

Haberleşme Ağlarında Enerji Hasadı Yöntemi Kullanımının Eniyileme ve Gerçekleşmesi

Program Kodu: 1001

Proje No: 112E175

Proje Yürütücüsü:

Prof. Dr. Elif Uysal-Bıyıköğlü

Prof. Dr. Haluk KÜLAH (23.06.2014 tarihinden itibaren)

Araştırmacı:

Prof. Dr. Haluk KÜlah

Dr. Özge Zorlu

Bursiyerler:

Salar Chamanian

Sajjad Baghee

Oğuz Yaşar

B. Tan Bacinoğlu

Mahdi Shakiba-Herfeh

ÖNSÖZ

Bu proje kapsamında, kablosuz duyarga ağlarında (wireless sensor networks – WSN) enerji hasadı yönteminin kullanımına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çalışma, ODTÜ Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Prof. Dr. Elif Uysal-Bıyıköğlü ve Prof. Dr. Haluk Külâh'ın araştırma gruplarında gerçekleştirilmiştir.

Proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları birçok uluslararası konferansta sunulmuş ve bilimsel dergilerde yayınlanarak literatüre önemli katkılar sağlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarının, kendi enerjisini üretebilen kablosuz duyarga ağlarının gerçekleştirilmesinde bir temel oluşturmasını amaçlıyoruz.

Bu proje, Avrupa Birliği 7.Çerçeve ERA-NET Chist-Era programınca “e-crops: Energy harvesting Communication netwoRks: OPTimization and demonStration” başlığıyla kabul edilmiştir. Projenin ODTÜ dışındaki uluslararası ortakları Imperial College, İngiltere; Eurecom, Fransa; CTTC, İspanya'dır. Chist-Era programı formatı gereği projenin ODTÜ ayağı 112E175 numarası ile 1001 araştırma projeleri programı çerçevesinde TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xv
1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1 Elektromanyetik ve Piezoelektrik Enerji Üreteçleri.....	3
2.2 Kendi enerjisini üreten Kablosuz Duyarga Ağları (WSN).....	11
3 GEREÇ ve YÖNTEM	13
3.1 Kuramsal Ağırlıklı Çalışmalar	13
3.1.1 Enerji Hasat ve Veri Trafik İstatistiklerinin <i>Öğrenilmesinin</i> Başarım Ölçütlerine Etkisi.....	13
3.1.2 Ön çalışmalar ve elde edilen ilk sonuçlar	14
3.2 Deneysel ağırlıklı çalışmalar	17
3.2.1 Elektromanyetik Enerji Üretici Tasarım ve Uygulanması	17
3.2.1.1 Optimizasyon çalışmaları.....	17
3.2.1.2 Arayüz devresi tasarımı.....	19
3.2.1.3 Pasif doğrultucu devrenin EM enerji üretici ile doğrulanması.....	22
3.2.2 Sensör düğümleri için pizeoelektrik enerji üreteçleri.....	24
3.2.2.1 Piezoelektrik Enerji Üreteçlerinin Karakterizasyonu	26
3.2.2.2 Piezoelektrik Enerji Üreteçleri İçin Arayüz Elektronikleri	29
3.2.3 Duyarga düğümleri ve erişim noktası	30
3.2.3.1 Enerji ve ağ yaşam süresi (ağ ömrü).....	33
3.2.3.2 Seri portla akım ölçme düzeneği:	34
3.2.3.3 MicaZ pil gerilim seviyesini gözlemlemek:.....	36
3.2.3.4 Paket yol atama protokolü ve ağdaki enerji tüketimi:	39
3.2.3.5 MicaZ en düşük güç harcama deneyi:	40

3.2.3.6	Kablosuz Algılayıcı (Duyarga) Ağının Enerji Gereksinimlerinin Belirlenmesi Çalışmaları	43
3.2.3.7	İvme sensörü ile örnek bir deneysel uygulama.....	44
4	BULGULAR	47
4.1	Kuramsal çalışmalar	47
4.1.1	Enerji Hasatlı Çoklu Girdili Tek Çıktılı Kanalda Geribildirim İşaretleri için Ayrılan Gücün Eniyilenmesi	47
4.1.1.1	Değişken Geribildirim Uzunluğu.....	50
4.1.2	Bilgi tazeliği için enerji hasatçı göndermeçlerin eniyilemesi.....	52
4.1.2.1	Çevrimdışı Problem.....	53
4.1.2.2	Çevrimiçi Problem.....	54
4.1.2.3	Sayısal İnceleme.....	56
4.2	Kablosuz duyurga ağlarında elektromanyetik enerji üretici kullanımı... 59	
4.2.1	Elektromanyetik enerji üretici ile pillerin şarj edilmesi.....	59
4.2.2	Enerji Üreteçleri ile WSN modüllerinin birlikte çalıştırılması.....	61
4.2.3	EM enerji üreticinin gerçek bir uygulamaya dahil edilmesi	64
4.2.4	Sonuç.....	68
4.3	Kablosuz duyurga ağlarında piezoelektrik enerji üretici kullanımı	68
4.3.1	Pil içermeyen kablosuz sensör düğümü	68
4.3.2	Enerji-Nötr Operasyon	72
4.3.3	Kendinden-Adaptif MicaZ Sensör Düğümü	73
4.3.4	Enerji Üreteçli Kendinden-Adaptif Sensör Düğümü	76
4.3.5	Sonuç.....	79
4.4	Enerji-nötr WSN'lerin ömür tahmini için enerji simülatörü	79
4.4.1	MicaZ düğümü için enerji tüketimi ölçümü	80
4.4.2	Simülatörün gereklilikleri ve yapısı	81
4.4.2.1	Simülatördeki Enerji Tüketim Birimleri	82
4.4.2.2	Simülatördeki Enerji Üretim Birimleri.....	82
4.4.3	Simülatörün Özellikleri.....	85
4.4.4	Simülasyon sonuçları.....	87
4.4.4.1	Simülasyon Sonuçları İçin Pratik Değerlere Göre Karşılaştırma Ve Doğrulama.....	87
4.4.4.2	Rastgele Enerji Hasadı Sürecinin Benzetimi.....	89
4.4.4.3	Rastgele Enerji Üretimi ve adaptif verici gücünün simülasyonu.....	90
4.4.5	Sonuçlar	91
5	TARTIŞMA/SONUÇ.....	92
6	KAYNAKLAR	97

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Taşınabilir sistemler için enerji kaynaklarının kapasitesinin karşılaştırılması [2].	4
Tablo 2. Piezoelektrik enerji üreticilerinin özellikleri.	26
Tablo 3. Bir düğümde harcanan toplam enerjinin bileşenleri.	34
Tablo 4. MicaZ'nin çeşitli işlevler için ortalama akım çekimi (mA).	44
Tablo 5. MicaZ enerji tüketimi (Supply @ 2.6V).	46
Tablo 6. Pilleri şarj etmek için kullanılan EM enerji üretici sisteminin özellikleri.	59
Tablo 7. Ortalama pil akımı ve pil ömründeki artış.	64
Tablo 8. Çok düşük frekanslar için tasarlanmış EM enerji üretici sisteminin özellikleri.	68
Tablo 9. MicaZ düğümün farklı blokları tarafından harcanan akım.	81
Tablo 10. EM enerji üretici ile donatılmış MicaZ düğümde ihtiyaç duyulan ortalama akım değeri.	83
Tablo 11. Kısım 4'te yer alan senaryo için MicaZ'nin aktivite zamanı.	87
Tablo 12. Üretilen enerji değerleri Her zaman aralığında hasatlanabilen enerji = $1.6937e-04$	89
Tablo 13. Üretilen enerji değerleri	90
Tablo 14. Kısım 4'te belirtilen senaryo için MicaZ EM enerji üretici ile donatıldığında radyo vericisinin aktif olma zamanı.	91

ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 1.** ODTÜ’de MEMS teknolojisi ile geliştirilen (a) titreşim tabanlı, (b) termoelektrik enerji üreticileri. 5
- Şekil 2.** Makro model EM enerji üretici..... 5
- Şekil 3.** Düşük voltajlarda çalışabilen EM enerji üretici için tasarlanmış doğrultucu devresi. 7
- Şekil 4.** Tasarlanan AA/DA çevirici (AC/DC Doubler) devresinin şematik gösterimi. 7
- Şekil 5.** Tasarlanan doğrultucu devresinin (AC/DC Doubler) ve GCCR doğrultucu devresinin yük akımına karşılık gelen a) Çıkış voltajı ve b) Güç verimliliği grafiği..... 8
- Şekil 6.** Tasarlanan arayüz elektronik devresinin farklı yük değerleri için giriş voltajına karşı çıkış voltajının değişim grafiği. 9
- Şekil 7.** Üretilen makro model piezoelektrik enerji üretici (PEH)..... 10
- Şekil 8.** Üretilen makro model PEH’in çıkışındaki gücün ve voltajın yük direncine göre değişimi. 10
- Şekil 9.** Grafik 2.1: Aceleci (“HASTY”) , En Aceleci (“HASTIEST”), Optimal (“OPTIMAL”) ve Öğrenen Beklenen Eşikdeğer Tembel Çizelgeleme (“LEARNING”) politikalarının $\alpha = 3$ iken iletim zamanı uzunluğuna (“Total Transmission Duration”) karşılık ortalama güç tüketimleri (“Average Power”) performans grafiği. (Paket trafiği için 10kB uzunluklu paketlerin belli bir Markov süreç modeline göre geldiği varsayılmıştır. Bu modelde paket gelmeme ($I_0 = 0$) ve gelme ($I_1 = 10\text{kB}$) olmak üzere iki durum varsayılmış ve bu durumlar arası geçiş olasılıkları ise $A_{00} = 0.9$, $A_{01} = 0.1$, $A_{10} = 0.5$, $A_{11} = 0.5$ olarak alınmıştır.) 16
- Şekil 10.** Tasarlanan elektromanyetik enerji üreticinin şematik yapısı..... 17
- Şekil 11.** Üretilen 20 mm çaplı enerji üretici yapıları. 18
- Şekil 12.** Üretilen 15 mm çaplı enerji üretici yapıları. 18
- Şekil 13.** Üretilen enerji üretici gövdelerinin ve AA tip bir bataryanın yandan görünüşü. 19
- Şekil 14.** Üretilen enerji üretici gövdelerinin AA tipi pil yuvasına yerleştirilmiş hali. 19
- Şekil 15.** İki safhalı doğrultucu-yükseltici şarj pompası devresi. 20
- Şekil 16.** PCB üzerine hazırlanmış doğrultucu devresi örnekleri. 21
- Şekil 17.** Doğrultucu devresinin giriş voltajına göre çıkış voltajı değişimi. 21
- Şekil 18.** Devrenin 1V ve 10 Hz giriş voltajı ile yapılmış olan test sonucu. 22
- Şekil 19.** a) 20 mm (Prototip 1) ve b) 15 mm(Prototip 2) çaplı optimum EM enerji üreticileri. 22

Şekil 20.	a) Test düzeneği b) Titreşim masasındaki Prototip 1 ve PCB devresi... 23
Şekil 21.	10 Hz ve 1 mm titreşim şartları için elde edilen giriş ve çıkış voltajları... 23
Şekil 22.	Optimum enerji üretici prototiplerinin 10 Hz frekanstaki farklı titreşim genlikleri için ürettiği tepe tepe voltajı..... 24
Şekil 23.	Birinci prototip ile hazırlanmış sistemin yük direncine göre çıkış voltajı değişimi. 24
Şekil 24.	Piezoelektrik enerji üreticinin şematik gösterimi..... 25
Şekil 25.	STANDARD QUIK-MOUNT ve VOLTURE piezo enerji hasat bileşenlerinin boyutları..... 25
Şekil 26.	(a) 503YB piezoelektrik enerji üreticinin (b) frekans cevap karakteristiği; (c) AC çıkış voltajı ve (d) elde edilen RMS güç değerinin yük direncine göre değişimi (0.5g ve 1g ivmede ve 72 Hz titreşim frekansında elde edilmiştir.). 27
Şekil 27.	(a) 103YB piezoelektrik enerji üreticinin (b) frekans cevap karakteristiği; (c) AC çıkış voltajı ve (d) elde edilen RMS güç değerinin yük direncine göre değişimi (0.5g ve 1g ivmede ve 283 Hz titreşim frekansında elde edilmiştir.). 27
Şekil 28.	(a) V25W piezoelektrik enerji üreticinin (b) frekans cevap karakteristiği; (c) AC çıkış voltajı ve (d) elde edilen RMS güç değerinin yük direncine göre değişimi (0.5g ve 1g ivmede ve 84 Hz titreşim frekansında elde edilmiştir.). 28
Şekil 29.	(a) V22BL piezoelektrik enerji üreticinin (b) frekans cevap karakteristiği; (c) AC çıkış voltajı ve (d) elde edilen RMS güç değerinin yük direncine göre değişimi (0.5g ve 1g ivmede ve 135 Hz titreşim frekansında elde edilmiştir.). 28
Şekil 30.	Piezoelektrik enerji üreteçleri için tasarlanmış PCB ve kullanılan devrelerin şematik gösterimi. 29
Şekil 31.	Tam köprü (FB) ve voltaj katlayıcı (D) doğrultucularının çıkışındaki voltaj ve gücün 0.2g ve 72 Hz titreşimde yük direncine göre değişimi..... 30
Şekil 32.	MicaZ tabanlı test düzeneği ve bileşenleri. 33
Şekil 33.	Akım Ölçerin Kontrol Paneli 35
Şekil 34.	Devre Şeması (Seri portla akım ölçer) 35
Şekil 35.	MicaZ ünitesinin farklı durumlardaki akım tüketimini ölçme düzeneği ... 36
Şekil 36.	Düğümün batarya gerilimini ölçen uygulamanın ekran görüntüsü 37
Şekil 37.	Sistem yüksek güç tüketimi (sensör ve led'ler aktif, paket gönderimi yapılıyor) modda çalıştığında ölçülen değerleri gösteren ekran görüntüsü 37
Şekil 38.	LEDlerin aktif ya da kapalı durumda olmasının seçildiği ekranın görüntüsü. 38
Şekil 39.	Screenshot of data rate adjustment. 38

Şekil 40.	MicaZ düğümünün Yüksek Güç çalışma durumunda 10.5 saat boyunca çalışması esnasında batarya gerilim düzeyinde gözlenen değişimin zamana karşı grafiği	39
Şekil 41.	MicaZ düğümünün Yüksek Güç çalışma durumunda 10.5 saat boyunca çalışması esnasında batarya gerilim düzeyinde gözlenen değişimin histogramı.	39
Şekil 42.	Algılayıcı (duyurga) kartı takılı iken MicaZ düğümünün çektiği akımın zamana göre değişimi. Radyo kartı açık durumda iken 21 mA akım çekilmektedir. Paket gönderimi esnasında bu akım 28 mA'e çıkmaktadır.	41
Şekil 43.	Algılayıcı (duyurga) kartı takılı değilken akımın zamana göre değişimi. Radyo kartı açık durumda iken 19 mA akım çekilmektedir. Paket gönderimi esnasında bu akım 20 mA'e çıkmaktadır.	42
Şekil 44.	MicaZ düğümünden baz istasyonuna gelen paket akışının ekran görüntüsü	42
Şekil 45.	MicaZnin çalışma deneyi sırasında osiloskop görüntüsü.....	43
Şekil 46.	MicaZnin çalışma deneyi sırasında akımölçer ile alınan kayıt	43
Şekil 47.	İvme sensörü ile yapılan uygulama senaryosunda deneysel olarak elde edilen MicaZ akım çekiminin zamana göre değişimi.	44
Şekil 48.	1 saniye işlem süresi için MicaZ Mote operasyonda pil voltajının zamanla değişimi.....	45
Şekil 49.	20 saniye işlem süresi için MicaZ Mote operasyonda pil voltajının zamanla değişimi.....	45
Şekil 50.	1 dakika işlem süresi için MicaZ Mote operasyonda pil voltajının zamanla değişimi.....	46
Şekil 51.	Merkezin güvenilir bir enerji kaynağına sahip olduğu ve kullanıcıların geri besleme için gereken enerjiyi çevrelerinden elde ettikleri çokkullanıcılı haberleşme bağlantısının şeması.....	48
Şekil 52.	Eniyi politika (kırmızı eğri) ve açgözlü politikaların (mavi) ortalama veri gönderimlerinin enerji kısıtı bulunmadığı durumda elde edilebilecek toplam veri akışı (yeşil) üst sınırı ile karşılaştırılması. Yatay eksen, zaman dilimi başına gelen ortalama enerji değeridir.	49
Şekil 53.	Eniyi politika için bit dağılımlarının zaman aralığı başına düşen ortalama enerji miktarları 1,7 ve 15 iken karşılaştırılması.	51
Şekil 54.	2,3 ve 4 sayıda kullanıcı için değişken geribildirim (variable feedback) ve sabit geribildirim (fixed feedback) politikalarının kullanıcı başına düşen ortalama enerji miktarına karşılık kullanıcı başına düşen ortalama veri akışına göre karşılaştırılması.	51

Şekil 55. Hasat enerjisi (Harvested Energy), enerji dolmacı (Energy Buffer), sistem gözlemcisi (System Monitor), gönderme cihaz (S), haberleşme kanalı (channel) ve alıcı cihazı (Recipient Device) gösteren sistem gösterimi.	52
Şekil 56. Bilgi yaşı için (Age of Information) olan değişimin zamana (Time) karşı değişimine yönelik örnek.	53
Şekil 57. Dengeli Güncelleme (BU) ve Açgözlü (Greedy) güncelleme politikalarının, paket başarımlar oranı (Packet Success Rate) p ye karşılık ortalama bilgi yaşı (Average Age of Information) üzerinden karşılaştırılması.	56
Şekil 58. Dengeli Güncelleme (BU) ve Açgözlü (Greedy) güncelleme politikalarının, paket başarımlar oranı (Packet Success Rate) p ye karşılık maksimum bilgi yaşı (Maximum Age of Information) üzerinden karşılaştırılması.	57
Şekil 59. Dengeli Güncelleme (BU) ve Açgözlü (Greedy) güncelleme politikalarının, paket başarımlar oranı (Packet Success Rate) $p=0.6$ iken ortalama hasat enerjisine karşılık ortalama bilgi yaşı (Average Age of Information) üzerinden karşılaştırılması.	57
Şekil 60. Dengeli Güncelleme (BU) ve Açgözlü (Greedy) güncelleme politikalarının, paket başarımlar oranı (Packet Success Rate) $p=0.6$ iken ortalama hasat enerjisine karşılık maksimum bilgi yaşı (Maximum Age of Information) üzerinden karşılaştırılması.	58
Şekil 61. Çevrimdışı eniyi çözüm (OFFLINE OPTIMAL) Dengeli Güncelleme (BU) ve Açgözlü (GREEDY) güncelleme politikalarının, paket başarımlar oranı (Packet Success Rate) $p=1$ iken ortalama hasat enerjisine karşılık ortalama bilgi yaşı (Average Age of Information) üzerinden karşılaştırılması.	58
Şekil 62. Testlerde kullanılan enerji üretici sisteminin şematik çizimi.	60
Şekil 63. İki adet seri bağlanmış şarjlı pilin enerji üretici ile farklı titreşim koşullarında şarj edilmesi. 10 Hz, 0.6g'lik sürekli titreşimlerle pil 2 gün içerisinde şarj edilebilmektedir.	60
Şekil 64. Tek pilin standart şarj cihazı ile şarj edilmesi. Voltaj değişim karakteristiği enerji üretici kullanılan durumla benzerlik göstermektedir.	61
Şekil 65. Enerji üretici kullanıldığı (kırmızı) ve kullanılmadığı (mavi) durumlarda pil voltajının zamanla değişimi. Enerji üretici sisteme dahil edildiğinde, MicaZ'nin çalışma opsiyonuna göre (burada, data gönderme sıklığı) pil voltajının değişimi azalmakta ya da voltaj sabit kalmaktadır.	62
Şekil 66. Pil üzerinden geçen akım. (a) Sadece pil kullanıldığında, (b) pil ve enerji üretici birlikte kullanıldığında. MicaZ atılken ikinci durumda görülen negatif akım pilin şarj edildiğini göstermektedir. (100 microAmp civarı bir akım ile pilin dolmakta olduğu görülmektedir.).....	63

Şekil 67. Koşucunun bileğine bağlanan sensor modülü ile ölçülen x ve y eksenlerindeki ivmenin frekansa göre dağılımı.	65
Şekil 68. Koşucunun beline bağlanan sensor modülü ile ölçülen x ve y eksenlerindeki ivmenin frekansa göre dağılımı.	65
Şekil 69. (a) Çok düşük frekanslı titreşimler için tasarlanan EM enerji üretici ve (b) doğrultucu elektronik devresi.	65
Şekil 70. Düşük frekanslar için tasarlanan EM enerji üreticinin farklı ivme değerleri için frekansa karşı çıkış voltajı grafiği.	66
Şekil 71. Düşük frekanslar için tasarlanan EM enerji üretici ve doğrultucu elektronik devrenin 2.65 Hz ve 0.15g titreşim için yük direncine karşı çıkış voltajı ve gücünün değişimi.....	66
Şekil 72. Üretilen enerji üretici sisteminin bir koşucunun bileğine ve beline bağlanmış görüntüsü.	67
Şekil 73. Koşucunun (a) bileğine ve (b) beline yerleştirilmiş çok düşük frekanslar için tasarlanmış enerji üretici sisteminin çıkış voltajının zamana göre değişimi.	67
Şekil 74. Enerji üreteçli sensör düğümünün şematik gösterimi.....	69
Şekil 75. MicaZ düğüm 30 s'de bir bilgi gönderirken ve enerji üretici 0.5g ve 68 Hz'de uyarıldığı koşullarda tampon kondansatör üzerindeki voltajın zamana göre değişimi.	70
Şekil 76. MicaZ düğüm 30 s'de bir bilgi gönderirken ve enerji üretici 68 Hz ve 4 farklı ivme ile uyarıldığı koşullarda tampon kondansatör üzerindeki voltajın zamana göre değişimi.	71
Şekil 77. MicaZ düğüm 20 s'de bir bilgi gönderirken ve enerji üretici 68 Hz ve 4 farklı ivme ile uyarıldığı koşullarda tampon kondansatör üzerindeki voltajın zamana göre değişimi.	71
Şekil 78. MicaZ düğüm 10 s'de bir bilgi gönderirken ve enerji üretici 68 Hz ve 4 farklı ivme ile uyarıldığı koşullarda tampon kondansatör üzerindeki voltajın zamana göre değişimi.	72
Şekil 79. Enerji Üreteç ve kendinden-adaptif pilsiz düğümün enerji karakteristiği.	73
Şekil 80. Görev döngüsü (duty cycle) ayarlama algoritmasının blok şeması.....	76
Şekil 81. Enerji üreteçli sensör düğümünün şematik gösterimi.....	77
Şekil 82. Hazırlanan enerji üreteçli sensör düğümünün resmi.....	77
Şekil 83. Enerji-nötr enerji üreteçli sensör düğümü test düzeneği.	78
Şekil 84. Tampon kondansatör voltajının farklı ivme değerleri ile yapın testlerden elde edilen zamana bağlı değişimi.	78
Şekil 85. Kendinden-adaptif MicaZ düğümün yarı rastgele titreşimler ile uyarıldığı zaman elde edilen sonuçlar.	79

Şekil 86. (a) Üretilen enerji üretici modülü ve (b) doğrultucu elektronik baskı devre kartı, (c) Elektromanyetik enerji üretici ile donatılmış MicaZ düğümü.	80
Şekil 87. Farklı ivme frekanslarda uyarılan EM enerji üretici çıkışındaki voltajın yük direncine göre değişimi.	83
Şekil 88. MicaZ görev döngüsü 60 s olarak ayarlanıp EM enerji üretici ile donatıldığı zaman pilden çekilen ortalama akım değeri değişimi.	85
Şekil 89. Simülatörün akış şeması.	86
Şekil 90. Güç kaynağının 48 saatlik zaman aralığındaki enerji değişimi. (MicaZ EM enerji üretici ile donatılmış ve donatılmamış durumlar için).	88
Şekil 91. Sadece ivme ölçer aktifken MicaZ akımının zamanla değişimi.	88
Şekil 92. Sadece ivme ölçer aktifken ve radyo düşük güç ile çalışırken gözlenen MicaZ akımı [76].	88

ÖZET

Kablosuz duyurga ağı (KDA), günümüzün bilgi ve iletişim teknolojileri altyapısında önemli bileşenler olmuşlardır. Bu noktada KDA'ların çalışma ömrü kritik bir parametre olarak görülmektedir. İletişim düğümlerinin ağ içindeki ömrü, KDA mimarisi, çevresel etkenler ve pil kapasitesi ile ilintilidir. Alternatif enerji kaynakları olarak enerji hasatı sistemleri kullanmak, pil ömrünü uzatmak ve ağ içinde verimli bir iletişim yapısı oluşturmak açısından en etkin yollardan biri olarak görülmektedir.

Bu projenin temel amacı, yukarıda belirtilen kapsamda, ortamdaki yenilenebilir enerjiyi kullanan ve bu enerjiyi kendi bataryalarında gerektiği gibi depolayarak harcayan ve düğümler arasındaki iletişim enerji verimli olarak optimize edilmiş bir kablosuz ağ yapısı geliştirmektir.

Bu proje için yapılan kuramsal ağırlıklı çalışmalar kapsamında çoğunlukla çevrimiçi problemler ve çözümleri üzerinde durulmuştur. Bu bağlamda da yapılan ilk çalışma, değişken paket trafiğine uyum sağlayan bir göndermecin, iletim sürecini enerji verimliliği açısından eniyileştirmesi ve bunun sonucunda ortaya çıkan enerji gereksinimi incelemiştir. İlgili problem için önerilen çevrimiçi 'Tembel Çizelgeleme' algoritması, benzetim deneyleriyle sınanmıştır. Sonraki çalışmada ise, enerji hasatçı ve algılayıcı bir göndermecin, güncelleme gönderim sürecini, güncellemelerin alındığı tarafta gözlenen ortalama ve en yüksek 'bilgi yaşı' açısından eniyileştirmesi problemi incelenmiştir. Bu problem için de, eniyi çevrimdışı / çevrimiçi çözümler gösterilmiş ve çevrimdışı çözümün yapısından yola çıkan eniyialtı çevrimiçi politika olarak 'Dengeli Güncelleme' (BU) politikası önerilmiştir. Diğer çalışmada ise, çoklu kullanıcı bir haberleşme sisteminde, enerji hasatçı kullanıcıların kanal kestirimi için geribildirim paketlerini enerji verimli şekilde bir merkeze gönderme problemi çalışılmıştır.

Deneysel ağırlıklı çalışmalar enerji üreteçlerinin tasarımı, üretimi, karakterizasyonu ve bu üreteçlerin KDA'larda kullanımına yöneliktir. Her ortamda bolca bulunan titreşimin enerji kaynağı olarak kullanılmasına karar verilmiş ve bu enerjiyi kullanan ve düşük frekanslarda çalışan elektromanyetik enerji üreteçleri geliştirilmiştir. Daha sonra bu üreteçlerle pillerin şarj edilebildiği ve bu yöntemle MicaZ düğümleri kullanan **bir KDA'nın çalışma ömrünün 10 kata kadar arttırılabildiği literatürde ilk kez gösterilmiştir**. Uygulamaya yönelik olarak, koşan bir insanın bileğinde titreşim karakteristiği incelenmiş ve buna uygun elektromanyetik enerji üreteçleri de tasarlanmıştır.

Daha yüksek frekanslı titreşimlere yönelik olarak piezoelektrik enerji üreticileri ile çalışmalar yapılmış ve geliştirilen KDA prototipleri pilsiz olarak çalıştırılabilmişlerdir. Burada, **enerji-nötr operasyon** ve **enerji üreticili kendinden adaptif sensör düğümleri** yine literatürde ilk kez deneysel olarak gösterilmiştir.

