

SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMANIN KABLOSUZ ALGILAYICI
AĞLARIN ENERJİ TÜKETİMİ VE YAŞAM SÜRESİ
ÜZERİNDEKİ ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ

CELALETTİN KARAKUŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2013

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Ünver KAYNAK
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. Hamza KURT
Anabilim Dalı Başkanı

CELALETTİN KARAKUŞ tarafından hazırlanan SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMANIN KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARIN ENERJİ TÜKETİMİ VE YAŞAM SÜRESİ ÜZERİNDEKİ ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Ali Cafer GÜRBÜZ
Tez Danışmanı

Doç. Dr. Bülent TAVLI
2. Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Hamza KURT

Üye : Doç. Dr. Ali Cafer GÜRBÜZ

Üye : Doç. Dr. Bülent TAVLI

Üye : Doç. Dr. Kemal BIÇAKCI

Üye : Yard. Doç. Dr. İsrail BAHÇECİ

TEZ BİLDİRİMİ

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

Celalettin KARAKUŞ

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Tez Danışmanları : Doç. Dr. Ali Cafer GÜRBÜZ
Doç. Dr. Bülent TAVLI
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Nisan 2013

Celalettin KARAKUŞ

**SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMANIN KABLOSUZ ALGILAYICI
AĞLARIN ENERJİ TÜKETİMİ VE YAŞAM SÜRESİ
ÜZERİNDEKİ ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ**

ÖZET

Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA) çeşitli fiziksel olayların ölçümünü yaparak ortam ve durum gözetleme amacıyla sivil, askeri birçok uygulamada kullanılmaktadır. KAA kısıtlı enerjiye sahip ölçüm yapan algılayıcı düğümlerden ve ölçümlerin toplandığı en az bir baz istasyonundan oluşur. KAA yaşam sürelerini artırmak, algılayıcı düğümü alt-sistemlerinde haberleşme ve hesaplama işlemlerini gerçekleştirmek için harcanan enerjiyle doğrudan ilişkilidir. Sıkıştırılmış Algılama (CS) kuramı, ölçülen fiziksel sinyal eğer seyrekse, sinyalin klasik sinyal geri oluşturma yöntemlerine göre daha az sayıda rastgele doğrusal ölçümlerle geri oluşturulabildiğini öne sürer. Bu önerinin, algılayıcı düğüm enerji tüketimi ve dolayısıyla ağ yaşam süresinin artırılması üzerinde etkileri vardır. Bu tezde, CS tabanlı yöntemin ölçme, veri işleme ve haberleşme işlemleri üzerindeki etkileri klasik sinyal işleme yaklaşımları ile karşılaştırılarak incelenmiştir. İlk aşamada, CS eniyileme problemini çözen yinelemeli algoritmalar incelenmiştir ve algoritmaların sinyali doğru geri oluşturma temelinde birbirleri üzerindeki başarımları benzetimlerle gösterilmiştir. Daha sonra, CS tabanlı yöntem ile klasik sinyal geri oluşturma yöntemlerinin enerji tüketim modelleri oluşturularak, veri akış eniyilemesi temelinde Karışık Tamsayılı Programlama (MIP) ile CS yönteminin KAA yaşam süresi üzerindeki etkinliği incelenmiştir. Parametre uzayı (seyreklik seviyesi, ağ yarıçapı, algılayıcı düğüm sayısı) üzerinde farklı durumlar için nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Nümerik analiz sonuçlarına göre, yeterince seyrek sinyaller için ve ağ yarıçapının küçük olduğu uygulamalarda CS enerji etkinliği sağlayarak ağ yaşam süresini artırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Algılayıcı Ağlar, Sıkıştırılmış Algılama, Seyrek Sinyal Geri Oluşturma Algoritmaları, Karışık Tamsayı Programlama, Algılayıcı Düğüm Enerji Tüketimi, Ağ Yaşam Süresi Eniyilemesi.

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Electrical and Electronics Engineering
Supervisors : Assoc. Prof. Dr. Ali Cafer GÜRBÜZ
Assoc. Prof. Dr. Bülent TAVLI
Degree Awarded and Date : M.Sc. – APRIL 2013

Celalettin KARAKUŞ

**INVESTIGATION OF THE IMPACT OF COMPRESSIVE
SENSING ON THE ENERGY DISSIPATION AND LIFETIME OF
WIRELESS SENSOR NETWORKS**

ABSTRACT

Wireless Sensor Networks (WSN) are used in many applications by the measurement of physical phenomena in order to monitoring the environment and the status of many civil and military applications. WSN consist a number of energy-limited measuring sensor nodes and at least one base station. Improving the lifetime of WSN is directly related with the energy efficiency of computation and communication operations in the sensor nodes. The Compressive Sensing (CS) theory suggests a new way of sensing the signal through linear measurements possibly needing much less number of measurements compared to the conventional cases if the underlying signal is sparse. This result definitely has implications on WSN energy efficiency and prolonging network lifetime. In this study the effects of acquiring, processing, and communicating CS based measurements on WSN lifetime are analyzed in comparison to conventional approaches. Firstly, some of the iterative signal recovery algorithms alternative for solving the CS problem are investigated and performances on each other based on true reconstruction rates are examined. Then, energy dissipation models for both CS and conventional approaches are built and used to construct a Mixed Integer Programming (MIP) framework that jointly captures the energy costs for computation and communication operations. Numerical analyses are performed by systematically sampling the parameter space (*i.e.*, sparsity levels, network radius, and number of nodes). Our results show that CS prolongs network lifetime for sparse enough signals and is more advantageous for smaller network radii.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Compressive Sensing, Sparse Signal Recovery Algorithms, Mixed Integer Programming, Sensor Node Energy Consumption, Network Lifetime Optimization.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince danışmanlığımı yapan ve çalışmalarım süresince desteklerini esirgemeyen danışmanlarım Sayın Doç. Dr. Ali Cafer GÜRBÜZ ve Sayın Doç. Dr. Bülent Tavlı'ya çok teşekkür ederim.

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı bünyesinde bulunan tüm öğretim üyelerine yardımlarından ötürü teşekkür ederim. Eğitimim süresince burs imkanı sağlayan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne ve TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na (BİDEB) teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca benden maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 109E280 numaralı Sıkıştırılmış Uzaktan Algılama ve Görüntüleme başlıklı kariyer projesi dahilindedir ve FP7 Marie Curie Reintegration Grant programı çerçevesinde PIRG04-GA-2008-239506 proje numarasıyla Avrupa Birliği tarafından desteklenmiştir.

İçindekiler

1	GİRİŞ	1
2	KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR VE DOĞRUSAL PROGRAMLAMA	8
2.1	Kablosuz Algılayıcı Ağlar	8
2.2	Algılayıcı Düğümler	10
2.3	Doğrusal Programlama	13
2.3.1	Karışık Tamsayılı Programlama (MIP)	14
2.3.2	Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS)	15
3	SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA VE SEYREK SİNYAL GERİ OLUŞTURMA ALGORİTMALARININ İNCELENMESİ	16
3.1	Sıkıştırılmış Algılama	16
3.1.1	Ortak Seyreklik Seviyeli Sinyal Modeli	21
3.1.2	Doğru Geri Oluşturma için Benzetim Sonuçları	22
3.2	Seyrek Sinyal Geri Oluşturma Algoritmaları	26
3.2.1	OMP Algoritması	27
3.2.2	CoSaMP Algoritması	27

3.2.3	IHT Algoritması	29
3.2.4	LIHT Algoritması	30
3.3	Benzetim Sonuçları	31
3.3.1	Test 1	32
3.3.2	Test 2	32
3.3.3	Test 3	34
3.3.4	Test 4	35
4	ALGILAYICI DÜĞÜMLERDE ENERJİ TÜKETİM MODEL- LERİ	37
4.1	Enerji Tüketim Modelleri	37
4.1.1	Haberleşmeye Bağlı Enerji Tüketimi	38
4.1.2	Hesaplamaya Bağlı Enerji Tüketimi	39
4.2	Algılayıcı Düğümler için Sinyal İşleme ve Haberleşme Senaryoları	41
4.2.1	Senaryo-1, Algılama ve Ham Verinin İletilmesi Yaklaşımı (DANP)	41
4.2.2	Senaryo-2, Algılama ve Dönüşüm Kodlaması ile İşlenerek İletilmesi Yaklaşımı (DATC)	42
4.2.3	Senaryo-3, Algılama ve Sıkıştırılmış Algılama ile İşlenerek İletilmesi Yaklaşımı (DACS)	43
5	KABLOSUZ AĞ MODELİ	45
5.1	Ağ Modeli	45
6	NÜMERİK ANALİZLER	51

6.1	Yönlendirmesiz Ağda Enerji Tüketimi	51
6.2	Çoklu Algılayıcılar için Ağ Yaşam Süresi	52
7	SONUÇLAR	57
	ÖZGEÇMİŞ	67

Şekil Listesi

2.1	Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Örnek Ağ Modelleri	9
2.2	Algılayıcı Düğümde İşlevsel Alt-sistemler	10
3.1	Farklı Seyreklik Seviyeli $N = 512$ Uzunluktaki Sinyallerin Doğru Geri Oluşturulması için Gerekli Ölçüm Sayısı	24
3.2	Ölçümlerinde Farklı Oranlarda Ortak Seyreklik Seviyesinin Olduğu 10 Adet Algılayıcının $N = 512$ Uzunluktaki Sinyallerin Doğru Geri Oluşturulması için Alması Gereken Ölçüm Sayısı	25
3.3	Test 1 için Doğru Geri Oluşturma Oranları, Hata Değerleri (a) $\tau_3 = 10^{-3}$, (b) $\tau_3 = 10^{-5}$	33
3.4	Test 2 için Doğru Geri Oluşturma Oranları, Hata Değerleri (a) $\tau_3 = 10^{-3}$, (b) $\tau_3 = 10^{-5}$	33
3.5	Test 3 için Doğru Geri Oluşturma Oranları (a) $\tau_3 = 10^{-3}$, (b) $\tau_3 = 10^{-5}$	34
3.6	Test 4, Algoritmaların Gürültüye Gürbüzlüğü	35
5.1	MIP Çerçevesi	48
6.1	DANP, DATC ve DACS Sinyal İşleme Senaryoları için Tek Bir Algılayıcı Düğümün Toplam Enerji Tüketimi (1) 50 m ve (2) 100 m.	52

6.2	Değişen Algılayıcı Düğüm Sayısına (ζ) göre Normalleştirilmiş KAA Yaşam Süresi, Ağ Yarıçapı $R_{net} = 100$ m ve Seyreklik Seviyesi Oranları (a) $K/N = 0.05$, (b) $K/N = 0.10$, (c) $K/N = 0.15$ ve (d) $K/N = 0.20$ 'dir.	54
6.3	Değişen Ağ Yarıçapına (R_{net}) göre Normalleştirilmiş KAA Yaşam Süresi, Algılayıcı Düğüm Sayısı ($\zeta = 50$) ve Seyreklik Seviyesi Oranları (a) $K/N = 0.05$, (b) $K/N = 0.10$, (c) $K/N = 0.15$, ve (d) $K/N = 0.20$ 'dir	55

Tablo Listesi

2.1	Bazı Algılayıcı Düğümlerin Donanımsal Özellikleri	11
2.2	Algılayıcı Düğümlerde Kullanılan Mikroişlemciler	12
2.3	Algılayıcı Düğümlerde Kullanılan Radyolar	13
3.1	CS için Semboller ve Tanımları	20
3.2	OMP Algoritması	28
3.3	CoSaMP Algoritması	29
3.4	IHT Algoritması	30
3.5	LIHT Algoritması	31
4.1	Mica2 Platformu için Farklı Menzillere göre Haberleşme (Veri İletimi) Nedenli Enerji Tüketimleri ($\mu\text{J}/\text{bit}$).	38
4.2	Algılayıcı Düğümlerde Enerji Tüketim Modelleri için Değişken Semboller ve Tanımları	44
5.1	Ağ Modeli için Değişken Semboller ve Tanımları	50

1. GİRİŞ

Günümüzde Kablosuz Algılayıcı Ağlar¹ (KAA) ölçüm yaparak ortam ve durum gözetleme amacıyla sivil, askeri birçok endüstride kullanılmaktadır. KAA fiziksel olayları gözlemlemek ve ortamdaki sinyalleri ölçmek için belli bir alana dağıtılmış algılama, veri işleme, radyo (almaç&göndermeç)², batarya ve güç dağıtım birimleri olan algılayıcı düğümlerden³ ve verilerin iletiildiği ve toplandığı en az bir baz istasyonundan oluşur [1]. Farklı uygulamalara göre görüntü, ses, titreşim vb. gibi fiziksel olayların ölçümünü yapabilen algılayıcılar, ölçüm sinyallerinin ham veya işlenmiş halini radyo frekansı (RF⁴) kapsama alanına giren ve röle işlevi gören komşu algılayıcı düğümler aracılığıyla veya doğrudan baz istasyonuna gönderir. Birçok KAA uygulamasında asıl amaç algılayıcı düğümler tarafından baz istasyonuna iletilen ölçüm sinyalinin baz istasyonunda en doğru biçimde geri oluşturulmasıdır. Baz istasyonu, algılayıcı düğümler tarafından gönderilen ham veya işlenmiş ölçüm sinyallerinin toplandığı, ölçülen gerçek (hedef) sinyallerin geri oluşturulduğı ve son işlemlerin yapıldığı klasik düğümlerden farklı ana düğümdür [2]. Klasik KAA'larda, enerji ihtiyacını yenilenemeyen bataryalardan karşılayan algılayıcı düğümler, genellikle bataryaların şarj edilmesinin mümkün olmadığı ortamlarda görev yapar. Dolayısıyla, algılayıcı düğümler sınırlı enerjiye sahiptir [3]. Verilerin toplandığı ve değerlendirildiğı baz istasyonunun ise algılayıcı düğümlere nazaran enerji kısıtı bulunmaz [4]. Kullanımları gereğı düğümlerin erişimden uzak farklı koşullar altında çalışması istenir. Bataryalar tükendikten sonra yenilenme veya değiştirilme imkanının olmaması nedeniyle, kablosuz algılayıcı düğümlerinin enerji tüketim karakteristiğı ve enerji tüketiminin yenilenmesi yani enerji verimliliğinin sağlanması büyük önem arz etmektedir.

¹ing: Wireless Sensor Networks

²ing: receiver&transmitter

³ing: sensor nodes

⁴ing: Radio Frequency

Ölçülen sinyalin geri oluşturulması için algılayıcı düğüm platformlarının donanım ve yazılım mimari tasarımları yıllardan beri Shannon örnekleme teoremi temelinde yapılmaktadır [5]. Klasik sinyal işleme tekniklerine göre baz istasyonunda algılayıcıların ölçüm sinyallerinin doğru geri oluşturulması için algılayıcı düğüm sinyali Nyquist oranında (örneklenen sinyalin frekansının en az iki katında) örnekleme yapar. Örnekleme işlemi sonucunda sinyalin ham ölçümleri elde edilir. Eğer ölçülen sinyal seyrek yani sıkıştırılabilir ise, algılayıcı düğümde bir dönüşüm tabanı kullanılarak sinyalin ayrıştırılması sağlanır, neticede sinyalin enerjisinin büyük kısmı az sayıda katsayı ile ifade edilir. Algılayıcı düğüm dönüştürme (sıkıştırma) işlemi sonucunda elde ettiği yüksek enerjili sinyal katsayılarını ve sinyal katsayılarının ölçüm içinde bulunduğu konum bilgilerini içeren veri paketini baz istasyonuna gönderir. Bu yöntemin dışında, algılayıcı mimari yapısına ve ölçüm karakteristiğine göre algılayıcı düğüm ölçümünü yaptığı ham verileri herhangi bir dönüştürme işlemi yapmadan doğrudan baz istasyonuna iletebilir. Örneğin, görüntü alan bir algılayıcı düğüm, öncelikle resim içindeki her bir pikselin değerini ölçer. Eğer resim sıkıştırılabilir ise bunu ayrık kosinüs dönüşümüne (DCT^5) tabi tutar. Sıkıştırma sonucunda az sayıda DCT katsayısı ile ölçümü yapılan resmin enerjisinin büyük kısmı ifade edilebilir. DCT katsayıları ve veri içindeki konumları kaydedilerek, geri kalan katsayılar atılır. Az enerjili DCT katsayılarının atılması, resmin kalitesini ve çözünürlüğünü bozmaz. Algılayıcı düğüm resmin içindeki ham piksel değerlerini veya sıkıştırma sonunda elde edilen DCT katsayılarını ve katsayıların indeks numaralarını (dizin içindeki konum bilgilerini) baz istasyonuna iletir.

Klasik sinyal işleme teknikleri dışında, Sıkıştırılmış Algılama (CS^6) teoremi yeni bir sinyal ölçüm ve geri oluşturma yöntemi sunmaktadır. CS kuramına göre sinyal eğer seyrek veya bir dönüşüm tabanında sıkıştırılabilir ise az sayıda rastgele doğrusal ölçümle ℓ_1 tabanlı dışbükey eniyileme problemi çözülerek geri oluşturulabilir [6, 7]. Sinyalin doğru geri oluşturulması için gereken ölçüm sayısı sinyalin seyreklik seviyesi ile doğrudan ilişkilidir. CS'nin KAA'da algılayıcı düğümler tarafından sinyal işleme tekniği olarak kullanılmasıyla, klasik algılayıcı düğümlerin yaptığı işlemler gibi ölçülen sinyal üzerinde dönüşüm ve seçim işlemleri yapılmaz ve CS ölçümü doğrudan baz istasyonuna gönderilir [8–13]. CS ile hedef sinyalin bütün verilerinin ölçülmesine gerek yoktur, dolayısıyla

⁵ing: discrete cosine transform

⁶ing: Compressive Sensing

ölçümün yeni bir gösterim alanına dönüştürülmesine gerek kalmaz; yani hedef sinyali, ölçümü yapılırken sıkıştırılabilir. Algılayıcı düğüm CS ile işlem yaparsa ve bu durum klasik sinyal işleme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, algılayıcı düğüm ham veri sayısından daha az sayıda ölçüm iletir; fakat dönüştürme işlemlerini yapan sinyal işleme tekniklerine göre daha fazla sayıda veri iletir. Bu yüzden, CS tabanlı sinyal işlemenin KAA'daki her bir düğüme uyarlanması ile, CS'in klasik sinyal işleme yöntemlerine göre enerji tüketim karakteristiği incelenecek ve KAA'nın yaşam süresini hangi koşullarda artırdığı tespit edilecektir. Bu çalışmada, ilk aşamada, CS problemini çözen ℓ_1 tabanlı dışbükey eniyileme algoritmasının yanında, CS problemini çözebilen yinelemeli seyrek sinyal geri oluşturma algoritmaları incelenmiştir. Yapılan benzetimlerle farklı seyreklik seviyeli sinyaller için yinelemeli yöntemlerin, dışbükey eniyileme yöntemleri ile benzer performansta doğru geri oluşturma oranlarına sahip olduğu gösterilmiştir. Bir KAA'da ölçümü yapılan hedef sinyallerin son toplanma ve geri oluşturulma noktası olan baz istasyonunda ℓ_1 tabanlı dışbükey yöntemleri ile geri oluşturulabildiği gibi, yinelemeli yöntemlerin de hesaplama karmaşıklığını azaltmak ve işlem süresini kısaltmak için kullanılabilmesi değerlendirilmiştir. İkinci aşamada, CS ve klasik sinyal geri oluşturma yöntemlerinin enerji etkinliklerinin adil biçimde karşılaştırılması için algılayıcı düğümlerde haberleşme ve hesaplama enerji tüketimleri birlikte ele alınmıştır. Gerçek bir algılayıcı düğümün deneysel güç tüketim sonuçları kullanılarak CS'nin de içinde olduğu farklı sinyal işleme senaryoları için enerji tüketim modelleri oluşturulmuştur. Bu amaçla, bir KAA'da hesaplama ve haberleşme işlemlerinin maliyetlerini ve kısıtlarını içeren Karışık Tamsayılı Programlama (MIP⁷) modeli oluşturularak CS tabanlı ve klasik sinyal işleme yöntemlerinin ağ yaşam süresi üzerindeki etkinliği incelenmiştir. Haberleşme ağlarının MIP ile analizi temel performans sınırlarını yakalama açısından oldukça yaygındır [14]. MIP kullanarak ağ analizi yapmanın birçok avantajı vardır. Bunlardan ilki ideal koşullarda veri paketlerinin eniyi yönlendirme kararları ile özel algoritmalar olmadan enerji maliyetlerini araştırmaktır. İkinci olarak, eniyileme problem çözücüsü içindeki bilgiye (kısıtlara ve amaç fonksiyonuna) bağlı sonuçlar tutarlı bir şekilde elde edilebilir.

