmeyer, M. 2011. "A survey of techniques and challenges in underwater localization". Ocean Engineering, 38(14), 1663-1676.

Tariq, M., Latiff, M. S. A., Ayaz, M., Coulibaly, Y., & Wahid, A. 2016. "Pressure Sensor Based Reliable (PSBR) Routing Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks", Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 32(3-4), 175-196.

Teymorian, A. Y., Cheng, W., Ma, L., Cheng, X., Lu, X., & Lu, Z. 2009. "3D underwater sensor network localization". IEEE Transactions on Mobile Computing, 8(12), 1610-1621.

Urick, R. 1983. Principles of Underwater Sound. McGraw-Hill.

Vasilescu, K., Rus, D., Dunbabin, M., & Corke, P. 2005. "Data Collection, Storage, and Retrieval with an Underwater Sensor Network," Proc. the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys'05), 154-165.

Wahid, A., & Kim, D. 2012. "An Energy Efficient Localization-Free Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 8(4), 307246.

Wahid, A., Lee, S., & Kim, D. 2014. "A reliable and energy-efficient routing protocol for underwater wireless sensor Networks", *Int. J. Commun. Syst.*, 27, 2048-2062.

Waldmeyer, M., Tan, H. P., & Seah, W. K. 2011. "Multi-stage AUV-aided localization for underwater wireless sensor networks". In *Advanced Information Networking and Applications (WAINA), 2011 IEEE Workshops of International Conference on* (pp. 908-913). IEEE.

Watfa, M., Nsouli, T., Ayyash, M. A., & Ayyash, O. 2010. "Reactive localization in underwater wireless sensor networks".

Xie, P., Cui, J. H., & Lao, L. 2006. "VBF: Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks", In: Boavida F., Plagemann T., Stiller B., Westphal C., Monteiro E. (eds) *NETWORKING 2006. Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications Systems. NETWORKING 2006. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3976. Springer, Berlin, Heidelberg.

Xu, J., Li, K., & Min, G. 2012. "Reliable and Energy-Efficient Multipath Communications in Underwater Sensor Networks", *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 23(7), 1326-1335.

Yan, H., Shi, Z. J., & Cui, J. H. 2008. "DBR: Depth-Based Routing for Underwater Sensor Networks", In: Das A., Pung H.K., Lee F.B.S., Wong L.W.C. (eds) *NETWORKING 2008 Ad Hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet. NETWORKING 2008. Lecture Notes in Computer Science*, vol 4982. Springer, Berlin, Heidelberg.

Yang, C., Ssu, K., & Yang, C. 2015. "A collision-analysis-based energy-efficient routing protocol in 3D underwater acoustic sensor Networks", *Computer Communications*, 66, 25-35.

Yi, J., Mirza, D., Kastner, R., Schurgers, C., Roberts, P., & Jaffe, J. 2015. "ToA-TS: Time of arrival based joint time synchronization and tracking for mobile underwater systems". *Ad Hoc Networks*, 34, 211-223.

Yu, H., Yao, N., & Liu, J. 2015. "An adaptive routing protocol in underwater sparse acoustic sensor Networks". *Ad Hoc Networks*, 34, 121-143.

Yu, Z., Xiao, C., & Zhou, G. 2014. "Multi-objectivization-based localization of underwater sensors using magnetometers". *IEEE Sensors Journal*, 14(4), 1099-1106.

Zhan, A., Chen, G., & Wang, W. 2009. "Utilizing automatic underwater vehicles to prouzun the lifetime of underwater sensor networks". *Computer Communications and Networks*, 2009. ICCCN 2009. Proceedings of 18th IEEE Internatonal Conference on (pp. 1-6).

Zhang, C., Han, G., Jiang, J., Shu, L., Liu G., & Rodrigues, J. J. P. C. 2014. "A Collaborative Localization algorithm for underwater acoustic sensor networks," *Computing, Management and Telecommunications (ComManTel)*, 2014 International Conference on, Da Nang, pp. 211-216.

Zhang, S., Li, D., & Chen, J. 2013. "A Link-State Based Adaptive Feedback Routing for Underwater Acoustic Sensor Networks", *IEEE Sensors Journal*, 13(11), 4402-4412.

Zhou, Y., He, J., Chen, K., Chen, J., & Liang, A. 2009. "An area localization scheme for large scale underwater wireless sensor Networks". In *Communications and Mobile Computing*, 2009. CMC'09. WRI International Conference on (Vol. 1, pp. 543-547). IEEE.

Zhou, Y., Gu, B. J., Chen, K., Chen, J. B., & Guan, H. B. 2009. "An range-free localization scheme for large scale underwater wireless sensor Networks". *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 14, 562-568.

Zhou, Z., Cui, J. H., & Zhou, S. 2007. "Localization for large-scale underwater sensor Networks". In *International Conference on Research in Networking* (pp. 108-119). Springer Berlin, Heidelberg.

Zhou, Z., Peng, Z., Cui, J. H., Shi, Z., & Bagtzoglou, A. 2011. "Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks". *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 10(3), 335-348.