Bu çalışmalar kapsamında elde edilen deneysel ve kuramsal sonuçları birleştiren, enerji-nötr KDA'larda ömür tahmini için bir enerji simülatörü de geliştirilmiştir. **Simülatör oluşturulurken teorik formülasyon yerine deneysel sonuçlardan faydalanılması nedeniyle bu çalışma da özgün değere sahiptir.**

Sonuç olarak, proje kapsamında enerji hasatlı KDA'lar konusuna hem kuramsal hem de deneysel açıdan özgün çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarla enerji hasatı yönteminin KDA'larda hem pil ömrünü uzatmak hem de enerji-nötr çalışmayı sağlamak amacıyla kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: enerji hasatı, kablosuz ağ, kablosuz haberleşme, kablosuz algılayıcı ağları, titreşim enerjisi, ağ optimizasyonu

ABSTRACT

Recently, Wireless sensor networks (WSN) are essential constituent parts of the basis of information and communication technologies. At this point, life-time of the WSNs is considered as a critical parameter. Life-time of the communication nodes in the network is related to the WSN architecture, environmental effects, and battery capacity. Utilizing energy harvesting systems is alternative energy sources is a beneficial method in terms of increasing battery life-time and providing efficient communication structure.

The main aim of this project, in the context stated above, is to use the ambient renewable energy and accumulate the extracted energy into a storage element in desired form as well as developing energy efficient and optimized wireless network structures.

The theoretical studies performed during the project generally focuses on on-line problems and their solutions. In this sense, the first study deals with the optimization of the data transmission process of a transmitter with variable packet traffic, and investigation of the resulting energy demand. The online "lazy scheduling" algorithm has been investigated for the solution of the stated problem. Next, the problem of optimizing the updated data transmission process of an energy harvesting sensor node has been investigated, at the point of view of the average and highest information age at the receive end. For this problem, best offline and online solutions have been shown, and "balanced update" policy has been offered as the best suboptimal online policy, which is derived from the offline policy. In another study, in a multi user communication network, the problem of sending the feedback packets to the central station in an efficient manner for channel prediction of the energy harvesting users has been investigated.

Experimental studies have been focused on the design, fabrication, characterization of energy harvesters and combining these harvesters with WSNs. Vibration is decided to be used as the energy source because of its abundancy and availability. Then electromagnetic energy harvesters, which are suitable for operation at low frequencies, have been developed for available ambient vibrations. Then, charging rechargeable batteries by means of electromagnetic energy harvester is demonstrated and **it has been shown that the life-time of a MicaZ mote can be prolonged more than 10-times by using energy harvesting**, for the first time in the literature. As an application, wrist vibration characteristics of a running person

are obtained and an electromagnetic energy harvester is designed corresponding to these characteristics.

Studies performed on piezoelectric energy harvesters for extracting energy from higher frequency sources and wireless sensor nodes that can be operated in a batteryless manner have been developed. Within this scope, **energy neutral operation and energy harvesting self-adaptive nodes are experimentally demonstrated** for the first time in the literature.

An energy simulator that combines the theoretical and experimental results of the project have also been developed for estimating the life-time of energy-neutral WSNs. **The novel approach in the simulator is the use of the experimental results instead of theoretical formulation for the prediction of the WSN lifetime.**

To summarize, novel theoretical and experimental studies on energy harvesting WSNs have been accomplished in the frame of the project. It has been experimentally shown that energy harvesting method can be utilized for prolonging the battery life-time and obtaining battery-less energy-neutral operation in WSNs.

Keywords: energy harvesting, wireless network, wireless communication, wireless sensor networks, vibration energy, network optimization.

1 GİRİŞ

“Her zaman, her yerde” kablosuz olarak sadece insanlar arasında değil, hayal edilebilen her tür cihaz arasında da bilgi ve veri alışverişi yapılabilmesi düşüncesi, haberleşme ve ağ teknolojilerinin gelişiminin izlemesi gereken yönü ifade eden bir slogan olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu vizyonda trilyonlarca otonom cihaz düşünülmektedir. Kablosuz haberleşme sorunu kablosuz algılayıcı ağları ile çözülmüş görünse de, var olan teknolojiye göre bu ağların enerji sorunu çözülmemiştir.

Kablosuz algılayıcı ağlarında olduğu gibi, düğümlerin enerjisini sağlayan bataryaların değiştirilmesinin gerekmesi, ya da, hücresel ağlarda olduğu gibi, bir güç sistemi altyapısına bağımlılık ve hem mobil, hem sabit cihazların gittikçe artan bir güç tüketimi söz konusudur. Öte yandan, ortamda var olan güneş, ısı, titreşim gibi doğal enerji kaynaklarından enerji elde etmek, yaygın değişimi ile “enerji hasatı” gerçekleştirmek, bu tür haberleşme sistemlerinin kendi kendine yeter bir biçimde tasarlanması için çok büyük umut vadetmektedir.

Buradan hareketle, bu proje kapsamında, ortamdaki yenilenebilir enerjiyi kullanan ve bu enerjiyi kendi bataryalarında gerektiği gibi depolayarak harcayan bir kablosuz ağ yapısının optimizasyonu, tasarımı, prototipleme ve deneysel verifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Öncelikle enerji çevrim metotları incelenmiş ve enerji kaynağı olarak titreşim tabanlı elektromanyetik ve piezoelektrik enerji üreteçlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Daha sonra bu üreteçlerin optimizasyonları yapılmış, prototipleri üretilmiş ve karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra elektromanyetik üreteçlerle pillerin şarj edilmesi üzerine çalışılmış ve literatürde ilk defa, bir kablosuz ağ düğümünün (MicaZ motu) pil ömrünün enerji üreteçleri kullanılarak 10 kata kadar arttırılabildiği gösterilmiştir. Piezoelektrik üreteçler ise piyasadan satın alınmış ve MicaZ düğümünün çalışması optimize edilerek ve gerekli elektronik devre kurularak duyurga düğümünün tamamen pilsiz ve adaptif bir biçimde çalışarak optimum veri transferi sağladığı yine literatürde ilk defa deneysel olarak gösterilmiştir. Bunun yanında, kablosu az düğümlerinin optimizasyonuna yönelik program geliştirilmiştir.

Bu proje, kendi enerjisine üretebilen kablosuz duyurga ağları konusunda kuramsal çalışan araştırmacılarla deneysel çalışan araştırmacıları bir araya getiren ilk projelerden biri olup literatüre önemli katkılarda bulunulmasını sağlamıştır.

CHIST-ERA Programı altında desteklenmek için seçilmiş bulunan projenin Türkiye dışındaki diğer üç ortağı Imperial College (Londra, İngiltere), CTTC (Barselona, İspanya) ve Eurecom (Fransa) isimli kurumlardır. Projenin Türkiye ayağı TÜBİTAK tarafından 1001 programı kapsamında desteklenmiştir. Bu raporda sunular çıktılar TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında yapılan çalışmaların derlenmiştir.

2 LİTERATÜR ÖZETİ

Geçtiğimiz onyıllar içerisinde kendi enerjisi kendi üretebilen elektronik cihazların üretimine olan ilginin artması enerji üreteçleri üzerine yapılan çalışmaların da artmasını sağlamıştır. Mikroelektronik üretim endüstrisindeki, düşük güçlü devre tasarımındaki ve iletişim ağı optimizasyonlarındaki gelişmeler bu tarz elektronik mikrosistemlerin güç gereksinimlerinin mikrowatt'lar seviyesine inmesine ve boyutlarının küçülmesine yardımcı olmuştur. Fakat bu sensörler kablosuz olduğundan kendi güç kaynaklarına ihtiyaç duymaktadırlar ki çoğu durum için geleneksel elektrokimyasal piller kullanılmaktadır. Sonuç olarak kablosuz sensörlerin çalışma süresi güç kaynağının ömrü ile sınırlıdır, özellikle kullanılan pillerin değişimi zor ve pahalı olduğu koşullarda bu durum ön plana çıkmaktadır. Bakım maliyeti, pil ömrü ve pillerin değiştirilmesi gibi problemler gerekli olan elektrik enerjisinin tamamının veya bir kısmının enerji üretici tekniği ile doğada var olan çeşitli enerji kaynaklarından elde ederek hafifletilmesi amaçlanmaktadır [1]. Bu noktada, kablosuz iletişim ağı uygulamaları için otonom akıllı sensörleri çalıştıracak enerjiyi sağlayacak enerji üreteç sistemleri ihtiyacı belirlemektedir.

Bu bölümde literatürde enerji üreteçleri ve kendi enerjisini üreten kablosuz duyurga ağları ile ilgili olarak yapılmış olan çalışmalar özetlenmektedir. Enerji üreteçleri içinde ODTÜ'de uzun süredir çalışılan ve bu projede de kullanılan elektromanyetik ve piezoelektrik enerji üreteçleri literatür özetine dahil edilmiştir. Kablosuz duyurga ağları ile ilgili kısımda da yine ODTÜ'de yapılan çalışmalar öne çıkarılmıştır.

2.1 Elektromanyetik ve Piezoelektrik Enerji Üreteçleri

Kendi enerjisini kendi üretebilen uzaktan kumandalı mikrosistemlerin çevresel gözlemlenebilirlik gibi kritik uygulamalarda kullanımı son yıllarda önemli derecede artış göstermiştir. Düşük güçteki bu sistemler (<1 mW) için gerekli enerji, elektrokimyasal piller veya mini yakıt hücrelerinden (micro fuel cells) sağlanabildiği gibi ortamda bulunan enerjiyi (ısı, ışık, titreşim, RF v.s.) elektrik enerjisine çevirme (energy harvesting) yöntemi ile de sağlanabilir [1,2]. Günlük yaşamda karşılaştığımız düşük seviyelerdeki titreşimler enerji üreteçleri yardımı ile elektrik enerjisini dönüştürülebilir. Titreşim tabanlı enerji üreteçlerinde en yaygın kullanılan metotlar elektromanyetik (EM) dönüşüm ve piezoelektrik etkidir. Üretilen güç yoğunlukları ele alındığında piezoelektrik enerji üreteçleri 40 Hz ile 1 kHz frekansları arasında daha etkili olurken daha düşük frekanslar için elektromanyetik enerji üreteçleri tercih edilmektedir.

Tablo 1’de enerji sağlayacak bu iki farklı yöntemin karşılaştırılması verilmiştir. Elektrokimyasal piller veya mini yakıt hücreleri birim hacimde daha fazla enerji sağlamalarına rağmen kimyasal reaksiyon içermeleri nedeniyle pratikte temiz yöntemler değildir. Ortamda var olan enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesi yöntemi (energy harvesting), diğer yöntemlere göre hem temiz (herhangi bir kimyasal reaksiyon içermemesi açısından) hem de uzun ömürlü olmasından dolayı son dönemlerde popüler hale gelmiştir.

Tablo 1. Taşınabilir sistemler için enerji kaynaklarının kapasitesinin karşılaştırılması [2].

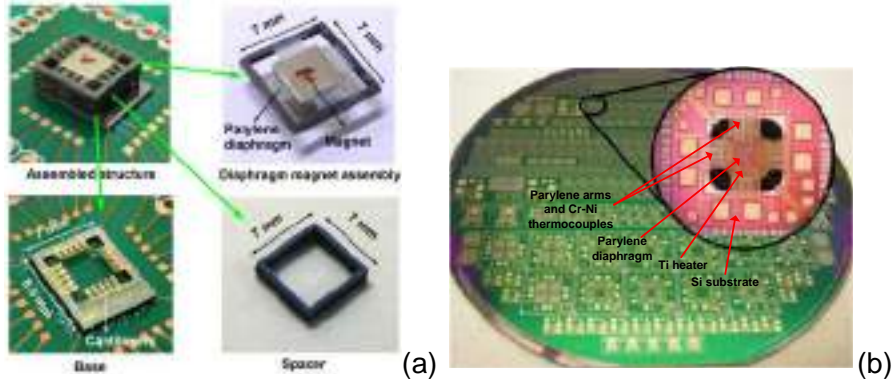
	Güç Yoğunluğu ($\mu\text{W}/\text{cm}^3$) (1 yıl çip ömrü için)	Güç Yoğunluğu ($\mu\text{W}/\text{cm}^3$) (10 yıl çip ömrü için)
Güneş Enerjisi (Açık Hava)	15000 (güneşli hava) 150 (bulutlu hava)	15000 (güneşli hava) 150 (bulutlu hava)
Güneş Enerjisi (İç Mekan)	6	6
Sarsıntı	100-200	100-200
Akustik	0.003 @ 75dB, 0.96 @ 100dB	0.003 @ 75dB, 0.96 @ 100dB
Günlük Sıcaklık Farkı	10	10
Yüzeysel Sıcaklık Değişimi	15 @ 10K değişim	15 @ 10K değişim
Lityum Piller	89	7
Benzin (mikro-motor)	403	40.3
Yakıt Hücreleri	560	56

Çevresel enerji kaynakları içinde titreşim her ortamda bulunabilir olmasından dolayı ayrı bir önem taşımaktadır. Gündelik hayattaki titreşimlere verilebilecek önemli örnekler; kalabalık bir yol kenarındaki pencerelerdeki titreşim, insan vücudunun hareketi, herhangi bir motorun ya da otomobilin yüzeyindeki titreşimlerdir. Bugüne kadar titreşimden enerji üretmek üzere piezoelektrik, elektrostatik ve elektromanyetik çevirim yöntemleri sunulmuştur [3-7]. Sunulan bu yöntemlerdeki temel sorun, elde edilen enerjinin çevresel titreşim frekansına bağımlı olması ve özellikle 1-10 Hz arasında güç üretiminin çok düşük seviyelerde olmasıdır [3, 5]. Halbuki bu frekans aralığı çevresel titreşimin en yoğun olduğu aralıktır.

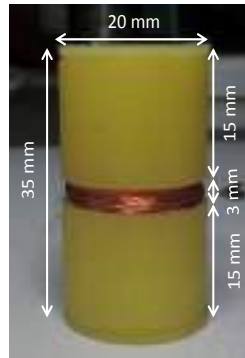
Düşük frekanslarda elde edilen güç değerleri hem elektromanyetik hem de piezoelektrik enerji üreteçlerinde düşük seviyelerdedir. Piezoelektrik malzemelerden üretilen voltaj değerleri yüksek olmasına rağmen, bu malzemelerin yapılarından dolayı empedansları elektromanyetik enerji üreteçlerine göre çok yüksek değerlerdedir. Bu sebepten, piezoelektrik enerji üreteçlerinin çıkışında bir empedans eşleyici devre kullanılmaktadır [8-10]. Elektromanyetik enerji üreteçlerinin düşük empedanslı olmaları bir avantaj olsa da, üretilen voltaj değerinin düşük seviyede olması üretilen gücün çok büyük bir bölümü doğrultucu elemanlar üzerinde harcanmasına sebebiyet vermektedir. Bu sebeplerle, düşük frekanslı enerji üreteçlerinden sağlanan AC güç, çok düşük verimliliklerle DC’ye çevrilebilmektedir.

Literatürde, bu tür enerji üreticilerini doğrultucu elektronik devre ile birleştiren çok az sayıda örnek vardır [11-16].

Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü ve ODTÜ MEMS Merkezi bünyesinde bulunan PowerMEMS grubunun titreşim tabanlı enerji üreticileri üzerine çalışmaları 2004 yılında başlamıştır ve halen daha devam etmektedir. Grup piezoelektrik enerji üreticilerinin tam bir sistem haline getirilmesi üzerine yeni çalışmaya başlamış ve hızlıca yol kat etmiştir. Diğer bir yandan elektromanyetik enerji üreticileri üzerinde uzun yıllardır çalışmaktadır. Bunların yanında titreşim tabanlı olmayan, termoelektrik enerji üreticileri üzerine çalışmalar da yapılmaktadır. Şekil 1'de MEMS teknolojisi kullanılarak yapılan çalışmalardan bazıları görülmektedir. Şekil 1(a)'da titreşim tabanlı bir mikro enerji üretici [17], Şekil 1(b)'de ise termoelektrik mikro enerji üretici görülmektedir [18].



Şekil 1. ODTÜ'de MEMS teknolojisi ile geliştirilen (a) titreşim tabanlı, (b) termoelektrik enerji üreticileri.

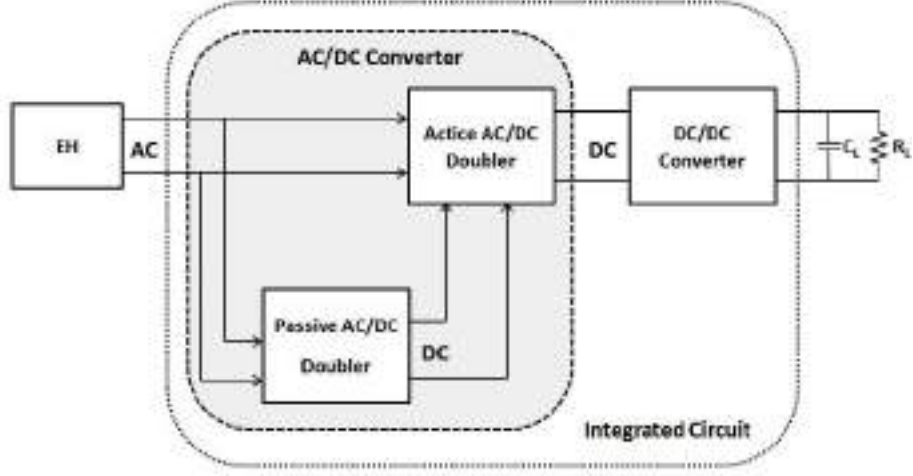


Şekil 2. Makro model EM enerji üretici.

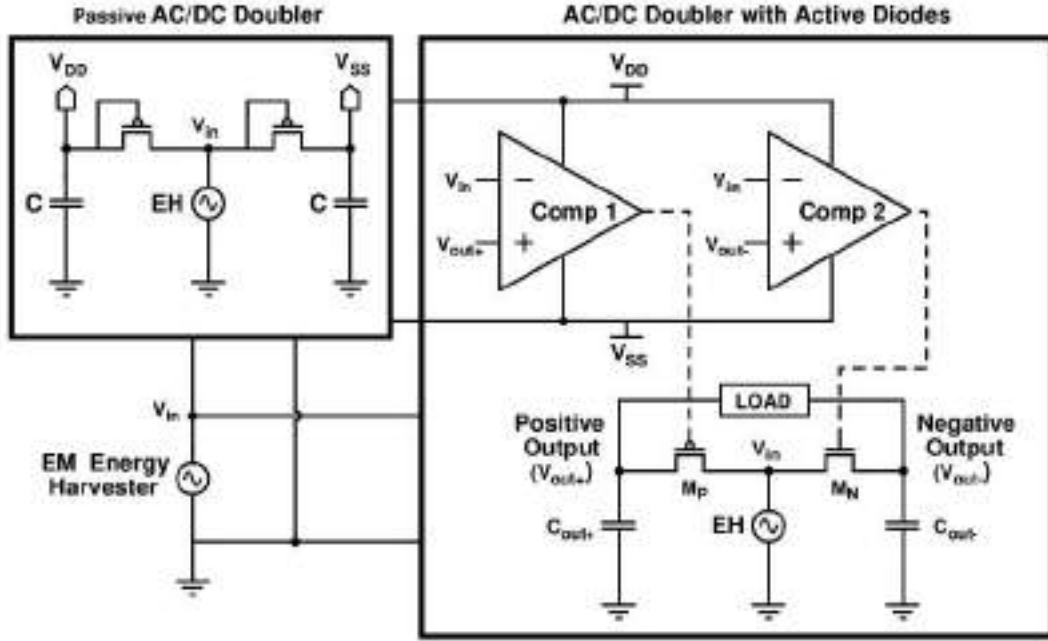
Enerji üreticilerinin mikro modellerinin yanında makro enerji üreticileri de çalışılmaktadır. Şekil 2 düşük sarsıntılar için üretilmiş olan makro model bir elektromanyetik (EM) enerji üreticini göstermektedir. Yine PowerMEMS grubu tarafından bu üreticinin çıkışındaki AA voltajını kullanılabilir seviyede DA voltajına çevirecek bir entegre devre tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 3). Tasarlanan üretic

düşük frekanslarda çalıştığı için üreticinin çıkışındaki sinyal de düşük seviyelerdedir, bu sebepten tasarlanan devrenin çok düşük voltajlar da çalışabiliyor olması gerekmektedir. Devrenin düşük voltajlarda çalışabilmesi için devrenin tasarımında düşük açılış voltajlarına sahip transistörleri içeren TSMC 90 nm teknolojisi kullanılmıştır. Üretilen gücün verimli bir biçimde elektriksel yüke aktarılabilmesini sağlamak için arayüz devresi farklı bloklardan oluşturulması gerekmektedir. İlk olarak, üretilen AC (Alternatif Akım-AA) voltajı DC (Doğru Akım-DA) voltaja çevirmek için bir analogdan dijitale çevirici veya doğrultucu kullanılmalıdır. Şekil 4 tasarlanan AA/DA çevirici (AC/DC Doubler) devresinin şematik gösterimini içermektedir. Üretilen AA voltajının maksimum verimlilikle çalışabilmesi ve voltaj kayıplarını azaltabilmek için doğrultucu eleman olarak aktif diyot doğrultucular kullanılmıştır. Aktif diyot doğrultucuların performansı ideal diyotlara yakın olmasına rağmen çalışabilmeleri için fazladan bir güç kaynağını ihtiyaç duymaktadırlar. İhtiyaç duydukları bu güç çok düşük seviyelerde (yaklaşık 10 nW) olduğu için bu gereksinimleri pasif diyotlu doğrultucular ile düşük kayıplar ile sağlanabilir. Yapılan tasarımda ihtiyaç duyulan bu enerji pasif diyotlu katlayıcı-doğrultucu devreler ile sağlanmıştır. Tasarlanan doğrultucu elektronik devresinin bir sonraki aşamasında doğrultulan voltajın tipik bir uygulamada kullanılacak seviyeye yükseltilmesi için bir DA/DA çevirici kullanılmıştır. Kullanılan bu DA/DA çevirici CMOS entegrasyonu için uygun olduğundan dolayı tamamen entegre ve kendi enerjisini kendi üretebilen bir sistem oluşturulmuştur. Tasarlanan sistem tam bir sistem çözümü sağlamaktadır ve özellikle düşük giriş voltajı değerleri (< 0.5 V) için çok iyi performans göstermektedir.

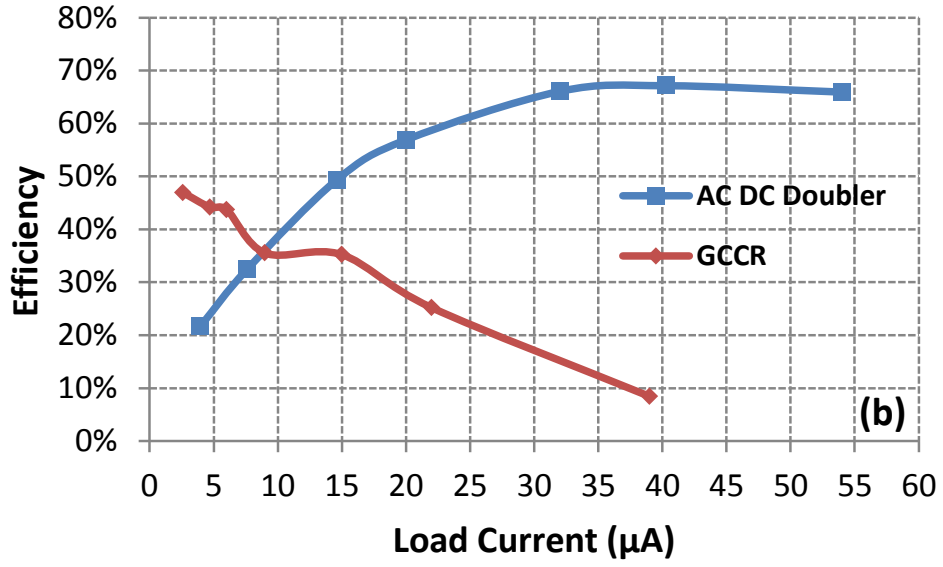
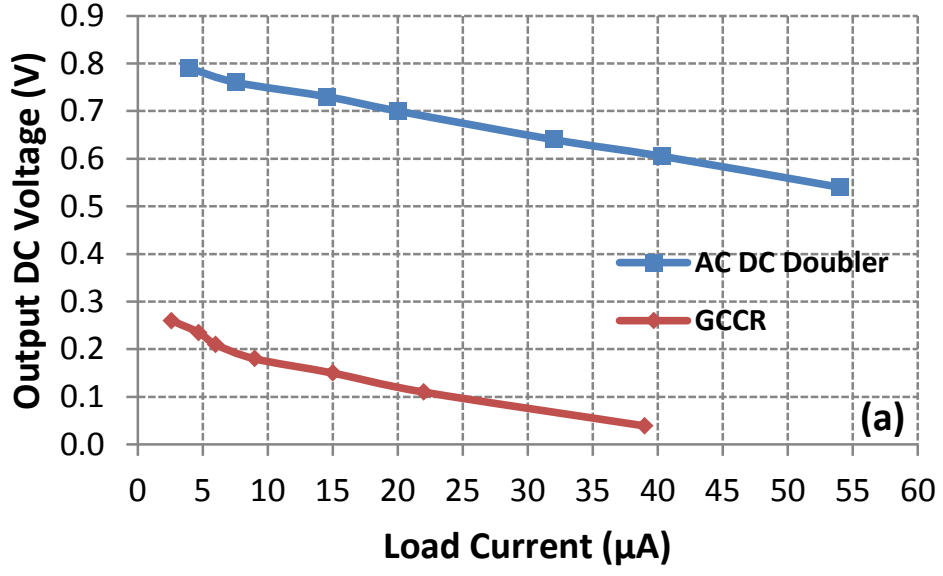
Tasarlanan devrenin Silisyum çip üzerine serimi yapılmış, ürettirilmiş ve testleri tamamlanmıştır. Şekil 5 tasarlanan AA/DA çevirici (AC/DC Doubler) devresinin literatürde yer alan pasif karşılıklı kapı bağlantılı doğrultuculu (Gate Cross Coupled Rectifier) devresi ile karşılaştırılmasını göstermektedir. Tasarlanan devrenin çıkış voltajı bütün yük durumları için GCCR devresine göre daha fazladır. GCCR devresinin güç verimliliği düşük akım değerleri için daha iyi olsa da tasarlanan devrenin verimliliği bir entegreyi sürmeyi sağlayabilecek yüksek akım değerlerinde çok daha yüksektir. Bu çalışmanın sonuçları [19]'da yayınlanmıştır. Bir sonraki aşamada tasarlanan tüm sistemin birleştirilmiş ve testleri yapılmıştır. Şekil 6 yapılan bu testler sonucunda elde edilen sonuçları göstermektedir. Tasarlanan devre 0.4 V'tan yüksek giriş voltajı değerleri için 1 V'tan fazla DA voltajı üretebilmektedir. Yapılan tam sistemin sonuçları [20]'de sunulmuştur.



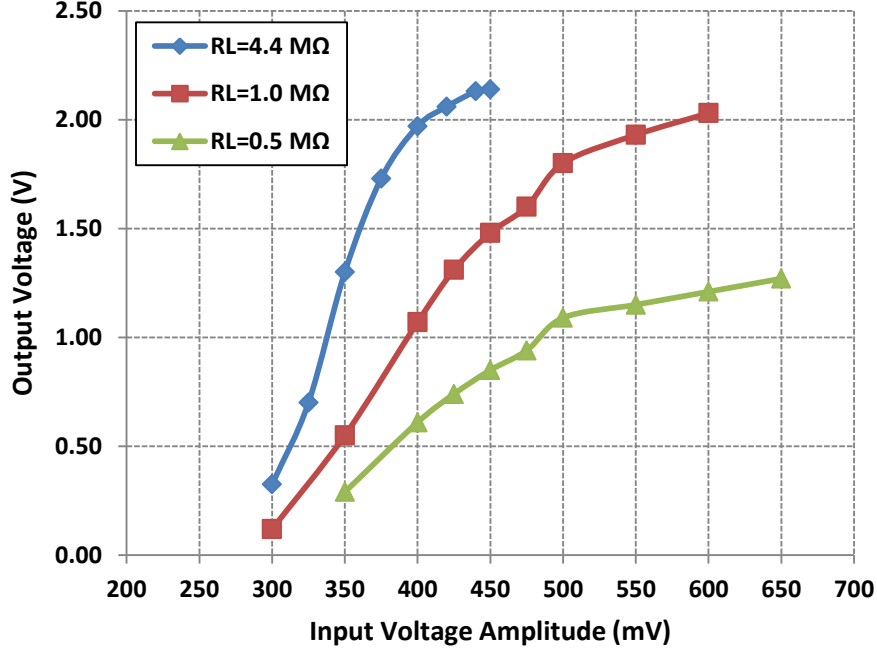
Şekil 3. Düşük voltajlarda çalışabilen EM enerji üretici için tasarlanmış doğrultucu devresi.