Literatürde, CS kuramının KAA üzerine uyarlanmış birçok uygulaması mevcuttur. [8] numaralı çalışmada, KAA'da ölçülen sinyallerin ortak seyreklik

⁷ing: Mixed Integer Programming - MIP

seviyelerinin olmasının avantajlarından bahsedilmiştir. Buna göre, ortak seyreklik seviyeli sinyallerin dağıtılmış sıkıştırılmış algılama⁸ teknikleri kullanılarak daha az ölçüm sayısı ile geri oluşturulabildiği, algılayıcı düğümlerin düşük karmaşıklığı ve gürbüz oluşu gösterilmiştir. [9] numaralı çalışmada dağıtılmış ağda sıkıştırılmış algoritmaların kullanılmasının akıllı bina uygulamalarında getirdiği avantajlardan bahsedilmiştir. Bu çalışmaya göre, her bir algılayıcı düğüm klasik veri toplama çerçevelerini veya sıkıştırılmış algılama yöntemini kullanarak gönderdiği veri paketi sayısını azaltabilmektedir. [10] numaralı çalışmada, KAA'da CS ölçüm yöntemleri kullanılarak yönlendirme metodlarının birbirleri üzerindeki etkinliği incelenmiştir. [11] numaralı çalışmada, CS tabanlı ölçümün ECG sıkıştırması üzerindeki etkisi incelenmiştir, CS'in kablosuz vücut ölçüm ağları (Shimmer) için düşük karmaşıklık ve enerji etkin olduğu gösterilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre CS yöntemi sayısal dalgacık dönüşümü⁹ tabanlı ECG sıkıştırması için iyi bir alternatiftir. [12] numaralı çalışmada çevredeki fiziksel olayları izleyen CS tabanlı KAA gösterilmiştir. Sinyallerin sıkıştırılabilir ve gerekli olan ölçüm sayısının düşürülebilir olduğu gösterilmiştir. [13] numaralı çalışmada KAA için CS tabanlı veri toplama algoritmaları incelenmiştir, teorik sonuçlara göre çok az sayıda sıkıştırılmış veri ile ölçümlerin geri oluşturulabileceği gösterilmiştir. [15] numaralı çalışmada, sualtı algılayıcı ağlarında enerji ve bant genişliği verimliliği elde etmek için rastgele kanal erişimi ve CS kavramlarını birleştiren bir dağıtılmış ağ şeması önerilmiştir. Çarpışmalar nedeniyle rastgele paket kaybını telafi etme için sunulan yeterli algılama için olasılık kavramı hakkında bilgi verilmiştir. [16] numaralı çalışmada, KAA'da etkin veri oluşturma ve ölçeklenebilir iletişimi sağlamak için CS ve ağ kodlamasını birleştiren bir çerçeve (NetCompress) sunulmuştur. CS, sinyal korelasyonları ile veriyi daha az sayıda ölçümle ve yüksek olasılıkla geri oluştururken, ağ kodlaması ile daha etkin veri toplama ve haberleşme imkanı sağlayarak iletişim yükünü enküçükler.

KAA kapsamında MIP yaklaşımı daha önce birçok çalışmada ağ problemlerini modellemek, ağ için özel olan değişkenleri eniyilemek ve ağ problemlerini çözmek için çalışılmıştır [17, 18]. MIP kullanılarak KAA analizinin yapıldığı güncel çalışmalar şu şekildedir. [19] numaralı çalışmada, KAA'daki iletimlerin organizasyonu için IEEE 802.15.4 protokolünün kapasitesi ve enerji tüketim karakteristiği MIP ile incelenerek, ağ kapasitesi için en iyi sonuç elde edilmiştir. [20] numaralı

⁸ing: Distributed Compressive Sensing

⁹ing: digital wavelet transform

çalışmada, sürekli veri toplamının gerçekleştirildiği bir KAA modelinde gerekli olan en az sayıda röle istasyon yerleşimi MIP modeli çerçevesinde incelenmiştir. [21] numaralı çalışmada, alternatif enerji kaynağı olarak düşünülen RF şarj kaynaklarının bir KAA'da yerleşimleri MIP ile eniyilenmiştir. [22] numaralı çalışmada, 2 farklı ortak yönlendirme ve planlama algoritması incelenerek veri iletim gecikmesinin enküçüklenmesi problemi, ağda enerji etkinliği düşünülerek MIP ile modellenmiştir. [23] numaralı çalışmada, belirli zaman dilimlerinde röle işlevi gören algılayıcı düğümlerin ağdaki konumlarını değiştirmenin hata toleransı üzerindeki etkinliği, enerji enküçüklemesi temelinde MIP ile incelenmiştir. [24] numaralı çalışmada, algılayıcı düğümlere gelen ve algılayıcı düğümlerden çıkan veri paket sayısının sınırlandırılmasının ağ yaşam süresine olan etkisi MIP çerçevesinde modellenmiştir ve incelenmiştir.

Bu tez çalışmasının ilerleyen bölümleri aşağıda anlatıldığı gibi planlanmıştır.

2. bölümde Kablosuz Algılayıcı Ağlar'ın (KAA) temelleri, algılayıcı düğümlerin donanımsal mimarisi, piyasada mevcut olan algılayıcı düğüm platformları ve donanımsal özellikleri anlatılmıştır. Bunun yanında, KAA'ların doğrusal programlama ile modellenebilmesi ve Karışık Tamsayı Programlama'nın temellerinden bahsedilmiştir. KAA için eniyileme problemlerini çözen genel cebirsel modelleme sistemi (GAMS¹⁰) hakkında bilgi verilmiştir.

3. bölümde Sıkıştırılmış Algılama (CS) kuramı ve matematiksel temellerinden bahsedilmiştir. Birden çok algılayıcı düğümün ölçümlerinde ortak seyrekliğin olduğu sinyaller için ortak seyreklik seviyeli sinyal modeli oluşturulmuştur. Sinyalin baz istasyonunda doğru geri oluşturulması farklı seyreklik seviyelerindeki sinyaller için bir algılayıcı düğümün ölçmesi gereken en az sayıda ölçüm sayısı yapılan benzetimlerle belirlenmiştir. Fiziksel sinyalin bir grup algılayıcı tarafından ölçüldüğü durumda, ölçülen sinyallerde ortak seyreklik seviyesinin olması durumu ve bu durumda algılayıcı düğümlerin ölçmesi gereken en az ölçüm sayısı benzetimleri yapılmıştır. Yapılan benzetimler ile bir algılayıcı düğümün ya da bir grup algılayıcının sıkıştırılmış algılama ile sinyal işlemesi durumunda farklı seyreklik seviyeli sinyallerin doğru geri oluşturulması için ölçülmesi gereken en az veri miktarı sayısı tespit edilmiştir. Sıkıştırılmış algılama problemi genelde dışbükey eniyileme yöntemlerinden ℓ_1 tabanlı eniyileme yöntemi kullanılarak

¹⁰ing: General Algebraic Modeling System

çözülmemektedir. ℓ_1 eniyileme yönteminin dışında, çözüme adım adım yaklaşan yinelemeli yöntemlerden Dikgen Eşleştirme Takibi (OMP¹¹), Sıkıştırılmış Algılamalı Eşleştirme Takibi (CoSaMP¹²), Yinelemeli Sert Eşikleme (IHT¹³) ve Lipstcihiz Yinelemeli Sert Eşikleme (LIHT¹⁴) algoritmaları incelenmiştir. Ölçüm sinyalinin doğru geri oluşturulması için alınması gereken en az veri miktarı dikkate alınarak, bu algoritmaların birbirlerine ve ℓ_1 eniyileme yöntemine göre başarımları farklı testlerle karşılaştırılmıştır. Sıkıştırılmış algılama probleminin çözümünde yinelemeli algoritmaların kullanılabilceği ve bu algoritmaların dışbükey eniyileme yöntemine yakın performansta çalıştığı gösterilmiştir.

4. bölümde farklı sinyal işleme tekniklerine göre algılayıcı düğümlerin alt-sistemlerinde harcanan enerji için enerji tüketim modelleri oluşturulmuştur. Öncelikle algılayıcı düğümde haberleşme ve hesaplama nedenli enerji tüketimlerinin matematiksel modellenmesi yapılmıştır. Klasik yöntemler veya CS ile yapılan sinyal işlemenin, aritmetik işlem sayımı temelinde hesaplama ve haberleşme enerji tüketim modelleri oluşturulmuştur. Buna göre, bir algılayıcı düğümde enerji tüketimleri Algılama ve Ham Verinin İletilmesi Yaklaşımı (DANP¹⁵), Algılama ve Dönüşüm Kodlaması ile İşlenerek İletilmesi Yaklaşımı (DATC¹⁶) ve Algılama ve Sıkıştırılmış Algılama ile İşlenerek İletilmesi Yaklaşımı (DACP¹⁷) senaryoları ile incelenmiştir ve her durum matematiksel olarak modellenmiştir.

5. bölümde bir KAA'da gerçekleşen tüm sinyal işleme, haberleşme ve veri paketi yönlendirme işlemleri için 4. bölümde verilen sinyal işleme ve haberleşme senaryolarını içeren ağ modeli Karışık Tamsayılı Programlama (MIP) çerçevesinde oluşturulmuştur. MIP çerçevesi içinde eniyileme probleminin amaç fonksiyonu ve kısıtları tanımlanmıştır. Ağ modelinde amaç fonksiyonu ağ yaşam süresini ençoklamak olarak belirlenmiştir.

6. bölümde MIP probleminin çözümü ve nümerik analiz sonuçları verilmiştir. İlk aşamada, ağda veri akış eniyilemesi olmadan sadece bir algılayıcı düğümün farklı seyreklik seviyeli sinyallerin ölçümü için enerji tüketim (sinyal işleme ve

¹¹ing: Orthogonal Matching Pursuit

¹²ing: Compressive Sensing Matching Pursuit

¹³ing: Iterative Hard Thresholding

¹⁴ing: Lipstcihiz Iterative Hard Thresholding

¹⁵ing: Data Acquisition and No Processing

¹⁶ing: Data Acquisition and Transform Coding

¹⁷ing: Data Acquisition and Compressive Sensing

haberleşme) benzetimleri yapılmıştır. İkinci aşamada, her bir sinyal işleme ve haberleşme senaryosuna göre değişen ağ yarıçaplarında veri akış eniyilemesi temelinde, ağ yaşam süresi farklı seyreklik seviyeli sinyallerin ölçümü için hesaplatılmıştır. Üçüncü bölümde, her bir sinyal işleme ve haberleşme senaryosuna göre sabit ağ yarıçapında değişen algılayıcı düğüm sayısına göre veri akış eniyilemesi temelinde, ağ yaşam süresi farklı seyreklik seviyeli sinyallerin ölçümü için hesaplatılmıştır.

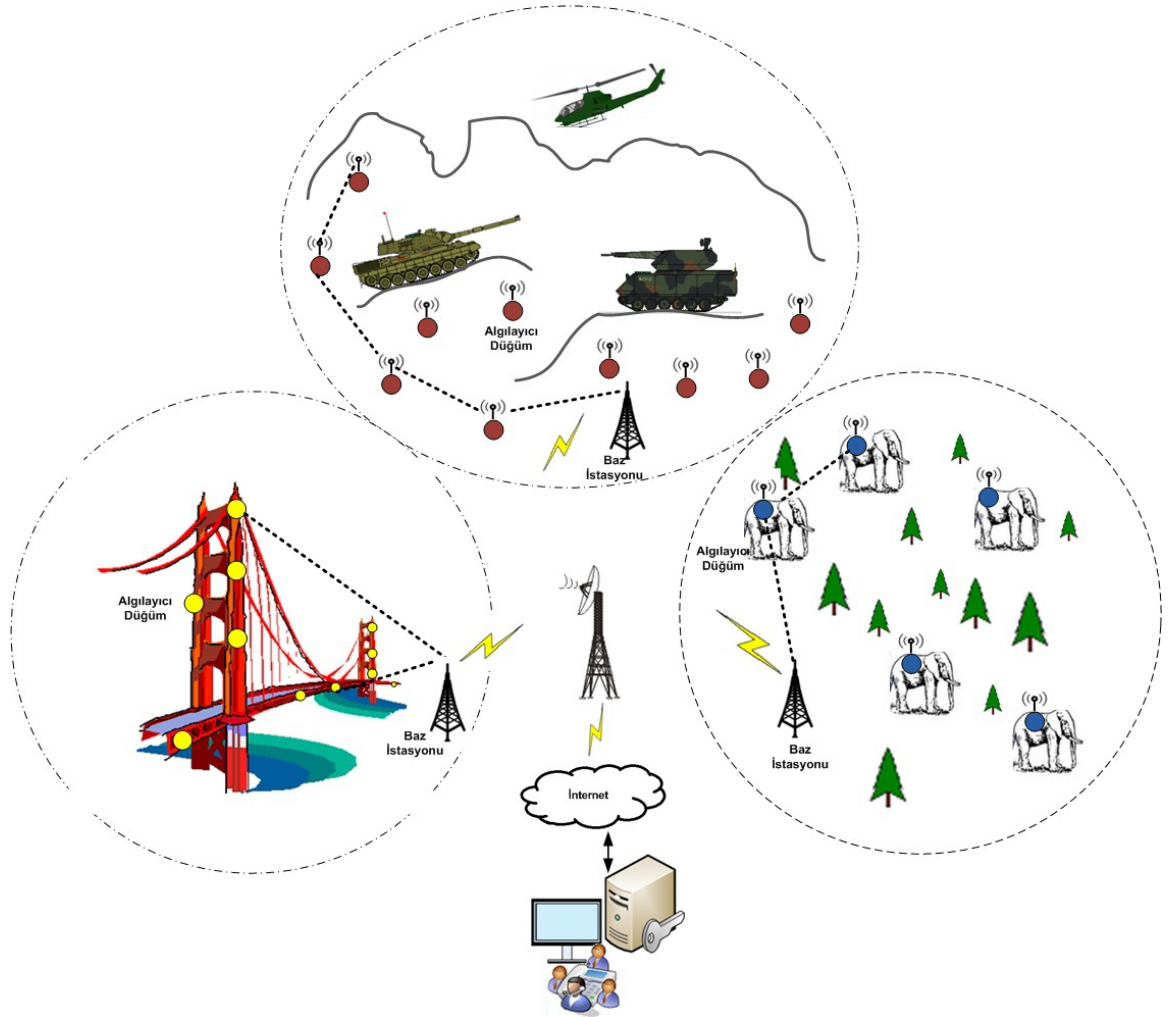
7. ve son bölümde tez kapsamında yapılan çalışmaların değerlendirmesi yapılmıştır ve tezin sonuçları verilmiştir.

2. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR VE DOĞRUSAL PROGRAMLAMA

2.1 Kablosuz Algılayıcı Ağlar

Kablosuz iletişim, algılama, ölçüm ve veri işleme teknolojilerinde meydana gelen gelişmeler düşük maliyetli, çok işlevli, küçük ve etkin algılayıcı düğümlerin üretilmesine ve piyasaya sürülmesine imkan sağlamıştır. Birden çok algılayıcı düğümün birbirleriyle haberleşebilecek uzaklıklarda belirli bir alana düzgün yerleştirilerek veya dağıtılarak bir araya getirilmesiyle Kablosuz Algılayıcı Ağ (KAA) oluşturulur. KAA geniş bir yelpazede farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Çevre gözetlemesi ile fiziksel olayların (sıcaklık, nem vb.) ölçümü, akıllı bina ölçümleri, yapısal sağlamlık izleme gibi sivil uygulamalar; ortamların gözetilmesi ve elektronik harp gibi askeri uygulamalar; arazideki zirai ölçümlerin takip edilmesi gibi tarım uygulamaları; habitat ve canlı gözleme gibi zoolojik uygulamalar, implante tıbbi cihazlar üzerinden ölçümler gibi sağlık uygulamaları olmak üzere farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır ve her uygulama için farklı ağ yapılandırmalarına ve ağ topolojilerine sahip olabilmektedir [25].

KAA erişimi zor ortamlardan kablosuz olarak veri ölçülmesini, verinin işlenmesini ve işlenen verinin enerji kısıtı olmayan baz istasyonuna iletilmesini sağlayan kısıtlı enerjiye sahip algılayıcı düğümlerden ve verinin toplandığı en az bir baz istasyonundan oluşur. Algılayıcı düğümlerin taşınması, kurulumu ve ağa entegrasyonu kolaydır. Algılayıcı düğümlerin kullanılması için herhangi bir kablo ağı ve enerji



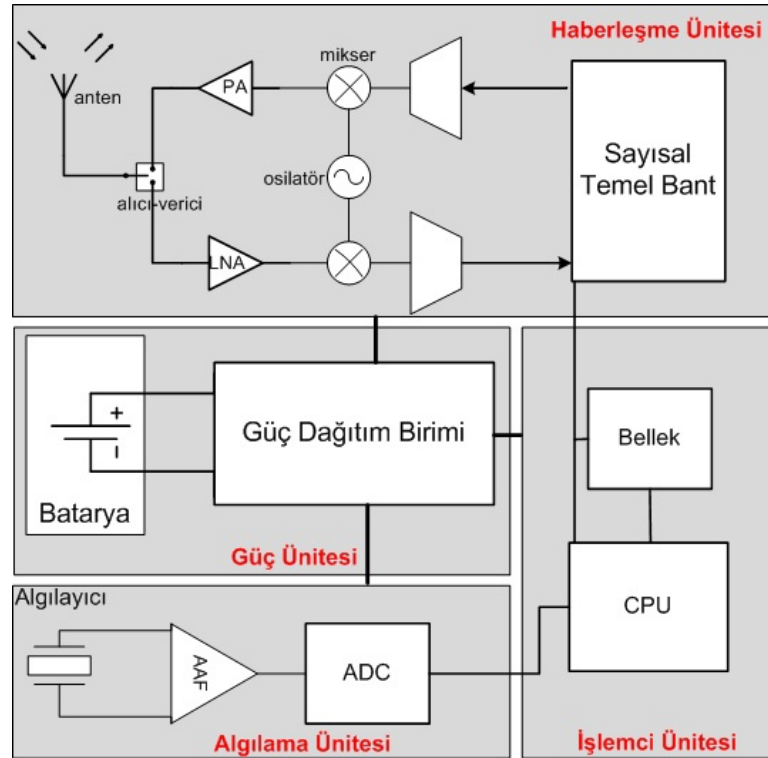
Şekil 2.1: Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Örnek Ağ Modelleri

alt yapısı gerekmez. Kablo ağı ve alt yapı elemanları bulunmadığı için, düğümler erişimden uzak ve farklı ortamlara yerleştirilebilir ve ağ farklı uygulamalar için uyarlanabilir. KAA'da her bir alt düğüm işlevlerini diğer algılayıcı düğümlerden bağımsız olarak yerine getirir. Algılayıcı yapısına ve işlevine göre ortamdaki fiziksel olayların (görüntü, ses, titreşim, sıcaklık, nem, basınç vb.) ölçümünü yapabilen algılayıcılar, alt sistemlerinde veri işleme adımlarını gerçekleştirdikten sonra radyo frekans (RF) haberleşmesi vasıtasıyla veriyi, bütün algılayıcı düğüm verilerinin toplandığı ve değerlendirmeye alındığı baz istasyonuna gönderir. Algılayıcı düğümler ölçüm yapılan sahaya çok sayıda yerleştirilebilir, bu sayede çok geniş alanların kapsanmasına olanak sağlanır. Ağda bulunan düğümlerin bozulması veya kaybolması diğer düğümlerin ölçümleri tarafından telafi edilebilir;

dolayısıyla ağ, algılayıcı düğümlerin düşük performansına veya bozularak işlevini yitirmesine karşı gürbüzdür.

2.2 Algılayıcı Düğümler

Algılayıcı düğümler, kablosuz ağlarda kullanılan, algılama, veri işleme, güç ve haberleşme donanımlarına sahip elektronik ekipmanlardır. Klasik bir algılayıcı düğümde, güç kaynağı (batarya ya da pil), güç dağıtım ünitesi, algılayıcı (ölçüm) birimleri, analog-sayısal dönüştürücü, işlemci, bellek ve radyo birimleri bulunur. Genelgeçer bir algılayıcı düğümü için donanımsal mimari Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Algılayıcı Düğümde İşlevsel Alt-sistemler

Günümüzde mevcut olan farklı nesil algılayıcı düğüm platformlarının ve sahip oldukları donanımların özellikleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Algılayıcı birimi, işlevine göre ortamdaki ses, görüntü, sıcaklık vb. gibi fiziksel

Tablo 2.1: Bazı Algılayıcı Düğümlerin Donanımsal Özellikleri

Platform	İşlemci	Radyo	Harici Bellek	Güç Kaynağı
WesC	AT90LS8535	TR1000	32 kB	Lityum
MICA	ATMega128L	TR1000	512 kB	AA
MICA2	ATMega128L	CC1000	512 kB	AA
MICA2Dot	ATMega128L	CC1000	512 kB	Lityum
MICAz	ATMega128L	CC2420	512 kB	AA
Telos	MSP430F149	CC2420	512 kB	AA
iMote	ARM7TDMI Core	Bluetooth	512 kB + 64 kB SRAM	AA
Medusa MK-2	ATMega103L	TR1000	4 Mb	Li-ion
iBadge	ATMega128L	Bluetooth, TR1000	4 Mb	Li-ion
DIY	PIC18F252	BiM2	64 kB FRAM	AAA&Lityum
Particle	PIC18F6720	RFM TR1001	32 kB EEPROM	AAA&Lityum
BT Nodes	ATMega128L	Bluetooth, CC1000	244 kB SRAM	AA
ZebraNet	MSP430F149	9XStream	4 Mb	Li-ion
Pushpin	C8051F016	Infrared	32 kb	AA
WINS 3.0	PXA255	802.11b	1GB + 64 MB SDRAM	Kurşun-asit

olayları algılayan ve ölçen donanımlardır. Algılayıcı birimi çalışması için enerji ihtiyacına göre pasif veya aktif olarak gruplandırılabilir. Örneğin, Mica 2 platformuna entegre olabilen Mica Weather Board modülü üzerinde sıcaklık, barometrik basınç, nem, ışıdirenç (fotoresistör), infrared (termopil) algılayıcıları bulunur [26].

Algılayıcı düğüm işlevlerini yerine getirebilmesi ve alt-sistem donanımlarını beslemesi için gerekli olan enerjiyi düğüme entegre pil veya bataryadan sağlar. Örnek olarak, düğüm güç ihtiyacını lityum, lityum-ion ve klasik alkalin pilden sağlayabilir. Pilin dışında güç ünitesi altında, algılayıcı düğüm alt-sistemlerinin ihtiyacı olan ikincil güçlerin oluşturulduğu güç dönüştürücü birimi vardır. Bu birimde sayısal-sayısal voltaj dönüştürücüleri ve akım düzenleyicileri bulunur.