Zhou, Z., Peng, Z., Cui, J., & Shi, Z. 2011. "Efficient Multipath Communication for Time-Critical Applications in Underwater Acoustic Sensor Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 19(1), 28-41.



Zhou, Z., Cui, J. H., & Zhou, S. 2010. "Efficient localization for large-scale underwater sensor networks". *Ad Hoc Networks*, 8(3), 267-279.

Zhu, G., Jiang, R., Xie, L., & Chen, Y. 2014. "A distributed localization scheme based on mobility prediction for underwater wireless sensor networks". In *The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)* (pp. 4863-4867). IEEE.

Zorzi, M., Casari, P., Baldo, N., & Harris, A.F. 2008. "Energy-efficient Routing Schemes for Underwater Acoustic Networks, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 26(9), 1754-1766.

GCPRIS

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. VEHBİ ÇAĞRI GÜNGÖR
Proje No:	114E248
Proje Başlığı:	Kablosuz Sualtı Akustik Algılayıcı Ağlarında Güvenilir İletişim
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	GÜRKAN TUNA
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ABDULLAH GÜL Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/03/2015 - 01/03/2018
Onaylanan Bütçe:	354001.0
Harcanan Bütçe:	91782.41
Öz:	<p>Dünyamızın üçte ikisinden fazlası sularla kaplıdır. Denizlerden, göllerden ve nehirlerden oluşan sualtı dünyası doğal kaynaklar (petrol, doğalgaz ve değerli mineraller) bakımından oldukça zengin olup insanoğlu tarafından henüz tam olarak keşfedilememiştir. Son yıllarda, bilimsel, çevresel, ticari ve askeri uygulamalarda kullanılmak üzere kablosuz sualtı algılayıcı ağların geliştirilmesi ve gerçekleştirilmesi noktasında endüstride ve akademide olağanüstü artan bir hızda ilgi olmuştur. Günümüzde sualtı algılayıcı ağlarının deprem izleme, denizbilim veri toplanması, felaket yönetimi, çevresel kirliliğin gözlemlenmesi, güvenli gemi seyri, çoklu ortam taktik izleme vb. alanlarda çeşitli uygulamaları bulunmaktadır. Bununla birlikte, sualtı akustik ortamı güvenilir ve etkin kablosuz iletişim için ciddi zorluklar yaratmaktadır. Bu bağlamda, güvenilir ve etkin sualtı iletişimin sağlanması için özgün bir iletişim sistemi gerekmektedir.</p> <p>Bu projede, kablosuz sualtı algılayıcı ağlarının ortak problemleri olan yayılım gecikmesinin yüksek ve değişken olması, sualtı kanal kapasitesinin yere, zamana ve frekansa bağlı olarak ciddi şekilde değişiklik göstermesi ve kablosuz sualtı algılayıcı düğümlerinin çok sınırlı enerjiye sahip olması gibi problemlerin adreslenmesi için konum farkında Katmanlar arası İletişim ve Fırsatçı Spektrum Erişim (Kİ-FSE) sistemi önerilmektedir. Geliştirilen Kİ-FSE sistemi kaynakları kısıtlı sualtı elemanları için geleneksel iletişim katman modelinde uygulama katmanından fiziksel katmana kadar iletişim katmanlarının yükünü azaltacak ve performanslarını geliştirecek tam bir katmanlar arası çözümdür. Ayrıca, Kİ-FSE sistemi sualtı ortamında etkin spektrum kullanımını sağlamak için fırsatçı spektrum erişim tekniklerinden faydalanmaktadır.</p> <p>Genel olarak, bu projenin nihai sonucu sualtı ortamları için özgün katmanlar arası ve fırsatçı spektrum erişim esasına dayanan iletişim protokollerinin geliştirilmesi için gerekli metotların ve temel kavramların ortaya konmasıdır. Sonuç olarak; bu projenin kariyer ve eğitimsel faydalarına ilaveten, bu projenin sonuçlarıyla mümkün kılınabilecek sağlam ve geniş ölçekli sualtı algılayıcı ağları sualtı dünyasının bilimsel, çevresel, ticari, askeri, vb. amaçlar için kapsamlı keşfini başarmayı mümkün kılacak ve sualtında bulunan yeni doğal kaynakların (petrol, doğal gaz, vb.) sualtı algılayıcı ağları tarafından keşfedilmesine önyak olacaktır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Kablosuz sualtı akustik algılayıcı ağları, güvenilir iletişim
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

Projenen Yapılan Yayınlar:

- 1- EDHRP: Energy Efficient Event Driven Hybrid Routing Protocol for Densely Deployed Wireless Sensor Networks (Makale - İndeksli Makale),
- 2- QERP: Quality-of-Service (QoS) Aware Evolutionary Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Networks (Makale - İndeksli Makale),
- 3- A survey on deployment techniques, localization algorithms, and research challenges for underwater acoustic sensor networks (Makale - İndeksli Makale),
- 4- LRP: Link quality-aware queue-based spectral clustering routing protocol for underwater acoustic sensor networks (Makale - İndeksli Makale),

GCTÜBİTAK