Şekil 4. Tasarlanan AA/DA çevirici (AC/DC Doubler) devresinin şematik gösterimi.

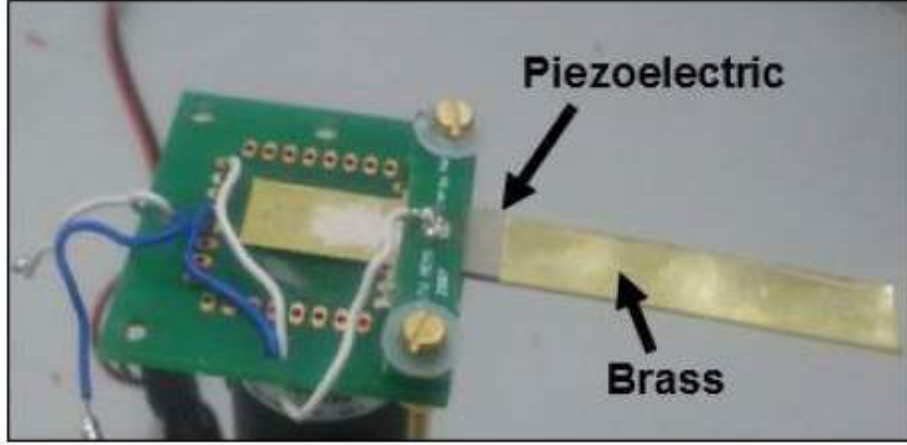


Şekil 5. Tasarlanan doğrultucu devresinin (AC/DC Doubler) ve GCCR doğrultucu devresinin yük akımına karşılık gelen a) Çıkış voltajı ve b) Güç verimliliği grafiği.

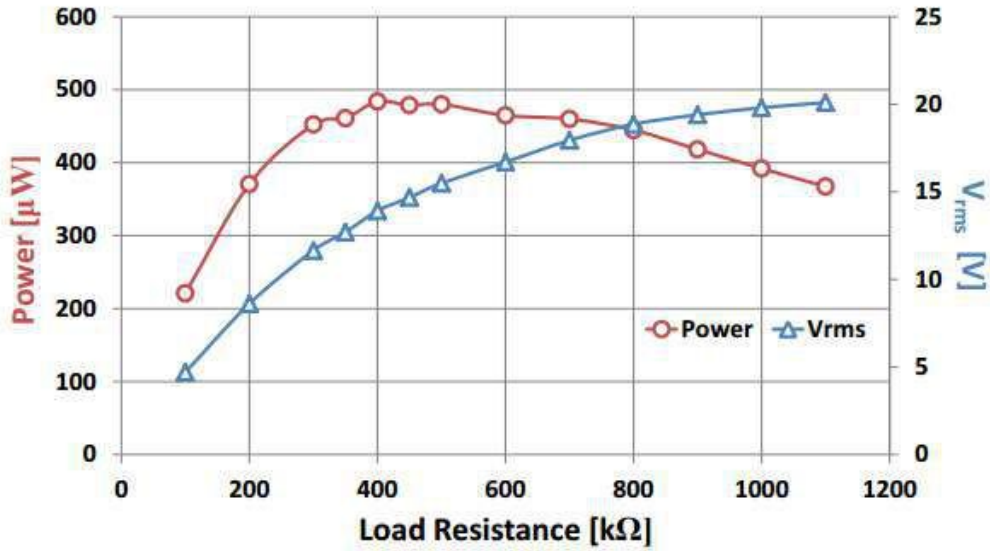


Şekil 6. Tasarlanan arayüz elektronik devresinin farklı yük değerleri için giriş voltajına karşı çıkış voltajının değişim grafiği.

Mekanik titreşimleri elektrik enerjisine çevirmek için kullanılan bir diğer yöntem olan piezoelektrik enerji üreteçlerinin (PEH) yüksek güç yoğunluğu ve entegrasyon potansiyelinden dolayı son dönemde bu alandaki çalışmalar önemli ölçüde artmıştır. PowerMEMS olarak bizim grubumuzda da bu yöndeki çalışmalar önemli gelişmeler kaydetmiştir. Yapılan çalışmalarda bilgisayara uygulanabilecek makro model bir PEH prototipi geliştirilmiştir [21-23]. Prototipi geliştirmek için piezoelektrik malzeme ve trampen yapı için sırası ile PZT-5A seramikler ve pirinç plakalar kullanılmıştır. Üretilen prototip resmi Şekil 7'de gözlemlenmektedir. Yapılan deneysel sonuçlar üretilen prototip doğal frekansı olan 109 Hz'te ve 1 mm titreşim genliğinde 64 V_{rms} çıkış voltajı üretebildiği gözlemlenmiştir. Şekil 8 prototipten elde edilen gücün ve voltajın yük direncine göre değişimini göstermektedir. Prototip optimum direnç değeri olan 400 kΩ'da 14 V_{rms} çıkış voltajı ve maksimum 484 μw güç üretebilmektedir.



Şekil 7. Üretilen makro model piezoelektrik enerji üretici (PEH).



Şekil 8. Üretilen makro model PEH'in çıkışındaki gücün ve voltajın yük direncine göre değişimi.

Elektromanyetik enerji üreticilerinde olduğu gibi piezoelektrik enerji üreticilerinden de alternatif voltaj üretilmektedir. Bu nedenle, üretilen gücü bir kaynak olarak kullanabilmek için bir AA/DA çevirici, örneğin tam-köprü doğrulayıcı ve katlayan doğrulayıcı [24-25], kullanılmalıdır. AA/DA çeviriciler genellikle diyot köprü yapısındadırlar ama bazen bu devrelerin çıkışında doğrultulan gücü optimize edecek ve voltaj regülasyonunu sağlayacak DA/DA çeviriciler kullanılabilir [26-27]. Yapılan çalışmalarda sisteme eklenen elektronik devreler piezoelektrik enerji üreticilerine sönümlenme etkisi yaparak çıkıştaki gücü limitleyebilmektedir. Bu etkiyi azaltmak için referans [28]'de PEH'ten üretilen voltajın doğrusal olmayan bir yöntemle işleyerek üretilen gücün %400 artırılması sağlanmıştır. Benzer bir yöntem olan Synchronous electric charge extraction (SECE) topolojisini kullanarak düşük titreşimle ve düşük güç seviyeleri için otonom bir arayüz elektroniği bizim grubumuz

tarafından tasarlanmıştır [29]. Tasarlanan devrede gücün çıkarılması bir set anahtar ve çip dışı bir bobin ile sağlanmıştır. Piezoelektrik üreticinin iç kapasitörü ile bobin arasında anahtarlama yapılarak piezoelektrik malzeme tarafından üretilen yükün çıkış kapasitöründe depolanması sağlanmıştır.

2.2 Kendi enerjisini üreten Kablosuz Duyarga Ağları (WSN)

Kablosuz Algılayıcı Ağları (KAA), fiziksel olayları veya çevresel değişimleri gözetleme amacıyla kurulmuş haberleşme altyapısı olan ve kendi kendine yeterli (otonom) algılayıcı düğüm olarak adlandırılan cihazlardan oluşan haberleşme ağlarıdır. KAA uygulamaları arasında, muharebe sahası gözetimi, tıbbi bakım gözetimi, tarım amaçlı gözetim, endüstriyel gözetim gibi farklı ihtiyaçlara yönelik ve çeşitli zorlu koşullarda çalışma gereksinimleri olan uygulamalar [30][31] olması sebebiyle KAA düğümlerinin ve işletim protokollerinin tasarımı [32-36] yaygın bir araştırma alanıdır.

KAA uygulamalarında da karşılaşılan en önemli problemlerden biri ise, kendi kendine yeterli olması beklenen düğümlerinin ve dolayısıyla bütün algılayıcı ağının enerji sınırlamasıdır [37-41]. Bu algılayıcı ağlarının işletim ömrü, algılayıcı düğümlerinin bataryalarında var olan enerji miktarına ve ağın enerji tüketimi açısından verimliliğine [37-41] bağlı olmaktadır. KAA düğümleri için, enerji sınırlamalarını ve enerji verimli işletim teknikleri inceleyen çalışmalar düğümlerin enerji tüketimindeki birincil etken olması [39] [41] nedeniyle düğümün haberleşme etkinliğine yönelik odaklanılmıştır. Haberleşme ihtiyacı karşılanırken, var olan donanımıyla düğümün batarya ömrünü uzatabilmek ve dolayısıyla ağın işletim ömrünü uzatabilmek amacıyla önerilen yaklaşımlar haberleşme ağının verimliliği [32-38], [40] üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşımlar ise, düğümler üzerinde batarya dışında enerji kaynağı olabilecek bir donanım olmaksızın, düğümlerin batarya ömürlerinin uzatılması haricinde KAA'nın daimi işletimini sağlayacak etkin bir çözüm oluşturamamaktadır. Daimi işletim için, düğümlerin enerji ihtiyaçlarını sınırsız ve sürekli olabilecek enerji kaynakları gerekmektedir.

KAA düğümlerinin bu enerji sınırlaması problemine etkin bir çözüm oluşturmak adına algılayıcı düğümlere enerji hasatçı donanımları eklenmesi uzun bir süredir kabul edilebilir ve uygulanabilir [42-46] bir yaklaşım olmuştur. KAA düğümleri için kullanılacak enerji hasatçı donanımlar çoğunlukla bu düğümlerin batarya seviyelerini yeterli değerlerde tutmak amacıyla enerji takviyesi sağlayan donanımlar olarak düşünülmektedir. Düğümün batarya seviyesinin her zaman pozitif enerji değerlerinde tutulmasını garantileyen ideal işletim koşulu ise, ilgili literatürde "enerji-

nötr" işletim [47][48] yani ürettiği kadar enerji kullanan işletim olarak adlandırılmaktadır. Bu şekilde de, KAA düğümünün enerji üretim ve tüketim dengesi sağlandığında düğümün batarya ömrü kuramsal olarak sonsuz uzunlukta düşünülebilir ve enerji hasatçı donanım ile nihai olarak amaçlanmış olan düğümün daimi işletimine ulaşılmış olunur. Ancak pratikte bu işletim koşuluna erişebilmek enerji hasadı ile gelen enerjinin düzensiz olduğu ve düğüm enerji ihtiyacının önceden belirlenmiş olduğu durumda batarya büyüklüğünün de sınırlı olması ile birlikte neredeyse imkansızdır. Bunun sebebi ise, deterministik olarak belirlenen enerji ihtiyacının, rastgele ve düzensiz olarak gelen enerji hasadı tarafından karşılanamadığı bir zaman aralığının oluşmasının sonsuz zaman ufku içerisinde [50] kaçınılmaz olabilmesidir.

Diğer taraftan da, KAA düğümünün enerji tüketiminin enerji hasadının ortalamasına denk olacak şekilde bir sistem dengesi yakalanabilmesi kuramsal olarak en iyi çözüm [49-53] olarak görülmüştür. Bu yaklaşımlarda da, düğümün enerji hasadına göre uyumlu güç tüketimini sağlayabilmesi haberleşme yapılırken kullanılan iletim gücünün ayarlanması [49-51], [53] ile olduğu gibi düğümün görev döngüsünün ayarlanmasıyla [52] da yapılır. Ancak gösterilmiştir ki, düğümün üzerinde haberleşme yaptığı haberleşme kanalı, kanal kazanımı açısından statik bir kanal olarak varsayılırsa, düğümün bu kanal üzerinde batarya enerjisi olduğu sürece sürekli olarak iletim yapması [51] kuramsal olarak ideal bir çözümdür. Bunların yanında da, enerji hasatçı sistemlerin haberleşme sınırları [50], [54-55] kuramsal olarak incelenmiştir.

Enerji hasatçı düğümler için önerilen kuramsal tekniklerin ve öngörülerin doğru bir şekilde uygulanabilmesi, enerji hasadı süreciyle elde edilebilir enerjinin özelliklerinin saptanmasını gerekli kılmaktadır. Bu doğrultuda da, enerji hasadı süreçlerini karakterize etmek amacıyla yapılan [56] deneysel ölçümler ve bunlara bağlı varsayımlar oldukça önemli olmaktadır. Bu varsayımlar ise, enerji hasadının ortalama gücü gibi değerlerine karşılık gelebilen ve düğümün enerji tüketim politikasını belirleyebilen etkenlerdir.

Enerji hasadı için, enerji geliş sürecine bağlı olarak öngörülebilir (deterministik) veya tamamen rastgele süreç [56] varsayımları yapılabilir. Güneş enerji için enerji hasadı yapan donanımlar [45], [57-59] çoğunlukla öngörülebilir kaynaklar olarak varsayılırken, vibrasyon enerjisi için enerji hasadı yapan donanımlar [46], [60] rastgele (stokastik) kaynaklar olarak varsayılmıştır. Enerji kaynağının da düzensiz ve rastgele oluyor olması, buna bağlı çalışacak KAA düğümünün kendi kendine çalışmasını zorlaştıran bir etkidir.

3 GEREÇ ve YÖNTEM

Bu bölümde, proje kapsamında kullanılan enerji üreteçlerinin kablosuz ağ düğümlerinin özellikleri ve ilgili kısımlarda yapılan tasarım ve optimizasyon çalışmaları anlatılmıştır. Kendi enerjisini üreten kablosuz duyurga ağları ile ilgili deneysel ve teorik çalışmalar bir sonraki bölümde verilmektedir.

3.1 Kuramsal Ağırlıklı Çalışmalar

3.1.1 Enerji Hasat ve Veri Trafığı İstatistiklerinin Öğrenilmesinin Başarım Ölçütlerine Etkisi

Imperial College'daki proje ortağı D. Gündüz ve lisansüstü öğrenci P. Blasco tarafından, 2012 yılında [61], enerji hasatlı bir haberleşme sisteminin çevrimiçi olarak hasat sıklığına adaptasyonu için Q-learning adı verilen öğrenme kuramı sonuçları uygulanmıştır. Modele göre, ortamdaki enerji hasatı yapan bir adet haberleşme düğümü ele alınmıştır. Bu düğüm, kullanacağı veri aktarım hızı ve gücüne karar vermek için tanımlanan bir ödül (reward) fonksiyonunu hesaplayacaktır. Bir enerji durumunda seçtiği stratejiye göre, belirli bir ödül elde etmekte, ve uzun vadede, hangi durumda hangi güç değerini kullanacağına buna göre yakınsamaktadır.

Projem aşamasında, D. Gündüz ve P. Blasco ile de iletişim içinde olarak, enerji hasatı istatistiklerine uyum sağlayan bir iletim stratejisinden yeterli başarımla elde etmek için karmaşık bir öğrenme yaklaşımı kullanmak gerekip gerekmediği araştırılmıştır. Üzerinde durmakta olduğumuz **kilit başarımla ölçütleri** şunlardır:

- Sonlu bir çerçeve (zaman aralığı) içinde, gelen enerji hasatlarını kullanarak, en fazla toplam verinin gönderilmesi ("throughput maximization")
- Sonlu bir çerçeve (zaman aralığı) içinde, gelen enerji hasatlarını kullanarak, gönderilen veriye dayanan fayda fonksiyonunun enbüyütülmesi ("time-discounted throughput maximization"). Bu ölçütün birincisinden farkı, geç gönderilen verinin değerinin azalması, bu şekilde throughput ve gecikmenin birlikte kontrol edilebilmesidir.
- Belirli bir miktarda verinin, gelen enerji hasatları kullanılarak, en kısa sürede gönderilmesi (tamamlanma zamanı enküçültme problemi- "completion time minimization") Bu amaç fonksiyonunun kullanılması da dolaylı olarak gecikmeyi küçültmektedir.

Yaklaşık 2010 yılından beri hızla gelişen enerji hasatlı haberleşme çözümlerine literatüründe, yukarıdaki amaç fonksiyonlarını benimseyen farklı çalışmalar olmuştur. [49]'da "time-discounted" toplam veri akışını uzun vadede (sonsuz ufuklu olarak)

enbüyüten bir problem kurulmuş ve bunun sonucunda bir çevrimiçi hız ve güç adaptasyonu algoritması önerilmiştir. Bu, problemin sonsuz ufuklu oluşundan da kaynaklanarak, oldukça basit eşik değerine dayanan (threshold based) bir algoritma olmuştur. Araştırma grubumuzda Tan Bacinoğlu'nun 2012 yılında tamamlanan tezi [62] kapsamında, sonlu ufuklu bir objektif fonksiyonu seçilmiş ve yine eşik değer bazlı bir stratejinin optimalitesi gösterilmiştir.

Veri miktarı (throughput) enyükseltme, standart bir amaç ifadesi olup, enerji kısıtı altında incelendiğinde, sınırlı bir zaman dilimi ve bu dilimde hasat edilen sınırlı enerji varsayıldığında anlamlı olmaktadır.

Tamamlanma zamanı (Completion Time) bir amaç fonksiyonu olarak bilimiz dahilinde ilk olarak [63]da ele alınmıştır. Enerji hasatlı iletişim için *tamamlanma zamanının* anlamlı bir amaç fonksiyonu olmasının temel nedeni şudur: zaman kısıtı olmazsa, enerji verimli iletim bizi düşük hız kullanmaya yöneltecektir. Bu yüzden, enerji verimli olurken bir yandan iletimi kısa sürede tamamlama zorunluluğu konulması, problemi hem uygulama bakımından anlamlı, hem de matematiksel bakımdan ilgi çekici hale getirmektedir. Bu nedenle, model çok ilgi çekmiş ve daha karmaşık iletim senaryolarına da uygulanmıştır. Örneğin, [64]'de enerji hasatlı Gauss gürültülü yayın kanalında (broadcast channel) her kullanıcı için belirli bir miktar verinin gönderiminin tamamlanma zamanını enküçülten çizelgeleme problemi tanımlanmış ve çevrimdışı (offline) çözümü yapılmıştır. [65]de aynı problemde, veri paketlerinin de zaman içinde belirli anlarda oluştuğu durum incelenmiş ve çevrimdışı problemi hızlı çözen bir algoritma (DuOpt algoritması) önerilmiştir. [66]de, çoklu erişim problemi ele alınmış ve benzer çözümler yapılmıştır. Yine tamamlanma zamanı problemleri, batarya kısıtlı durumlar için incelenmiştir (ör. [67]).

Güneş enerjisi hasatı, literatürde verilen çeşitli ölçümlere dayanarak, Markov süreç olarak modellenebilmektedir. Buna göre, Markov bir süreç varsayarak, basit hüristik bir öğrenme ile yukarıdaki ölçütlere göre elde edilebilecek başarı sınanmıştır.

3.1.2 Ön çalışmalar ve elde edilen ilk sonuçlar

Denenen yöntem: Markov parametrelerinin sıklığa dayanarak (zamanda ortalama alınarak) kestirilmesi ile Beklenen Eşik Değeri Stratejisinin birleştirilmesi.

Bu çalışmada, daha önceki araştırmalarda tanımlanan bir çevrimiçi Tembel Çizelgeleme (iletim hızının elde bulunan veri miktarına göre ayarlanarak, trafik yoğun olmadığına veri hızı kısıldığı için bu yöntemlere genellikle Tembel Çizelgeleme-Lazy Scheduling [68] adı verilmektedir) yöntemi, paket trafiği istatistiklerinin bilinmediği ve bunların öğrenileceği varsayımı altında yeniden tasarlanmıştır. Ancak,

paket trafiğinin istatistiksel özelliklerini öğrenmek için çok basit bir yaklaşım kullanılmıştır. Amaç, Markov süreç olduğu bilinen paket sürecinin, Q-learning gibi karmaşık bir yaklaşım kullanmadan da, çizelgeleme başarımı açısından yeterince iyi öğrenilmesinin mümkün olup olmadığını görmektir.

Öğrenen Beklenen Eşikdeğer Tembel Çizelgeleme politikası, önceki araştırmalarımızda [62] tanımlanan *Beklenen Eşikdeğer Tembel Çizelgeleme* politikasından farklı olarak $\sum_{l=1}^{n-1} E[B_l|B_n^T]$ terimlerinin yerine $(\frac{n-1}{T-n+1}) \sum_{l=n}^T B_l$ yani şu ana kadar gözlenen ortalama veri akışını koyan, basit bir “öğrenen” politikadır . Burada, B_l l ’inci zaman diliminde gelen veri miktarını, B_n^T ise n ’inci slota kadar geçmiş olan sürede gözlemlenen veri miktarlarını göstermektedir. Veri trafiği istatistikleri bilinmediğinden, öğrenen politikada, beklenen değer hesabı yapılamamakta, bu basit bir zaman ortalaması ile yer değiştirmektedir.

Bu algoritmanın n ’inci zaman dilinde gerçekleştireceği kodlama hızı seçimi (r_n) aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$r_n = \max\{\rho \in V \mid L_n(B_n^T, r) \leq b_n\}$$

$$L_n(B_n^T, r) = \max \left(r, rn + r\alpha - \left(\frac{n-1}{T-n+1} \right) \sum_{l=n}^T B_l \right) r \neq r_{min} ; \quad (1)$$

$$L_n(H_n^N, r_{min}) = 0$$

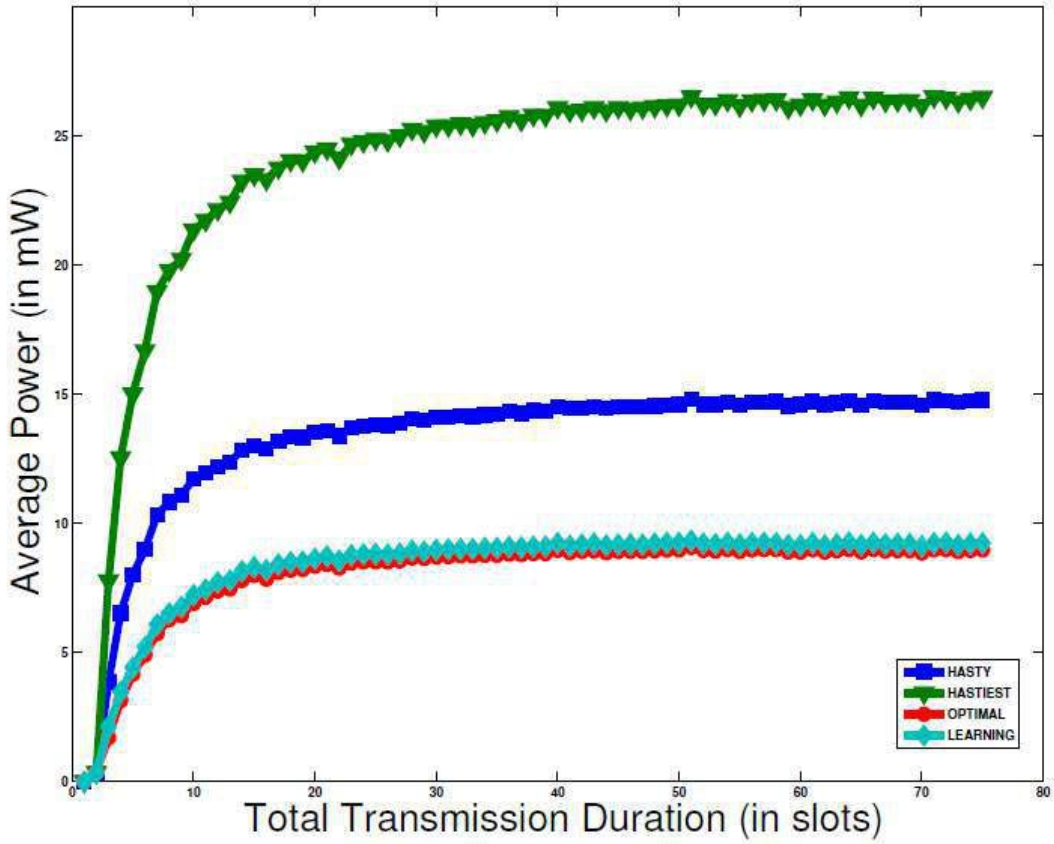
Yukarıdaki ifadelerde, L_n , zaman ufğunun sonuna n kadar zaman dilimi süre olduğunda, anında r hızının seçilmesi için, elde bulunan bit sayısına göre bir eşik değer vermektedir. Algoritmanın parametrelerinden α , zaman ufku bitene kadar ne kadar verinin bitirileceği konusundaki agresifliği kontrol etmektedir.

Sonuçlar:

Elde edilen ön sonuçlarda, yukarıda sözü geçen çok basit öğrenme algoritması ile birleştirilen eşik değer algoritmasının, optimale çok yakın başarımlar elde ettiği görülmektedir. Aşağıda grafikte bir örneği verilen sonuçlarda, öğrenmeyen diğer iki basit algoritmanın da başarımları gösterilmektedir. Optimal algoritmanın istatistikleri bildiği kabul edilmiştir ve dinamik programlama ile hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, proje öncesinde yapılan gözlemler, tamamlanma zamanı ve veri hızı gibi başarımlarımız açısından, basit bir öğrenmenin bile yeterli olduğunu düşündürmektedir. Tembel çizelgeleme, kesikli gelen veriyi enerjiyi minimize ederek

çizelgeleme problemi olduğundan, kesikli gelen enerji ile zamanı minimize etme problemi ile dual bir problemidir. Yine de bunun devamındaki çalışmalarda, enerji hasatlı çizelgeleme ve daha karmaşık Markov süreçleri altında, tamamlanma zamanı dışındaki problemlerin de denenmesi amaçlanmaktadır. Nihai amaç, enerji hasatı/veri geliş sürecindeki ikinci derece ve daha yüksek derece istatistiklerin kilit başarımlar ölçütlerine etkisini analitik olarak ifade edebilmektir. Bu amaç gerçekleştirildiğinde enerji hasatı literatürüne olduğu kadar tembel çizelgeleme ve enerji verimli çizelgeleme literatürüne de yeni bir katkı sunulabilecektir.



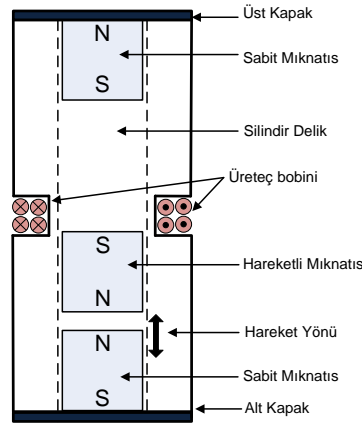
Şekil 9. Grafik 2.1: Aceleci ("HASTY"), En Aceleci ("HASTIEST"), Optimal ("OPTIMAL") ve Öğrenen Beklenen Eşikdeğer Tembel Çizelgeleme ("LEARNING") politikalarının $\alpha = 3$ iken iletim zamanı uzunluğuna ("Total Transmission Duration") karşılık ortalama güç tüketimleri ("Average Power") performans grafiği. (Paket trafiği için 10kB uzunluklu paketlerin belli bir Markov süreç modeline göre geldiği varsayılmıştır. Bu modelde paket gelme ($l(0) = 0$) ve gelme ($l(1) = 10\text{kB}$) olmak üzere iki durum varsayılmış ve bu durumlar arası geçiş olasılıkları ise $A_{00} = 0.9$, $A_{01} = 0.1$, $A_{10} = 0.5$, $A_{11} = 0.5$ olarak alınmıştır.)