Analog-sayısal dönüştürücü (ADC), klasik sinyal işleme teknikleri ile ölçüm sonrasında analog olarak alınmış ölçüm sinyalinin sayısal veriye dönüştürülerek

sıkıştırılabilmesi ve işlenmesine imkan sağlayan birimdir. Sinyal ölçümü yapıldıktan ve filtrelendikten sonra, analog-sayısal dönüştürücüye gönderilir. Çoğu fiziksel sinyalin karakteristiği düşünüldüğünde sinyal ölçümleri için yüksek örnekleme oranlarına gerek yoktur.

İşlemci ünitesi, ölçüm verilerini işler ve verinin paketlenmesi işlemlerini gerçekleştirir. Bunun yanında, algılayıcı alt-sistemlerinin işlevselliğini denetler. İşlemci olarak, mikrodenetleyici, alanı programlanabilir kapı dizileri (FPGA¹⁸), veya uygulamaya özel tümleşik devreler kullanılabilir. Enerji tüketim karakteristiğine göre algılayıcı düğümlerde genelde mikroişlemciler tercih edilir. Piyasada mevcut olan ve algılayıcı düğümlerde kullanılan mikroişlemcilerin, çalışma frekansları, hafıza kapasiteleri, veri uzunlukları ve ADC çözünürlükleri Tablo 2.2’de gösterilmiştir. Bellek, işlemci tarafından işlenen verinin radyo ünitesine gönderilmeden önce tutulduğu ve kaydedildiği birimdir.

Tablo 2.2: Algılayıcı Düğümlerde Kullanılan Mikroişlemciler

İşlemci	Frek. (MHz)	Hafıza	Veri Uz. (bit)	ADC (bit)
AT90LS8535	4	8 kB Flash, 512B EEPROM, 512B SRAM	8	10
ATMega128L	8	128 kB Flash, 4 kB EEPROM, 4 kB SRAM	8	10
AT91FR4081	33	136 kB On-Chip SRAM, 8 Mb Flash	32	-
MSP430F149	8	60 kB + 256B Flash, 2 kB RAM	16	12
C8051F016	25	2304B RAM, 32 kB Flash	8	10
PIC18F6720	25	128 kB Flash, 3840B SRAM, 1 kB EEPROM	8	10
PIC18F252	40	32 kB Flash, 1536B RAM, 256B EEPROM	8	10
StrongARM SA-1110	133	-	32	-
PXA255	400	32 kB Instruction Cache, 32 kB Data	32	-

Çoğu algılayıcı düğüm haberleşme için radyo haberleşmesi kullanmaktadır. Radyo ünitesi altında, anten, almaç ve göndermeç birimleri, kipleme ve kipçözücü birimleri yer alır. Radyo birimi, işlemci komutlarıyla işlevsel durumlarına göre, iletim, alma, uyku ve bekleme modlarına getirilebilir. Her bir durumda radyo

¹⁸ing: Field Programmable Gate Array

biriminin enerji tüketimi farklıdır. Çoğu algılayıcı düğümde raftan hazır (COTS¹⁹) radyo tabanlı platformlar kullanılmaktadır. Mevcut radyolardaki göndermeçlerin ortalama çıkış güçleri -25 dBm ile 10 dBm arasında değişirken, almaçların duyarlılık seviyesi -110 dBm seviyelerine ulaşabilmektedir [27]. Algılayıcı düğümlerde kullanılan radyo modelleri, çalıştıkları RF bant aralıkları, veri hızları, almaç duyarlılık seviyeleri ve kullandıkları kipleme teknikleri Tablo 2.3’de gösterilmiştir [27].

Tablo 2.3: Algılayıcı Düğümlerde Kullanılan Radyolar

Radyo Modeli	Bant (MHz)	Veri Hızı (kbps)	Duyarlılık (dbm)	Kipleme Tekniği
TR1000	916.5	115.2	-106	OOK/ASK
TR1001	868.35	115.2	-106	OOK/ASK
CC1000	300-1000	76.8	-110	FSK
CC2420	2400	250	-94	OQPSK
Bim2	433.92	64	-93	OOK/ASK
TR1000	902-928	20	-114	FHSS

2.3 Doğrusal Programlama

Eniyileme²⁰ problemlerinin çözümünde doğrusal programlama kullanılır ve gerçek dünyadaki bir çok problem doğrusal programlama ile modellenenbilir. George Dantzig doğrusal problemlerin çözümünde temel olan Simpleks algoritmasını bulduktan sonra doğrusal programlama problemlerin modellenmesinde ve çözümünde sıklıkla kullanılmıştır [28]. Doğrusal programlama elde olan kaynakların en iyi ve en verimli şekilde kullanılarak maliyetlerin enküçüklenip, karın ençoklanması amaçlayan bilinmeyenleri çözme ve en olurlu çözümü bulma tekniğidir.

Bir problemde eniyilemenin yapılabilmesi için birden fazla olası çözümün veya çözüm kümesinin olması gerekir. Bu çözümler arasından amacı gerçekleştirecek en iyi çözümü bulmak hedeflenir. Doğrusal programlama en iyi çözümü bulmak için en sık kullanılan yöntemdir. Bir doğrusal programlamada, değişkenler (karar değişkenleri), amaç fonksiyonu ve kısıtlar yer alır. Problemin çözümüne başlandığında değişkenlerin değerleri bilinmemektedir. Bu değerler kontrol edilebilirdir

¹⁹ing: Commercial Off-The-Shelf

²⁰ing: optimization

ve problem çözümünü sonunda en iyi değerleri alacaktır. Amaç fonksiyonu, karar değişkenlerinden oluşan ve hedeflenen durumu (enküçükleme, enbüyüklenme) ifade eden matematiksel fonksiyondur. Kısıtlar, olası çözüm kümesini kısıtlayan matematiksel ifadelerdir. Doğrusal programlama modeli matematiksel olarak ifade edildiğinde amaç fonksiyonu ve kısıt denklemleri içinde bulunan değişkenler doğrusal olmalıdır.

Algılayıcı düğümler verilerini komşu düğümler üzerinden yönlendirerek baz istasyonuna iletir. Ağdaki her bir algılayıcı düğüm röle işlevi görür. Mesafeye ve veri işlemeye bağlı enerji tüketim kısıtları nedeniyle, bataryayı en iyi şekilde kullanmak ve veriyi en iyi şekilde yönlendirmek ağ ömrünü artırmak için kaçınılmazdır. Doğrusal programlama ile akış eniyilemesi temelinde KAA'ların modellenmesi gerçekleştirilebilir. Modelleme ile algılayıcı düğümde enerji tüketimi enküçüklemesi veya KAA'da ağ yaşam süresi enbüyüklemesi amaçlanarak bazı ağ kısıtları ile birlikte problem çözdürülür.

Modellerin doğrusal programlama ile çözülmesi doğrusal planlama yapılmasıyla gerçekleşir. Doğrusal programlamada tüm değişkenler gerçel²¹ değerlidir, dolayısıyla değişkenler kesirli değerler alabilir. Tamsayı programlamada ise değişkenlerin hepsi tamsayıdır ya da ikili (0 veya 1) değerler alabilir.

2.3.1 Karışık Tamsayı Programlama (MIP)

Bazı problemlerde, problemin yapısından dolayı değişkenlerden bir kısmı veya tamamı tamsayı olarak tanımlanamamaktadır. Problemden yer alan değişkenlerin bir kısmı gerçel değerli (ör: kesirli), bir kısmı tamsayı veya ikili olarak tanımlanmış olabilir. Dolayısıyla modeldeki değişkenlerin değer kümeleri karışıktır. Amaç fonksiyonu ve kısıtlar doğrusal ve değişkenlerin tanım kümelerinde alabileceği değerler ikili, gerçel değerli veya tamsayı ise problemin çözüm programına Karışık Tamsayı Programlama (MIP) veya Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama (MILP) denir. Sistemde tamsayı olmayan değişkenler de bulunduğu için kısıtların çevrelediği uzay sürekli değildir ve problemin en iyi çözüm noktası uzayın sınırlarında olmak zorunda değildir. Bu tip problemlerin çözümünde birçok algoritma

²¹ing: reel

kullanılmaktadır. Örneğin Dakin algoritmasında dal ve sınır yöntemi²² tamsayı kısıtlarını yok sayar ve bütün değişkenleri gerçel sayı kabul ederek problemi çözdürür [14]. Olurlu kümeden bir tane çözüm değeri seçilir. Bu değişken değeri için bulunan değer ardışık iki tamsayı arasında olduğu düşünülürse, problem iki dala ayrılır ve herbir dalda bu değişken bir ardışık tamsayıya esitlenerek dallanmaya olurlu tamsayılı çözüm bulunana değin devam edilir. Gerçel sayı farzedilerek yapılan çözümlenelerde istenilen tüm değişkenler tamsayı çıkmış ise bu durum, en iyi çözümün bulunduğu anlamına gelir. Dakin algoritmasının hesaplama ve zaman maliyeti yüksektir.

2.3.2 Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS)

Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS²³ [29]) Doğrusal Programlama (LP), Karışık Tamsayılı Programlama (MIP), Doğrusal Olmayan Programlama (NLP) gibi birçok problemin modellenmesini sağlayan matematiksel programlamanın ve eniyilemenin gerçekleştirilebildiği yüksek seviyeli bir modelleme ve çözüm sistemidir. GAMS, kompleks ve yüksek ölçekli uygulamaları modellemek için kullanılır. GAMS bir kullanıcı arayüzü, dil derleyicisi ve gömülü yüksek performanslı matematiksel modelleme ve çözücü paketleri içerir. Kullanıcı tarafından kodlanan modeli çözücülere verilmek üzere genel bir forma getirir ve kullanıcının tercih edebileceği çözücüye çözdürür. 6. bölümde gerçekleştirilen doğrusal program modelleri MIP çözüm paketi kullanılarak GAMS ile çözdürülmüştür.

²²ing: branch and bound method

²³ing: General Algebraic Modeling System

3. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA VE SEYREK SİNYAL GERİ OLUŞTURMA ALGORİTMALARININ İNCELENMESİ

3.1 Sıkıştırılmış Algılama

Ayrık zamanda sinyal işleme akışında sinyalin örneklenmesi ilk adımdır. Bu adımda, zaman tabanında sürekli olan sinyal eşit aralıklarla örneklenerek ayrık zamanda ölçümler elde edilir. Ölçülen verilerden sinyallerin veya imgelerin geri elde edilmesinde dikkate alınan standart yaklaşım Nyquist-Shannon örnekleme teoremi olarak bilinir [5]. Bu teorem, bantsınırlı bir sinyalin sürekli zamanda geri oluşturulması için gerekli olan örnekleme frekansının sinyal frekansının en az iki katı kadar seçilmesi gerektiğini söyler. Uygun şartlar sağlandığında sinyalin doğru geri oluşturulması sinc interpolasyonu ile sağlanır. Buna göre, klasik sinyal işleme yöntemlerinin kullanıldığı birçok sinyal işleme uygulamasında, sinyal ilk olarak Nyquist-Shannon örnekleme kriterine göre örneklenir. Sinyal gösteriminin ve işlemenin kolay olacağı başka bir tabana (Ör: Fourier, dalgacık²⁴, ayrık kosinüs dönüşüm²⁵ tabanları) dönüşümü sağlanır. Sinyalin dönüşüm tabanına aktarımıyla sinyal normalden daha az sayıda katsayı vektörü ile ifade edilir. Bu

²⁴ing: wavelet

²⁵ing: discrete cosine transform

sinyal işleminin etkin olmayan yöntemidir çünkü atılan ve işe yaramayan bilgi örnekleme aşamasında elde edilir. Örnekleme ile aldığımız işimize yaramayan bilgiyi en baştan ölçmek istemeyebiliriz. Fakat, örnekleme işlemlerinin yapıldığı gerçek hayattaki donanımların çoğu analog elektronik devrelerdir ve analog devre ile örnekleme yapılan donanımlara akıl ve mantık birimleri eklemek pratikte pek imkanı değildir. Örneğin, örnekleme aşamasında eğer sinyal doğrudan sadece sıfır olmayan anlamlı katsayıları alınarak örneklenebilseydi, örnekleme daha verimli olabilirdi. Fakat, sinyal ölçümünden önce hangi dönüşüm tabanının kullanılacağı ve dönüşüm tabanı katsayılarından hangilerinin sıfır olduğu daha önceden bilinemediği için bu yaklaşım klasik yöntemlerle pek mümkün değildir.

Sıkıştırılmış algılama (CS) bir x sinyalinde örnekleme ve hesaplama maliyetini büyük oranda düşüren sıkıştırmaya dayalı yeni bir sinyal ölçüm ve geri oluşturma yaklaşımıdır [6,7]. CS tüm sinyali yüksek örnekleme hızı ile ölçmek yerine sinyalin sadece en fazla bilgi içeren (en yüksek enerjili) kısmını ölçer. Böylece klasik sinyal işleme yöntemlerine göre enerji ve zamandan kazanabilir. CS sinyalin seyrek olarak ifade edilebildiği tabanı kullanır ve sinyal üzerindeki rastgele izdüşümleri kullanarak ölçümler yapar, az sayıda doğrusal ölçümle sinyalin doğru geri oluşturulabileceğini söyler.

$x \in R^N$ geri oluşturulmak istenen gerçel değerli N uzunluğunda ayrık zamanlı hedef sinyali olduğunu varsayalım. R^N uzayındaki herhangi bir vektör $\{\psi_i\}_i^N$ baz vektörlerinin doğrusal katışımı olarak Denklem 3.1 gibi ifade edilebilir. Burada s_i ağırlık katsayıları, ψ_i ise taban vektörleridir. ψ_i taban vektörleri, Ψ temel matrisinin i . sütunlarıdır.

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^N s_i \psi_i \quad \mathbf{x} = \Psi \mathbf{s} \quad (3.1)$$

\mathbf{x} sinyalini oluşturan s_i katsayısı vektörünün K adet elemanı sıfırdan farklı ise x sinyali K -seyreklik veya sinyalin seyreklik seviyesi K 'dır denir. Seyreklik seviyesi, sinyal uzunluğundan yeterince küçükse ($K \ll N$) sinyal sıkıştırılabilir [30]. Bu durum x 'in l_0 normu olarak da ifade edilebilir. Örneğin, (3.2) numaralı denklemde $\|x\|_0 = K$ ise sinyal K seyreklik [31].

$$\|x\|_0 = |\text{supp}(x)| = |\{j : x_j \neq 0\}| \quad (3.2)$$

Sinyallerin sıkıştırılabilmesi birçok dönüşüm kodlamasının temelini oluşturur. CS ile, sinyali Nyquist-Shannon teoremine göre örnekleyerek dönüşüm kodlamasına tabi tutup sıkıştırmak yerine ϕ_m , $m = 1, 2, \dots, M$ taban vektörleri üzerinden $y(m) = \langle x, \phi_m^T \rangle$ sinyalin doğrusal izdüşümleri ölçülür. \mathbf{y} , R^M uzayında $M \ll N$ olacak şekilde ölçüm sinyalini ve Φ , $R^{M \times N}$ uzayında ölçüm matrisini ifade etsin. Bu durumda denklem sistemi,

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (3.3)'de gösterilen modelde, $M = N$ olursa \mathbf{x} , N bilinmeyenli N adet denklem kullanılarak kolay bir şekilde çözülebilir. $M > N$ olduğu durumda, sistem artık belirtilmiştir ve \mathbf{x} 'i çözmek için en küçük kareler problemi çözülmelidir. Sinyal boyutuna göre daha az sayıda ölçümle sinyallerin geri oluşturulabileceği ile ilgilendiğimizden $M < N$ olduğu durumu incelemek önemlidir. $M < N$ olduğunda, sistem eksik belirtilmiştir (denklem sayısı bilinmeyen sayısından azdır), yani Φ matrisinin sıfır uzayı bulunduğundan denklem sistemini sağlayan sonsuz çözüm vardır. Bu noktada çözüme ulaşmak için sinyalin seyreklik bilgisi kullanılır. Denklem sistemini çözen en seyrek sinyal en doğru çözümdür. Bu nedenle, istenen çözüm (hedef) tüm çözümler içinde en seyrek sonuca ulaşmaktır. CS kuramı N boyutlu ve K seyrek bir x sinyalinin $M = O(K \log N)$ adet rastgele uyumsuz doğrusal ölçümle geri oluşturulabileceğini söyler. x hedef sinyali, y ölçüm vektöründen dışbükey eniyileme problemi çözülerek elde edilir. Denklem (3.4)'de ifade edilen eniyileme problemi doğrusal programlama araçları kullanılarak çözülebilir.

$$\arg \min \|\mathbf{s}\|_0 \quad s.t. \quad \mathbf{y} = \Phi \Psi \mathbf{s} \quad (3.4)$$

Çözülmesi istenen doğrusal programda amaç fonksiyonu \mathbf{x} içindeki sıfır olmayan indekslerin enküçüklenmesidir. Fakat, ℓ_0 enküçükleme probleminin hesaplama

karmaşıklığı vardır ve bu nedenle problem NP-Zor²⁶ problemidir, büyük N değerleri için herhangi bir algoritma veya çözüm tekniği ile en iyi sonuca ulaşamaz. Belli seyreklik koşulları altında bu eniyileme probleminin dışbükey ℓ_1 çözümü (3.5) olurludur ve aynı başarıyı elde etmektedir.

$$\arg \min \|s\|_1 \quad s.t. \quad \mathbf{y} = \Phi\Psi\mathbf{s} \quad (3.5)$$

Gürültülü sinyaller için ise veri kısıtını gevşeterek Denklem 3.6 şeklinde bir eniyileme ile seyrek \mathbf{s} sinyali geri oluşturulabilir [32].

$$\arg \min \|s\| \quad \text{oyleki} \quad \|\Theta s - y\|_2 < \epsilon \quad (3.6)$$

Sinyal geri oluşturmada başarı sağlanabilmesi için $A = \Phi\Psi$ olarak tanımlanan matrisinin Kısıtlı İsoometri Özelliği (RIP²⁷) taşıması gerekir [33]. Buna göre, Φ matrisinin boyutu N 'den M 'e azaltılırken K seyreklik seviyesine sahip sinyaldeki bilgi bozulmamalıdır. Bu, ölçüm matrisi Φ oluşturulurken dikkat edilmesi gereken temel husustur. A_T matrisi A matrisinin sütunlarından oluşturulan $M \times |T|$ boyutlu bir matristir.

$$1 - \delta_K \leq \frac{\|A_v\|_2}{\|v\|_2} \leq 1 + \delta_K, \quad \delta_K \in (0, 1) \quad (3.7)$$

Katsayı dizileri v_j , $j \in T$ ve $|T| \leq K$ 'dır [33]. Tüm T 'ler için A 'nın K -sınırlı izometri sabiti δ_K , denklem (3.7)'yi sağlayan en küçük değerdir. Bu özellik esasen gereklidir çünkü kümelerin kardinalitisi K 'dan küçük sütunları ortonormal bir sistem gibi davranır. [34]'de, K seyreklik seviyesine sahip x sinyalinin $\delta_{2K} + \delta_{3K} < 1$ özelliğini sağladığında denklem (3.5) ile doğru olarak geri oluşturulabildiği gösterilmiştir.

Ölçüm matrisi Φ rastgele matris olarak oluşturulabilir. Örneğin, R^M birim çemberinin üzerinden bağımsız ve rastgele N adet vektör örneklenebilir. $K = O(M/\log(N/M))$ için denklem (3.7), $1 - O(\exp^{-\gamma N})$ olasılığı ile sağlanır.

²⁶ing: Non-deterministic Polynomial-time Hard

²⁷ing: Restricted Isometry Property

Tablo 3.1: CS için Semboller ve Tanımları

Sembol	Tanım
\mathbf{x}	Gerçek sinyali ifade eden vektör
ψ_i	R^N Uzayında temel vektör
Ψ	Temel matris
s	Dönüşüm tabanı vektörü
N	Ölçüm sinyalinde bilinmeyen sayısı
M	CS'te doğru geri oluşturma için toplam ölçüm sayısı
K	Sıfırdan farklı değişken sayısı, seyreklik seviyesi
\mathbf{y}	R^M Uzayında CS ölçümü
Φ	$R^{M \times N}$ Uzayında CS ölçüm matrisi
x_c	Ortak seyreklik seviyesi
x_i	Yenilikçi seyreklik seviyesi
X	Çoklu algılayıcı hedef sinyalleri
Y	Çoklu algılayıcı ölçüm sinyalleri

Burada $\gamma > 0$ 'dır [33]. Bağımsız özdeşçe ayrılmış (i.i.d.²⁸) Bernoulli veya Gaussian rastgele değişkenlerinden oluşturulan ölçüm matrisi Φ ; sinozoidal, dalgacık, Gabor fonksiyonları vb. Ψ tabanlarında sınırlı izometri özelliğini sağlar [35]. Fiziksel ortamlardan ölçülen sinyallerin büyük çoğunluğu sıkıştırılabilir. Yani dönüşüm katsayılarının sıralanmış büyüklükleri hızlı şekilde sıfıra doğru azalabilir. Sıkıştırılabilir sinyaller seyrek olarak yakınsanabilir. x_K , rastgele bir $x \in R^N$ sinyalinin K seyreklik seviyesindeki en iyi yakınsanmış hali olsun. Eğer sınırlı izometri özelliği sağlanıyorsa, sinyalin geri oluşturulma hatası $\|x - x_K\|_{\ell_1}$ 'dan daha kötü olamaz [36]. Üstelik sinyalin geri oluşturulma prosedürü ölçüm hatalarına karşı gürbüzdür. Ölçümlere bozulma ϵ_n eklenmesi sinyalin geri oluşturulma hatasını ϵ_n 'nun küçük bir katından daha fazla etkilemez [36]. Gürültülü ölçümler için bazı geri oluşturma yöntemleri kullanılabilir [36–39]. Bu yöntemlerden bazılarında geri oluşturulma hatasının enerjisi denklem (3.8)'deki gibi kısıtlanmaktadır.

$$\min \|\mathbf{x}\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|\mathbf{y} - A\mathbf{x}\|_2 < \epsilon \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'de geri oluşturma kararlı ve geri oluşturulma hatası sonludur [40].

²⁸ing: Independent Identically Distributed

Bu ikinci dereceden bir koni programıdır (SOCP²⁹). Gürültülü geri oluşturma için kullanılabilecek daha kolay bir doğrusal program ise Dantzig Seçicisidir³⁰ [37]. Dantzig seçicisinde kalan vektörünün her elementi gürültü seviyesinin içinde olmalı ve kalan vektörü ile A matrisinin sütunları arasındaki kolerasyon iyi olmamalıdır. Dantzig seçicisi denklem (3.9)'teki gibi gösterilebilir:

$$\min \|\mathbf{x}\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|A^T(\mathbf{y} - A\mathbf{x})\|_\infty < \epsilon \quad (3.9)$$

CS matematiksel sonuçları KAA çerçevesinde değerlendirildiğinde, CS ile ölçüm yapan her bir algılayıcı klasik sinyal işleme yöntemlerindeki gibi N boyutlu x sinyalini ölçmek yerine M boyutlu sıkıştırılmış y sinyalini ölçer ($M \ll N$) [41]. Eniyileme probleminin çözümündeki hesaplama karmaşasının yüksekliği nedeniyle sinyal geri oluşturma işlemi enerji sorunu olmayan baz istasyonunda yapılır. Her bir algılayıcı ayrı ölçümler yapıp sadece CS ölçümünü baz istasyonuna iletir.

3.1.1 Ortak Seyreklik Seviyeli Sinyal Modeli

Bir KAA'da, belirli bir alana dağıtılmış algılayıcı düğümler benzer sinyalleri ölçebilir. Her bir algılayıcı düğümün ölçtüğü sinyaller seyrek olabileceği gibi bu ölçümlerin diğer algılayıcı düğümlerin ölçtüğü sinyaller ile korelasyonu olabilir. Bir başka deyişle, algılayıcı düğümlerin ortamdan ölçmek istedikleri sinyallerin ortak kısımları (indeksleri) vardır [42].

Algılayıcıların ölçtüğü sinyal içinde ortak destek kümesinin (ortak seyreklik seviyesinin) olduğu durumda, tüm algılayıcı düğüm ölçümleri için ortak bir gösterim yapılabilir. KAA'daki her bir düğümün ölçmek istediği hedef sinyal vektöründe, ortak parça (x_c) ile her bir algılayıcıya özel yenilikçi parça (x_i) bulunsun. Buna göre hedef sinyali $x_c + x_i$ olarak ifade edilebilir. (Ortak ve yenilikçi parçaların aynı tabanda seyrek olduğu kabul ediliyor.). Her bir algılayıcı düğümün ölçtüğü sinyal ise y_i olsun. Yukarıdaki tanımlara göre ortak seyreklikli ölçüm modeli 3.10'de gösterilmiştir. Burada Y tüm algılayıcı düğümlerin ölçümlerini

²⁹ing: Second-Order Cone Program

³⁰ing: Dantzig Selector

ifade eder.

$$X = \begin{bmatrix} x_c \\ x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix}, \hat{A} = \begin{bmatrix} A_1 & A_1 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ A_2 & 0 & A_2 & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_n & 0 & 0 & \cdot & \cdot & A_n \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Ortak seyreklik seviyeli sinyal modeli kullanılarak, her bir algılayıcı düğümün ölçüm sinyalini çok sayıda ölçümle ayrı ayrı ölçmesi yerine, az sayıda ölçüm yapılarak ve tüm ölçümler baz istasyonunda toplanarak sinyallerin eşzamanlı geri oluşturulması sağlanır. Baz istasyonun her bir algılayıcının ölçüm matrisini bildiği farzediliyor. Ortak seyreklik seviyeli sinyal modelinde sinyalleri geri oluşturmak için çözülecek eniyileme problemi Denklem 3.11’de gösterilmiştir.

$$\hat{X} = \arg \min(\|x_c\|_1 + \sum_{i=1}^n \|x_i\|_1) \quad \text{öyleki} \quad \hat{A}X = Y \quad (3.11)$$

Denklem 3.11’de gösterilen eniyileme problemi doğrusal programlama araçları kullanılarak çözülebilir.

3.1.2 Doğru Geri Oluşturma için Benzetim Sonuçları

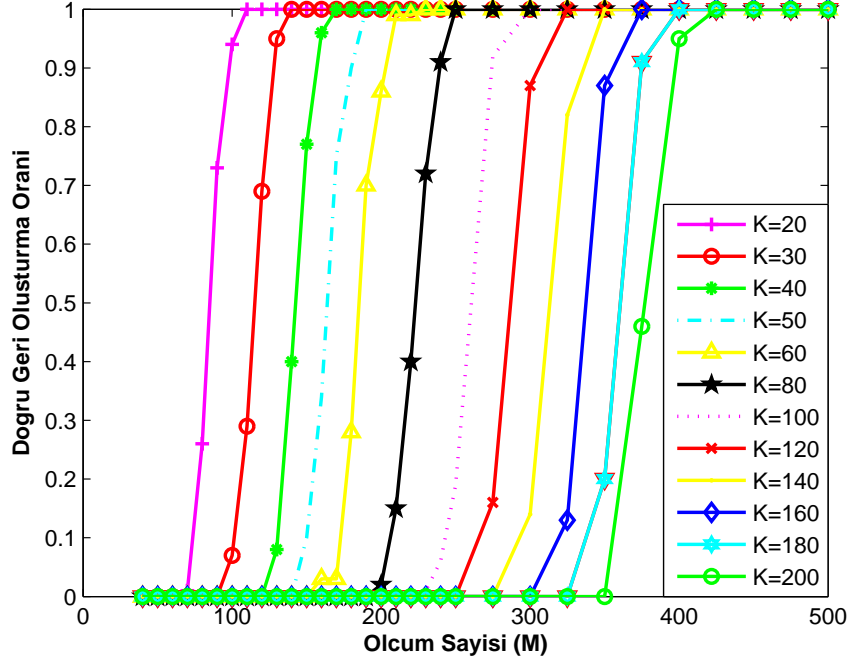
Literatürde, CS ile ölçüm yapan bir algılayıcının doğru geri oluşturma yapması için alması gereken en küçük ölçüm sayısı çokça çalışılmıştır [43, 44]. CS kuramında sinyalin doğru geri oluşturulması için gerekli ölçüm sayısının M , en az $O(K \log N)$ kadar olması gerektiği ispatlanmıştır [7]. Alınması gereken ölçüm sayısını (M), seyreklik seviyesi (K) ve sinyal boyutunun (N) bir fonksiyonu olarak ifade etmek ve $(K \log N)$ seviyesinin derecesini belirlemek için nümerik analizler gerçekleştirildi. Tüm algılayıcıların ayrı ölçümler yapıp ölçümlerini baz istasyonuna gönderdiği ve ölçümlerde ortak seyrekliğin olmadığı bir KAA

modelinde, $N = 512$ boyutlu, K seyreklik seviyesi 20 ile 200 arasında değişen sinyaller ele alınmıştır. Her seyreklik seviyesi için, sıkıştırılmış ölçümler rastgele Bernoulli/Rademacher (rastgele ± 1) $M \times N$ boyutlu ölçüm matrisleri kullanılarak oluşturulmuştur. Sinyallerin doğru geri oluşturulması için her bir algılayıcının alması gereken ölçüm sayısının derecesi Denklem 3.5 ile ifade edilen ℓ_1 enküçükleme tabanlı eniyileme problemi çözülerek belirlenmiştir. Sinyalin geri oluşturulmasında ℓ_1 -magic [45] kütüphanesi kullanılmıştır. ℓ_1 -magic paketi sıkıştırılmış algılama teoremi için dışbükey eniyileme problemini çözen MATLAB programında koşturulan algoritmadır.

Geri oluşturulan sinyal ile gerçek sinyal arasındaki nümerik farkın sonsuz normu belli bir değerin altında olursa ($|x - \hat{x}|_\infty \leq \tau$) sinyalin doğru geri oluşturulduğu kabul edilir (hata sınırı τ , 10^{-3} alınmıştır). 500 adet Monte-Carlo benzetimi sonucunda seyreklik seviyesinin değişimine göre doğru geri oluşturma için gerekli ölçüm sayısı hesaplatılmıştır. Her bir benzetimde birbirinden bağımsız seyrek sinyaller ve ölçüm matrisleri seçilmiştir. Şekil 3.1’de farklı seyreklik seviyesine sahip sinyaller için doğru geri oluşturma oranları, ölçüm sayısının fonksiyonu olarak gösterilmiştir.

Sinyali baz istasyonunda doğru geri oluşturmak için her bir algılayıcının ortalama $M \approx 1.5K \log N$ ölçüm yapması gerekir. Bu sonuç literatürde elde edilen sonuçlarla tutarlıdır. Ölçüm sayısının seyreklik seviyesi ve sinyal boyutu ile olan ilişkisi, farklı boyutlardaki sinyaller için de denenmiş ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bundan sonra yapılacak analizlerde sinyallerde ortak seyreklik seviyesinin olmadığı sıkıştırılmış algılama tabanlı sinyal işleme modellerinde, sinyalin doğru geri oluşturulması için gereken ölçüm sayısı $M = 1.5K \log N$ olarak alınacaktır.

Bir diğer çalışmada, çoklu algılayıcıların ölçüm yaptığı ve sinyallerde ortak seyrekliğin olduğu bir KAA’da sinyallerin doğru geri oluşturulması için gerekli olan en az ölçüm sayısının belirlenmesi amaçlanmıştır. Buna göre, ölçümlerinde ortak seyrekliği olan 10 adet algılayıcı düğümünün oluşturduğu bir KAA’da, baz istasyonunda sinyalin doğru geri oluşturulması için her bir düğümün ölçmesi ve baz istasyonuna göndermesi gereken ölçüm sayısı benzetimlerle belirlenmiştir. Her bir algılayıcının ölçtüğü sinyaller $N = 512$ boyutlu olup, sinyallerin 10 ile 40 arasında değişen ortak değişkenleri ve her algılayıcıya özel 5 adet farklı (yenilikçi)



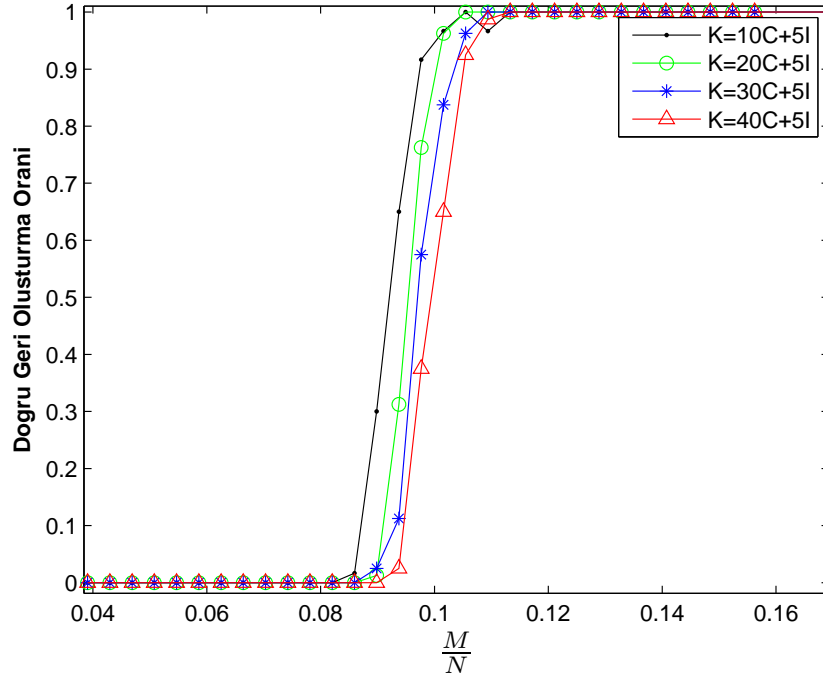
Şekil 3.1: Farklı Seyreklik Seviyeli $N = 512$ Uzunluktaki Sinyallerin Doğru Geri Oluşturulması için Gerekli Ölçüm Sayısı

değişkeni olduğu varsayılıyor. Her seyreklik seviyesi için, sıkıştırılmış ölçümler rastgele Bernoulli/Rademacher (rastgele ± 1) $M \times N$ boyutlu ölçüm matrisleri kullanılarak oluşturulmuştur. Baz istasyonunda her bir algılayıcının ölçüm sinyalleri Denklem 3.10'da gösterildiği gibi modellenmiştir. Sinyallerin doğru geri oluşturulması için her bir algılayıcı düğümün alması gereken ölçüm sayısının derecesi Denklem 3.11 ile ifade edilen ℓ_1 enküçükleme tabanlı eniyileme problemi çözülerek belirlenmiştir. Sinyalin geri oluşturulmasında ℓ_1 -magic kütüphanesi kullanılmıştır.

Geri oluşturulan sinyal ile gerçek sinyal arasındaki numerik farkın sonsuz normu belli bir değerin altında olursa ($|x - \hat{x}|_\infty \leq \tau$) sinyalin doğru geri oluşturulduğu kabul edilir (hata sınırı τ , 10^{-3} alınmıştır). 500 adet Monte-Carlo benzetimi sonucunda seyreklik seviyesinin değişimine göre doğru geri oluşturma için gerekli ölçüm sayısı hesaplatılmıştır. Her bir benzetimde birbirinden bağımsız seyrek sinyaller ve ölçüm matrisleri seçilmiştir. Şekil 3.2'de farklı seyreklik seviyesine sahip sinyaller için doğru geri oluşturma oranları, ölçüm sayısının fonksiyonu olarak

gösterilmiştir. Buna göre sinyallerdeki ortak seyreklik nedeniyle, normalden daha az sayıda ölçüm yapılması sinyalin doğru geri oluşturulması için yeterlidir.

Örnek olarak, 512 boyutlu ortak seyrekliğin olmadığı 45 seyrekli bir sinyal tek algılayıcı ile 183 adet rastgele ölçümle geri oluşturulurken, 10 algılayıcı düğümden oluşan ve düğümlerin ölçtüğü sinyallerin ortak seyreklik seviyelerinin olduğu modelde her bir algılayıcının ortalama 61 adet ölçüm yapması sinyalin doğru geri oluşturulması için yeterlidir.



Şekil 3.2: Ölçümlerinde Farklı Oranlarda Ortak Seyreklik Seviyesinin Olduğu 10 Adet Algılayıcının $N = 512$ Uzunluktaki Sinyallerin Doğru Geri Oluşturulması için Alması Gereken Ölçüm Sayısı

3.2 Seyrek Sinyal Geri Oluşturma Algoritmaları

Seyreklik konusu geçtiğimiz son birkaç asırda farklı disiplinlerdeki araştırmacıların en çok uğraş verdiği konulardandır. Görüntü, ses, video ve benzer sinyallerin yüksek sıkıştırma oranlarında sıkıştırılması, gürültüden arındırılması ve gürültüye dayanıklılığı konularında seyreklik önem kazanır [46]. Bunun yanında, özellikle ölçüm almanın zor ve maliyetli olduğu uygulamalarda az sayıda ölçümle sinyali geri oluşturmak önemlidir. Seyrek sinyallerin geri oluşturulması için ℓ_1 enküçükleme yöntemi ve greedy (fırsatçı) yöntemler olmak üzere iki temel yöntem önerilmiştir. ℓ_1 enküçükleme yöntemi gürültülü ve gürültüsüz ölçümler üzerinde uygulanabildiğini ve dışbükey eniyileme tekniği ile bazı kısıtlar (sinyal seyrekliği, kısıtlı isometri özelliği) sağlandığında eniyi çözümü bulduğunu söylemiştik. ℓ_1 eniyileme yöntemi gibi global eniyi çözümü üreten dışbükey eniyileme yöntemlerinin dışında, çözüme adım adım ulaşmayı hedefleyen alt-eniyi çözüm yöntemlerini kullanan yöntemlere greedy ya da yinelemeli yöntemler denir. Bu yöntemler kullanılarak da seyrek sinyaller geri oluşturulabilir. Bunun yanında, yinelemeli yöntemlerin dışbükey eniyileme yöntemleri üzerinde avantajları da vardır [47].

KAA modeli üzerinde sinyalin geri oluşturma işlemleri baz istasyonunda yapılması ve sinyallerin hızlı şekilde geri oluşturması sağlanmalıdır. Gerçek zamanlı uygulamalarda veri toplama ve sinyalleri geri çözme hızı önem kazanır. Yinelemeli yöntemler ile önce ölçülen sinyalin adım adım parametrik modeli kullanılarak, olabilecek her parametre kombinasyonu için bir veri tabanı oluşturulur. Yinelemeli yöntemler küresel bir çözüm bulmak yerine, ardışık olarak çalışır ve her adımda veri tabanındaki en iyi veriyi seçer. Yinelemeli yöntemler seyrek sinyalleri geri oluşturabilmektedir; fakat ℓ_1 enküçükleme yöntemi gibi küresel bir çözüm sağlamayı garanti etmez. Buna karşın hesaplama karmaşıklığı ve yükü ℓ_1 enküçükleme yöntemine göre çok düşüktür. Dolayısıyla sinyalleri geri oluşturma hızı daha yüksektir.

ℓ_1 eniyileme tekniğinin yanında özellikle hesaplama karmaşıklığını azaltan yinelemeli yöntemlerden en önemlileri olan Dikgen Eşleştirme Takibi (Orthogonal Matching Pursuit, OMP), Sıkıştırılmış Örneklemeli Eşleştirme Takibi

(Compressive Sampling Matching Pursuit, CoSaMP), Yinelemeli Sert Eşikleme (Iterative Hard Thresholding, IHT) algoritmaları ve güncel çalışmalardan Lipschitz Yinelemeli Sert Eşikleme (Lipschitz Iterative Hard Thresholding, LIHT) algoritması incelenmiştir. Önerilen yinelemeli yöntemlerin ℓ_1 norm tabanlı çözümlere göre sinyal doğru geri oluşturmadaki başarımlarının analizi ve birbirleri içerisindeki başarımlarının bulunması büyük önem taşır. Bundan sonraki bölümde algoritmaların akışları anlatılacaktır.

3.2.1 OMP Algoritması

Dikgen Eşleştirme Takibi (OMP) algoritması seyrek sinyal geri oluşturma yöntemlerindedir. Bu yöntemde ölçülen sinyalin modeli kullanılarak, adım adım oluşturulagelen artık vektörle en fazla ilişkili elemanları seçilir. İlişkili elemanlar üzerinden model veritabanı yada bir sözlük oluşturur. Her adımda artık vektör belirlenen durma kriterine kadar güncellenir [48].

$y = Ax + n$ gibi doğrusal bir sistemde seyrek x 'in geri oluşturulması ele alınmıştır. Algoritmaya girdi olarak ölçüm sinyali (y), ölçüm matrisi (A) verilir. Başlangıç değeri ataması işlemlerinde, sayaç (k) sıfırlanır, ölçüm sinyali artık vektöre eşitlenir ve başlangıçta veritabanı olarak boş küme alınır. Artık vektör ve ölçüm matrisi kullanılarak indeks kümesi oluşturulur. İndeks kümesi model veritabanı içine alınır ve güncellenir. İndeks kümesi son elamanı ile en küçük kareler problemi çözülür ve hedef sinyal çözümüne yaklaşılr. Artık vektör güncellenir ve başa dönülerek yeni indeks kümesi oluşturulur. OMP algoritması sözde programı³¹ Tablo 3.2'de detaylandırılmıştır. Koşullar sağlandığında algoritma çıktı olarak gerçek hedef sinyali x 'i verir.

3.2.2 CoSaMP Algoritması

Sıkıştırılmış Algılamalı Eşleştirme Takibi (CoSaMP) algoritması her adımda artık vektör kullanarak hesapladığı hatanın seyreklik değerinin 2 katı kadar en güçlü destek kümesini seçer ve en küçük kareler probleminin çözümü ile durma kriteri

³¹ing: pseudocode

Tablo 3.2: OMP Algoritması

Girdi: A (ölçüm matrisi), y (ölçüm sinyali)

1. $\Lambda_0 = \emptyset$, $r_0 \leftarrow y$, $k \leftarrow 0$ başlangıç değer ataması

yinele

2. $\lambda_t \leftarrow \arg \max |\langle r_{t-1}, A_\omega \rangle|$ bir indeks kümesi oluştur

3. $\Lambda_t \leftarrow \Lambda_{t-1} \cup \lambda_t$ indeks kümesini güncelle

4. $x(\lambda_j) \leftarrow \min \|y - \sum_{j=1}^t x(\lambda_j) A_{\lambda_j}\|_2$ en küçük kareler problemini çöz

5. $r_t \leftarrow y - \sum_{j=1}^t x(\lambda_j) A_{\lambda_j}$ x_j 'yi belirle ve gelecek döngü için r 'yi hesapla

6. $k \leftarrow k + 1$ sayacı artır

koşul sağlandığında döngüden çık

Çıktı: x (katsayı vektörü)

sağlanana kadar döngüyü yinelemeye devam eder [49]. $y = Ax + n$ gibi doğrusal bir sistemde seyrek x 'in geri oluşturulması ele alınmıştır. Algoritmaya girdi olarak ölçüm sinyali (y), ölçüm matrisi (A) ve seyreklik seviyesi (K) verilir. Başlangıç değer ataması işlemlerinde, sayaç (k) sıfırlanır, ölçüm sinyali artık vektöre eşitlenir ve başlangıçta bulunmak istenen hedef sinyal değeri sıfır değerine atanır. Ölçüm matrisinin transpozunu ve artık vektör kullanılarak mevcut hata değeri hesaplatılır. Hatanın $2K$ adet destek kümesi belirlenir ve sonraki adımda en güçlü destek kümesi seçilir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak bulunan çözüm kontrol edilir ve hedef sinyal çözümüne yaklaşılr. Koşullar sağlanırsa çözüm bulunmuştur. Diğer durumda, artık vektör tekrar güncellenir ve başa dönülerek yeni indeks kümesi oluşturulur. CoSaMP algoritması sözde programı Tablo 3.3'de detaylandırılmıştır. Koşullar sağlandığında algoritma çıktı olarak gerçek hedef sinyali x 'i verir.