3.2 Deneysel ağırlıklı çalışmalar

3.2.1 Elektromanyetik Enerji Üretici Tasarım ve Uygulanması

3.2.1.1 Optimizasyon çalışmaları

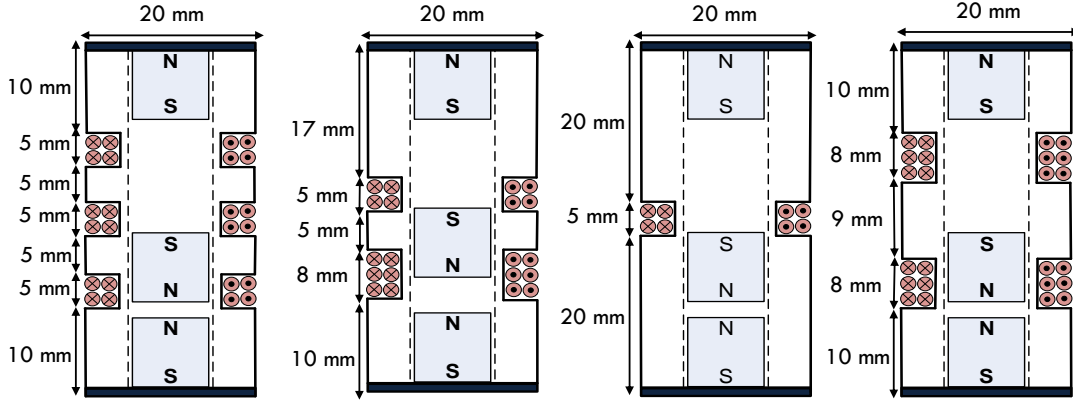
Proje kapsamında tasarlanan enerji üretici ile düşük frekanslardaki titreşimlerle oluşan kinetik enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesi amaçlanmaktadır. Şekil 9 bu amaç için kullanılması planlanan EM enerji üreticinin şematik yapısını göstermektedir. Tasarlanan enerji üretici, temel olarak yalıtkan bir silindir tüp, silindirin üzerine sarılmış bir bobin ve tüpün içine yerleştirilmiş 3 adet mıknatıstan oluşmaktadır. Bu mıknatıslardan iki tanesi tüpün üst ve alt kapağına yapıştırılmış, diğeri ise silindir eksenine doğrultusunda hareket edebilecek şekilde serbest bırakılmıştır. Mıknatısların kutupları da birbirlerine itecek şekilde düzenlenmiştir. Bu sayede ortadaki mıknatıs havada asılı kalmakta ve silindir ekseninde bir titreşim olduğunda hareket etmeye başlayıp ve Faraday yasasına göre tüp etrafına sarılı bobin üzerinde bir alternatif voltaj oluşturmaktadır.



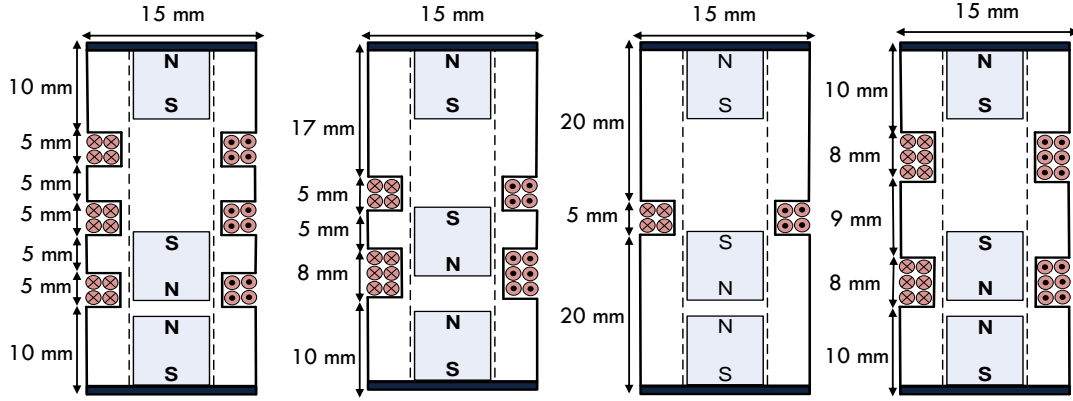
Şekil 10. Tasarlanan elektromanyetik enerji üreticinin şematik yapısı.

Tasarlanan enerji üreticinin optimum gücünü alabilmek için birden fazla üreteç yapısı üretilmesi planlanmıştır. Şekil 10 ve 11 üretilen enerji üreteçlerinin şematik yapılarını ve boyutlarını göstermektedir. Tasarlanan üreteçlerde farklı pozisyonlarda ve farklı boyutlarda bobinler bulunmaktadır. Bobinlerin yerini değiştirerek maksimum manyetik alan farklılığı oluşan noktanın bulunması planlanmaktadır. Bobinleri sarılmış olduğu oyukların boyutu hem sarılabilecek maksimum miktarı değiştirmektedir hem de manyetik alanın etkisini gözlemlemeye yardımcı olmaktadır. Bobinlerin sarım sayısını artırmak indüklenen voltaj değerini doğrusal olarak etkilemektedir. Oluşturulan yapılar hem 20 mm (Şekil 11) hem de 15 mm (Şekil 12) çaplı silindirler kullanılarak yapılmıştır. 15 mm çaplı olan prototiplerin boyutları yaklaşık olarak AA tipi pil boyutu ile aynıdır. 15 mm çaplı prototipler içerisine

yerleştirilen mıknatısların boyutları diğerlerine göre daha küçük olduğu için oluşturabilecekleri voltaj değerleri de daha azdır.



Şekil 11. Üretilen 20 mm çaplı enerji üretici yapıları.



Şekil 12. Üretilen 15 mm çaplı enerji üretici yapıları.

Tasarlanan bu enerji üreticileri üretilmiş ve testleri yapılmıştır. Şekil 13 ve 14 tasarlanan bazı enerji üretici prototiplerinin üretilmiş gövde kısımlarının bir AA tipi pil ve buna uygun pil yuvası ile beraber fotoğraflarını göstermektedir. Şekil 13'te soldaki ilk üç prototipin gövde çapı 20 mm, geriye kalan üç prototipin çapı ise 15 mm'dir. Üretilen prototip gövdelerinin uzunluğu bataryadan biraz daha kısa tutulmuştur böylece üreteç üzerine entegre devreye eklenince boyları hemen hemen aynı uzunlukta olacaktır. Tasarlanan üreteçlerin tam bir sistem halinde optimizasyonunun tamamlanabilmesi için üreteçlerden çıkan voltajı doğrultacak bir arayüz elektroniği tasarlanmış ve testlere öyle devam edilmiştir.



Şekil 13. Üretilen enerji üretici gövdelerinin ve AA tip bir bataryanın yandan görünüşü.



Şekil 14. Üretilen enerji üretici gövdelerinin AA tipi pil yuvasına yerleştirilmiş hali.

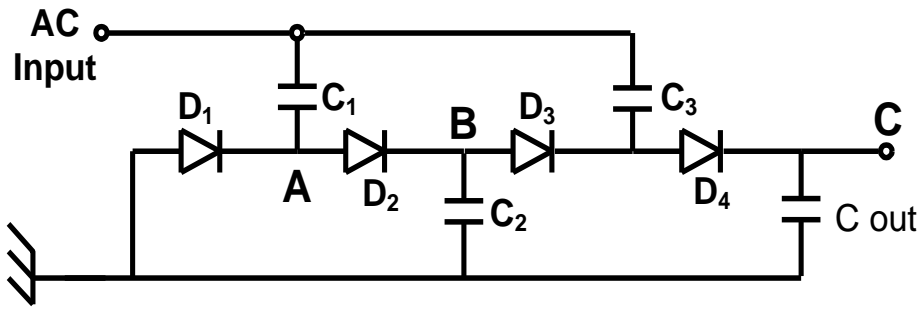
3.2.1.2 Arayüz devresi tasarımı

Tasarlanan titreşim tabanlı enerji üretici çıkışında indüklenen voltaj alternatif akım (AA) formundadır, fakat üretilen bu voltajın bir elektronik devreyi/cihazı çalıştırabilmesi için doğru akım (DA) formuna çevrilmesi gerekmektedir. Üretilen AA voltajını DA voltajına çevirmek için bir doğrultucu devresi gerekmektedir. Doğrultucu devrelerini aktif ve pasif olmak üzere iki ana başlık altında toplayabiliriz. Aktif doğrultucuların voltaj kayıplarının daha az olmasına rağmen çalışabilmeleri için dışardan bir güç kaynağına ihtiyaç duymaktadırlar, fakat pasif doğrultucu devrelerin böyle bir güç gereksinimi yoktur. Proje kapsamında geliştirilen sistemde güç kaynağı kullanmayan pasif bir doğrultucu devresi kullanılmıştır.

Tasarlanan enerji üreticileri düşük frekanslarda çalışmaktadır fakat elektromanyetik enerji üreticilerinin çıkış voltajları düşük titreşim koşullarında düşük seviyelerdedir. Bu sebepten, üreticinin çıkışındaki AA voltajını DA voltajına çevirirken yükseltecek bir

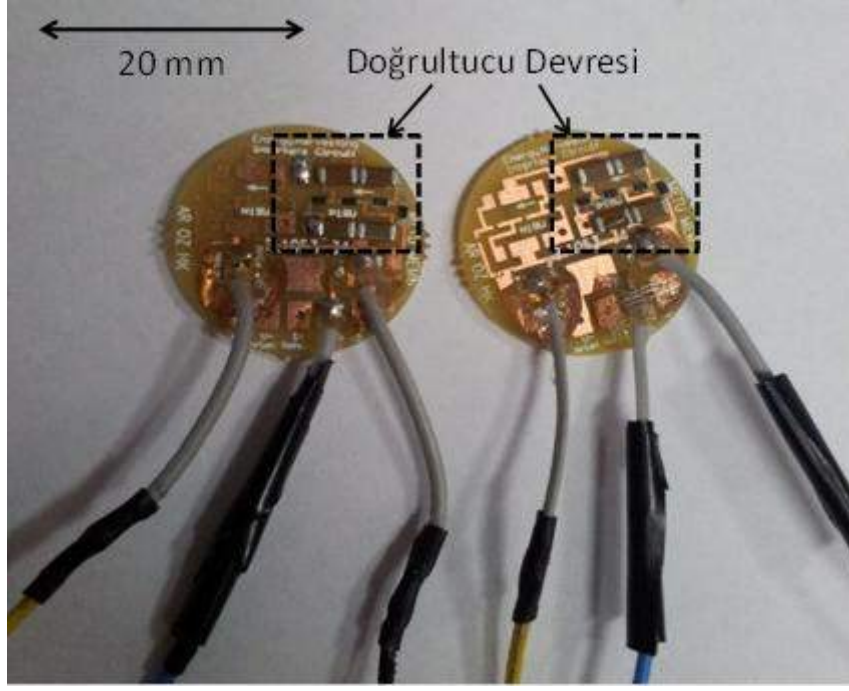
entegre devre tasarımı kullanılmıştır. Şekil 15 bu amaç için kullanılan iki safhalı doğrultucu-yükseltici şarj pompası devresini göstermektedir. Devrenin çıkış voltajı teorik olarak girişindeki AA voltajın tepe değerinin 4 katıdır. Fakat devre içerisinde kullanılan diyotlar ideal olmadığı için üzerlerinde bir voltaj kaybı oluşur. Bu durumda devrenin çıkışında elde edilecek olan çıkış voltajı Denklem 2’de verilmiştir. Devrenin çıkışındaki voltajı maksimize edebilmek için diyotlardan kaynaklı voltaj kayıplarının (V_{TH}) en aza indirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle devrede düşük açılış voltajına sahip Schottky diyotlar [69] kullanılmıştır.

$$V_{OUT} = 4(V_{in,tepe} - V_{TH}) \quad (2)$$

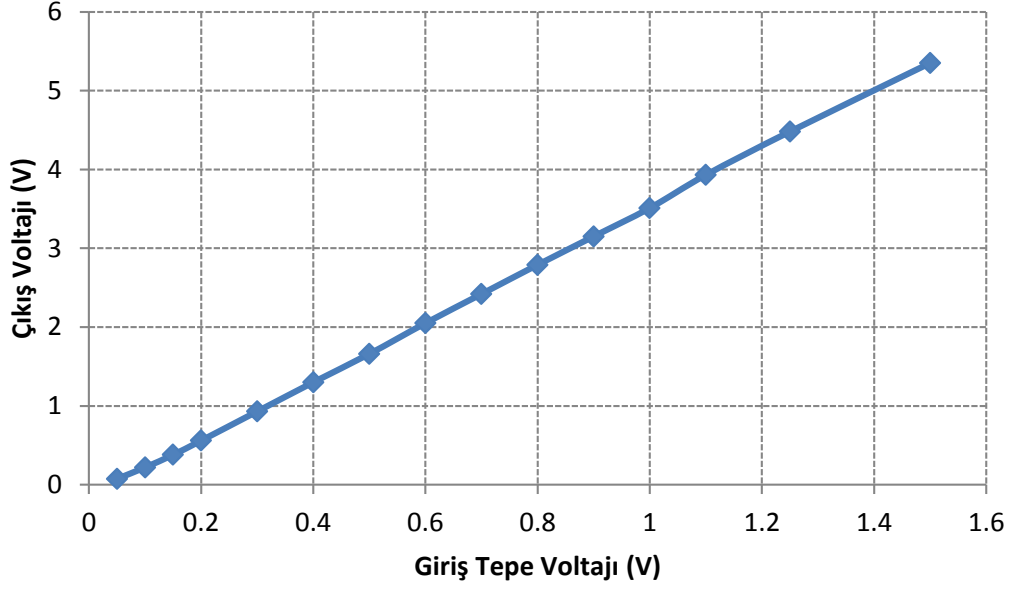


Şekil 15. İki safhalı doğrultucu-yükseltici şarj pompası devresi.

Şekil 15’de sunulan devre yapısı bir PCB üzerine kurulmuş ve testleri yapılmıştır. Şekil 16, PCB üzerine hazırlanmış iki örneği göstermektedir. Hazırlanan örneklerin testleri yapılmış ve elde edilen sonuç Şekil 17’de verilmiştir. Bu testlerde devreler bir sinyal üretici ile beslenmiş ve giriş ve çıkış voltajları bir osiloskopta gözlenmiştir. Daha önce de belirttiği gibi devre giriş voltajının 4 katına yakın bir değer vermektedir. Kullanılan diyotların açılış voltajı yaklaşık 0.125 V olduğu için örneğin giriş voltajı 1 V iken devrenin çıkış voltajı yaklaşık 3.5 V’a ulaşmaktadır. Şekil 18 devrenin yüksüz durumda iken 10 Hz frekanslı ve 1 V genlikli sinüsoidal bir giriş voltajı için verdiği çıkış voltajını göstermektedir.



Şekil 16.PCB üzerine hazırlanmış doğrultucu devresi örnekleri.



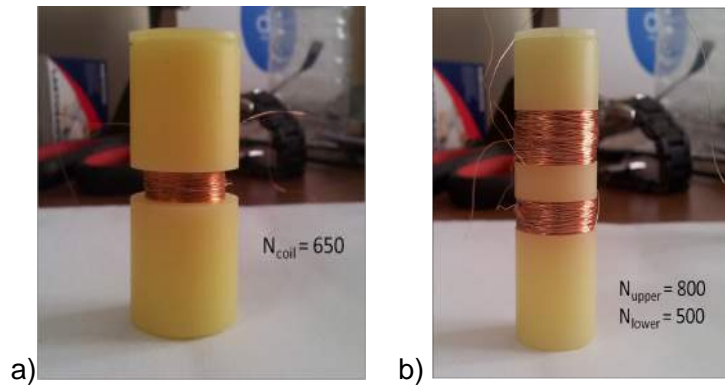
Şekil 17.Doğrultucu devresinin giriş voltajına göre çıkış voltajı değişimi.



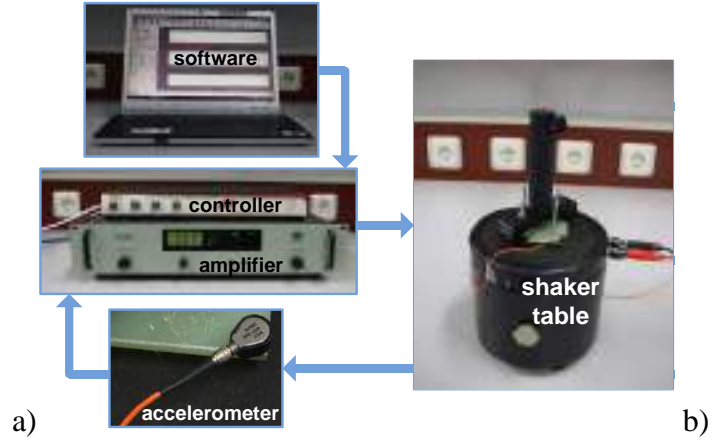
Şekil 18.Devrenin 1V ve 10 Hz giriş voltajı ile yapılmış olan test sonucu.

3.2.1.3 Pasif doğrultucu devrenin EM enerji üretici ile doğrulanması

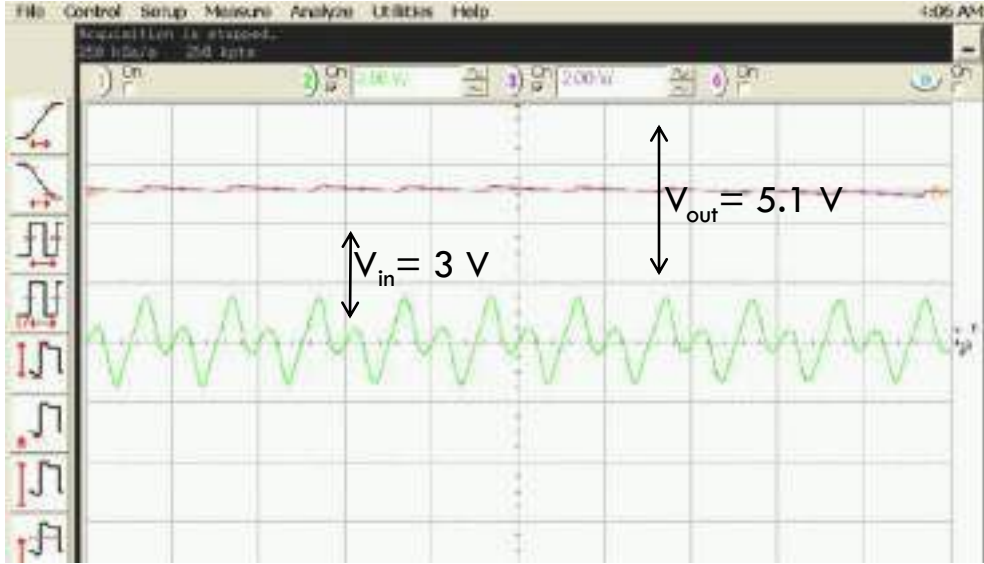
Bir sonraki aşamada, tasarlanan devre ve enerji üretici birleştirilmiş ve bir sistem olarak beraber çalışmaları gözlenmiştir. Bu çerçevede tasarlanan enerji üreticilerinin her iki boyutu (15 mm ve 20 mm çaplı enerji üreticileri) için optimum olanlar bulunmuştur. Şekil 19 bu boyutlar için elde edilen optimum enerji üretici prototiplerini göstermektedir. Birinci prototipin çapı 20 mm ve etrafın sarılmış bobinin sarım sayısı 650'dir. İkinci prototipin çapı ise 15 mm olup yukarıda ve aşağıda olmak üzere iki farklı bobin içermektedir. Üstteki ve alttaki bobinlerin sarım sayısı sırası ile 800 ve 500'dür. Şekil 20, üretilen enerji üretici prototiplerinin testlerinin yapıldığı test düzeneğini ve test düzeneğine yerleştirilmiş prototip ve üzerine monte edilmiş PCB'yi göstermektedir. PCB hem devreyi taşımakta hem de kapak vazifesi görmektedir. Sistemin 10 Hz titreşim frekansı 1 mm tepe-tepe titreşim genliği için bobin ve doğrultucu devre çıkışında elde edilen AA ve DA voltajlar Şekil 21'de gösterilmektedir. Uygulanan bu titreşim şartları için enerji üretici çıkışında 3 V tepe-tepe (1.5 V tepe) voltajı oluşmaktadır ve tasarlanan devre elde edilen bu sinyali 5.1 V'a doğrultmaktadır.



Şekil 19.a) 20 mm (Prototip 1) ve b) 15 mm(Prototip 2) çaplı optimum EM enerji üreticileri.



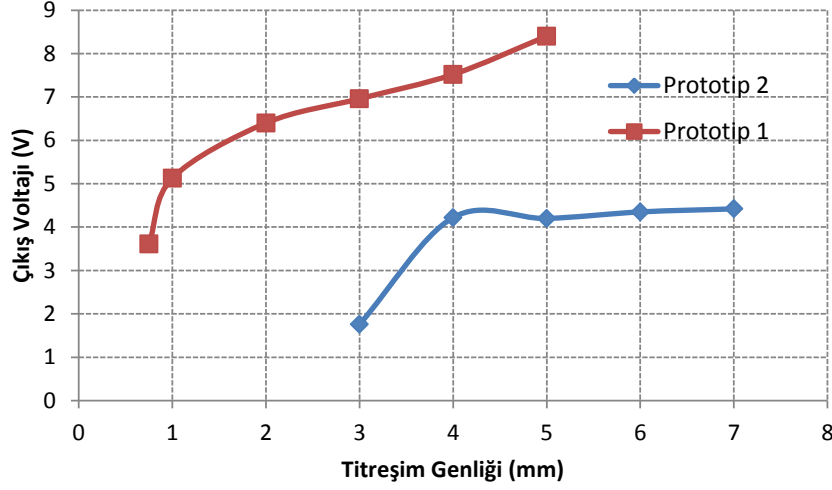
Şekil 20.a) Test düzeneği b) Titreşim masasındaki Prototip 1 ve PCB devresi.



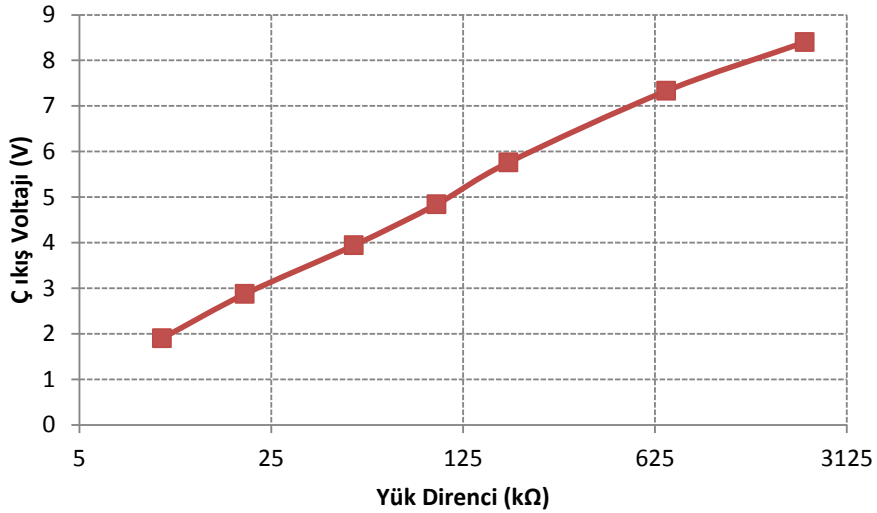
Şekil 21.10 Hz ve 1 mm titreşim şartları için elde edilen giriş ve çıkış voltajları.

Şekil 22 enerji üretici prototiplerinin 10 Hz frekanstaki farklı titreşim genlikleri için ürettikleri tepe tepe voltaj değerini vermektedir (2. Prototip için üstteki bobinin voltajı gözlenmiştir). Beklendiği üzere birinci prototipten elde edilen voltaj ikinci prototipten elde edilene göre daha fazladır. Bunun başlıca sebebi, üreteç içerisinde kullanılan hareketli mıknatısların diğerine göre daha büyük boyutlarda olması ve daha fazla

manyetik alan değişimi yaratabilmesidir. Şekil 23, birince prototip ile hazırlanmış sistemin çıkış voltajının devrenin çıkışındaki yk direncine göre değişimini göstermektedir.



Şekil 22.Optimum enerji reteci prototiplerinin 10 Hz frekanstaki farklı titreşim genlikleri için ürettiği tepe tepe voltajı.



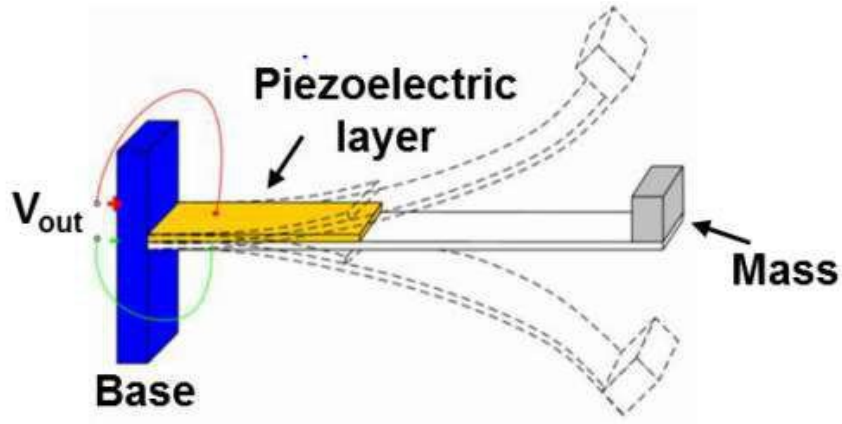
Şekil 23.Birinci prototip ile hazırlanmış sistemin yük direncine göre çıkış voltajı değişimi.

3.2.2 Sensör düğümleri için pizeoelektrik enerji reteleri

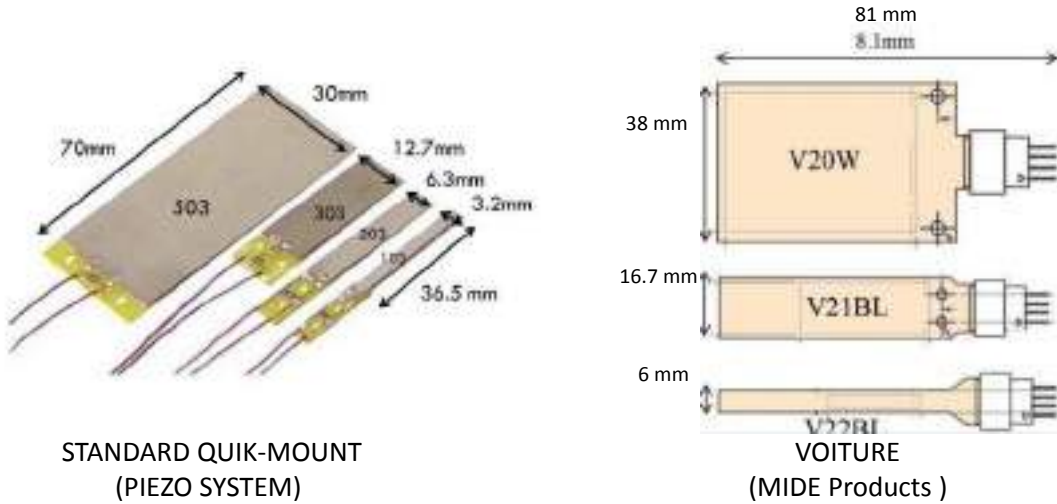
Raporun bu bölümünde MicaZ kablosuz düğümün enerji ihtiyacının bir piezoelektrik enerji reteci sistemi ile karşılanmasına dayalı bir sistem anlatılmıştır. Piezoelektrik malzemelerden enerji üretimi geçtiğimiz yıllar içerisinde birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Şekil 24 tipik bir piezoelektrik enerji reteci yapısını göstermektedir. Piezoelektrik enerji retelerinin doğal frekanslarının düşük veya yüksek oluşu

trampren yapı üzerine yerleştirilen kütle ile ayarlanabilmektedir. Piezoelektrik tabaka genellikle trampren yapının sabitlenmiş tarafına yerleştirilmektedir. Üreteç titreşen bir cihaza veya makineye bağlandığı zaman bu titreşimler mekanik bağlantı ile üreteç üzerine aktarılmaktadır. Böylelikle kökteki uyarımlar çubuğun titreşmesine sebep olmaktadır. Yapıdaki eğilmeler piezoelektrik tabaka üzerinde değişken gerilme ve sıkıştırma stresleri oluşturmaktadır. Sonuç olarak oluşan stresin büyüklüğüne göre piezoelektrik tabaka üzerinde alternatif bir voltaj oluşmaktadır.