Tablo 3.3: CoSaMP Algoritması

Girdi: A (ölçüm matrisi), y (ölçüm sinyali), K (seyreklik seviyesi)

1. $x_{-1} \leftarrow 0, r \leftarrow y, k \leftarrow 0$ Başlangıç değer ataması

yinele

2. $e \leftarrow A^T r$ şimdiki hatayı hesapla
3. $\Omega \leftarrow e_{2K}$ hatanın $2K$ kadar destek kümesini belirle
4. $T \leftarrow \Omega \cup \text{supp}(x_{j-1})$ en güçlü destek kümesini seç
5. $b_k \leftarrow A_T \setminus y$, $b_{|T^c} \leftarrow 0$ en küçük kareler yöntemini uygula
6. $x_j \leftarrow b_k$, $r \leftarrow y - Ax_j$ x_j 'yi belirle ve gelecek döngü için r 'yi hesapla
7. $k \leftarrow k + 1$ sayacı artır

koşul sağlandığında döngüden çık

Çıktı: x (katsayı vektörü)

3.2.3 IHT Algoritması

Yinelemeli Sert Eşikleme (IHT) algoritması ölçüm sinyali ile ölçüm matrisinin yansımalarına katı eşikleme uygular [50]. Bu katı eşikleme operatörü H denklemleri ile (3.12)'de tanımlanmıştır.

$$H(x) = \begin{cases} x, & |x| \geq \frac{\theta}{2} \\ 0, & |x| < \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (3.12)$$

$y = Ax + n$ gibi doğrusal bir sistemde seyrek x 'in geri oluşturulması ele alınmıştır. Algoritmaya girdi olarak ölçüm sinyali (y) ve ölçüm matrisi (A) verilir. Başlangıç değer ataması işlemlerinde, sayaç (k) sıfırlanır, ölçüm sinyali artık vektöre eşitlenir, başlangıçta bulunmak istenen hedef sinyal değeri sıfır değerine atanır ve kestirim vektörü hedef sinyal değeri ile ölçüm matrisinin çarpımıyla hesaplanır. H operatörü ile eşikleme yapılır ve katsayı vektörü güncellenir. Yeni

kestirim vektörü hesaplanır ve durma kriteri sağlanana dek artık vektör değeri hesaplanır. IHT algoritması sözde programı Tablo 3.4'de detaylandırılmıştır. Koşullar sağlandığında algoritma çıktı olarak gerçek hedef sinyali x 'i verir.

Tablo 3.4: IHT Algoritması

Girdi: A (ölçüm matrisi), y (ölçüm sinyali)

1. $x_{-1} \leftarrow 0, a_{-1} = Ax_{-1} \leftarrow 0, k \leftarrow 0, r \leftarrow y$ başlangıç değer ataması

yinele

2. $x_j \leftarrow H_\theta(x_{j-1} + A^T(y - Ax_{j-1}))$ H operatörü ile katsayı vektörünü güncelle
3. $a_j \leftarrow Ax_j$ yeni kestirim vektörünü hesapla
4. $r \leftarrow y - a_j$ durma kriteri sağlanana dek artık değeri hesapla
7. $k \leftarrow k + 1$ sayacı artır

koşul sağlandığında döngüden çık

Çıktı: x (katsayı vektörü)

3.2.4 LIHT Algoritması

Lipstcihiz Yinelemeli Sert Eşikleme (LIHT) algoritması ölçüm sinyali ve ölçüm matrisi kullanarak hesapladığı $f = \|Ax - y\|_2^2$ hatasının gradyanı yönünde ilerleyerek her adımda en güçlü K destek kümesini seçer ve çözüme ulaşmaya çalışır [51].

$y = Ax + n$ gibi doğrusal bir sistemde seyrek x 'in geri oluşturulması ele alınmıştır. Algoritmaya girdi olarak ölçüm sinyali (y), ölçüm matrisi (A) ve seyreklik seviyesi (K) verilir. Başlangıç değer ataması işlemlerinde, hatanın gradyant fonksiyonu katsayısı denkleminde $\epsilon_{2K} = 0.4652$ olarak seçilir. LIHT algoritması Tablo 3.5'de detaylandırılmıştır. $M_K(x)$ operatörü çıktı olarak x sinyalinin en güçlü K destek kümesindeki değerleri vermektedir. Koşullar sağlandığında algoritma çıktı olarak gerçek hedef sinyali x 'i verir.

Tablo 3.5: LIHT Algoritması

Girdi: A (ölçüm matrisi), y (ölçüm sinyali), K (seyreklik seviyesi)

1. $L_{2K} = 2(1 + \epsilon_{2K})$, $\epsilon_{2K} = 0.4652$ başlangıç değeri ataması

yinele

2. $x_{i+1} = M_K(x_i - \frac{1}{L_{2K}} \nabla f(x_i))$ hatanın gradyanti ile destek kümesini güncelle

koşul sağlandığında döngüden çık

Çıktı: x (katsayı vektörü)

3.3 Benzetim Sonuçları

Ölçülen sinyalin gürültülü ve gürültüsüz durumları ele alınarak ℓ_1 eniyileme tekniğini kullanan CS yöntemi ile yinelemeli yöntemlerden OMP, IHT, CoSaMP ve LIHT algoritmalarının sinyali doğru geri oluşturma başarımları karşılaştırılmıştır.

$y = Ax + n$ gibi doğrusal bir sistemde seyrek x 'in geri oluşturulması ele alınmıştır. Algoritmalarda $\|A\hat{x} - y\|_2 < \epsilon$ kısıtı gözetilerek durma koşulu sağlanır. ϵ hata kısıt parametresi algoritmalara girdi olarak verilir.

Gürültülü ve gürültüsüz durumlarda geri oluşturulan sinyal ile gerçek sinyal arasındaki maliyet fonksiyonu farklı testlerle oluşturulmuştur. Her iki durumda da algoritmalar 250 defa tekrarlanarak, benzetim sonuçlarının ortalamaları alınmış ve başarımlar elde edilmiştir. Gürültüsüz durumda sinyal boyutu (N) 512, seyreklik seviyesi (K) 20 alınmıştır ve ölçüm sayısı (M) 40 ile 500 arasında belli aralıklarda artırılmıştır. Ölçüm matrisi (A) Gauss dağılımlı rastgele değişkenlerden oluşturulmuştur. Ölçüm sayısının değişimine göre OMP, CoSaMP, IHT ve LIHT algoritmalarının doğru geri oluşturma oranları hesaplatılmıştır. Bunun yanında *ℓ1magic* kütüphanesi kullanılarak eniyileme çözümü sunan CS algoritması da yinelemeli yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

Algoritmaların performansı doğru geri oluşturma oranları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme işleminde ölçümü yapılan hedef sinyal (gerçek sinyal) ile algoritma sonucunda geri oluşturulan sinyal karşılaştırılmıştır. Bu

karşılaştırma işlemi için 4 farklı test uygulanmıştır.

3.3.1 Test 1

Test 1 maliyet fonksiyonu olarak, denklem (3.13)'de gösterildiği gibi oluşturulan sinyal (\hat{x}) ile gerçek sinyal (x) arasındaki farkın değerine bakar ve bu hata değeri vektörün bütün indisleri için belli bir seviyenin altında ise ölçülen sinyalin doğru geri oluşturulduğunu kabul eder.

$$|x - \hat{x}| \leq \tau_1 \quad (3.13)$$

Gürültüsüz modelde Test 1 kullanılarak algoritmaların ölçüm sayısının sinyal boyutu oranına karşılık doğru geri oluşturma oranı grafiği Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Hata değeri (τ_1), 10^{-3} ve 10^{-5} olarak seçilmiştir.

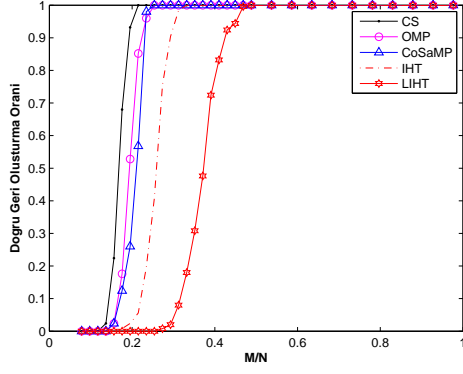
Grafikten görüldüğü üzere; OMP, CoSaMP ve IHT algoritmalarının başarımları CS algoritmasının başarımlarına yakındır. Daha az hata ile sinyal geri oluşturulmak istendiğinde yani (τ_1) azaldığında, aynı ölçüm sayısında OMP ve CoSaMP algoritmalarının başarımları değişmemekle birlikte, CS ve IHT algoritmalarının başarımları azalmaktadır.

3.3.2 Test 2

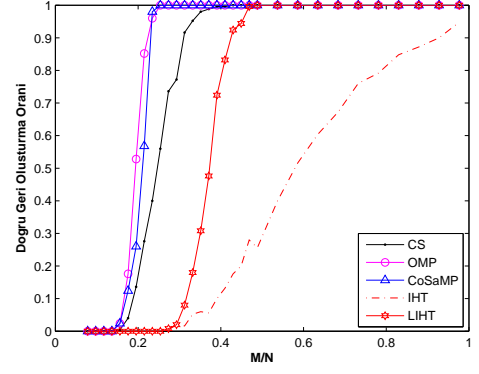
Test 2 denklem (3.14)'da gösterildiği gibi, oluşturulan sinyal ile gerçek sinyalin farkının ℓ_2 normuna bakar, bu değer belli bir değerin altındaysa ölçülen sinyalin doğru geri oluşturulduğunu kabul eder.

$$\|x - \hat{x}\|_2 \leq \tau_2 \quad (3.14)$$

Gürültüsüz modelde *Test 2* kullanılarak algoritmaların ölçüm sayısının sinyal



(a)

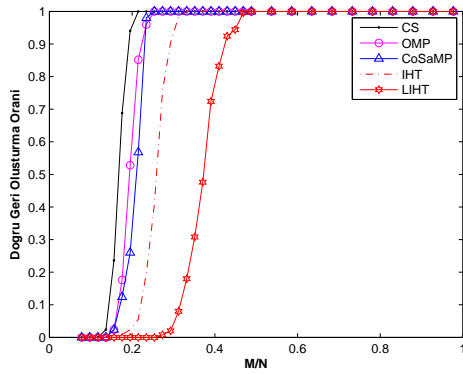


(b)

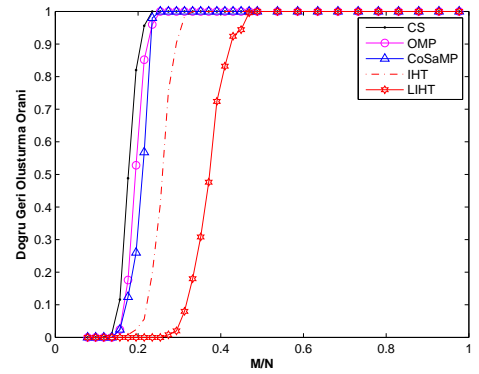
Şekil 3.3: Test 1 için Doğru Geri Oluşturma Oranları, Hata Değerleri (a) $\tau_3 = 10^{-3}$, (b) $\tau_3 = 10^{-5}$

boyutuna oranına karşılık doğru oluşturma oranı grafiği, hata değeri (τ_2) 10^{-3} ve 10^{-5} seçildiğinde Şekil 3.4'de gösterilmiştir.

τ_2 'nin değişmesi başarımlarını etkilememektedir, bunun yanında bu testde de aynı ölçüm sayısında OMP ve CoSaMP algoritmalarının doğru geri oluşturma başarımları CS başarımları ile benzerdir.



(a)



(b)

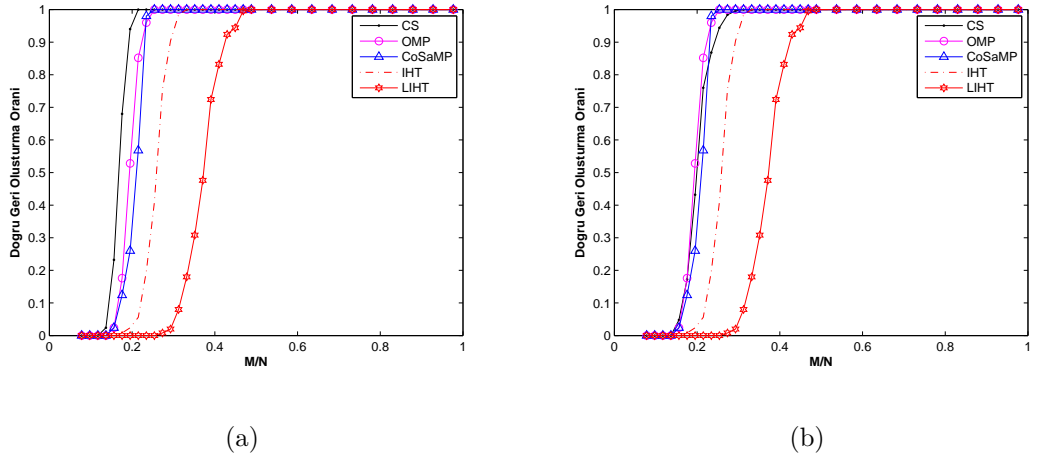
Şekil 3.4: Test 2 için Doğru Geri Oluşturma Oranları, Hata Değerleri (a) $\tau_3 = 10^{-3}$, (b) $\tau_3 = 10^{-5}$

3.3.3 Test 3

Test 3 denklem (3.15)'da gösterildiği gibi, ölçüm matrisinin geri oluşturulan sinyal ile yaptığı yansımanın, ölçüm sinyali ile arasındaki farkın ℓ_2 normunun belli bir değerin altında olmasını bekler. Bunun yanında oluşturulan sinyalin seyreklik seviyesinin, gerçek sinyalin seyreklik seviyesine eşit veya seyreklik seviyesinden az olmasını bekler, koşullar sağlandığında sinyalin doğru geri oluşturulduğunu kabul eder.

$$\|A\hat{x} - y\|_2 \leq \tau_3 \quad \text{ve} \quad K_{\hat{x}} \leq K_x \quad (3.15)$$

Gürültüsüz modelde *Test 3* kullanılarak algoritmaların ölçüm sayısının sinyal boyutuna oranına karşılık doğru geri oluşturma oranı grafiği, hata değeri (τ_3) 10^{-3} ve 10^{-5} seçildiğinde Şekil 3.5'te gösterilmiştir. τ_3 'ün azalması CS algoritmasının sinyali doğru geri oluşturma başarımının azalmasına neden olmaktadır. τ_3 değerinin azalması diğer yöntemlerin doğru geri oluşturma başarımlarını etkilememektedir.



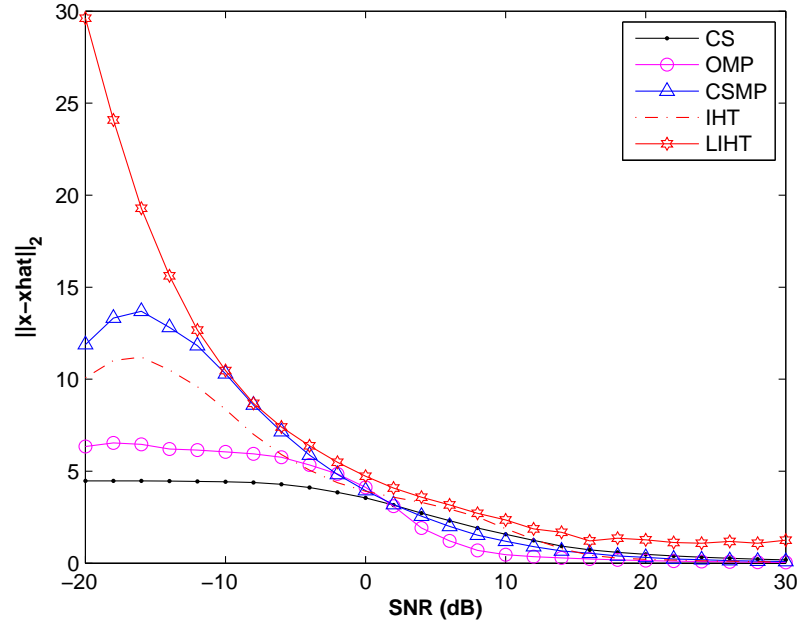
Şekil 3.5: Test 3 için Doğru Geri Oluşturma Oranları (a) $\tau_3 = 10^{-3}$, (b) $\tau_3 = 10^{-5}$

3.3.4 Test 4

Algoritmaların ölçülen sinyal üzerinde gürültü olması durumunda, sinyali doğru geri oluşturma başarımları önemlidir. *Test 4* ölçülen sinyalin gürültülü olduğu varsayılarak ölçüm yapılmasını inceler. Gürültülü modelde hedef sinyal boyutu (N) 512, seyreklik seviyesi (K) 20 ve ölçüm sayısı (M) 200 alınmıştır. Ölçüm matrisi (A) Gauss dağılımlı rastgele değişkenlerden seçilmiştir. Ölçüm sinyaline eklenen Beyaz Gauss Gürültüsünün (WGN³²) varyansı denklem (3.16)'da gösterildiği gibi hesaplatılmıştır. Denklemden P_s sinyalin gücünü ifade etmektedir.

$$\sigma_g^2 = \frac{P_s}{10^{\frac{SNR}{10}}} \quad (3.16)$$

Sinyal Gürültü Oranları (SNR³³) -20 dB ile 30 dB arasında belli oranlarda artırılarak algoritmalar için sinyali doğru geri oluşturma başarımları hesaplatılmıştır.



Şekil 3.6: Test 4, Algoritmaların Gürültüye Gürbüzlüğü

³²ing: White Gaussian Noise

³³ing: Signal-to-noise ratio

Oluşturulan sinyal ile gerçek sinyal arasındaki hatanın normunun ortalama değeri doğru oluşturma için başarım kriteridir. Algoritmaların farklı SNR değerlerinde gürültüye gürbüzlüğü Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Buna göre düşük SNR değerlerinde CS algoritması daha az hata ile sinyali geri oluştururken, SNR değeri arttıkça ($\text{SNR} \geq -2\text{dB}$) OMP algoritması diğer algoritmalara göre sinyali daha az hata ile geri oluşturur.

4. ALGILAYICI DÜĞÜMLERDE ENERJİ TÜKETİM MODELLERİ

4.1 Enerji Tüketim Modelleri

Klasik bir algılayıcı düğümün enerji tüketimi iki grupta incelenir. Bunlar (i) veri algılama ve sinyal işleme nedenli hesaplama enerji tüketimi (E_{CMP}) ve (ii) veri paketi alma ve gönderme nedenli haberleşme enerji tüketimidir (E_{COM}). Haberleşme enerjisi algılayıcı radyosunda (almaç ve göndermeçlerinde) harcanan enerjiyi ifade ederken, hesaplama enerjisi algılayıcı düğümün sinyali ölçmesi ve işlemcisinde sinyal işleme için yaptığı aritmetik işlemler nedenlidir.

Farklı amaçlarda kullanılan algılayıcı platformları için haberleşme ve hesaplama enerjileri değişir. Güç tüketim karakteristiği deneylerle doğrulanmış ve yaygın olarak kullanılan Mica2 platformunun enerji tüketim değişkenleri enerji tüketim modellerinde ve analizlerde kullanılmıştır. Mica2 algılayıcısı donanımsal olarak üzerinde Atmel Atmega 128L model işlemci ve Chipcon CC1000 model radyo bulundurur. Her iki birim enerji tüketim karakteristiği bakımından birbirleriyle uyumludur.

Her bir algılayıcı düğümün oluşturduğu veri paketi önünde 168 bit uzunluğunda veri başlığı³⁴ vardır. Maksimum veri paketi uzunluğu 2040 bit'tir. Paket başına maksimum veri yükü 1872 bit'tir [52]. Alındı bilgisini ifade eden ACK³⁵ paketinin

³⁴ing: data header

³⁵ing: Acknowledgement

uzunluğu 160 bit'tir ($L_A = 160$). Enerji tüketim modellerinde ve analizlerde bu değişken değerleri kullanılmıştır.

4.1.1 Haberleşmeye Bağlı Enerji Tüketimi

Haberleşme enerji karakteristiklerini analizlerde kullanmak için Mica2 algılayıcı düğümünde yer alan CC1000 radyosunun [53] numaralı çalışmada anlatılan deneysel haberleşme enerji tüketim modelleri referans alınmıştır.

Tablo 4.1: Mica2 Platformu için Farklı Menzillere göre Haberleşme (Veri İletimi) Nedenli Enerji Tüketimleri ($\mu\text{J}/\text{bit}$).

güç seviyesi (l)	iletim enerjisi (E_{tx}^l)	menzil (R_{max}^l)
$l-1$	0.672	19.30
$l-2$	0.688	20.46
$l-3$	0.703	21.69
$l-4$	0.706	22.69
$l-5$	0.711	24.38
$l-6$	0.724	25.84
$l-7$	0.727	27.39
$l-8$	0.742	29.03
$l-9$	0.758	30.78
$l-10$	0.773	32.62
$l-11$	0.789	34.58
$l-12$	0.813	36.66
$l-13$	0.828	38.86
$l-14$	0.844	41.19
$l-15$	0.867	43.67
$l-16$	1.078	46.29
$l-17$	1.133	49.07
$l-18$	1.135	52.01
$l-19$	1.180	55.13
$l-20$	1.234	58.44
$l-21$	1.313	61.95
$l-22$	1.344	65.67
$l-23$	1.445	69.61
$l-24$	1.500	73.79
$l-25$	1.664	78.22
$l-26$	1.984	82.92
$l-27$	2.538	100.00

İletim mesafelerine göre veri paketindeki bit başına iletim enerjisi tüketim miktarları Tablo 4.1’de verilmiştir. Bir bit uzunluğundaki bilginin l güç seviyesi ile gönderilmesi için harcanan enerji E_{tx}^l değişkeni ile ifade edilmektedir. l güç seviyesi ile bilginin iletilebileceği en uzak menzil R_{max}^l ile gösterilmektedir. Örneğin haberleşmek isteyen düğüm- i ve düğüm- j arasındaki mesafe R_{max}^l ’den büyükse ($d_{ij} > R_{max}^l$), iki düğüm birbirlerinin kapsama alanı dışındadır ve l güç seviyesinde yapılan bir RF yayımla haberleşemez. Algılayıcı düğümde bir bitlik bilginin alınması için tüketilen enerji sabittir ve E_{rx} ile ifade edilir. Kanal bantgeniği (ς) 38.4 kbps’dir [54]. Veri alma için harcanan enerji (E_{rx}) sabittir ve değeri $7.38 \mu\text{J/bit}$ ’tir. Haberleşme güç tüketim değişkenlerinin değerleri [53] numaralı çalışma referans alınarak belirlenmiştir.

4.1.2 Hesaplamaya Bağlı Enerji Tüketimi

Klasik temel donanıma sahip bir algılayıcı düğümünde hesaplama nedenli enerji tüketiminin 3 ana bileşeni vardır. Bu bileşenler,

1. Sinyal ölçülmesi (algılanması) için enerji tüketimi – E_{ACQ}
2. İşlemci arka planı enerji tüketimi– E_{BCK}
3. Sinyal işleme nedenli enerji tüketimi – E_{SP}

ile isimlendirilmiştir. Algılayıcı düğümde hesaplamaya bağlı enerji tüketimi Denklem 4.1’de gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$E_{CMP} = E_{ACQ} + E_{BCK} + E_{SP} \quad (4.1)$$

Mica2 algılayıcı düğümlerinde bir sinyali algılama için harcanan güç $P_{ACQ} = 15.01 \text{ mW}$ ’tır [55]. N -byte uzunluğundaki ham verinin algılanması için, N adet ana işlemci (CPU³⁶) işlem sayısı gerekir. 7.4 MHz frekansta çalışan Atmega 128L işlemcisi saniye 7.4 milyon makine işlemi (MIPS³⁷) gerçekleştirir. İşlem için geçen süre $D_{OP} = \frac{1}{7.4 \times 10^6}$ saniyedir [54]. Dolayısıyla algılayıcı tarafından N -byte

³⁶ing: Central Processing Unit

³⁷ing: Machine Instructions per Second

uzunluğundaki sinyalin elde edilmesi için harcanan enerji Denklem 4.2 ile ifade edilir.

$$E_{ACQ} = NP_{ACQ}D_{OP} \quad (4.2)$$

Atmega 128L'nin çoğu komutu tek bir CPU saat döngüsünde yürütülür [54]. Bunun yanında, [56]'da yer alan ölçümlere göre, CPU'nun arayüzlerine erişimi için gereken enerji CPU işlemlerinde çekilen akım miktarından çok daha azdır.

Algılayıcının arka planda harcadığı enerji E_{BCK} ile ifade edilir. Arka planda harcanan enerji farklı sinyal işleme tekniklerine göre değişmez. Algılayıcı düğümün işlevsiz olduğu boş durumda (idle) tüketilen enerji hesaplanabilir. Sinyal işleme esnasında işlemcinin kullanım süresi ve arka planda harcanan güç $P_{BCK} = 9.6 \text{ mW}$ [55] değişkenleri kullanılarak arka plan enerji tüketimi Denklem 4.3'te gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$E_{BCK} = P_{BCK}D_{SP} \quad (4.3)$$

Belirli bir sinyal işleme görevi için gerçekleştirilen işlem sayısı CPU kullanım süresini belirler. Bir başka deyişle, arka plan enerji tüketimi sinyal işleme görevleri için geçen süre ile orantılıdır.

Sinyal işleme nedenli enerji tüketimi (E_{SP})'nin genelgeçer matematiksel formu yoktur ve farklı sinyal işleme tekniklerine göre değişir. Farklı sinyal işleme tekniklerinin sinyal işleme nedenli enerji tüketimi (E_{SP}), Bölüm 4.2'de detaylandırılmıştır.

4.2 Algılayıcı Dügümler için Sinyal İşleme ve Haberleşme Senaryoları

Farklı sinyal işleme tekniklerine göre algılayıcı düğümün haberleşme ve hesaplama nedenli enerji tüketimleri değişir. Bu bölümde 3 farklı sinyal işleme tekniğine göre enerji tüketim senaryoları oluşturulmuştur. Bu senaryolar,

1. Senaryo-1, Algılama ve Ham Verinin İletilmesi Yaklaşımı (DANP)
2. Senaryo-2, Algılama ve Verinin Dönüşüm Kodlaması ile İşlenerek İletilmesi Yaklaşımı (DATC)
3. Senaryo-3, Algılama ve Verinin Sıkıştırılmış Algılama ile İşlenerek İletilmesi Yaklaşımı (DACS)

ile isimlendirilmiştir.

İlerleyen bölümlerde, her senaryonun hesaplama ve haberleşme enerji tüketimi matematiksel modelleri oluşturulmuştur.

4.2.1 Senaryo-1, Algılama ve Ham Verinin İletilmesi Yaklaşımı (DANP)

Algılayıcı düğüm ölçüm işlemi yaptıktan sonra ölçüm sinyali üzerinde herhangi bir dönüşüm işlemi yapmadan sadece ölçüm ham verisini baz istasyonuna iletebilir. İleri dönüştürme ve geri oluşturma işlemleri gibi son işlemler baz istasyonunda gerçekleştirilir. Bu durumda işlemcide sadece ölçüm işlemi için enerji harcanmıştır ve sinyal işleme nedenli enerji tüketimi yoktur. Ölçüm ve ham verinin iletilmesi senaryosu için hesaplama enerji tüketimi Denklem 4.4 gösterilmiştir.

$$E_{CMP-DANP} = E_{ACQ} = NP_{ACQ}D_{OP} \quad (4.4)$$

Senaryo-1 için algılayıcı düğüm N boyutlu bir sinyalin ölçümü sonrasında N byte verinin iletimini yapar.

4.2.2 Senaryo-2, Algılama ve Dönüşüm Kodlaması ile İşlenerek İletilmesi Yaklaşımı (DATC)

Klasik sinyal işleme yöntemlerinde ölçüm yapıldıktan sonra, ikinci senaryoda (DATC), ölçülen sinyal analog-sayısal dönüştürücüsünden geçirilir, bir dönüşüm tabanı (Fourier, DCT, Wavelet vb.) kullanılarak sinyal ayrıştırması yapılır ve N adet dönüşüm katsayıları elde edilir. Dönüşüm katsayıları sıralanarak sinyal enerjisinin büyük kısmınının toplandığı K adet en büyük katsayı ve katsayıların veri dizisi içinde buldukları konumları (indeks numaraları) belirlenir. K adet katsayı değerleri ve indeks bilgileri kullanılarak ölçümü yapılan fiziksel olay kayıpsız olarak geri oluşturulabilir. Bu senaryoda elde edilen ölçümün yüksek enerjili katsayıları ve dizi içindeki konumları baz istasyonuna birlikte iletilir. Bu dönüşüm kodlamasında, aritmetik işlemlerin sayımı yapılarak sinyal işleme nedenli enerji tüketimi hesaplanabilir. Bir dönüşüm tabanında çarpım işleminin aritmetik işlem sayımı yapılırsa; bu işlemcide $N(N - 1)$ toplama ve N^2 çarpma işlemi gerektirir. N adet verinin sıralanıp K adetinin seçilmesi $N \log_2(N)$ karşılaştırma ve kaydırma işlemi gerektirir. K adet verinin büyüklükleri ve indeksleri baz istasyonuna iletilir, işlem sonunda toplamda $2K$ adet verinin iletimi yapılır. Senaryo-2 için hesaplama nedenli enerji tüketimi Denklem 4.5'de gösterilmiştir.

$$E_{SP-DATC} = N\varepsilon_{mrd} + N^2(\varepsilon_{add} + \varepsilon_{mul}) + N \log N(\varepsilon_{cmp} + \varepsilon_{sft}) + 2K\varepsilon_{mwr} \quad (4.5)$$

Denklemden yer alan değişkenlerden ε_{add} (3.30 nJ), ε_{mul} (9.90 nJ), ε_{cmp} (3.30 nJ), ε_{sft} (3.30 nJ), ε_{mrd} (0.26 nJ) ve ε_{mwr} (4.30 nJ), CPU'da bir byte aritmetik hesaplama işlemi için sırasıyla toplama, çarpma, karşılaştırma, kaydırma, okuma ve yazma işlemlerini gerçekleştirmek için harcanan enerji tüketimlerini göstermektedir [52, 57].

Senaryo-2 için CPU'da gerçekleştirilen toplam işlem sayısı $O_{SP-DATC}$ ile ifade edilir, bu değer aritmetik işlem sayısı kadardır ve $2N^2 + 2N \log(N) + N + 2K$ olarak hesaplanır. İşlemlerin gerçekleşmesi için geçen süre $D_{SP-DATC} = O_{SP-DATC} D_{OP}$ denklemi ile bulunur.

Senaryo-2 için algılayıcı düğüm N boyutlu bir sinyalin ölçümü sonrasında $2K$ byte uzunluğundaki verinin iletimini yapar.

4.2.3 Senaryo-3, Algılama ve Sıkıştırılmış Algılama ile İşlenerek İletilmesi Yaklaşımı (DACS)

Sıkıştırılmış Algılama (CS) ile ölçüm tekniğinin sırrı ölçüm verisini sıkıştırarak elde etmesidir. Günümüzde CS ile işlem yapan donanımlar üzerinde çokca çalışma vardır [58–60]. Bu çalışmalar henüz deneysel düzeyde olup, bu donanımlar üzerinde CS ile yapılan izdüşüm işlemlerin enerji maliyeti bilinmemektedir. Bu yüzden, CS tabanlı işlemlerin enerji tüketimini hesaplamak için klasik yöntemlerdeki maliyet fonksiyonlarına benzer enerji tüketim fonksiyonları oluşturulabilir. CS yöntemi ile işlem yapan algılayıcıda fiziksel sinyalin ölçülmesi için CS donanımı izdüşüm işlemi ile $N \gg M$ ölçüm almak yerine M adet ölçüm alır. Buna göre, N boyutlu ölçüm sinyalinin klasik yöntemlerde olduğu gibi elde edildiği varsayalım. M adet sıkıştırılmış ölçüm $M \times N$ boyutlu Bernoulli (rastgele ± 1) matrisi ile yapılan çarpım işlemi ile elde edilir. Matris elemanları sadece ± 1 elemanları içerdiği için, rastgele izdüşüm işlemleri için aritmetik işlemlerin sayım hesabı yapıldığında $M(N - 1)$ adet toplama işlemi gerekir. Algılayıcı düğüm $M(N - 1)$ adet okuma ve yazma işlemleri gerçekleştirir.

Tanımlanan hesaplama enerji tüketimi Denklem 4.6'de gösterilmiştir.

$$E_{SP-DACS} = N\varepsilon_{mrd} + MN\varepsilon_{add} + M\varepsilon_{mwr} \quad (4.6)$$

Senaryo-3 için CPU'da gerçekleştirilen toplam işlem sayısı $O_{SP-DACS} = MN + N + M$ ile hesaplanır. İşlemlerin gerçekleşmesi için geçen süre $D_{SP-DACS} = O_{SP-DACS}D_{OP}$ ile bulunur.

Senaryo-3 için algılayıcı düğüm N boyutlu bir sinyalin ölçümü sonrasında M byte uzunluğundaki verinin iletimini yapar.

Tablo 4.2: Algılayıcı Düğümlerde Enerji Tüketim Modelleri için Değişken Sembolleri ve Tanımları

Sembol	Tanım
E_{CMP}	Hesaplama nedenli enerji tüketimi
E_{COM}	Haberleşme nedenli enerji tüketimi
E_{tx}^l	l g�c seviyesinde haberleşme enerji tüketimi
R_{max}^l	l g�c seviyesinde maksimum kapsama alanı uzaklığı
d_{ij}	$i.$ ve $j.$ düğümler arasındaki mesafe
E_{rx}	Veri alma için harcanan enerji (7.38 μ J/bit)
ς	Kanal bantgenişliği (38.4 Kbps)
L_P	Gerçek veri paketi uzunluğu
L_A	ACK paketi uzunluğu (160 bit)
E_{ACQ}	Algılama için harcanan enerji
E_{BCK}	Artalan (arka plan) enerji tüketimi
E_{SP}	Sinyal işleme nedenli enerji tüketimi
P_{ACQ}	Algılama nedenli g�c tüketimi (15.01 mW)
D_{OP}	Komut yürütme zamanı (0.14 μ s)
$E_{CMP-DANP}$	DANP senaryosu için hesaplama nedenli enerji tüketimi
D_{SP}	Sinyal işleme aşamasında işlemci (CPU) kullanım süresi
$E_{SP-DATC}$	DATC senaryosu için haberleşme nedenli enerji tüketimi
ε_{add}	Toplama işlemi için harcanan enerji (3.30 nJ)
ε_{mul}	çarpma işlemi için harcanan enerji (9.90 nJ)
ε_{cmp}	Karşılaştırma işlemi için harcanan enerji (3.30 nJ)
ε_{sft}	Kaydırma işlemi için harcanan enerji (3.30 nJ)
ε_{mrd}	Bellekten okumak için harcanan enerji (0.26 nJ)
ε_{mwr}	Belleğe yazmak için harcanan enerji (4.30 nJ)
$O_{SP-DATC}$	DATC için toplam işlem sayısı
$D_{SP-DATC}$	DATC için geçen toplam süre
$E_{SP-DACS}$	DACS için hesaplama nedenli enerji tüketimi
$O_{SP-DACS}$	DACS için toplam işlem sayısı
$D_{SP-DACS}$	DACS için geçen toplam süre

5. KABLOSUZ AĞ MODELİ

5.1 Ağ Modeli

Bu bölümde, ağda gerçekleşen tüm hesaplama, haberleşme ve veri paketi yönlendirme işlemleri karışık tamsayı programlama (MIP) ile ifade edilmiştir. Bölüm 4'te oluşturulan sinyal işleme ve haberleşme senaryoları MIP çerçevesinde modellenmiştir.

Çalışmamızda kabul ettiğimiz KAA topolojisi, bir adet baz istasyonundan (toplama merkezi) ve birden çok algılayıcı düğümden oluşmaktadır. Ağdaki toplam algılayıcı düğüm sayısı ζ ile gösterilir. Ağ topolojisi $G = (V, A)$ ile ifade edilebilir. Burada V kümesi baz istasyonu da içine alan tüm düğümlerin olduğu kümedir. Buna ek olarak, W kümesi de baz istasyonu dışındaki tüm algılayıcı düğümleri içine alan küme olarak ifade edilsin ($W = V \setminus \{0\}$). $A = \{(i, j) : i \in V, j \in V - i, d_{ij} \leq R_{max}^{l-max}\}$ tanımı ile ağ içindeki veri akışı gösterilebilir. Düğüm- i 'den düğüm- j 'e gönderilen toplam veri paketi sayısı f_{ij} ile gösterilmiştir. Veri paket sayısına göre gönderilen toplam alındı bilgisi (ACK³⁸) paket sayısı g_{ij} ile gösterilmiştir. A ile yapılan tanıma göre hiçbir düğüm kendisine veri paketi gönderemez, ayrıca hiçbir düğüm RF kapsama alanı dışındaki düğümlere veri paketi gönderemez. Buna göre, düğümler veri paketlerini sadece gönderebilecekleri maksimum uzaklıklarda R_{max}^{l-max} bulunan düğümlere veya baz istasyonuna iletebilir. Baz istasyonundan herhangi bir algılayıcı düğüme ACK bilgisi dışında veri akışı yoktur. Akış kümesi baz istasyonunun ACK bilgisi göndermesi dikkate alınarak oluşturulmuştur. Ağ topolojisinde düğümler arasındaki haberleşmelerin zamana bağlı (senkronize) olduğu ve zamanın belirli

³⁸ing: acknowledgement

aralıklarda organize edildiği varsayılmıştır. Buna ek olarak, algılayıcı düğüm haberleşmesinde zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA³⁹) tabanlı ortam erişim kontrolü (MAC⁴⁰) katmanının işlevsel olduğu ve zaman dilimi atama algoritması çatışmasız bir iletim takvimine göre planlandığı düşünülmüştür. [61] numaralı çalışmada böyle bir algoritma ile bantgenişliği gereksinimleri uygun olduğu zaman çarpışmasız haberleşmenin sağlanabildiği gösterilmiştir. Her bir zaman diliminde, her bir algılayıcı düğüm sabit sayıda veri paketi üretip, bu veri paketini algılayıcı düğümler aracılığıyla veya doğrudan baz istasyonuna iletmektedir [62]. Tüm bu değişkenlere ve kısıtlara göre, ağ içindeki eniyileme problemi MIP ile modellenmiştir. MIP modeli Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Buna göre eniyileme probleminin amaç fonksiyonu ağ yaşam süresini (H) eniyilemek olmasına rağmen, bizim problemimiz ve amacımız kısıtları sağlayan en iyi akışları bularak ağ ömrünün en küçük olduğu zamanı enbüyüklemektir. H değişkeni ağ yaşam süresini zaman dilimi sayısının bir fonksiyonu olarak vermektedir. Gerçek ağ yaşam süresi, bir zaman dilimi süresi ile zaman dilim sayısının çarpılması ile elde edilir ($H \times T_{rnd}$), burada T_{rnd} bir zaman diliminde geçen süredir. Zaman dilimi sayısı (H) birimsiz bir değişkendir.

MIP çerçevesindeki kısıtlar incelenirse, Denklem 5.1 ve Denklem 5.2 ağdaki bütün akışların negatif olamayacağını ifade eder. Denklem 5.3 algılayıcı düğümde ve baz istasyonu akış dengelemesini sağlar. düğüm- i ’ye yönlendirilen veri paketi sayısı ile düğüm- i ’nin ürettiği veri paketi sayısının toplamı; düğüm i ’den çıkan veri paketi sayısının toplamına eşittir. Buna göre algılayıcılar röle işlevi görerek diğer algılayıcılardan yönlendirilen veri paketlerini baz istasyonuna iletir. $H \times s_i$ sayısı düğüm- i ’de üretilen toplam veri miktarını verir. s_i değişkeni her bir zaman diliminde düğüm- i ’nin ürettiği veri miktarıdır. Algılayıcı düğümlerde üretilen tüm veriler en sonunda baz istasyonuna ulaşır. Buna göre ağda üretilen veri paketlerinin toplam miktarı $H \times \sum_{i \in W} s_i$ ile ifade edilebilir.

Denklem 5.4 ile (j, i) akışındaki ACK paket sayısının (i, j) akışındaki veri paketi sayısına eşit olduğu gösterilmiştir. Denklem 5.5 veri paketlerinin baz istasyonu dışında herhangi bir düğüme ya da başka bir yere iletilerek sonlanmadığını göstermektedir. Baz istasyonu dışındaki bütün düğümlerin veri iletim, veri alma, ACK bilgisi alma ve ACK bilgisi gönderme ile sinyal işleme için tükettikleri

³⁹ing: Time Division Multiple Access

⁴⁰ing: Medium Access Control

enerji batarya enerjileri (ρ) ile sınırlıdır. Bu kısıt Denklem 5.6'da gösterilmiştir. Analizlerde algılayıcı düğümlerin enerjilerini iki adet alkalın pille (AA) sağladığı düşünülmüştür⁴¹ ve bu değer $\rho = 25$ kJ olarak alınmıştır [56].

Enerji dengeleme kısıtında yer alan, iletim enerjisi için en iyi seçim Denklem 5.8'de gösterilen kısıt ile belirlenir. Örneğin, veri alışverişinde bulunacak i ve j düğümleri arasındaki mesafe $d_{ij} = 20$ m olsun. $19.30 \text{ m} < d_{ij} \leq 20.46 \text{ m}$ olduğu için algılayıcı düğüm 2. seviye veri iletim enerjisi harcamak zorundadır ($E_{tx,ij}^{opt} = 0.688\mu\text{J}$). Her bir zaman diliminde üretilen verinin uzunluğu (byte sayısı) ve her bir zaman diliminde hesaplama işlemleri için harcanan enerji, sinyal işleme ve haberleşme senaryosuna göre değişir.