Bu çalışmada PIEZO SYSTEM ve VOLTURE firmalarından alınmış ticari piezoelektrik enerji üreteçleri kullanılmıştır. Kullanılan piezoelektrik enerji üreteçlerinin boyutları ve özellikleri Şekil 25'de ve Tablo 2'de özetlenmiştir.



Şekil 24. Piezoelektrik enerji üreticinin şematik gösterimi.



Şekil 25. STANDARD QUIK-MOUNT ve VOLTURE piezo enerji hasat bileşenlerinin boyutları.

Tablo 2. Piezoelektrik enerji üreticilerinin özellikleri.

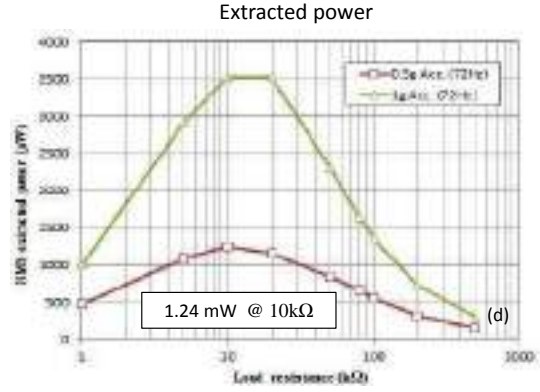
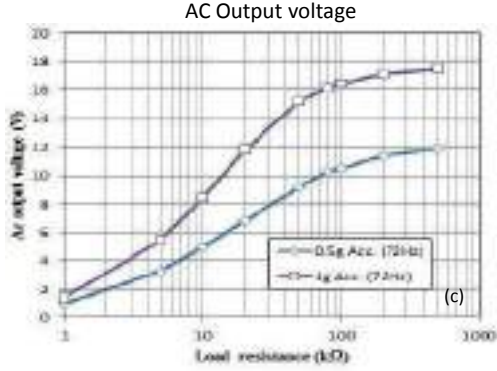
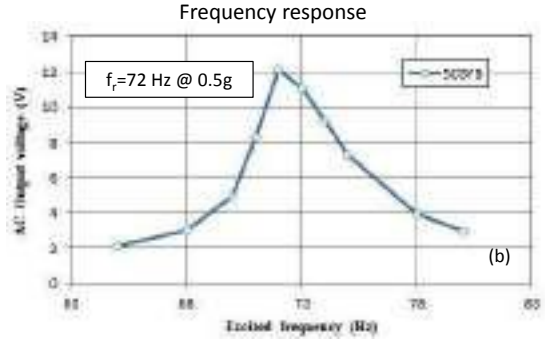
Firma	Model	Frekans aralığı	Paralel Kapasitans (nF)	Tip-mass (gram)
ROHS	Q220-A4-303YB	250	52	-
ROHS	Q220-A4-503YB	45	260	-
ROHS	D220-A4-103YB	100	13	-
Volture	V25W	40-120	130	2-0
Volture	V21BL	40-110	26	2-0
Volture	V22BL	30-110	9	2-0

3.2.2.1 Piezoelektrik Enerji Üreteçlerinin Karakterizasyonu

İlk adım olarak piezoelektrik enerji üreticileri düzgün bir şekilde sabitleyecek tabakalar hazırlanmış, böylelikle üreticilerden maksimum performansın elde edilmesi sağlanmış ve MicaZ sensör düğümü için bir yuva oluşturulmuştur. Enerji üretici ile düğümün başarılı bir şekilde kelepçelenebilmesi için hem tabanın hem de kelepçenin sert bir malzemeden yapıldığından emin olmak gerekir. Sert malzeme kullanmak kelepçelemeden dolayı oluşan enerji kaybını minimuma indirmeyi sağlar. Kelepçenin genişliği üreticideki çubuğun tamamını geçmeli ve piezoelektrik malzemenin biraz üzerine geçmelidir.

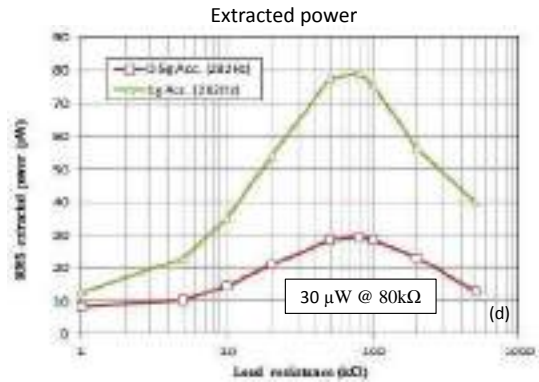
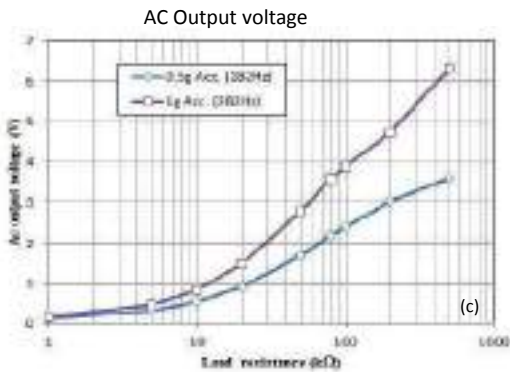
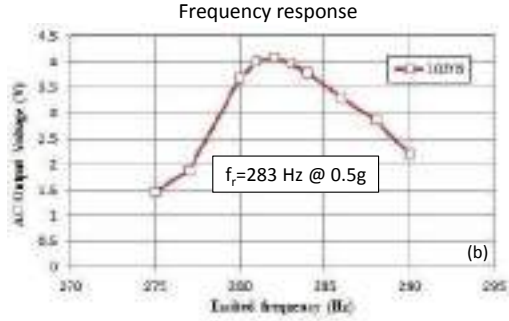
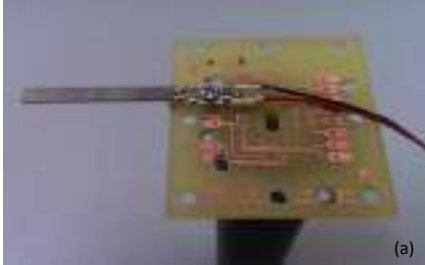
Bir sonraki adımda piezoelektrik enerji üreticilerin karakteristik özellikleri yapılan testler ile elde edilmiştir. Şekil 26 sabitleyici düzeneğin resmini ve Q220-A4-503YB piezoelektrik üreticinin doğal frekans karakteristiğini göstermektedir. Enerji üreticinin çıkışındaki AC voltajı ve rms gücün 72 Hz (rezonans frekansı) titreşim frekansı, 0.5g ve 1g titreşim ivmesi ile uyarıldığı durum için yük direnci ile değişimi Şekil 26'da verilmiştir. 0.5g ve 1g ivme değerleri için elde edilen maksimum güç sırası ile 1.24 mW ve 3.5 mW'tır. Şekil 27, 28 ve 29 diğer piezoelektrik enerji üreticilerin karakterizasyonunu göstermektedir.

Q220_A4_503YB

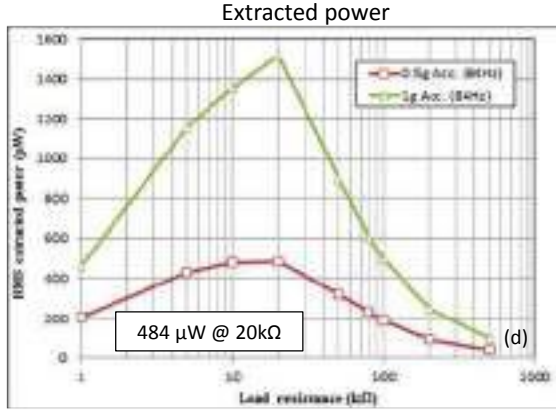
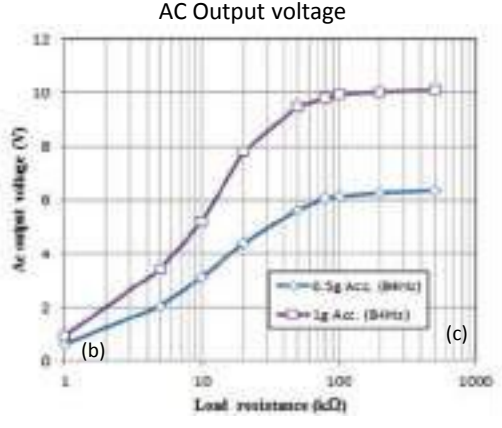
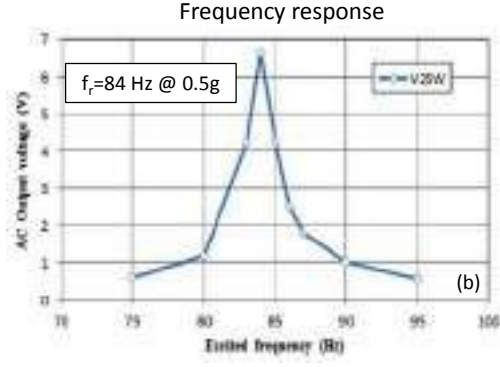
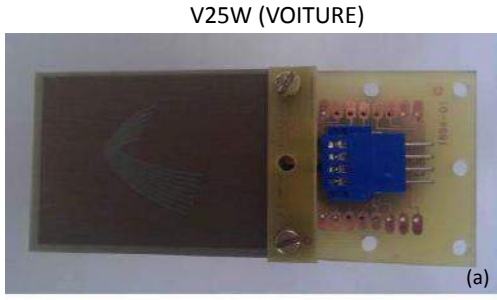


Şekil 26.(a) 503YB piezoelektrik enerji üreticinin (b) frekans cevap karakteristiği; (c) AC çıkış voltajı ve (d) elde edilen RMS güç değerinin yük direncine göre değişimi (0.5g ve 1g ivmede ve 72 Hz titreşim frekansında elde edilmiştir.).

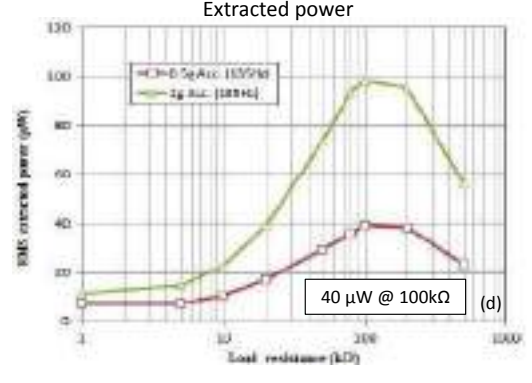
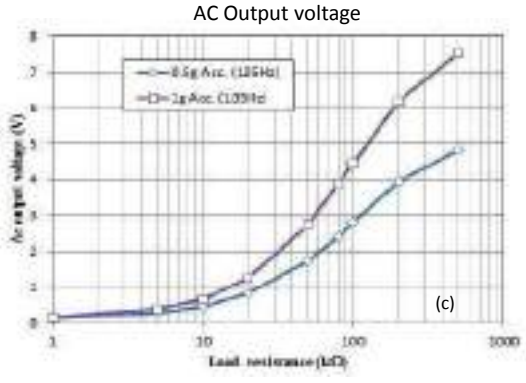
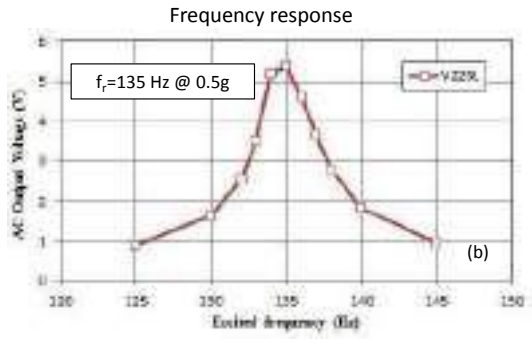
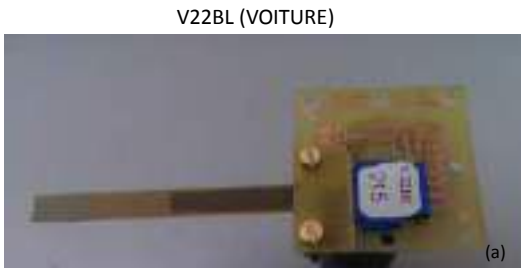
Q220_A4_103YB



Şekil 27.(a) 103YB piezoelektrik enerji üreticinin (b) frekans cevap karakteristiği; (c) AC çıkış voltajı ve (d) elde edilen RMS güç değerinin yük direncine göre değişimi (0.5g ve 1g ivmede ve 283 Hz titreşim frekansında elde edilmiştir.).



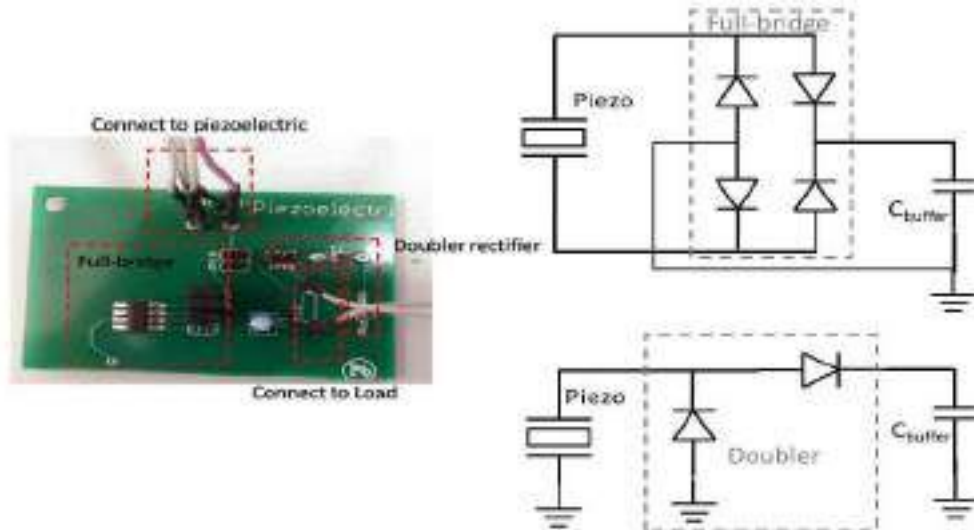
Şekil 28.(a) V25W piezoelektrik enerji üreticinin (b) frekans cevap karakteristiği; (c) AC çıkış voltajı ve (d) elde edilen RMS güç değerinin yük direncine göre değişimi (0.5g ve 1g ivmede ve 84 Hz titreşim frekansında elde edilmiştir.).



Şekil 29.(a) V22BL piezoelektrik enerji üreticinin (b) frekans cevap karakteristiği; (c) AC çıkış voltajı ve (d) elde edilen RMS güç değerinin yük direncine göre değişimi (0.5g ve 1g ivmede ve 135 Hz titreşim frekansında elde edilmiştir.).

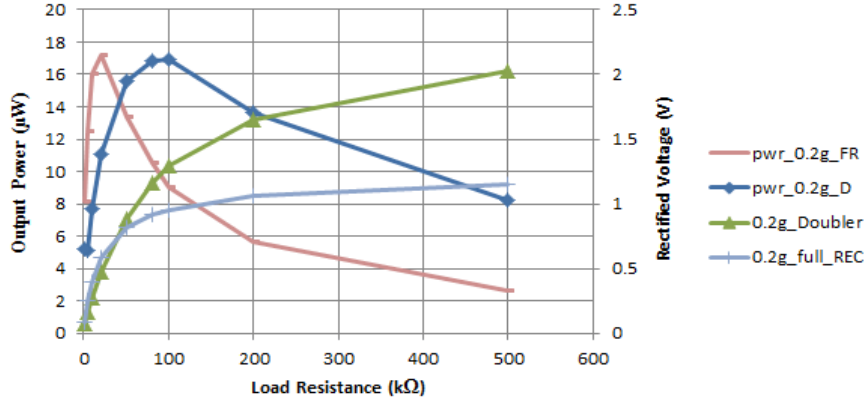
3.2.2.2 Piezoelektrik Enerji Üreteçleri İçin Arayüz Elektronik

Piezoelektrik enerji üreteçler tarafından üretilen güç alternatif akım (AC) formda olduğundan dolayı üretilen gücü verimli bir şekilde doğrusal akıma (DC) çevirecek bir devreye ihtiyaç duyulmaktadır. Dahası üretilen enerjinin elektronik cihazlarda kullanılmak üzere bir kondansatör veya şarj edilebilir pil üzerine depolayacak bir güç depolama devresi kullanılmalıdır. Bu amaç için kullanılabilir en bilindik iki doğrultucu devre tam köprü doğrultucu ve voltaj katlayıcı devreleridir ki literatürde birçok çalışmada yer almaktadırlar [70-71]. Bu devreler genellikle doğrultucu diyotlardan ve filtre kondansatörlerinden oluşmaktadır. Bu alternatif bir voltajı doğrultmak için kullanılabilir en pratik ve basit yöntemdir. Yukarıda detayları verilen piezoelektrik üreteçlerden DC voltaj elde etmek için her iki devre de bir baskı devre kartı (PCB) üzerinde üretilmiştir. Şekil 30 üretilen PCB'yi ve devrelerin şematik gösterimini içermektedir. Bu devrelerde voltaj kaybını minimuma indirmek için Schottky diyotlar kullanılmıştır.



Şekil 30. Piezoelektrik enerji üreteçleri için tasarlanmış PCB ve kullanılan devrelerin şematik gösterimi.

Günlük hayatta karşılaştığımız titreşimler genellikle düşük seviyelerde karşımıza çıkmaktadır. Örneğin bir mikrodalga fırın veya işlek bir caddeye yakın büyük bir ofis penceresindeki titreşimler ele alındığı zaman en çok güç elde edilen frekans aralığı 70 Hz ve 500 Hz bandında olduğu gözlemlenmiştir [72]. Enerji üreteçlerin doğrultucu elektronik devreler ile birlikte performansını gözlemleyebilmek için 103YB piezoelektrik üreteç 0.2g ivme ve rezonans frekansında (282 Hz) titreşim uygulanarak test edilmiştir. Üretecin çıkışındaki voltaj ayrı ayrı hem tam köprü doğrultucu hem de katlayıcı doğrultucu devreleri ile doğrultulmuştur. Devrelerin çıkışındaki DC voltaj ve gücün yük direncine göre değişimi Şekil 31'de verilmiştir.



Şekil 31. Tam köprü (FB) ve voltaj katlayıcı (D) doğrultucularının çıkışındaki voltaj ve gücün 0.2g ve 72 Hz titreşimde yük direncine göre değişimi.

Tam köprü doğrultucu tarafından çıkarılan güç çıkış voltajına (yük direncine) göre değişmekte ve belirli bir direnç değerinde maksimum değerine ulaşmaktadır. Voltaj katlayıcı devresinde ise çıkarılan maksimum güç aynı olsa da çıkış voltajı tam köprü doğrultucuya göre iki kat daha fazladır. Her iki devrenin de çıkış voltajı yük tarafından çekilen akıma bağlı olarak değişmektedir. Çıkış voltajının elektronik yük tarafından çekilen akıma bağlı olması bu devreleri tek başına bir güç kaynağı olarak kullanmayı engellemektedir.

3.2.3 Duyarga düğümleri ve erişim noktası

Bu çalışmada geliştirilen sezim, konumlama ve sınıflandırma algoritmalarının başarımı ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde kurulan manyetik WSN ile deneysel olarak tespit edilmektedir. Ana düğüm hariç, algılayıcı ağda bulunan her düğüm MTS310B sensör kartı ile donatılmış bir MICAz telsiz algılayıcı modülünden oluşmaktadır. Ana düğüm ise MIB520 USB Gateway kartını MICAz ile birlikte kullanmaktadır. Masaüstü bir bilgisayar algılayıcı ağının kaynaştırma merkezi olarak işlev görmektedir.

Her MICAz modülü IEEE 802.15.4 standartına uyumlu, Chipcon CC240 RF alıcı/vericiyle ve Atmega 128L mikrokontrolör ile donatılmıştır. MTS310CB sensör kartında ise Honeywell HMC1002 2-eksenli manyetometre bulunmaktadır. MICAz modülleri programlamak için Tiny OS-2.1.0 ücretsiz, açık-kaynak işletim sistemi kullanılmıştır. Merkezi, ağaç yapılı bir ağ TinyOS Ağ Protokol Çalışma Grubu (Network Protocol Working Group - Net2WG) tarafından geliştirilmiş Toplama Ağacı Protokolü (Collection Tree Protocol - CTP) kullanarak kuruldu. Ağ çapında yanıt gerektiren mesajlar için ise, örneğin yeniden başlatma mesajları için, Net2WG'in dağıtım (dissemination) protokolu DRIP kullanılmıştır. Kullanılan sistem ve kod geliştirme ortamı elemanları aşağıdaki gibidir:

MICAz sensör düğümleri: MICAz, Crossbow Technology Inc. tarafından üretilen, TinyOS geliştirici komünitesi tarafından kullanılan temel sensör düğümü donanım platformlarından biridir. Programlama ve bilgisayar ile haberleşme arabirimi kullanıcı dostudur ve TinyOS versiyonları ile ekstra yamaya gerek kalmadan uyumludur.

MTS310 sensör kartları: MTS310, üzerinde ışık, sıcaklık, mikrofon, buzzer, 2-eksenli ivme ölçer, 2-eksenli manyetik sensör bulunduran, MICAz sensör düğümü platformları ile uyumlu bir sensör kartıdır.

MIB520 USB interface board: MICAz programlama ve bilgisayar ile haberleşme arabirimi. Bu ara birim donanımsal olarak bilgisayarın tek bir usb portunu kullanarak iki adet sanal port oluşturup sırasıyla sensör düğümü programlanması ve bilgisayar – sensör düğümü haberleşmesi sağlanması için kullanılmaktadır.

Bu ürünlerin bir tanesi oluşturulan ağaç yapılı ağda toplanan bilgilerin bir kök sensör düğümü aracılığı ile PC'ye gönderilmesi ya da PC'den ağı oluşturan sensör düğümlerine mesaj gönderilmesi amacıyla, kök sensör düğümü ile PC arayüzünü sağlamak için kullanılmaktadır. Diğerleri ise geliştirme sürecinde ağda iletilen debug mesajlarını toplayabilmek ve PC'ye iletmek için kullanılmaktadır.

Uzaktan programlama Altyapısı: Deluge T2 isimli yayma protokolü kullanılarak sensör düğümlerini yerinden oynatmaya gerek kalmadan kablosuz olarak programlanabilmektedir.

Test bilgisayarı: Ubuntu v9.10 ve şu an için TinyOS'in en güncel versyonu olan TinyOS-2.1.1 kurulu bir test bilgisayarı.

Eclipse v3.5.0: TinyOS-2.1.0'da kod geliştirmek, derlemek ve MICAz sensör düğümüne yükleme yapabilmek, test bilgisayarı tarafında, ağ topolojisini görselleştirmek ve toplanan verileri kaydetmek için kullanılan java uygulamasını geliştirmek, derlemek ve çalıştırmak için kullanılacaktır.

Yeti2: Eclipse için geliştirilen bir TinyOS eklentisidir. Eklentinin amacı, kod geliştiricisine modern bir geliştirme ortamından beklenen uygun özellikleri sunmaktır. Temel özellikleri şunlardır:

- Gerçek zamanlı kod doğrulama
- Sözdizimi vurgulama
- Kontekse duyarlı kod tamamlama
- Dosyalar ve tanımlamalar arası bağlantılarda gezebilme
- Eclipse üzerinden kod derleyebilme ve program yükleyebilme

- Bileşen grafiği oluşturma
- Taslak görünümü sunma
- C önişlemci görünümü sunma
- MIG (Message Interface Generator) & NCG (NesC Constant Generator) araçları desteği

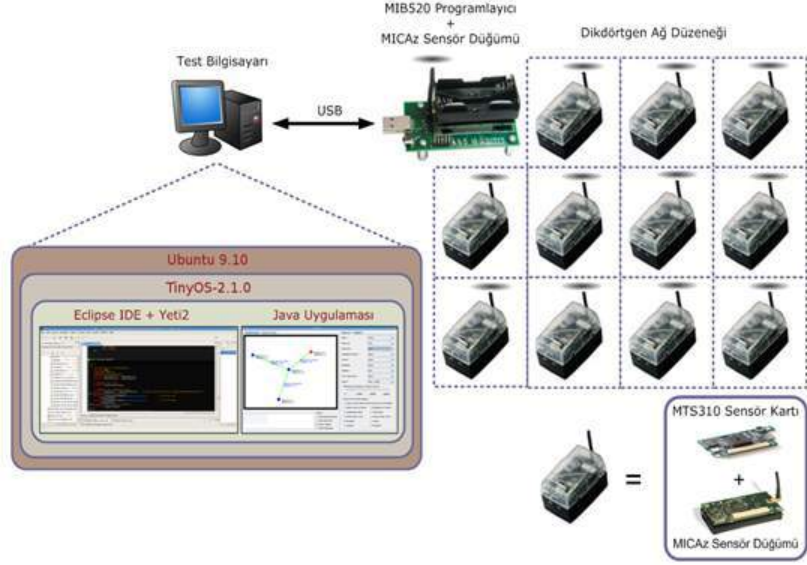
MIG aracının amacı, TinyOS'de kullanılan mesaj yapısındaki alanları çözümleyebilmek için standart arayüzler sunan bir kod üretmektir. Test bilgisayarında verileri incelemek için kullanılan Java uygulamaları MIG tarafından üretilen kodu kullanarak mesaj alanlarını tanırlar ve neticesinde mesajları kolaylıkla işleyebilirler.

NCG aracının amacı da MIG aracınınkine paralel olarak NesC dosyalarındaki sabitleri çıkarıp test bilgisayarında kullanılan Java uygulamalarının kullanımına sunmaktır. NCG, genellikle MIG ile beraber TinyOS mesajlarındaki sabitleri çıkarmak için kullanılır.

SVN (Subversion) v1.6.3: Açık kaynak kodlu bir versiyon kontrol sistemidir.

Ağ görselleştirme ve veri toplama yazılımı: Kurulan ağ topolojisi gözlemlemek, ve ağdan kök sensör düğümüne gönderilen verilerin kaydedilmesini sağlamak üzere JAVA programlama dilinde yazılan bir uygulamadır. Kaydedilen bilgilerde gelen paketlerin içerisindeki sensör verisi, paketin göndericisi, göndericisinin yol atama ölçüt değeri, bağlı olduğu üst sensör düğümü (parent node) numarası gibi bilgiler alınmaktadır. Bu bilgiler '.csv' uzantılı bir dosyaya kaydedilebilmektedir.

Şekil 32'de test düzeneği şeması ve görüntüleri mevcuttur.



Şekil 32.MicaZ tabanlı test düzeneği ve bileşenleri.