KAA'da bulunan enerjisi (bataryası) ilk biten algılayıcı düğümün yaşam süresi KAA yaşam süresini belirler. Bu varsayım şu şekilde değerlendirilmelidir: ağda yer alan düğümler için yaşam sürelerinin ençoklanması amaçlanmaktadır, bu yüzden düğümlerin hepsi enerjilerini dengeli biçimde tüketmelidir, dolayısıyla ağda bulunan düğümlerin enerjileri eş zamanlı olarak tükenir. Sonuç olarak algılayıcı düğümlerin yaşam sürelerini artırmak, KAA yaşam süresini artırmakla eşittir.

$$E_{tx,ij}^{opt} = \begin{cases} E_{tx}^{l-1} & \text{eğer} & d_{ij} \leq R_{max}^{l-1} \\ \infty & \text{eğer değilse} & d_{ij} > R_{max}^{l-27} \\ E_{tx}^{l+1} & \text{eğer değilse} & R_{max}^l < d_{ij} \leq R_{max}^{l+1} \end{cases} \quad (5.8)$$

RF yayın ortamında algılayıcı düğüm bant sınırlarını dikkate almırsa, verinin alınması ve iletilmesi için gerekli olan bantgenişliği kanal bantgenişliği ile sınırlıdır. Bu kısıttan ötürü kanalda paylaşılan kapasite dikkate alınmalıdır. Düğüm- i 'nin kapsama alanı içinde olan fakat düğüm- i 'nin göndermediği veya almadığı yayınlar düğüm- i 'ye iletilen yayınlar için girişime neden olur. Denklem 5.7 her bir düğüm için düğüme giren, düğümden çıkan ve girişimde bulunan akışın bantgenişliğinin kanal kapasitesi ile üst seviyede sınırlandırıldığını ifade etmektedir. Bu kısıt [61]'de çalışılan yeterli durumun uyarlanmış halidir. Girişim fonksiyonu (I_{jl}^i) Denklem 5.9'de gösterilmiştir. Örnek olarak düğüm- i ; düğüm- j ve düğüm- l 'nin haberleştikleri kapsama alanı içinde ve girişimden etkileniyorsa

⁴¹Mica2 platformları enerjisini 2 adet AA pil ile sağlar.

Enbüyükle H
Öyle ki:

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.1)$$

$$g_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.2)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} f_{ij} - \sum_{(j,i) \in A} f_{ji} = \begin{cases} H \times s_i & i \in W \\ -H \times \sum_{i \in W} s_i & i = 0 \end{cases} \quad \forall i \in V \quad (5.3)$$

$$g_{ji} = f_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.4)$$

$$\sum_{(0,j) \in A} f_{0j} = 0 \quad (5.5)$$

$$\underbrace{L_P \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} E_{tx,ij}^{opt}}_{\text{veri gönderimi}} + \underbrace{E_{rx} L_P \sum_{(j,i) \in A} f_{ji}}_{\text{veri alımı}} + \underbrace{E_{rx} L_A \sum_{(j,i) \in A} g_{ji}}_{\text{ACK alımı}} + \underbrace{L_A \sum_{(i,j) \in A} g_{ij} E_{tx,ji}^{opt}}_{\text{ACK gönderimi}} + \underbrace{H \times E_{CMP}}_{\text{hesaplama}} \leq \varrho \quad \forall i \in W \quad (5.6)$$

$$L_P \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} + L_P \sum_{(j,i) \in A} f_{ji} + L_A \sum_{(i,j) \in A} g_{ij} + L_A \sum_{(j,i) \in A} g_{ji} + \sum_{(j,l) \in A} I_{jl}^i (L_P f_{jl} + L_A g_{jl}) \leq \varsigma HT_{rnd} \quad \forall i \in V \quad (5.7)$$

Şekil 5.1: MIP Çerçevesi

düğüm- i için girişim fonksiyonu (I_{jl}^i) 1 değerindedir, düğümlerin kapsama alanı dışında ve girişimden etkilenmiyorsa girişim fonksiyonu 0 değerindedir. Genel anlamda, girişim mesafesi iletim mesafesine eşit veya iletim mesafesinden büyükse ($\gamma \geq 1$), γ değerine bağlı olarak düğüm- j 'nin l düğümü için yaptığı yayın düğüm- i 'ye girişimde bulunabilir. Bu durum, j ve l düğümleri arasındaki mesafe, j ile i düğümleri arasındaki mesafeden az olsa bile gerçekleşir.

$$I_{jl}^i = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \gamma d_{jl} \geq d_{ji} \quad \forall j \in V \setminus \{i\}, \forall l \in V \setminus \{i, j\} \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (5.9)$$

KAA konumları ve pozisyonları sabit algılayıcı düğümlerden oluşur. Bu yüzden ağ topolojisinin keşfi, rota oluşturma ve diğer başlangıç kurulum işlemleri tek seferde yapılır ve bu işlemler uzun süre tekrar edilmez. Örneğin algılayıcı düğümlerin CS ile işlem yaptığı bir senaryoda baz istasyonun ölçüm matrisini algılayıcı düğümlere yayması, algılayıcı düğümlerin yerleşimlerinden sonra yapılan tek seferlik bir işlemidir. Ağda yeniden yapılanma sürecinin yeterince uzun olduğu düşünülürse, bu operasyonların enerji maliyetleri ağda harcanan toplam enerji miktarının küçük bir kısmını (en az %1) oluşturmaktadır [63]. Dolayısıyla, sabit KAA'larda toplam enerji dağılımı dikkate alındığında yönlendirme enerji yükü toplam enerji tüketimini etkilemeyecek kadar küçük olduğu için ihmal edilebilir.

Tablo 5.1: Ağ Modeli için Değişken Sembolleri ve Tanımları

Sembol	Tanım
E_{CMP}	Hesaplama nedenli enerji tüketimi
E_{COM}	Haberleşme nedenli enerji tüketimi
E_{tx}^l	l güç seviyesinde haberleşme enerji tüketimi
R_{max}^l	l güç seviyesinde maksimum kapsama alanı uzaklığı
d_{ij}	i . ve j . düğümler arasındaki mesafe
E_{rx}	reception energy dissipation (7.38 μ J/bit)
ς	Kanal bantgenişliği (38.4 Kbps)
L_P	Gerçek veri paketi uzunluğu
L_A	ACK paketi uzunluğu (160 bit)
ζ	Ağdaki toplam algılayıcı düğüm sayısı
$G = (V, A)$	Çizge olarak ağ topolojisi
V	Baz istasyonu ve bütün düğümlerin oluşturduğu küme
W	Baz istasyonu hariç bütün düğümlerin oluşturduğu küme
A	Akışların kümesi
f_{ij}	i . düğümden j . düğüme veri akışı
g_{ij}	i . düğümden j . düğüme ACK akışı
H	Ağ ömrü
T_{rnd}	Bir zaman diliminin süresi (500 s)
s_i	i . düğümden bir zaman dilimi için üretilen veri paketi
ϱ	Herbir algılayıcı düğüm için batarya enerjisi
$E_{tx,ij}^{opt}$	Eniyi iletim enerjisi
I_{jk}^i	Elektromanyetik girişim fonksiyonu
γ	Elektromanyetik girişim faktörü
R_{net}	Disk topolojisindeki ağ yarıçapı

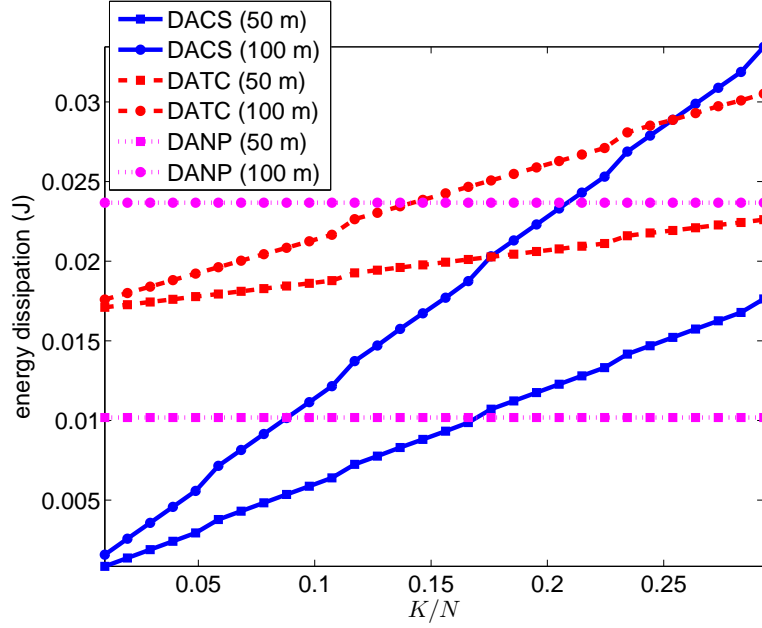
6. NÜMERİK ANALİZLER

Bu bölümde, bir Kablosuz Algılayıcı Ağ içinde yer alan algılayıcı düğümlerin farklı sinyal işleme ve haberleşme senaryolarına göre karışık tamsayılı doğrusal programlama temelinde ağ yaşam süresi, farklı parametre değişimleri dikkate alınarak analiz edilmiştir.

6.1 Yönlendirmesiz Ağda Enerji Tüketimi

Ağ içinde yönlendirmelerin olmadığı, algılayıcı düğümlerin röle işlevini yapmadığı bir senaryoda, temel anlamda haberleşme ve hesaplama enerji tüketimlerinin farklı senaryolarda yapılan sinyal işleme tekniklerine göre karşılaştırılması incelenmiştir. DANP, DATC ve DACS senaryoları Bölüm 4'te detaylandırılmıştır. Tek bir algılayıcı düğümün fiziksel ortamdaki ölçümü yapması, işlemesi ve veriyi iletmesi için enerji tüketim modeli oluşturulmuştur. Fiziksel ortamdan ölçülen sinyalin uzunluğu $N = 1024$ byte olarak seçilmiştir. Algılayıcı düğüm ile baz istasyonu arasındaki mesafe nominal ve maksimum menziller olan 50 m and 100 m seçilmiştir. Buna göre algılayıcı düğüm, sırasıyla $l-18$ ve $l-27$ güç seviyelerini kullanarak haberleşme işlemlerini gerçekleştirir. Veri iletimi nedenli enerji tüketimi ve ACK bilgisinin alınmasıyla oluşan enerji tüketimi haberleşme nedenli enerji tüketimleridir. Yapılan analiz sonucunda, sinyal boyutuna göre farklı seyreklik oranlarına (K/N) ve iki farklı menzile göre toplam enerji tüketimi değişimi Şekil 6.1'te gösterilmiştir.

Ölçülen sinyaldeki seyreklik seviyesi arttıkça DACS ve DATC ile işlem yapan algılayıcıların enerji tüketimleri de artmaktadır. DANP ile işlem yapan senaryoda ölçüm yapıldıktan sonra herhangi bir sinyal işleme adımı gerçekleştirilmeden



Şekil 6.1: DANP, DATC ve DACS Sinyal İşleme Senaryoları için Tek Bir Algılayıcı Düğümün Toplam Enerji Tüketimi (1) 50 m ve (2) 100 m.

ham verilerin hepsinin iletilmesi nedeniyle algılayıcının enerji tüketimi sinyalin seyreklik seviyesinin değişiminden etkilenmemektedir. Düşük seyreklik seviyeli (ör., $K/N < 0.15$) sinyallerin ölçümünde DACS ile işlem yapan algılayıcıların enerji tüketimi DATC ve DANP ile işlem yapan algılayıcılara göre her iki menzil için de daha düşüktür. Diğer taraftan seyrek olmayan sinyallerin DACS yaklaşımı ile ölçümü enerji tüketim başarımı bakımından avantajlı değildir.

6.2 Çoklu Algılayıcılar için Ağ Yaşam Süresi

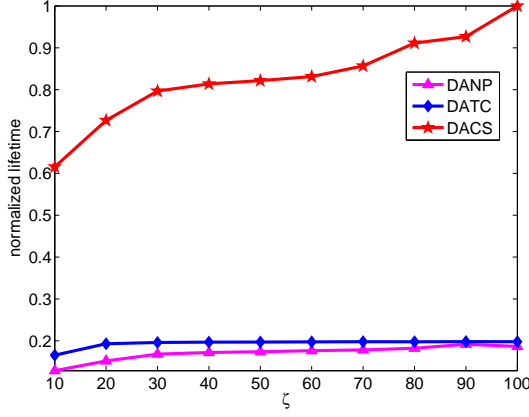
Farklı sinyal işleme yaklaşımlarının ağ yaşam süresi üzerindeki etkisini incelemek için Bölüm 5’te anlatılan MIP modeli kullanılmıştır. Algılayıcı düğümler yarıçapı R_{net} olan disk şeklindeki bir alana düzgün (üniform) dağıtılmış biçimde rastgele yerleştirilmiştir. Baz istasyonu diskin merkezinde bulunup, enerji kısıtı yoktur. Baz istasyonun ve algılayıcı düğümlerin konumları sabittir. KAA topolojisinde, her bir algılayıcı düğüm ürettiği verileri diğer algılayıcı düğümler üzerinden veya doğrudan baz istasyonuna iletebilir. Her algılayıcı düğümün bataryasının

başlangıç enerjilerinin eşit olduğu ve her düğümün aynı süre içinde eşit sayıda veri ürettiği farzediliyor. Her bir algılayıcının ürettiği veri, baz istasyonuna kesinlikle ulaşıyor [64].

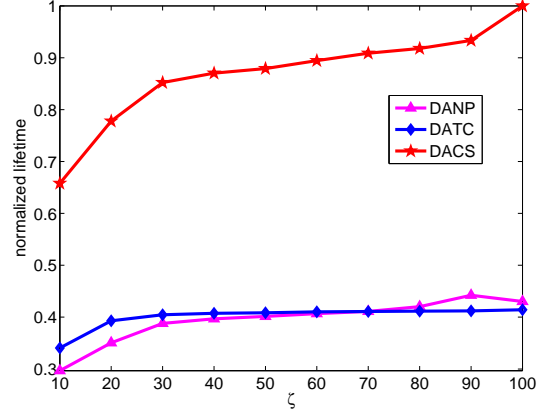
GAMS ([29]) çözücüsü kullanılarak MIP problemi KAA yaşam süresini ençoklama amaç fonksiyonu için değişen algılayıcı düğüm sayısına ve ağ yarıçapına göre seyreklik seviyelerinin $K/N = 0.05, 0.10, 0.15$ ve 0.20 olduğu durumlar için nümerik olarak çözdürülmüştür. Her tekrarlama topolojideki algılayıcı düğümlerin dağılımı, dolayısıyla algılayıcı düğüm konumları değiştirilmiştir. Algılayıcı ağ yaşam sürelerinin ortalaması hesaplatılarak daha sonra bu değerler normalleştirilmiştir. Normalleştirme işlemi bütün veri noktalarının en yüksek ağ yaşam süresi değerine bölünmesi ile elde edilir.

Ağ yarıçapının $R_{net} = 100$ metre olduğu bir KAA disk topolojisinde, farklı seyreklik seviyelerindeki sinyallerin ölçümü için değişen algılayıcı düğüm sayısına göre normalleştirilmiş ağ yaşam süresi Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Sinyalin her seyreklik seviyesinde en uzun ağ yaşam sürelerine DACS ile erişilmiştir. Özellikle seyrek sinyallerde ($K/N = 0.05$) DACS yöntemini kullanarak işlem yapan KAA yaşamsüresi diğer yöntemlerle işlem yapan ağlara göre fazladır. Sinyallerdeki seyreklik seviyesi azaldıkça CS yönteminin ağ yaşam süresi üzerindeki etkisi azalmaktadır ve ağ yaşam süresi bakımından diğer yöntemler ile arasındaki fark kapanmaktadır. $K/N = 0.20$ olduğu durumda DACS ve DANP senaryoları için ağ yaşamsüreleri arasında %15 fark vardır. KAA'daki algılayıcı düğüm sayısının artırılması ağ yaşamsüresini her durumda (sinyaldeki seyreklik seviyesinin tüm durumları için) artırmaktadır. Ağ yarıçapının R_{net} sabit olduğu durumda, algılayıcı düğüm sayısının artması ağda bulunan düğüm yoğunluğunu artırır. Dolayısıyla, komşu algılayıcı düğüm sayısının artmasıyla baz istasyonuna giden alternatif yol sayısı artar. Birbirleri ile çok yakın ve yönlendirme zenginliğinin olduğu ağlardan uzun ağ yaşam süreleri sağlanır. Bunun yanında, algılayıcı düğüm yoğunluğunu artırmak ortalama iletim mesafesini azaltır. Göndermeç ve almaç arasındaki mesafenin artması haberleşme nedenli enerji tüketimi artırmaktadır.

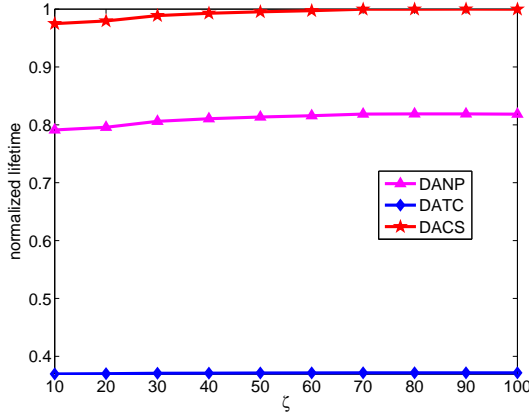
Algılayıcı düğüm sayısının sabit ve ($\zeta = 50$) adet olduğu bir KAA disk topolojisinde, farklı seyreklik seviyelerindeki sinyallerin ölçümü için değişen ağ yarıçapına göre normalleştirilmiş ağ yaşam süresi Şekil 6.3'te gösterilmiştir. $K/N = 0.20$ olduğu durum dışındaki tüm seyreklik seviyeleri için, DACS ile



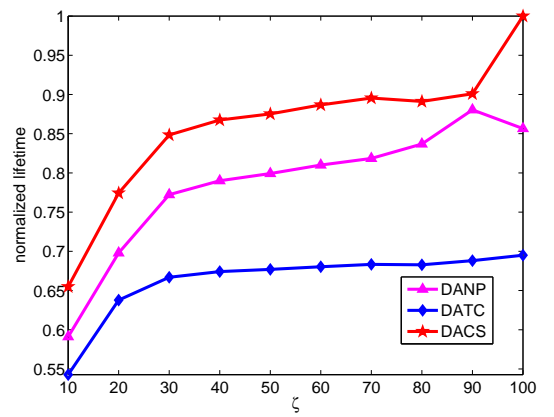
(a)



(b)

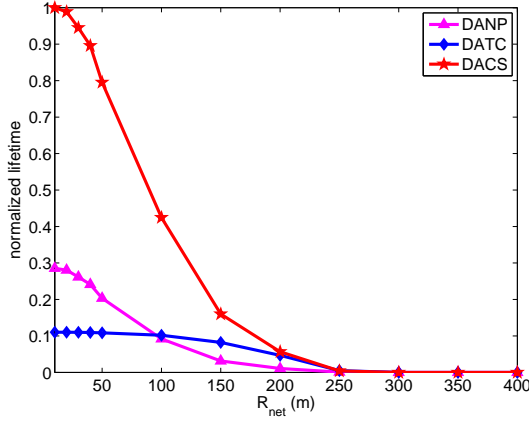


(c)

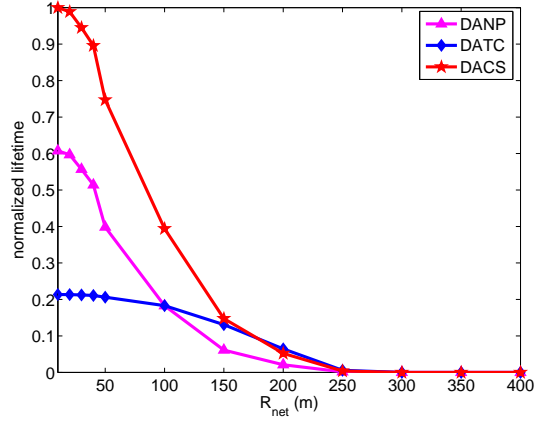


(d)

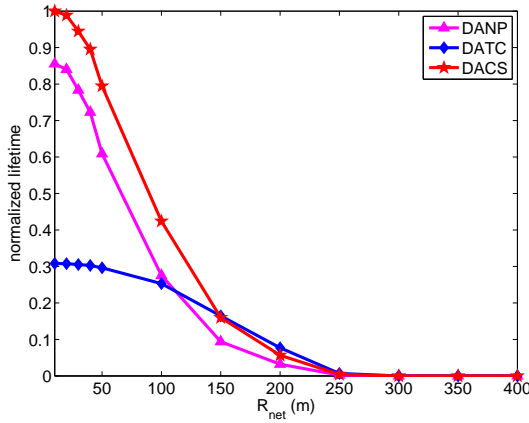
Şekil 6.2: Değişen Algılayıcı Düğüm Sayısına (ζ) göre Normleştirilmiş KAA Yaşam Süresi, Ağ Yarıçapı $R_{net} = 100$ m ve Seyreklik Seviyesi Oranları (a) $K/N = 0.05$, (b) $K/N = 0.10$, (c) $K/N = 0.15$ ve (d) $K/N = 0.20$ 'dir.



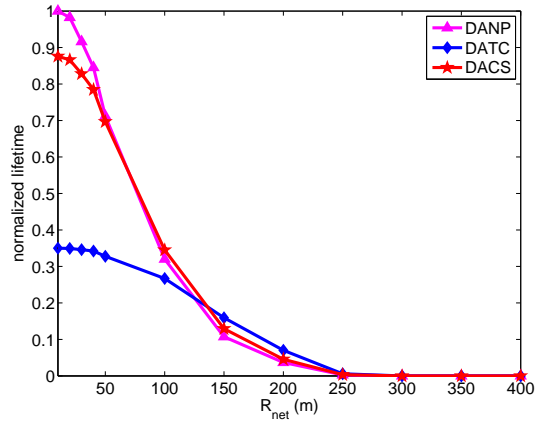
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.3: Değişen Ağ Yarıçapına (R_{net}) göre Normalleştirilmiş KAA Yaşam Süresi, Algılayıcı Düğüm Sayısı ($\zeta = 50$) ve Seyreklik Seviyesi Oranları (a) $K/N = 0.05$, (b) $K/N = 0.10$, (c) $K/N = 0.15$, ve (d) $K/N = 0.20$ 'dir

ulaşılan ağ yaşam sũresi diğer yũntemlere gũre $R_{net} \leq 150$ m olduğu sũrece daha uzundur. Ağ yarıçapının arttığı durumunda DATC yũntemi DACS'ye gũre daha yũksek performansla ağ yaşam sũresini uzatmaktadır. Örneğin, $R_{net} \geq 250$ m ve $K/N = 0.05$, $R_{net} \geq 200$ m ve $K/N = 0.10$, $R_{net} \geq 150$ m ve $K/N = 0.15$ olduğu durumlarda DATC yũntemiyle işlem yapan ağın yaşam sũresi daha uzundur. Ağ yarıçapının kũçük olduğu durumlar ve yũksek seyreklik seviyeli K/N sinyallerin ۆlçũmũ için DANP yũntemi daha uzun ağ ۆmrũ sağlar. Örneğin $R_{net} \leq 50$ m ve $K/N = 0.20$ olduğu durumda diğer yũntemlere gũre DANP ağ yařamsũresi dikkate alındığında daha iyi performansa sahiptir. Tũm sinyal işleme ve haberleşme senaryoları için ağ yarıçapı R_{net} arttıķça ağ yaşam sũresi azalmaktadır. Ağ yarıçapının bũyũmesi dũđũmler arasındaki ortalama mesafeyi artıracadığı için haberleşme nedenli enerji tũketimi de artmış olur. Bunun yanında, algılayıcı dũđũm sayısını sabit tutup, ağın yarıçapını artırmak, dũđũm başına dũřen komşu dũđũm sayısını azaltır. Bu durum, ağın enerji dengeleme kapasitesini sınırlandırır.

7. SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, yeni bir sinyal işleme, ölçme ve geri oluşturma yöntemi sunan Sıkıştırılmış Algılama'nın (CS) Kablosuz Algılayıcı Ağlar'a (KAA) uyarlanması ve KAA'nın enerji verimliliği ve yaşam süresi üzerindeki etkinliği incelenmiştir.

Bu amaçla, 1. Bölümde problemin genel tanımı yapılmış ve kablosuz ağlar, sinyal işleme yöntemleri, algılayıcı düğümlerde sinyal işleme ve haberleşme nedenli enerji tüketimi konularında genel bilgiler verilmiştir.

2. Bölümde KAA'nın kullanım alanları, algılayıcı düğümlerin donanımsal yapısı, piyasada mevcut olan algılayıcı düğüm platformları ve algılayıcı düğüm alt-sistem donanımları anlatılmıştır. Doğrusal programlama ile KAA problemlerinin çözülebileceği anlatılmış olup, doğrusal programlama modelindeki değişkenlerin tamsayı dışında gerçel veya ikili sayı değerleri alması durumunda karışık tamsayılı programlamanın (MIP) işlevsel olduğuna değinilmiştir. Karışık tamsayılı problemlerin modelleme sistemleri ile çözülebildiğinden bahsedilerek genel cebirsel modelleme sistemi (GAMS) programı hakkında bilgiler verilmiştir.

3. Bölümde Sıkıştırılmış Algılama (CS) kuramının matematiksel temelleri anlatılmıştır. Sinyalin seyrek olması ve sınırlı isometri özelliklerini sağlaması halinde klasik yöntemlere göre daha az ölçümle geri oluşturulabileceği anlatılmıştır. Sinyalin geri oluşturulması için çözülmesi gereken dışbükey eniyileme problemi verilmiştir. Sinyalin doğru geri oluşturulması için algılayıcı düğümün ölçmesi gereken en az ölçüm sayısının seyreklik seviyesi ve sinyal boyutuyla orantılı ve bir katsayıyla dereceli olduğu anlatılmıştır. Bu derecenin belirlenmesi için farklı seyreklik seviyeli sinyaller kullanılarak çoklu benzetimler yapılmıştır ve her seyreklik seviyesi için doğru geri oluşturma oranları çıkarılmıştır. Çıkarımlar sonucunda

doğru geri oluşturma için gerekli en az lim sayısının derecesi belirlenmiştir. Bunun yanında, ortak seyreklik seviyeli sinyal modeli tanımlanmış olup, çoklu algılayıcıların limlerinde ortak seyrekliğin olması durumunda problemin yeni bir eniyileme problemi olarak tanımlanabileceği gösterilmiştir. Ortak seyreklik seviyeli sinyaller için de eniyileme problemi farklı yenilikçi seyreklik seviyelerine göre zdrlmştr ve doğru geri oluşturma oranları çıkarılmıştır. Buna göre ortak seyreklikle gösterilebilen sinyaller daha az limle doğru geri oluşturulabilir. Sıkıştırılmış algılamanın dışbükey eniyileme zm paketleri dışında yinelemeli (fırsatçı) algoritmalar ile de zlebileceği gösterilmiştir. Bu algoritmalarından OMP, CoSaMP, IHT ve LIHT için algoritma akışları verilmiştir ve üzümlere adım adım yaklaştığı her adımda olurlu zme yöneldikleri gösterilmiştir. Algoritmaların birbirleri arasında ve dışbükey eniyileme yöntemiyle seyrek sinyalleri doğru geri oluşturma başarımları farklı testler ile karşılaştırılmıştır. Benzetimler sonucunda yinelemeli yöntemlerden OMP algoritmasının çoğu testte başarımının dışbükey zm yönteminin başarımına yakın olduğu gösterilmiştir.

4. Bölümde bir algılayıcı düğümün haberleşme ve hesaplama enerji tüketim modelleri oluşturulmuştur. Enerji tüketim değişkenlerinin değerleri Mica2 platformunun deneysel g verileri kullanılarak belirlenmiştir. Haberleşmeye bağlı enerji tüketimlerinin farklı iletim seviyelerine göre değişmesi ve algılayıcının her iletim seviyesinde farklı enerji harcaması gösterilmiştir. Hesaplamaya bağlı enerji tüketimlerinin temelde sinyalin ölçülmesi (algılanması), ana işlemci arka planında yapılan işlemler ve sinyal işleme nedenli olduğu gösterilerek her bir tüketim matematiksel olarak ifade edilmiştir. Farklı sinyal işleme ve haberleşme senaryolarına göre enerji tüketim modelleri oluşturulmuştur. Algılama ve Ham Verinin İletilmesi (DANP), Algılama ve Verinin Dönüşüm Kodlaması ile İşlenerek İletilmesi (DATC) ve Algılama ve Verinin Sıkıştırılmış Algılama ile İşlenerek İletilmesi (DACS) yaklaşımları olmak üzere 3 farklı senaryo için aritmetik işlemlerin sayımı temelinde sinyal işlemenin enerji maliyeti sayımı yapılarak, gerçek Mica2 platformunun deneysel tüketim sonuçları temelinde sinyal işleme enerji tüketimleri verilmiştir.

5. Bölümde bir KAA'da gerçekleşen tüm hesaplama, haberleşme ve veri paketi yönlendirme işlemleri karışık tamsayılı doğrusal programlama (MIP) ile ifade edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan ağ topolojisi ve ağın özellikleri anlatılmıştır. Oluşturulan sinyal işleme ve haberleşme senaryolarına uyarlanabilen genelgeçer

MIP çerçevesi, amaç fonksiyonu ve kısıtları tanımlanmıştır.

6. Bölümde, 4. bölümde tanımlanan enerji senaryoları ve 5. bölümde verilen ağ modeli ve MIP çerçevesi sonuçları kullanılmış olup; sinyal seyreklik seviyesi, ağ yarıçapı, ağdaki algılayıcı düğüm sayısının değişimlerine göre nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, ağ içinde yönlendirmenin olmadığı ve algılayıcı düğümlerin röle işlevini yapmadığı bir durumda bir algılayıcı düğümün DANP, DATC, DACS senaryoları ile sinyal işleme ve haberleşme işlemlerini gerçekleştirilmesi ve sinyalin farklı seyreklik seviyeleri için nominal ve maksimum iletim mesafelerine iletilmesi durumları için tüketilen enerjiler karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, düşük seyreklik seviyeli (ör., $K/N < 0.15$) sinyallerin ölçümünde DACS ile işlem yapan algılayıcıların enerji tüketimi DATC ve DANP ile işlem yapan algılayıcılara göre her iki menzil için de daha düşüktür. İkinci aşamada, çoklu algılayıcı düğümlerin olduğu ve ağ içinde yönlendirmenin olduğu durumda GAMS çözücüsü kullanılarak MIP problemi KAA yaşam süresini ençoklama amaç fonksiyonu için değişen algılayıcı düğüm sayısına ve ağ yarıçapına göre seyreklik seviyelerinin $K/N = 0.05, 0.10, 0.15,$ and 0.20 olduğu durumlar için nümerik olarak çözdürülmüştür. Buna göre, ağ yarıçapının $R_{net} = 100$ metre olduğu bir KAA disk topolojisinde, sinyalin her seyreklik seviyesinde en uzun ağ yaşam sürelerine DACS ile erişilmiştir. Bunun yanında sabit yarıçapta algılayıcı düğüm sayısının artması her senaryo için ağ yaşam süresini artırmaktadır. Algılayıcı düğüm sayısının sabit ve ($\zeta = 50$) adet olduğu bir KAA disk topolojisinde, $K/N = 0.20$ olduğu durum dışındaki tüm seyreklik seviyeleri için, DACS ile ulaşılan ağ yaşam süresi diğer yöntemlere göre $R_{net} \leq 150$ m olduğu sürece daha uzundur. Ayrıca, ağda düğüm sayısının sabit tutularak ağ yarıçapının artırılması her senaryo için ağ yaşam süresini azaltmaktadır.

Kaynakça

- [1] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, “Wireless sensor network survey,” *Computer Networks*, vol. 52, pp. 2292–2330, 2008.
- [2] K. Akkaya and M. Younis, “A survey on routing protocols for wireless sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 3, pp. 325–349, 2005.
- [3] C. Schurgers, V. Raghunathan, S. Park, and M. Srivastava, “Energy-aware wireless microsensor networks,” *IEEE Signal Proc. Magazine*, vol. 19, pp. 40–50, 2002.
- [4] G. Anastasi, M. Conti, M. D. Francesco, and A. Passarella, “Energy conservation in wireless sensor networks: A survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 7, pp. 537–568, 2009.
- [5] C. E. Shannon, “Communication in the presence of noise,” *Proc. Institute of Radio Engineers*, vol. 37, pp. 10–21, 1949.
- [6] D. Donoho, “Compressed sensing,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, pp. 1289–1306, 2006.
- [7] E. J. Candes, J. Romberg, and T. Tao, “Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, p. 489–509, 2006.
- [8] D. Baron, M. B. Wakin, M. F. Duarte, S. Sarvotham, and R. G. Baraniuk, “Distributed compressed sensing,” Tech. Rep. TREE-0612, Rice University, Department of Electrical and Computer Engineering, 2006.
- [9] C. Caione, D. Brunelli, and L. Benini, “Compressive sensing optimization over ZigBee networks,” in *Proceedings of the International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES)*, pp. 36–44, 2010.

- [10] X. Wang, Z. Zhao, Y. Xia, and H. Zhang, “Compressed sensing for efficient random routing in multi-hop wireless sensor networks,” *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, vol. 7, pp. 275–292, 2011.
- [11] H. Mamaghanian, N. Khaled, D. Atienza, and P. Vandergheynst, “Compressed sensing for real-time energy-efficient ECG compression on wireless body sensor nodes,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 58, pp. 2456–2466, 2011.
- [12] W. Chen and I. J. Wassell, “Energy efficient signal acquisition via compressive sensing in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the International Symposium on Wireless and Pervasive Computing (ISWPC)*, pp. 1–6, 2011.
- [13] G. Cao, F. Yu, and B. Zhang, “Improving network lifetime for wireless sensor network using compressive sensing,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC)*, pp. 448–454, 2011.
- [14] J. W. Chinneck, “Practical optimization: A gentle introduction,” 2011.
- [15] F. Fazel, M. Fazel, and M. Stojanovic, “Random access compressed sensing for energy-efficient underwater sensor networks,” *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, vol. 29, pp. 1660–1670, 2011.
- [16] N. Nguyen, D. L. Jones, and S. Krishnamurthy, “Netcompress: Coupling network coding and compressed sensing for efficient data communication in wireless sensor networks,” in *IEEE Workshop on Signal Processing Systems (SIPS)*, pp. 356 –361, 2010.
- [17] F. Ishmanov, A. S. Malik, and S. M. Kim, “Energy consumption balancing (ECB) issues and mechanisms in wireless sensor networks (WSNs): a comprehensive overview,” *European Transactions on Telecommunications*, vol. 22, pp. 151–167, 2011.
- [18] A. Gogu, D. Nace, A. Dilo, and N. Meratnia, “Review of optimization problems in wireless sensor networks,” in *Telecommunications Networks -*

Current Status and Future Trends (J. Hamilton Ortiz, ed.), pp. 153–180, InTech, 2012.

- [19] F. Theoleyre and B. Darties, “Capacity and energy-consumption optimization for the cluster-tree topology in IEEE 802.15.4,” *IEEE Communications Letters*, vol. 15, pp. 816–818, 2011.
- [20] C. Prommak and S. Modhirun, “Optimal wireless sensor network design for efficient energy utilization,” in *Proceedings of the IEEE Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications (WAINA)*, pp. 814–819, 2011.
- [21] M. Erol-Kantarci and H. T. Mouftah, “Mission-aware placement of RF-based power transmitters in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pp. 12–17, 2012.
- [22] D. H. Tran and D. S. Kim, “Minimum latency and energy efficiency routing with lossy link awareness in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, pp. 75–78, 2012.
- [23] F. M. Al-Turjman, H. S. Hassanein, and M. Ibnkahla, “Optimized relay repositioning for wireless sensor networks applied in environmental applications,” in *Proceedings of the International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 1860–1864, 2011.
- [24] B. Tavli, M. B. Akgun, and K. Bicakci, “Impact of limiting number of links on the lifetime of wireless sensor networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 15, pp. 43–45, 2011.
- [25] M. Haenggi, *Opportunities and Challenges in Wireless Sensor Networks*. CRC Press, 2004.
- [26] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson, “Wireless sensor networks for habitat monitoring,” WSNA '02, pp. 88–97, ACM, 2002.
- [27] D. Puccinelli and M. Haenggi, “Wireless sensor networks: applications and challenges of ubiquitous sensing,” *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, vol. 5, no. 3, pp. 19–31, 2005.

- [28] G. B. Dantzig, “Linear programming,” *Operations Research*, vol. 50, no. 1, pp. 42–47, 2002.
- [29] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, and R. Raman, *GAMS: A User Guide*. The Scientific Press, 1998.
- [30] R. Baraniuk, “Compressive sensing,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, pp. 118–121, 2007.
- [31] D. Needell and J. A. Tropp, “Cosamp: iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples,” *Commun. ACM*, vol. 53, no. 12, pp. 93–100, 2010.
- [32] J. Haupt and R. Nowak, “Signal reconstruction from noisy random projections,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, pp. 4036–4048, 2006.
- [33] E. J. Candes, “Compressive sampling,” in *International Congress of Mathematicians (ICM)*, vol. 3, pp. 1433–1452, 2006.
- [34] E. Candes and T. Tao, “Decoding by linear programming,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 12, pp. 4203–4215, 2005.
- [35] R. Baraniuk, M. Davenport, R. DeVore, and M. Wakin, “A simple proof of the restricted isometry property for random matrices,” *Constr. Approx.*, vol. 2008, 2007.
- [36] E. Candès, J. Romberg, and T. Tao, “Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements,” *Communications on Pure and Applied Mathematics*, vol. 59, pp. 1207–1223, 2006.
- [37] E. Candes and T. Tao, “The Dantzig selector: statistical estimation when p is much larger than n ,” *The Annals of Statistics*, vol. 35, no. 6, pp. 2313–2351, 2007.
- [38] D. Donoho, M. Elad, and V. Temlyakov, “Stable recovery of sparse overcomplete representations in the presence of noise,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 1, pp. 6–18, 2006.

- [39] J. Haupt and R. Nowak, “Signal reconstruction from noisy random projections,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 9, pp. 4036–4048, 2006.
- [40] E. J. Candès, J. K. Romberg, and T. Tao, “Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements,” *Communications on Pure and Applied Mathematics*, vol. 59, no. 8, pp. 1207–1223, 2006.
- [41] J. Haupt, W. U. Bajwa, M. Rabbat, and R. Nowak, “Compressed sensing for networked data,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, pp. 92–101, 2008.
- [42] M. Duarte, S. Sarvotham, D. Baron, M. Wakin, and R. Baraniuk, “Distributed compressed sensing of jointly sparse signals,” in *Signals, Systems and Computers, 2005. Conference Record of the Thirty-Ninth Asilomar Conference on*, pp. 1537–1541, 2005.
- [43] D. L. Donoho, “High-dimensional centrally symmetric polytopes with neighborliness proportional to dimension,” *Discrete and Computational Geometry*, vol. 35, pp. 617–652, 2006.
- [44] D. L. Donoho and J. Tanner, “Counting faces of randomly-projected polytopes when the projection radically lowers dimension,” *Journal of the American Mathematical Society*, vol. 22, pp. 1–53, 2009.
- [45] E. J. Candès, “ ℓ_1 magic- recovery of sparse signals,” 2007.
- [46] A. Gilbert and P. Indyk, “Sparse recovery using sparse matrices,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 6, pp. 937–947, 2010.
- [47] J. A. Tropp, A. C. Gilbert, and M. J. Strauss, “Algorithms for simultaneous sparse approximation: part i: Greedy pursuit,” *Signal Process.*, vol. 86, no. 3, pp. 572–588, 2006.
- [48] J. A. Tropp, A. C. Gilbert, Martin, J. Strauss, J. A. Tropp, A. C. Gilbert, and M. J. Strauss, “Algorithms for simultaneous sparse approximation. part ii: Convex relaxation,” 2004.
- [49] A. V. Cevher, “Elec 639: Graphical models lecture notes-the cosamp algorithm,” 2008.

- [50] K. Herrity, A. Gilbert, and J. Tropp, “Sparse approximation via iterative thresholding,” in *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006. ICASSP 2006 Proceedings. 2006 IEEE International Conference on*, vol. 3, 2006.
- [51] V. Cevher, “An alps view of sparse recovery,” in *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 5808–5811, 2011.
- [52] V. Lecuire, C. Duran-Faundez, and N. Krommenacker, “Energy-efficient image transmission in sensor networks,” *International Journal of Sensor Networks*, vol. 4, pp. 37–47, 2008.
- [53] J. Vales-Alonso, E. Egea-Lopez, A. Martínez-Sala, P. Pavon-Marino, M. V. Bueno-Delgado, and J. García-Haro, “Performance evaluation of MAC transmission power control in wireless sensor networks,” *Computer Networks*, vol. 51, pp. 1483–1498, 2007.
- [54] K. Bilinska, M. Filo, and R. Krystowski, “Mica, Mica2, MicaZ,” 2007.
- [55] V. Shnayder, M. Hempstead, B. Chen, G. W. Allen, and M. Welsh, “Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications,” in *Proceedings of the ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pp. 188–200, 2004.
- [56] O. Landsiedel, K. Wehrle, and S. Gotz, “Accurate prediction of power consumption in sensor networks,” in *Proceedings of the IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets)*, pp. 37–44, 2005.
- [57] Y. Liang and W. Peng, “Minimizing energy consumptions in wireless sensor networks via two-modal transmission,” *ACM Computer Comm. Review*, vol. 40, pp. 12–18, 2010.
- [58] R. Robucci, J. D. Gray, L. K. Chiu, J. Romberg, and P. Hasler, “Compressive sensing on a CMOS separable-transform image sensor,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, pp. 1089–1101, 2010.
- [59] X. Chen, Z. Yu, S. Hoyos, B. M. Sadler, and J. Silva-Martinez, “A sub-nyquist rate sampling receiver exploiting compressive sensing,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 58, pp. 507–520, 2011.

- [60] F. Chen, A. P. Chandrakasan, and V. Stojanovic, "Design and analysis of a hardware-efficient compressed sensing architecture for data compression in wireless sensors," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 47, pp. 744–756, 2012.
- [61] M. Cheng, X. Gong, and L. Cai, "Joint routing and link rate allocation under bandwidth and energy constraints in sensor networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, pp. 3770–3779, 2009.
- [62] L. Xiang, J. Luo, and A. Vasilikos, "Compressed data aggregation for energy efficient wireless sensor networks," in *Proceedings of the IEEE Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, pp. 46–54, 2011.
- [63] K. Bicakci, H. Gultekin, and B. Tavli, "The impact of one-time energy costs on network lifetime in wireless sensor networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 13, pp. 905–907, 2009.
- [64] Z. Cheng, M. Perillo, and W. Heinzelman, "General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, pp. 484–497, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : KARAKUŞ, Celalettin
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum tarihi ve yeri : 15.06.1986, Çubuk
Medeni hali : Evli
Telefon : +905556395456
e-mail : ckarakus@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010 - 2011	TOBB ETÜ	Araştırma Görevlisi
2011 - Halen	ROKETSAN A.Ş.	Sistem Tasarım Müh.

Yabancı Dil

İngilizce (Çok iyi)
Almanca (Orta)

Yayınlar

Karakus, C.; Gurbuz, A.C., "Comparison of iterative sparse recovery algorithms," Signal Processing and Communications Applications (SIU), 2011 IEEE 19th Conference on , vol., no., pp.857,860, 20-22 April 2011.

Karakus, C.; Gurbuz, A.C.; Tavli, B., "Efficiency of Compressive Sensing on the lifetime of Wireless Sensor Networks," Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2012 20th , vol., no., pp.1,4, 18-20 April 2012.

Karakus, C.; Gurbuz, A.C.; Tavli, B., "Energy and Lifetime Analysis of Compressed Wireless Compressed Wireless Sensor Network Communication," Sensors Applications Symposium (SAS), 2013 IEEE, vol., no., pp.7,10, 19-21 Feb. 2013.

Karakus, C.; Gurbuz, A.; Tavli, B., "Analysis of Energy Efficiency of Compressive Sensing in Wireless Sensor Networks," Sensors Journal, IEEE , vol.13, no.5, pp.1999,2008, May 2013