3.2.3.1 Enerji ve ağ yaşam süresi (ağ ömrü)

Kablosuz algılayıcı ağları için ağın yaşam süresi önemli ve kritik bir noktadır. Ağın çalışmasını garantilemek için her düğümdeki güç harcamasının tahmin edilmesi ve çalışma sırasında kontrol altında tutulması gerekmektedir. Düğümlerin farklı durumlarda enerji harcamaları deney yapılmadan önce hesaplanmalı ve deney süresinde göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durumlar, algılayıcının aktif olduğu durum, uyku durumu, gönderme (iletim) modu, alıcı modu, aktif bekleme modu, v.b. durumlardır. Tüm bu farklı durumlarda farklı güç harcama seviyeleri olacağı için, deneyden önce güç harcaması hesaplanarak ağın yaşam süresi tahmin edilebilir. Farklı durumlarda bir düğümün harcadığı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$E = \int_0^T v(t) \times i(t) \times dt \quad (3)$$

Burada, E, enerji; v(t), Güç kaynağının gerilimi; i(t), pilin üzerinden geçen akım; T, Deneyin gerçekleşme süresini temsil etmektedir.

Tablo 3. Bir düğümde harcanan toplam enerjinin bileşenleri.

	Deney süresi	Enerji
Radyonun kapalı durumu	T: Radyonun kapalı olduğu süre	E1
Radyonun açık durumu	T:Radyonun açık olduğu ama göndermenin olmadığı süre	E2
Belirli uzunlukta bir veri paketi için alıcı modu	T:Data hızı ve protokole bağlı olan bir süre	E3
Belirli uzunlukta bir veri paketi için gönderici modu	T:Data hızı ve protokole bağlı olan bir süre	E4
Gereken algılayıcının açık diğerlerinin kapalı durumu	T:Algılama süresi	E5
LEDlerin açık olduğu durum	T:Aktif olduğu süre	E6

Bir düğüm için toplam enerji harcaması:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^6 E_i \quad (4)$$

Deney süresince güç kaynağından gelen besleme geriliminin sabit kaldığı kabul edilmektedir. Bu durumda, enerji hesaplaması için gereken tek değişken akımdır (i). Bu değişkeni ölçmek için özel bir devre tasarlanmıştır. Devrenin özellikleri aşağıda anlatılmaktadır.

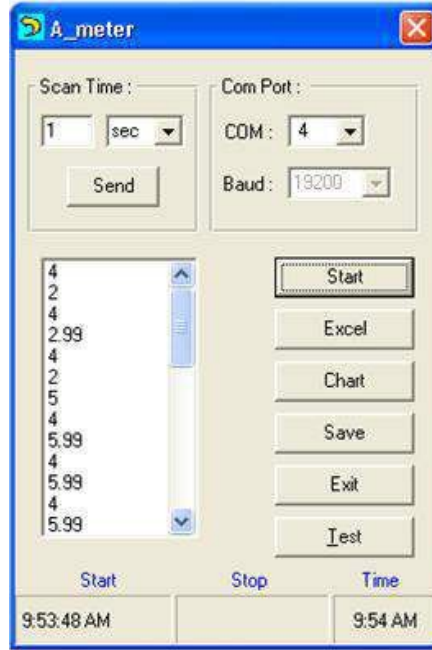
3.2.3.2 Seri portla akım ölçme düzeneği:

Bu devre, seri port ile bilgisayara bağlanabilmektedir. Akım(i), pil voltajı(v1), gözlemlenen direncin üzerindeki gerilim ve akım örnekleme hızı bu cihazın LCDsinde anlık olarak gözlemlenebilmektedir. Örnekleme hızı kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Düğümlerin görev çevrimi göz önüne alarak, analizler için akımın örnekleme hızı değiştirilebilir.

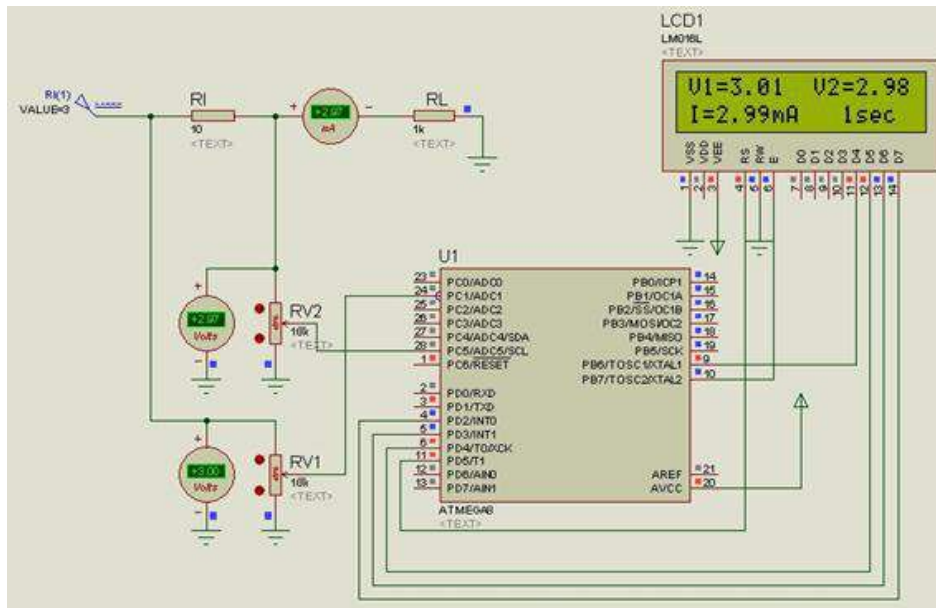
Deneyin başlangıcından sonuna kadar tüm akım değerleri kayıt edilmektedir ve bilgisayar tarafından da çizilir.

Bu devrede AVR Atmega 128 kullanılmıştır. AVR mikrodenetleyiciyi programlamak için "BASCOR AVR" kullanılmıştır. Bilgisayar yazılımı Visual Basic ile yapılmıştır.

Bu akımölçerin arayüz şekli, devre şeması, deney şekli aşağıda gösterilmektedir:



Şekil 33. Akım Ölçerin Kontrol Paneli



Şekil 34. Devre Şeması (Seri portla akım ölçer)



Şekil 35.MicaZ ünitesinin farklı durumlardaki akım tüketimini ölçme düzeneği

3.2.3.3 MicaZ pil gerilim seviyesini gözlemlemek:

MicaZ düğümlerin batarya gerilim seviyesinin fazla değişim göstermemesi, kablosuz algılayıcı ağlarda bir hedefi takip edebilmek gibi uygulamalarda önemli olduğundan normal çalışma sırasında batarya seviyesindeki değişimi ve bataryanın akım-gerilim düşmesi karakteristiğini analiz etmek için de bir deney tasarlanmıştır. MicaZ, pil gerilimini (V_{batt}) ölçmek için kullanılacak bir kesin iç gerilim referans noktasına sahiptir. ATmega128L üzerindeki 8 kanallı ADC pil gerilimini tam ölçek referans olarak kullandığından, ADC'nin tam ölçek gerilim değeri pil gerilimi değiştikçe değişir. Pil gerilimini izlemek için, gerilim referansı (bant aralığı referansı), pil gerilimine (V_{batt}) karşılık gelen ADC tam ölçek gerilim aralığına karar vermek için izlenir.

ADC okumalarından (ADC_Count) pil gerilimini hesaplamak için:

$$V_{batt} = V_{ref} \times ADC_FS / ADC_Count \quad (5)$$

V_{batt} pil gerilimini V_{ref} iç gerilim referansını (1.223 V), ADC_Count iç gerilim referansın ADC ölçümünden gelen veriyi ve ADC_FS sabit 1024 değerini göstermektedir.

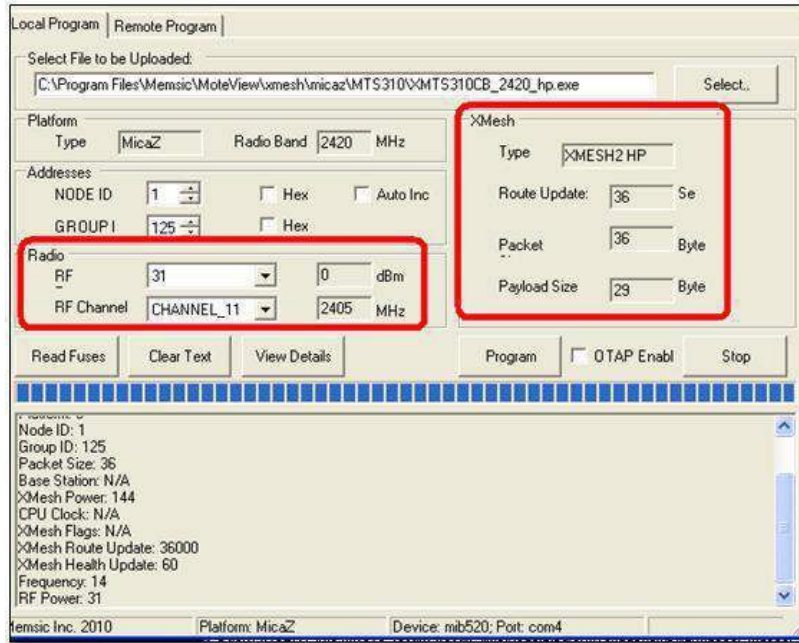
4 düğüm için pil gerilim seviyesi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

Nodes		
	Id	Name
<input type="checkbox"/>	00	Gateway
<input type="checkbox"/>	01	Node 1
<input type="checkbox"/>	04	Node 4
<input type="checkbox"/>	07	Node 7
<input type="checkbox"/>	09	Node 9

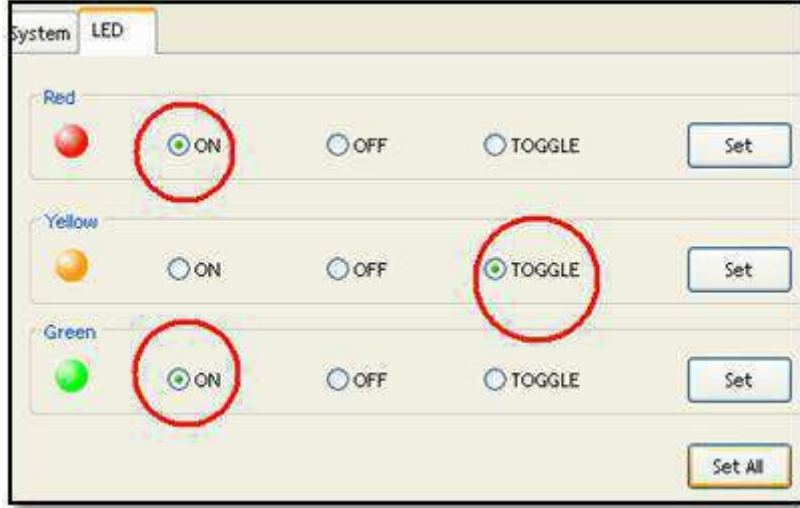
Node Data		
	Id	voltage
<input type="checkbox"/>	1	2.76 V
<input type="checkbox"/>	4	2.73 V
<input type="checkbox"/>	7	2.98 V
<input type="checkbox"/>	9	2.98 V

Şekil 36.Düğümün batarya gerilimini ölçen uygulamanın ekran görüntüsü

Pil karakteristiğini kontrol etmek için MoteView yazılımı kullanılmıştır. Tüm düğüm algılayıcıları aktiften, yüksek güç(HP) modunda Xmesh protokolü bir düğüme kurulur. Kırmızı ve yeşil LED'ler açık ve sarı LED ise periyodik olarak yanıp sönmektedir. Veri gönderim hızı, 0.3 saniye seçilmiştir. Deney süresi, yaklaşık 10 saat 30 dakikadır.



Şekil 37.Sistem yüksek güç tüketimi (sensör ve led'ler aktif, paket gönderimi yapıyor) moda çalıştığıında ölçülen değerleri gösteren ekran görüntüsü



Şekil 38.LEDlerin aktif ya da kapalı durumda olmasının seçildiği ekranın görüntüsü.

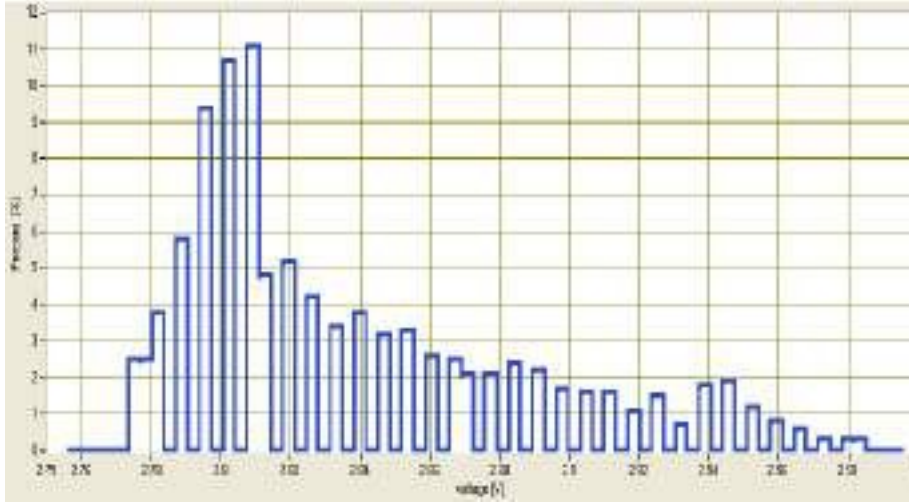


Şekil 39.Screenshot of data rate adjustment.

Sonuçlar, deney süresi boyunca gerilim seviyesinin değiştiğini göstermektedir. Bu deneyde, düğüm için 2 adet 1.5 V AA “Sakura” marka alkalin PİL güç kaynağı olarak seçilmiştir. Aşağıdaki şekillerde deney süresi boyunca gerilim düzeyindeki değişimi ve histogram gösterilmektedir:



Şekil 40.MicaZ düğümünün Yüksek Güç çalışma durumunda 10.5 saat boyunca çalışması esnasında batarya gerilim düzeyinde gözlenen değişimin zamana karşı grafiği



Şekil 41.MicaZ düğümünün Yüksek Güç çalışma durumunda 10.5 saat boyunca çalışması esnasında batarya gerilim düzeyinde gözlenen değişimin histogramı.

3.2.3.4 Paket yol atama protokolü ve ağdaki enerji tüketimi:

Her düğümdeki enerji tüketimini etkileyen esas etkenlerden biri, yol atama (diğer bir adıyla yönlendirme) protokolüdür. Ağ topolojisinin ve seçilen yönlendirme protokolün ağın kullanım amacına, gözlemlenecek alanın özelliklerine, ve enerji tüketimi beklentilerine uygun seçilmesi gerekir. Test düzeneğimizde iki ayrı protokol uygulanacak ve denenecektir. İlk protokol, “The Collection Tree Protocol” (CTP), ikincisi ise “A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach” (HEED) olarak bilinmektedir.

CTP, ağaç tabanlı (tree-based) bir toplama protokolüdür. Ağdaki bazı düğümler kendilerini ağaç kökü olarak tanıtmaktadır. Düğümler bu ağaç köklerine ağaçları

yönlendirme kümesi oluşturur. CTP çalışırken belirli bir köke paket yollamaz adres kullanmaz, onun yerine sonraki hopı seçerek dolaylı olarak kök oluşturur. Düğümler, yönlendirme gradyanı (değişim hızını) kullanarak köklere doğru bir rota oluşturur.

CTP protokolü, veri bağlantı katmanının dört koşulu sağladığını kabul eder:

- Verimli bir yerel yayın adresi sağlar.
- Tek yönlü gönderilen paketler için eş zamanlı alındılar (ACK mesajları) sağlar.
- Çoklu yüksek seviyeli protokolleri desteklemek için bir protokol gönderme alanı sağlar.
- Tek atlamalı kaynak (source) ve hedef (destination) alanına sahiptir.

CTP, bazı komşuların bağlantı kalitelerinin tahminlerine sahip olduğunu kabul etmiştir. Bunlar bir düğümün aldığı paketlerini başarıyla alınan tek yönlü paketleri yollayabilmesi için gereken gönderim sayısına ilişkin bir tahmin sağlar.

CTP, iletim güvenilirliğini artırmak için bazı mekanizmalara sahiptir, ama %100 iletim güvenilirliği garantisi vermez. Görece düşük trafik hızları için tasarlanmıştır. Bant genişliği kısıtlı sistemler için bu protokol yerine, çoklu küçük çerçeveleri (frame) veri bağlantı katmanına yerleştiren bir protokol daha verimli olabilir.

HEED, düğümün kalan enerjisi ve ikinci bir parametre, örneğin, komşularına göre yakınlık veya düğümün derecesi (komşu sayısı) ile küme başlarını periyodik olarak seçer. HEED, işlemi $O(1)$ yinelemede sonlandırır, düşük mesaj ekyükü (overhead) oluşturur ve ağ boyunca yeterince düzgün küme başları dağılımını sağlar. Düğüm yoğunluğunun ve küme içi ve kümeler arası gönderim mesafelerinin (range) uygun sınırları ile, HEED'in kümelenmiş ağların bağlantısını neredeyse kesinlikle garanti edebileceği kanıtlanmıştır.

Proje dönemindeki çalışmalarda KAA, CTP protokolü ile çalıştırılmıştır. Bir düğüm üzerinde algılayıcı kartı takılı olduğu ve olmadığı durumlarda akım değerleri ölçülmüştür. Aşağıda deneyin ayrıntıları verilmektedir:

3.2.3.5 MicaZ en düşük güç harcama deneyi:

Algılayıcı cihazların güç harcamasını en aza indirmek için aşağıdaki öğeler kontrol altında tutulmalıdır:

1. LED'lerin işlevi (işlevleri olmadığında kapalı olmaları)
2. Algılayıcıların işlemleri (gerektiği kadar algılama yapılması)
3. Radyonun işlemleri (paket gönderimi optimizasyonu)

4. Radyonun işlem zamanı aralığı (duty cycle optimizasyonu)
5. Paket boyutu
6. Göndericinin gücü

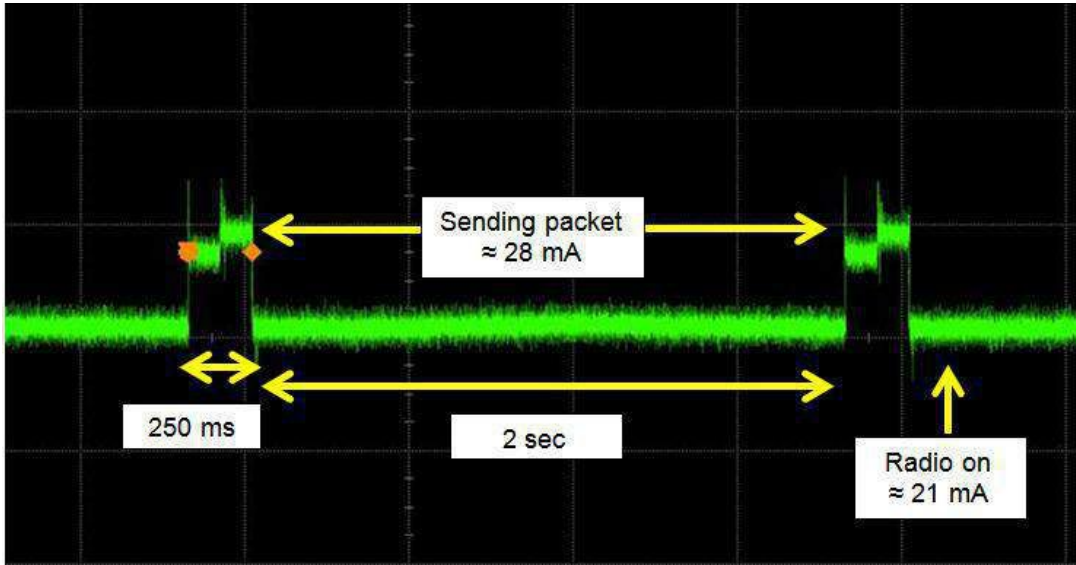
Bu çalışmada kod üzerinde sadece manyetik algılayıcı okunmuş (aktif olmuş), diğer algılayıcılar ise devre dışı bırakılmıştır. Manyetik algılayıcılar için bir saniyedeki okuma sayısı 1'e ayarlanmıştır. (Örnekleme sıklığı 1 Hz). Akım harcaması, radyo gönderimi -25 dB olduğu zaman en aza indirgenir (8.5 mA) Bu yüzden, bu çalışmada gönderim güç seviyesi olarak -25 dB seçilmiştir.

Akım tüketimini ölçmek için 10 Ω 'luk direnç MicaZ düğümüne seri olarak bağlanmıştır. Bu dirence düşen gerilim kaydedilmiştir.

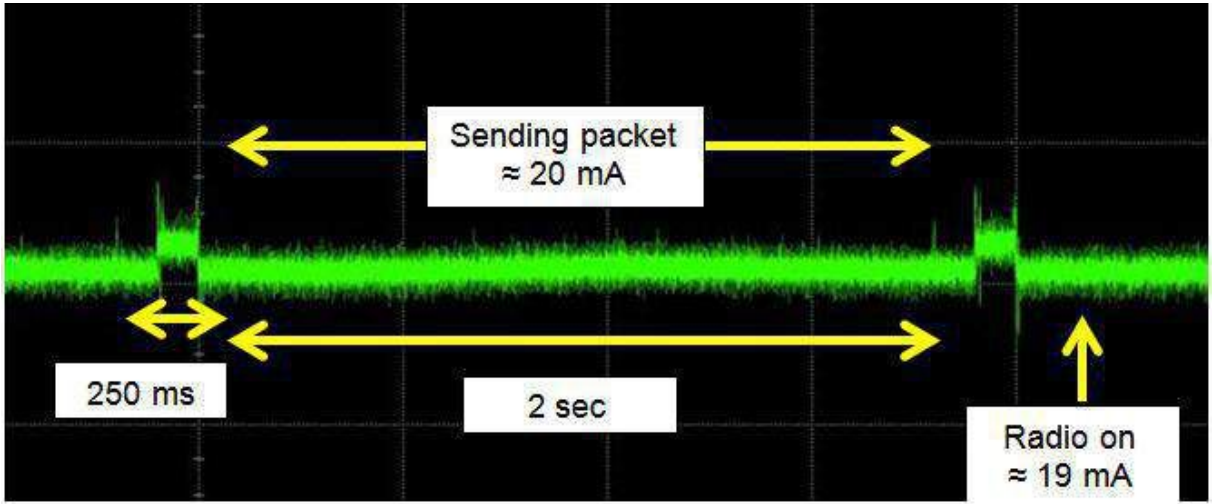
Bu çalışmada göz önünde bulundurulanan radyo işlem durumları aşağıdaki gibidir:

- Uyku zaman aralığı=0
- Görev çevrimi (Doluluk boşluk oranı)=10000 (%100 anlamına gelir)

Osiloskop ve akımölçer görüntüleri aşağıdaki gibidir:



Şekil 42.Algılayıcı (duyarga) kartı takılı iken MicaZ düğümünün çektiği akımın zamana göre değişimi. Radyo kartı açık durumda iken 21 mA akım çekilmektedir. Paket gönderimi esnasında bu akım 28 mA'ye çıkmaktadır.



Şekil 43. Algılayıcı (duyurga) kartı takılı değilken akımın zamana göre değişimi. Radyo kartı açık durumda iken 19 mA akım çekilmektedir. Paket gönderimi esnasında bu akım 20 mA'ye çıkmaktadır.

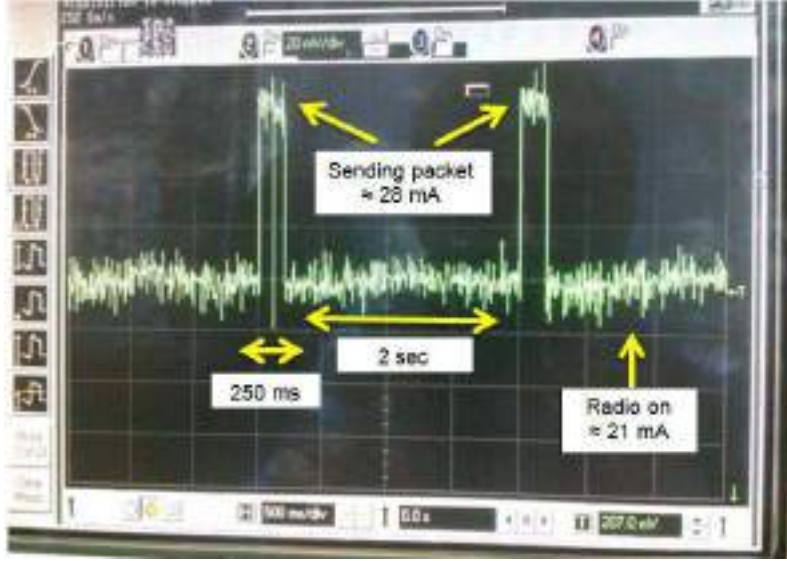
Algılayıcılardan gelen mesajın biçimi, aşağıdaki gibidir:

- Hedef adresi (2 bayt)
- Bağlantı kaynak adresi (2 bayt)
- Mesaj uzunluğu (1 bayt)
- Grup ID (1 bayt)
- Aktif mesajı işleyici türü (1 bayt)
- Veri (Payload) (en fazla 28 bayt)
- Düşüm kaynak ID (2 bayt)
- Örnek sayacı (2 bayt)

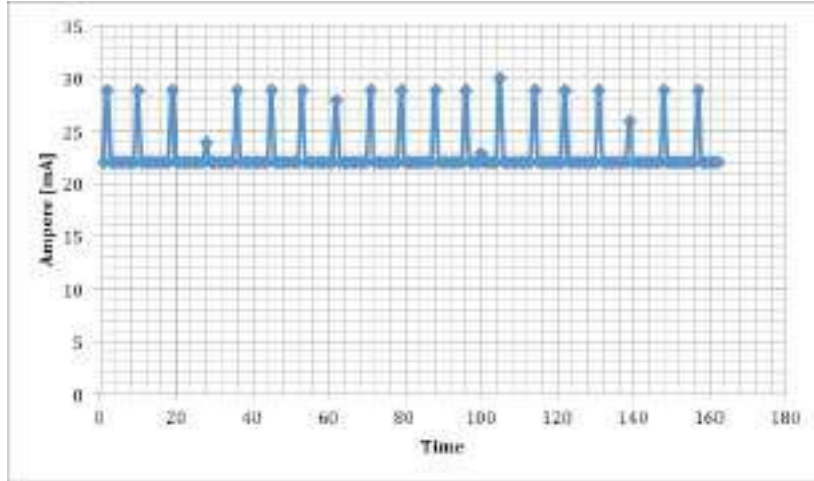
```

[File Edit View Terminal Help]
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 02 01 F4 01 F5 01 F4 01 F5 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 03 01 CA 01 CA 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 03 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 04 01 C9 01 C9 01 CA 01 CA 01 CA 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 04 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 05 01 CA 01 CA 01 C9 01 C9 01 CA 01 CA 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 05 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 06 01 CA 01 CA 01 C9 01 C9 01 CA 01 CA 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 06 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 07 01 CA 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 07 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 08 01 CA 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 08 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 09 01 CA 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 09 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 0A 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 0A 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 0B 01 CA 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 0B 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 0C 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 0C 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 0D 01 CA 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 0D 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 0E 01 CA 01 F4 01 F4 01 F4 01 F5 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 0E 01 F4 01 C8 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 0F 01 C9 01 F5 01 F4 01 F5 01 F4 01 F5 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F3
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 0F 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 10 01 CA 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 10 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 11 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 11 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 12 01 CA 01 C8 01 C8 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F3
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 12 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 13 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 57 00 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 13 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 16 00 14 01 CA 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 C9 01 CA 01 CA 57 00 01 F3
00 FF FF 00 16 1C 00 93 00 00 00 00 17 00 14 01 F4 01 F5 01 F4 01 F4 01 F4 01 F5 01 F4 01 F4 01 F4 00 39 01 F2
  
```

Şekil 44. MicaZ düğümünden baz istasyonuna gelen paket akışının ekran görüntüsü



Şekil 45.MicaZn'in çalışma deneyi sırasında osiloskop görüntüsü



Şekil 46.MicaZn'in çalışma deneyi sırasında akımölçer ile alınan kayıt

3.2.3.6 Kablosuz Algılayıcı (Duyarga) Ağının Enerji Gereksinimlerinin Belirlenmesi Çalışmaları

Bekleme modunda enerji tüketimini azaltmak için, düşük görev döngüsü ile çalışmada her düğüm periyodik uyku modu ve uyanık modu arasında geçiş yapar. Enerji tüketimi ile ilgili duty cycle etkisini göstermek için, bu çalışmada, bir dizi deney yapılmıştır. Bu deneylerde, WSN modülü olarak MicaZ kullanılmıştır.

MicaZ'nin farklı çalışma opsiyonları (standby, LED'lerin açılıp kapatılması, radyonun açılıp kapatılması vb.) ve farklı veri iletim periyotları için harcadığı enerji pil voltajı ve

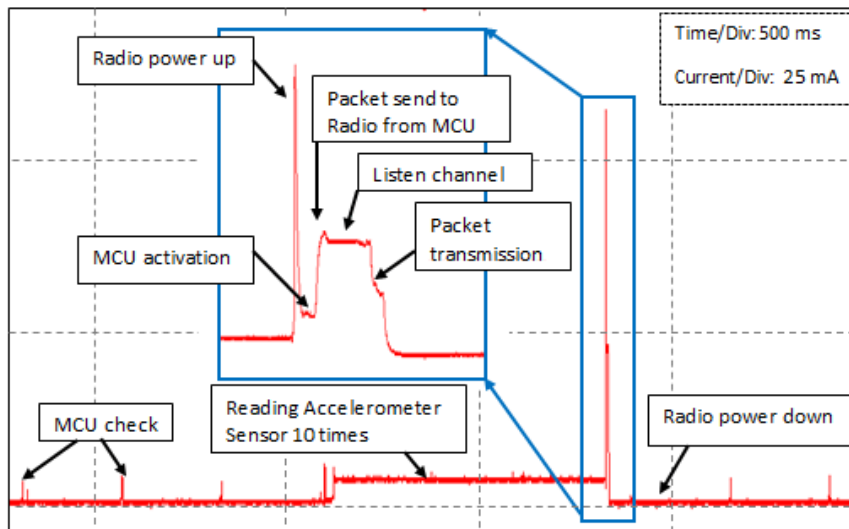
üzerindeki akım gözlenerek karakterize edilmiştir. Bu testlerin sonuçları aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Tablo 4. Micaz'nin çeşitli işlevler için ortalama akım çekimi (mA)

Radyo ünitesi		MCU		ivme sensorü	LEDler
TX: 0dBm	17.2	Active	7.8	~ 0.5	2.2 (her biri)
TX: -1dBm	16.2	Idle	3.4		
TX: -3dBm	15.5	Standby	0.024		
TX: -5dBm	13.8				
TX: -7dBm	12.5				
TX: -10dBm	11				
TX: -15dBm	10				
TX: -25dBm	8.5				
RX	19				

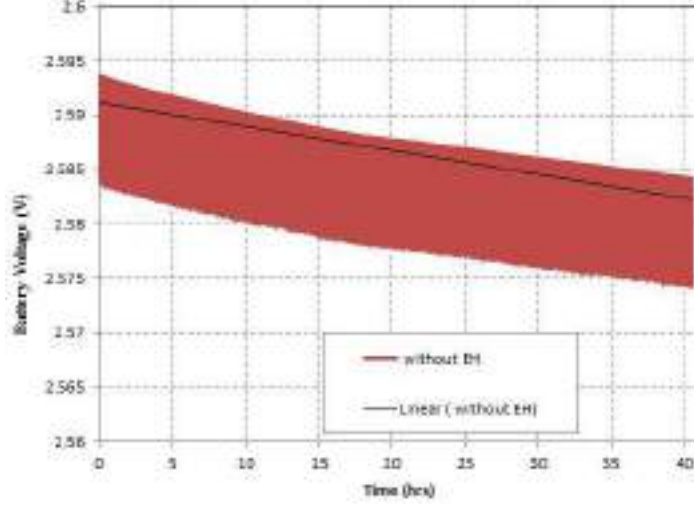
3.2.3.7 İvme sensörü ile örnek bir deneysel uygulama

MicaZ Mote her "T" saniyede 10 ivme değeri okumak, daha sonra okunan veriyi, düğüm kimliği ile birlikte yayınlamak üzere programlanmıştır. RF iletim gücü -25 dBm seçildiğinden minimum akım tüketimi, yani yaklaşık 8,5 mA gözlenmektedir (Bkz. Tablo 4). Veri gönderdikten sonra, alıcı-verici güç tutumluluğu konumuna geçer: ivme sensörü dışındaki tüm sensörler, ve tüm LED'ler devre dışı bırakılır. Bu çalışma esnasında 1 dakika içinde her bir paket iletimi akım değişimi, Şekil 47 'de gösterilmiştir. Bu senaryonun yardımı ile ortalama güç tüketimi tahmin edilmiştir. Bu işletme senaryosunda, sensör okuma işlemi ve bekleme modunun, radyo güç iletimine baskın bir katkıya sahip olduğu görülmektedir.

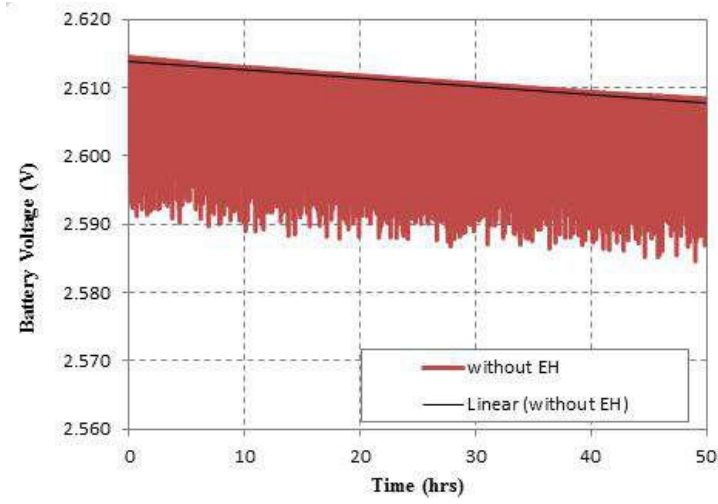


Şekil 47. İvme sensörü ile yapılan uygulama senaryosunda deneysel olarak elde edilen MicaZ akım çekiminin zamana göre değişimi.

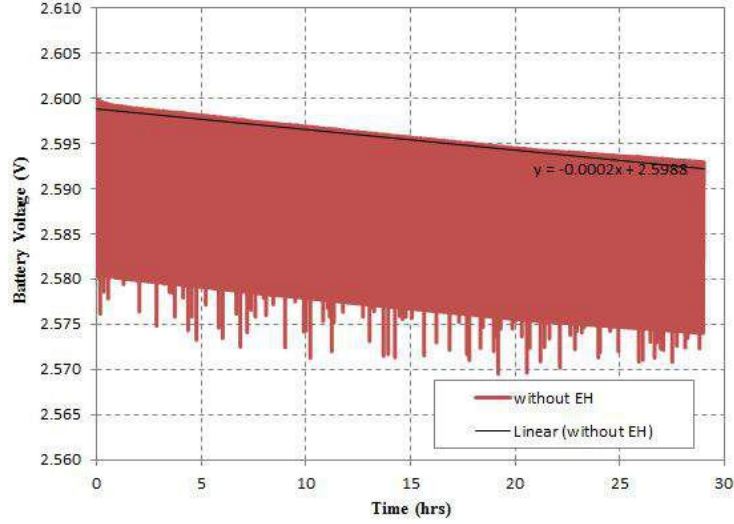
Bu uygulama, görev döngüsünün farklı değerleri için standart bir pil ile çalışmaya göre elektromanyetik enerji üretici ile çalışmada ağ ömrünün ne derece arttığını görmek için kullanıldı. Bu karşılaştırmanın sonuçları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. 1 saniye, 20 saniye, 1 dakika işlem süreleri için MicaZ Mote operasyonunda batarya voltajı seviyesi izlenmiştir.



Şekil 48.1 saniye işlem süresi için MicaZ Mote operasyonda pil voltajının zamanla değişimi



Şekil 49.20 saniye işlem süresi için MicaZ Mote operasyonda pil voltajının zamanla değişimi



Şekil 50.1 dakika işlem süresi için MicaZ Mote operasyonda pil voltajının zamanla değişimi

Sonuçlar görev döngüsü değiştirildiğinde enerji tüketimindeki değişimi göz önüne sermektedir.

MicaZ mote enerji tüketim tahmini akım değişimleri grafiği (Şekil 47) izlenmesi ve cihazın çalışma süresi ölçülerek, her bileşenin enerji tüketimi tahmin edilebilir. Bu değerler ölçülmüş ve her bir bileşenin enerji tüketimi, Tablo 5 de hesaplanmıştır.

Tablo 5. MicaZ enerji tüketimi (Supply @ 2.6V)

Event	Current draw	Duration	Energy Consumption
MCU check	0.8 mA	300×760 µs	474 µJ
Reading Acc. Sen. (10x)	3.7 mA	670 ms	6.4 mJ
Radio power up	~60 mA	590 µs	92 µJ
MCU activation	7.8 mA	760 µs	15.41 µJ
Packet send from MCU to Radio	23.8 mA	840 µs	51.97 µJ
Listen channel	22 mA	7.16 ms	410 µJ
Radio calibration & Packet transmission	13.2 mA	960 µsec	32.94 µJ
Standby time	24 µA	59.091 sec	3.687 mJ
Total	-	60 second	11.162 mJ (186.04 µW power)

4 BULGULAR

Bu bölümde proje kapsamında kendi enerjisini üreten kablosuz duyarga ağları ile ilgili çalışmalar özetlenecektir. Çalışmalar, WSN'lerde elektromanyetik enerji üretici kullanımı, piezoelektrik enerji üretici kullanımı olarak iki deneysel çalışma ve kendi enerjisini üreten WSN optimizasyonu kuramsal çalışması olarak üç ana başlıkta toplanmıştır.

4.1 Kuramsal çalışmalar

4.1.1 Enerji Hasatlı Çoklu Girdili Tek Çıktılı Kanalda Geribildirim İşaretleri için Ayrılan Gücün Eniyilenmesi

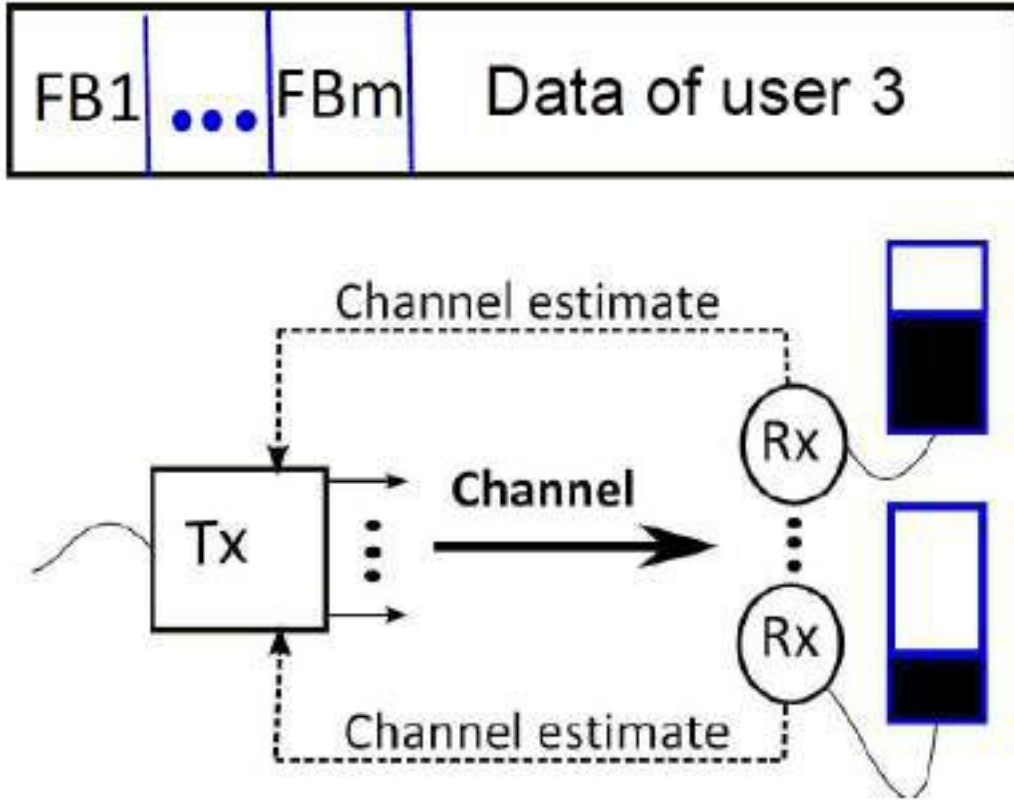
Bu çalışmada, M adet antenli bir alıcı-vericiye sahip bir merkez (baz istasyonu) ve birer antenli alıcı-vericilere sahip kullanıcılardan oluşan bir Çoklu Girdili Tek Çıktılı (ÇGTÇ) Bağlantı (ing. MISO Link) incelenmektedir. ÇGTÇ kanalda, eğer merkezdeki gönderici, alıcıların her birinin kanal durumlarının doğru bilgisine sahipse, aynı kanal kapasitesine ulaşabilmek için bilginin sahip olunmadığı durumda gereken gücün $1/M$ kadarı gerekmektedir. Bu bilgi pratikte, kullanıcıların geribildirim ile gönderecekleri kanal bilgisi ile elde edilecektir. Kullanıcıların kanal durumlarını kaç bit ile kodlayarak gönderdikleri bu bilginin doğruluk hassasiyetini etkileyecektir. Kanal bilgisinin daha doğru bilinmesi kullanıcının merkezden alabileceği veri hızını artıracığından, her bir çerçeve (frame) içerisinde geribildirim için ayrılan bit sayısı (bununla ilgili olarak ayrılan zaman ve güç), aynı çerçeve içerisinde kullanıcının merkezden alabileceği bit sayısını etkileyecektir (geribildirim hassas olursa kodlama daha başarılı olacak ve elde edilecek veri hızı artacaktır.)

Ele alınan problem formülasyonunda, merkez düğüm güvenilir bir enerji kaynağına sahip olduğundan, enerji sıkıntısı yoktur. Kullanıcılar ise, gereken enerjiyi çevrelerinden harmanlamakta oldukları için, kullanıcıların geribildirim için kullandıkları enerjiyi dikkatli harcamaları gerekmektedir. Örneğin, bir çerçevede geribildirim için harcanan enerji ve bit miktarı, sonraki çerçevelerde ayrılacak miktarı azaltacaktır- dolayısıyla, kısıtlı enerji hasat koşulları altında, hangi çerçevelerde geribildirim verileceği ve bu geribildirim için ne kadar kaynak aktarılacağı kararı önemlidir.

Projemizin uluslararası ortaklarından D. Gündüz ve D. Gesbert, yakın zamanda yayınlanan bir bildirimlerinde [73] bu problemin tek kullanıcı versiyonunu ele almış ve geribildirim için atanacak kaynağı zamana göre optimize eden offline (çevrimdışı,

yani enerji hasatı ve kanal kazancı (kanal durumu) süreçlerinin önceden bilindiği bir çözüm sunmuşlardır.

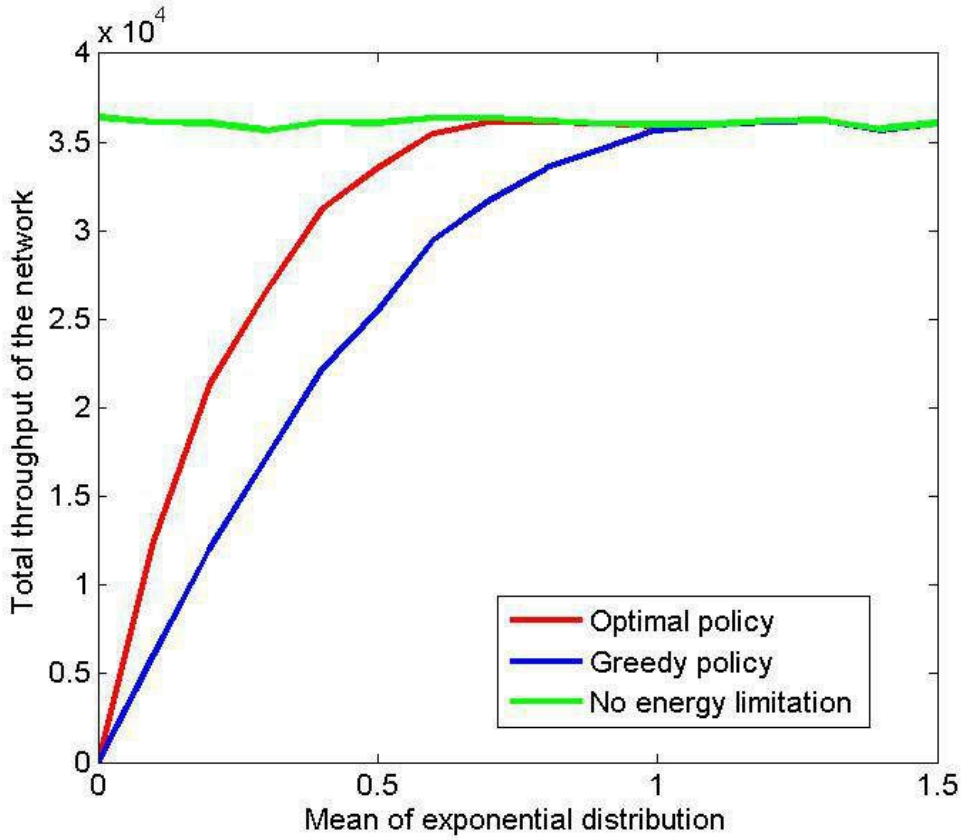
Bizim çalışmamız, [74]'deki formülasyonu çok kullanıcı (m adet kullanıcı) duruma genişletmektedir. Merkez, kullanıcılardan geribildirim alarak onların kanal durumu bilgilerini öğrendikten sonra her çerçevede k adet kullanıcıya seçerek onlara ortak bir yayın kodu aracılığıyla veri gönderir. Her çerçevede, öncelikle her kullanıcıya dilerse kanal bilgisini göndermesi için ayrılmış zaman dilimleri vardır. Öncelikle $k=1$ durumunu ele alalım. Çerçevenin geribildirim bölümünde tüm m kullanıcılar arasında geribildirim göndermeyi seçenlerin kanal bilgileri toplandıktan sonra, merkez en iyi kanal durumuna sahip kullanıcıyı seçer. (Merkezin amacı bu yayın kanalındaki anlık veri akış hızını enyükseltmektir.) [74]'deki modele olduğu gibi bu çalışmada da çevrimdışı, yani her kullanıcının gelecekteki kanal durumu ve harmanlanacak enerji miktarını bildiği varsayımı yapılmaktadır.



Şekil 51.Merkezin güvenilir bir enerji kaynağına sahip olduğu ve kullanıcıların geri besleme için gereken enerjiyi çevrelerinden elde ettikleri çokkullanıcıli haberleşme bağlantısının şeması

Bu çalışmanın ilk kısmında geribildirim paketlerinin uzunluğunun (geribildirim için gönderilen bit sayısı) sabit olduğu ve kullanıcıların sadece geribildirim yollayıp

yollamayacaklarına karar verdikleri kabul edilmiştir. Simetri gereği, her kullanıcının kendi toplam veri akışını enyükseltecek politikası aynıdır. Problemimizin amacı, bu politikayı bulmaktır. Bunun için ilk olarak, aday vektörü tanımlanmaktadır: her kanal durumunda, hangi kullanıcıların geribildirim göndereceklerini gösteren bir vektördür. Sonra üstünlük (majorization) tanımını kullanarak eğer bir politikanın aday vektörü diğer tüm politikaların aday vektörlerinden üstün ise bu politikanın eniyi politika olduğu kanıtlanmaktadır. Son olarak önerilen politikanın performansı açgözlü politikanınki ile kıyaslanmakta ve sonuçlar Şekil 52’de gösterilmektedir. Benzetim sonuçları Ek 5’teki bildiri taslağında ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.



Şekil 52.Eniyi politika (kırmızı eğri) ve açgözlü politikaların (mavi) ortalama veri gönderimlerinin enerji kısıtı bulunmadığı durumda elde edilebilecek toplam veri akışı (yeşil) üst sınırı ile karşılaştırılması. Yatay eksen, zaman dilimi başına gelen ortalama enerji değeridir.

İkinci kısımda, kullanıcıların geribeslemede kaç bit yollayacağı üzerine karar verdiği durum incelenmektedir. Bir kullanıcının merkez tarafından seçilme olasılığı o kullanıcının politikasına bağlı olduğundan yinelemeli (recursive) bir politika elde edilmektedir. İlk adımda tüm kanal durumlarının eşit olasılıkla gerçekleşebileceği kabul edilmektedir. Sonra bu değerlere göre, önerilen politika her kanal durumu için eniyi bit sayısı atamasını (allocation) bulmaktadır. Daha sonra seçim olasılıkları

güncellenmektedir. Bu süreç, seçim olasılıkları nihai bir değere yakınsayana kadar devam eder.

4.1.1.1 Değişken Geribildirim Uzunluğu

İkinci kısımda da, ilk kısmındaki problemi genelleştirerek geribildirim paketlerinin uzunluğunun değişken olabildiği varsayılmıştır.

Kullanıcıların problem süresi boyunca enerji hasadı yapmadığını eşit miktarda enerji ile başladığını varsayarsak, kullanıcıların beklenen kazanımları aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\max_{b_i} E(R_{tot}) = \max_{b_i} \sum_{i=1}^N R(h_i, b_i) P_C(R(h_i, b_i)) P(h_i) \quad (6)$$

öyle ki

$$TE_b \sum_{i=1}^N b_i P(h_i) = B \times E_b \quad (7)$$

Yukarıdaki denklemler için,

$R(h_i, b_i)$ ifadesi, kanal kazancı h_i ve gönderilen geribildirim biti sayısı b_i iken, kanalın yaklaşık iletim hızına,

N sayısı, kanal kazancının olası değer sayısına,

T zaman dilimi sayısına,

B bir kullanıcının başlangıç enerjisiyle gönderebileceği toplam bit sayısına,

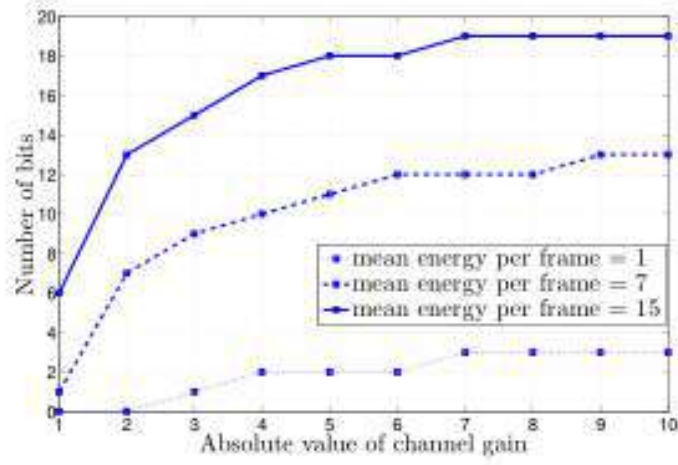
$P_C(R(h_i, b_i))$ değeri $R(h_i, b_i)$ iletim hızının seçilme olasılığına,

$P(h_i)$ kanal kazancının h_i değerini alma olasılığına,

ve E_b ifadesi de 1 bit gönderebilmek için harcanan enerji sabitine karşılık gelmektedir.

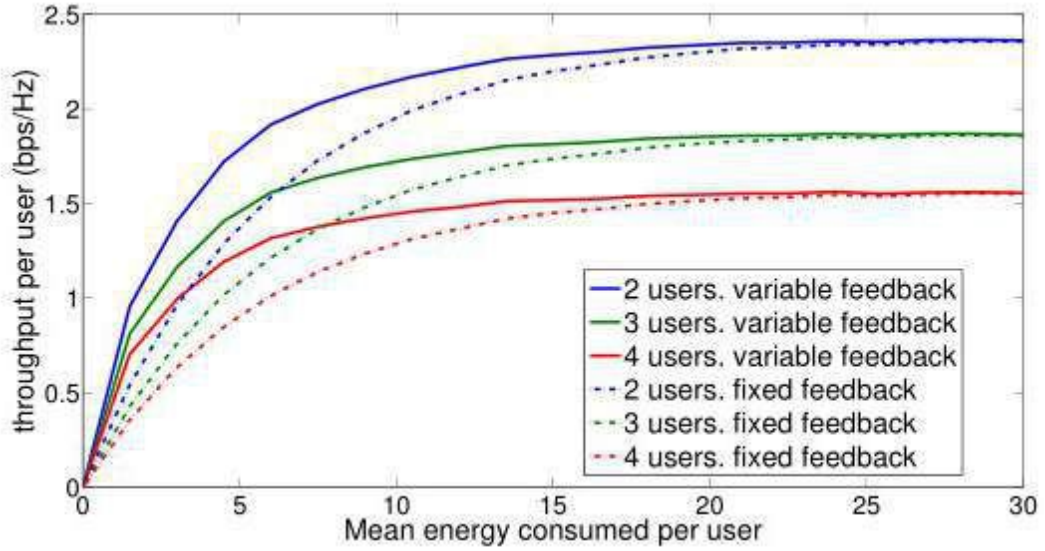
Bunun yanında da, eniyi politikada iletim hızı olan $R(h_i, b_i)$ ifadesinin kanal kazancının büyüklüğüne göre artan bir fonksiyonu olduğu gösterilebilir. Bunun sonucunda ise, eniyi politaka cebirsel olarak bulunabilir.

Şekil 53'te ise, zaman aralığı başına düşen ortalama enerji miktarları sırasıyla 1,7 ve 15 olurken eniyi politakanın 10 anten için bit dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 53.Eniyi politika için bit dağılımlarının zaman aralığı başına düşen ortalama enerji miktarları 1,7 ve 15 iken karşılaştırılması.

Sonraki benzetimde de, değişken uzunluklu geribildirim durumundaki performans sabit uzunluklu geribildirim durumundaki performans ile karşılaştırılmıştır ve değişken geribildirim durumunun sabit uzunluklu geribildirim durumuna göre belirgin bir biçimde daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür.

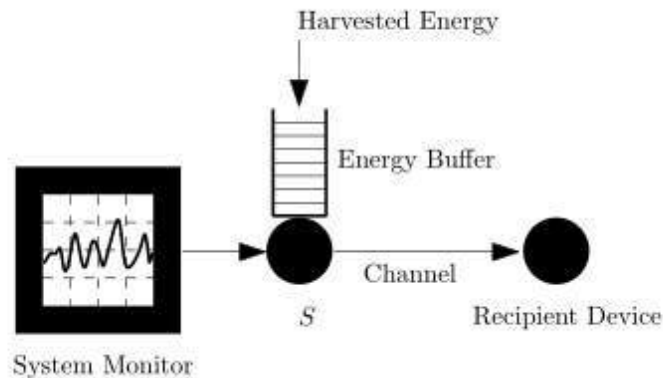


Şekil 54.2,3 ve 4 sayıda kullanıcı için değişken geribildirim (variable feedback) ve sabit geribildirim (fixed feedback) politikalarının kullanıcı başına düşen ortalama enerji miktarına karşılık kullanıcı başına düşen ortalama veri akışına göre karşılaştırılması.

4.1.2 Bilgi tazeliği için enerji hasatçı göndermeçlerin eniyilemesi

Bu çalışmada, gözlem yapan bir ağ düğümüne durum güncellemeleri gönderen bir göndermeç kaynağın (örneğin bir almaç düğümü) bu güncellemerin tazeliğini koruma amacıyla gönderim zamanlası yapmasının yöntemleri ve etkileri incelenmiştir. Göndermeç kaynak için enerji erişilebilirliğinin zamanla değişiyor olması, yapılan güncellemelerde de gönderim sıklığını sınırlayan bir etkidir. Bu çalışma için göndermeçin başarımı bilgi yaşı üzerinden yapılmıştır. Bilginin yaşı ise, başarılı bir şekilde gönderilmiş olan en yeni durum güncellemesinden itibaren geçen süre olarak ifade edilebilir. Gösterilebilir ki, çevrimdışı bir çözüm ortalama bilgi yaşını en küçültürken aynı zamanda gözlemlenen en büyük bilgi yaşını da en küçültür. Çevrimiçi problem ise, çevrimdışı problemin aksine enerji geliş sürecinin, güncelleme gönderim kararı verilmeden önce bilinmemesi esasına dayanarak dinamik programlama yöntemiyle kurgulanmıştır. Çevrimiçi problem için aynı zamanda çevrimdışı problemin çözümünden yararlanan Dengeli Güncelleme (BU) politikası önerilmiş ve bu çevrimiçi politika güncelleme için yeterli olduğu her an güncelleme yapan Açgözlü (Greedy) çevrimiçi politika ile karşılaştırıldığında, BU politikasının bu naif politikaya göre oldukça başarılı olduğu sayısal olarak gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada ele alınan sistem, temel olarak Şekil 55'teki gibi bir sistemdir. Bu sistem de, enerji hasatçı ve başka bir sistem için gözlem verileri toplayan bir göndermeçin gözlemlenen verileri durum güncellemeleri olarak alıcı bir cihaza bir haberleşme kanalı üzerinden gönderdiği bir sistemdir. Çevrimdışı problem için, enerji hasatçı cihazı hasat edeceği enerji miktarlarının önceden bilindiği varsayılırken, çevrimiçi problemde yalnızca güncelleme kararı verileceği andaki enerji dolmacı (batarya) seviyesi bilindiği varsayılmıştır.



Şekil 55.Hasat enerjisi (Harvested Energy), enerji dolmacı (Energy Buffer), sistem gözlemcisi (System Monitor), göndermeç cihaz (S), haberleşme kanalı (channel) ve alıcı cihazı (Recipient Device) gösteren sistem gösterimi.

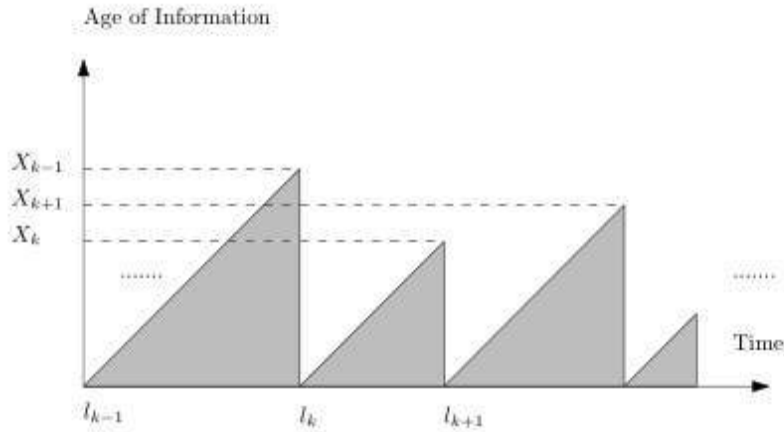
4.1.2.1 Çevrimdışı Problem

Problem Tanımı:

Çevrimdışı problem, 0 ve T olarak referans alınan zamanlar arasındaki sınırlı süre için aşağıdaki ifade ile tanımlanmaktadır. Genel olarak ise, burada incelen çevrimdışı problem gönderim sıklıkları yukarıdan sınırlanırken göndermeç kaynağın sağladığı ortalama bilgi yaşını enküçülten gönderim zamanlamasını bulmaktır.

$$\begin{aligned} \min. & \frac{1}{T} \int_0^T t - l_{N_U(t)} dt. \\ \text{s.t.} & N_U(t) \leq \hat{N}_U(t) \end{aligned} \quad (8)$$

Yukarıdaki ifadedeki $N_U(t)$ sayma süreci göndermeç kaynağın t anına kadar göndermiş olduğu toplam güncelleme sayısını gösterirken $\hat{N}_U(t)$ sayma süreci $N_U(t)$ sayma sürecinin enerji erişilebilirliği sebebiyle t anına kadar alabileceği en yüksek rakamı ifade eder. Bunların yanında da $L_{N_U(t)}$ ifadesi t anına kadar gönderilmiş olan en yeni durum güncellemesinin gönderim zamanına karşılık gelir.



Şekil 56. Bilgi yaşı için (Age of Information) olan değişimin zamana (Time) karşı değişimine yönelik örnek.

Çevrimdışı Çözüm:

Çevrimdışı problem için bu çalışmada bulunan çözümler en iyi çözümde gönderim sıklığının zamanla azalmaması ve aynı zamanda mümkün olan en fazla gönderim yapılması gerektiği gözlemlerine dayanmaktadır. Bu gözlemler de bu çalışma içinde kurumsal olarak ispatlanmıştır.

Çevrimdışı çözüm için κ ve $\kappa + 1$ gönderimleri arasında beklenen süreyi X_{κ}^* olarak tanımlarsak bu süreyi aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$X_{\kappa}^* = \max_{v \in (l_{\kappa}, T)} \left(\frac{v - l_{\kappa}}{\hat{N}_U(v) + 1 - \kappa} \right) \quad (9)$$

Yukarıdaki ifadede de, l_{κ} terimi κ güncellemesinin gönderildiği zamana karşılık gelmektedir.

4.1.2.2 Çevrimiçi Problem

Problem Tanımı:

Çevrimiçi problem için, dinamik programlama yöntemi kullanılarak ayrık zamanlı bir sistem kurulumu üzerinden bir tanımlama yapılmıştır ve ilgili dinamik programla denklemi aşağıdaki gibidir.

$$J(x(t), t) = \min_{\mu(t) \in \{0,1\}} E[c(x(t), \mu(t)) + J(\phi(x(t), \mu(t)), t + t_s) | \theta(t)] \quad (10)$$

Yukarıdaki denklem için, t karar verilen zamanı, $x(t)$ sistem durumunu, $J(x(t), t)$ sistem durumu için en düşük ortama toplam bedel fonksiyonunu, $\mu(t)$ sistem durumda verilen güncelleme kararını, $c(x(t), \mu(t))$ sistem durumda verilen kararın bedelini, $\phi(x(t), \mu(t))$ kararın sistemi götürdüğü yeni durumu, $\theta(t)$ sistemin geçmişini ve t_s ise kararın geçerli olduğu zaman süresini ifade etmektedir.

Geçiş bedeli için olan beklenen değer, güncelleme gönderimi yapıldığı takdirde bu güncelleme paketinin başarılı bir şekilde alınma olasılığının p sabiti olduğu varsayılırsa aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$E[c(x(t), \mu(t))] = E[d(t)](1 - \mu(t)p)t_s + \frac{1}{2}t_s^2 \quad (11)$$

Bu denklem için, $c(x(t), \mu(t))$ ifadesi bilginin alıcı tarafından gözlemlenen çevrimiçi yaşının t anındaki değerini gösterirken bu değer göndermeç tarafından bilinen beklenen değerinin zaman ile değişimi aşağıdaki gibidir.

$$E[d(t + t_s)] = E[d(t)](1 - \mu(t)p) + t_s \quad (12)$$

Formülasyonun neticesinde de güncelleme kararlarının sadece t anındaki batarya seviyesi $e(t)$ ve $E[d(t)]$ beklenen değerine bağlı olan $x(t) = (e(t), E[d(t)])$ sistem durumuna göre belirlenebildiği görülmüştür.

Çevrimiçi Çözüm:

Çevrimiçi çözüm için, güncelleme kararının geçerli olduğu zaman dilimi uzunluğu t_s değerinin sıfıra gitmesi durumunda beklenen bilgi yaşının batarya seviyeye bağlı bir eşik değer üzerinde olduğunda güncelleme kararının verilmesinin eniyi çözümü oluşturduğu bu çalışma çerçevesinde ispatlanmıştır. Bu çözüm ise, aşağıdaki gibi genel olarak ifade edilebilir:

$$\mu^*(t) = \mathbb{1}_{(e(t) \geq 1) \cap (E[d(t)] \geq d^*(t))} \quad (13)$$

Yukarıdaki ifadede de, $d(t)$ beklenen bilgi yaşı için eniyi eşik değeri ifade etmektedir.

Eşik değer için, farklı fonksiyonlar seçilerek eniyi altı politikalar bulunabilir. Örneğin, bu değer her zaman sıfır olarak seçildiği güncelleme politikasını "Açgözlü (Greedy)" politika olarak tanımlayabiliriz.

Bunun yanında da, çevrimdışı çözümün yapısını örnek alan Dengeli Güncelleme (BU) politikası bu çalışma çerçevesinde önerilmiştir. Bu politika için, karar fonksiyonu ve kullandığı eşik değer fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilmektedir.

$$\mu(t)^{BU} = \mathbb{1}_{(e(t) \geq 1) \cap (E[d(t)] \geq \bar{X}(t))} \quad (14)$$

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{p} \left(\frac{T-t}{e(t) + (T-t)(\bar{P}_h - P_{ON})} \right) \quad (15)$$

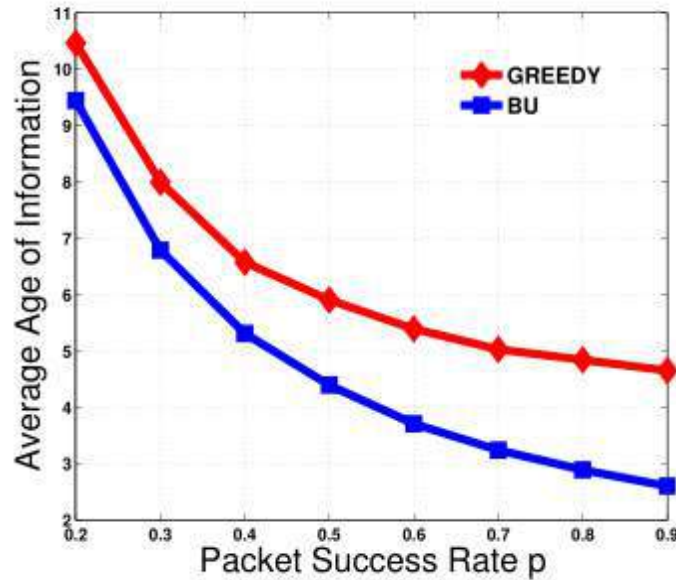
Yukarıdaki denklem için, \bar{P}_h değeri enerji hasadı ile gelen ortama gücü temsil ederken P_{ON} göndermeci açık olduğu sürece tükettiği güç değerini göstermektedir.

4.1.2.3 Sayısal İnceleme

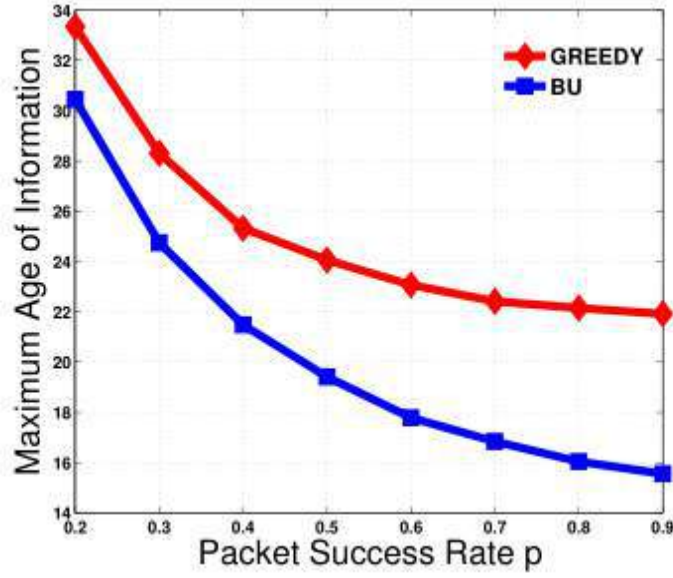
Dengeli Güncelleme (BU) ve Açgözlü (Greedy) güncelleme politikaları sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Bu sayısal deneyde, 100 birim zaman dilimi için enerji geliş süreci ve paket düşme durumlarının 10^4 farklı gerçekleştirilmesi üzerinden ortalama alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Enerji geliş ise Bernoulli geliş süreci olarak varsayılmıştır.

Yapılan deney ise, önerilen Dengeli Güncelleme (BU) politikasının Şekil 57-60'ta görüldüğü gibi ortama ve en yüksek bilgi yaşı ölçümleri açısından bilginin yaşına kullanmayan naif bir politika olan Açgözlü (Greedy) politikaya göre oldukça düşürmüştür.

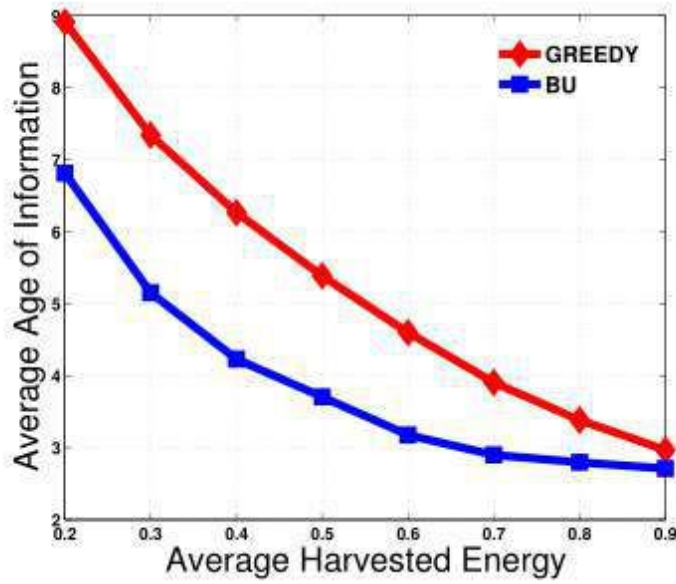
Aynı zamanda da, Dengeli Güncelleme (BU) politikası $p=1$ durumu için çevrimdışı problemin eniyi çözümü ile karşılaştırılmış ve çevrimdışı çözüme çok yakın performans sergilediği görülmüştür (Şekil 61).



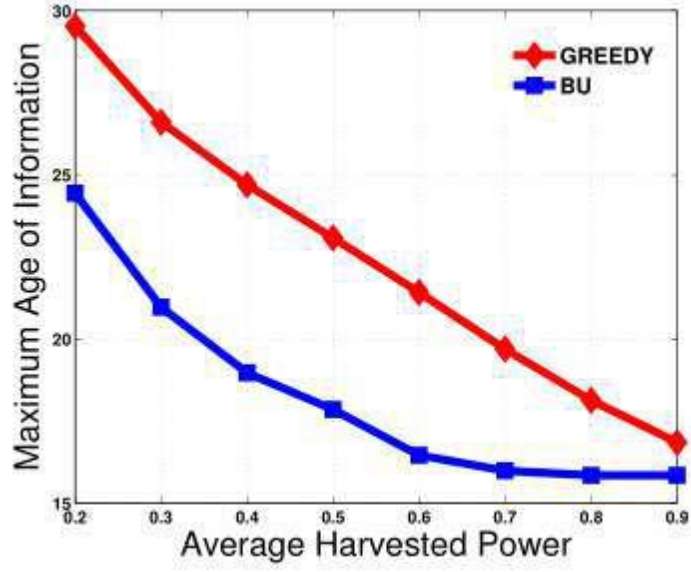
Şekil 57. Dengeli Güncelleme (BU) ve Açgözlü (Greedy) güncelleme politikalarının, paket başarımları (Packet Success Rate) p ye karşılık ortalama bilgi yaşı (Average Age of Information) üzerinden karşılaştırılması.



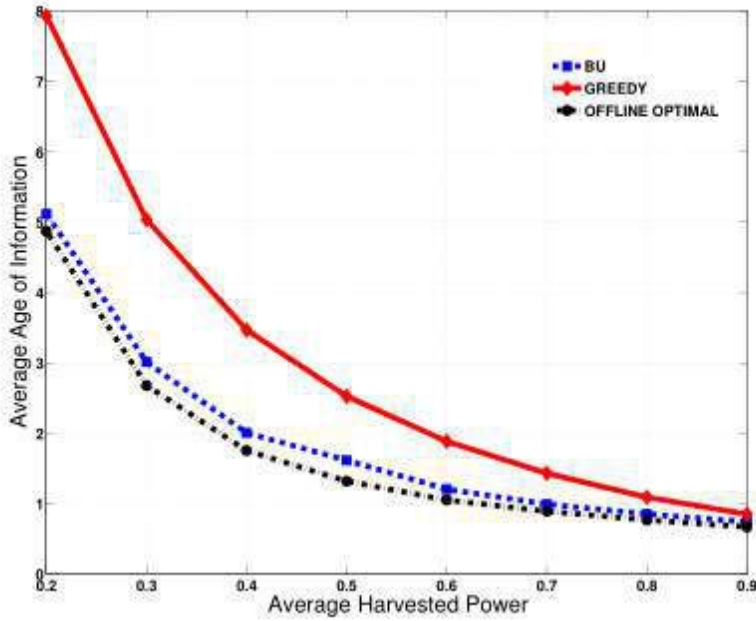
Şekil 58. Dengeli Güncelleme (BU) ve Açgözlü (Greedy) güncelleme politikalarının, paket başarımlı oranı (Packet Success Rate) p ye karşılık maksimum bilgi yaşı (Maximum Age of Information) üzerinden karşılaştırılması.



Şekil 59. Dengeli Güncelleme (BU) ve Açgözlü (Greedy) güncelleme politikalarının, paket başarımlı oranı (Packet Success Rate) $p=0.6$ iken ortalama hasat enerjisine karşılık ortalama bilgi yaşı (Average Age of Information) üzerinden karşılaştırılması.



Şekil 60. Dengeli Güncelleme (BU) ve Açgözlü (Greedy) güncelleme politikalarının, paket başarımları oranı (Packet Success Rate) $p=0.6$ iken ortalama hasat enerjisine karşılık maksimum bilgi yaşı (Maximum Age of Information) üzerinden karşılaştırılması.



Şekil 61. Çevrimdışı eniyi çözüm (OFFLINE OPTIMAL) Dengeli Güncelleme (BU) ve Açgözlü (GREEDY) güncelleme politikalarının, paket başarımları oranı (Packet Success Rate) $p=1$ iken ortalama hasat enerjisine karşılık ortalama bilgi yaşı (Average Age of Information) üzerinden karşılaştırılması.

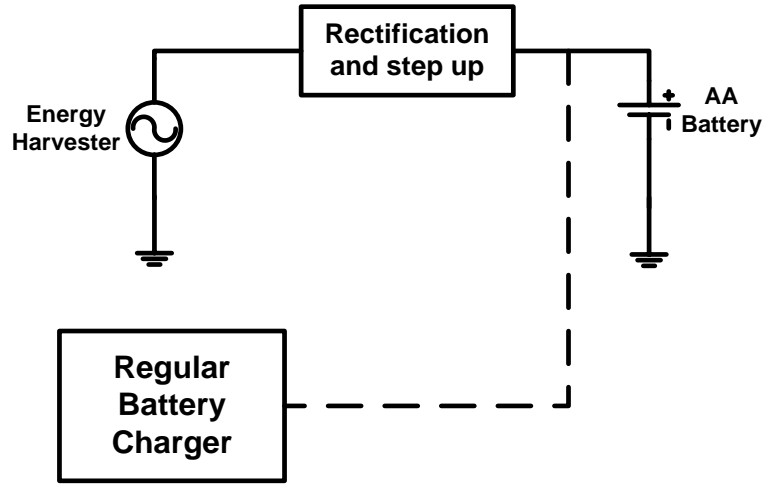
4.2 Kablosuz duyurga ağlarında elektromanyetik enerji üretici kullanımı

4.2.1 Elektromanyetik enerji üretici ile pillerin şarj edilmesi

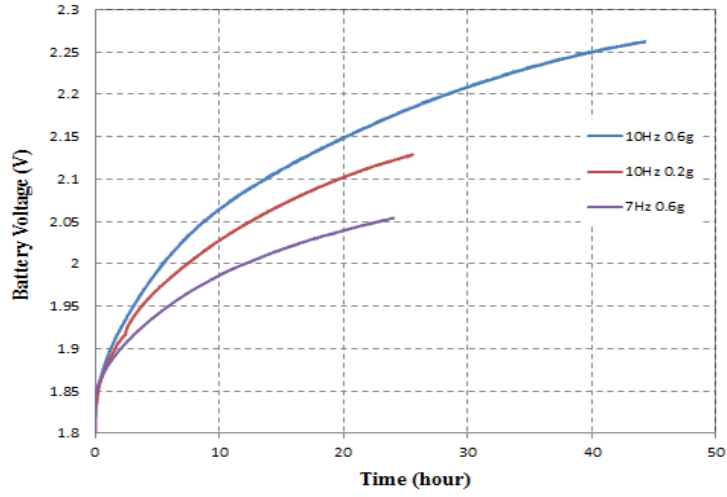
Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda 10 Hz civarında frekanslar için optimum enerji üretici sistemi elektromanyetik enerji üretici Prototip 1 ve tasarlanan pasif doğrultucu elektronik devresi seçilmiştir. Bir sonraki adımda optimizasyonu yapılan enerji üretici sistemi kullanarak şarj edilebilir pillerin şarj edilmesi sağlanmıştır. Tablo 6 bu amaç için kullanılan EM enerji üretici sisteminin (Prototip 1 + doğrultucu elektronik) özelliklerini göstermektedir. Şekil 62'de kullanılan elektromanyetik enerji üretici sisteminin şematik çizimi görülmektedir. Üreticinin içindeki mıknatısın hareketiyle bobin üzerinde bir AC gerilim oluşmakta ve bu gerilim PCB üzerindeki doğrultucu devre ile DC'ye çevrilmektedir. Şarjlı pillerin şarj edilmesi için doğrultucu devrenin çıkışı doğrudan 2 adet seri bağlı pile bağlanmış, ve pillerin üzerindeki voltajın zamanla değişimi gözlenmiştir. Şekil 63'te çeşitli titreşim koşullarında pillerin şarj profilleri görülmektedir. Bu düzenerle, 10 Hz frekans ve 0.6g ivmeli sürekli titreşim halinde piller 2 gün içerisinde tam olarak şarj edilebilmektedir.

Tablo 6. Pilleri şarj etmek için kullanılan EM enerji üretici sisteminin özellikleri.

Harvester Dimensions	$\varnothing:25$ mm, h:50 mm, 24.5 cm ³
Inertial Mass (NdFeB)	$\varnothing:10$ mm, h:7.5 mm, 4.25 gram
Input Vibration	7.4 Hz and 0.4g
Fixed Magnet (Top & Bottom)	5.3x5.3x0.5 mm ³
Saturation Magnetization	1.2 T
Coil Turns	1000
Coil Resistance	185 Ω
DC Output Voltage	2.3 V
Harvested power	250 μ W _{rms}
Power Density	10 μ W/ cm ³

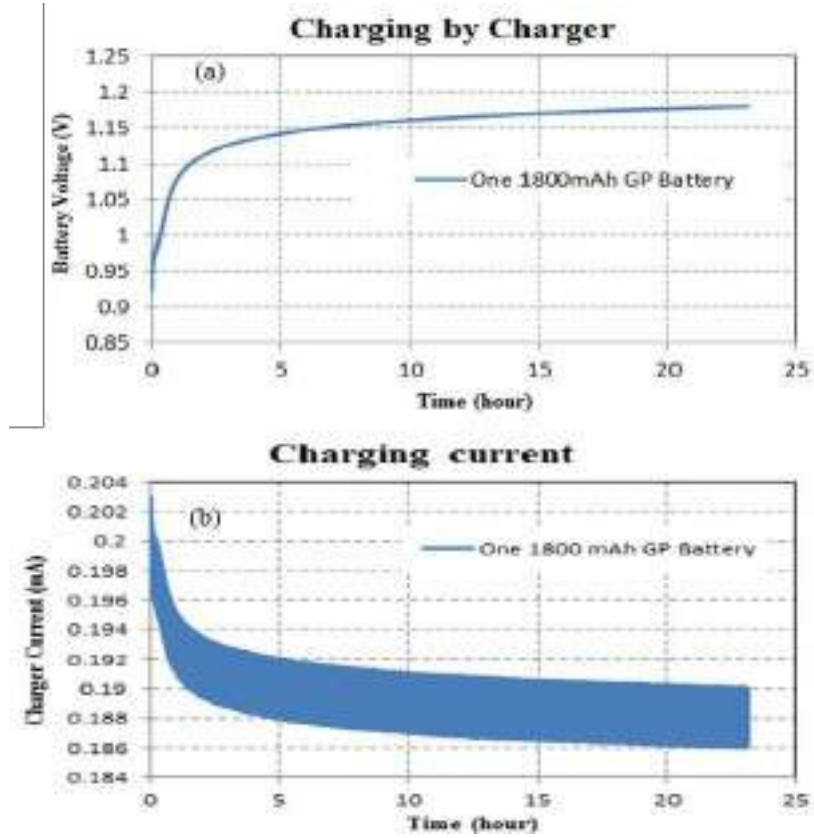


Şekil 62. Testlerde kullanılan enerji üretici sisteminin şematik çizimi.



Şekil 63. İki adet seri bağlanmış şarjlı pilin enerji üretici ile farklı titreşim koşullarında şarj edilmesi. 10 Hz, 0.6g'lik sürekli titreşimlerle pil 2 gün içerisinde şarj edilebilmektedir.

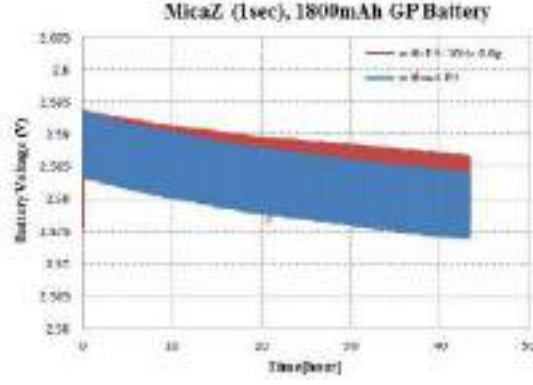
Şekil 64'da bir adet şarjlı pilin standart bir şarj cihazı ile şarj edildiğindeki voltajı ve üzerinden geçen akımının zamanla değişimi görülmektedir. Pilin tamamen şarj olması, beklendiği gibi daha kısa zamanda gerçekleşmekte, fakat pil voltajının değişimi benzer şekilde olmaktadır. Bu benzerlik de enerji üreticinin pili şarj etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.



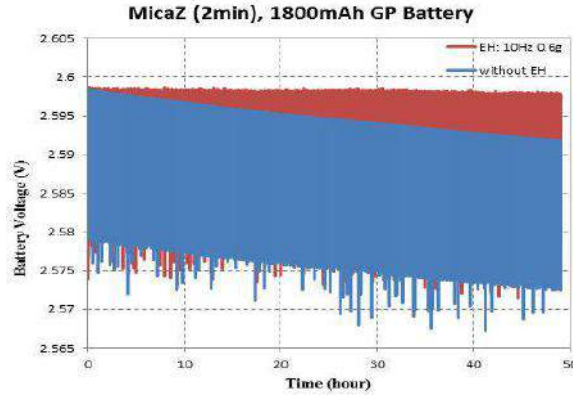
Şekil 64. Tek pilin standart şarj cihazı ile şarj edilmesi. Voltaj değişim karakteristiği enerji üretici kullanılan durumla benzerlik göstermektedir.

4.2.2 Enerji Üreteçleri ile WSN modüllerinin birlikte çalıştırılması

Tasarlanan enerji üretici sistemi ile pillerin şarj edilebileceği kanıtlandıktan sonra WSN modülleri pil ve enerji üretici ile beraber çalıştırılmış ve pil ömrü ve modülün üzerinden geçen akımın karakterizasyonu yapılmıştır. Bu deneylerde, WSN modülü olarak MicaZ kullanılmıştır. MicaZ'nin farklı çalışma opsiyonları (standby, LED'lerin açılıp kapatılması, radyonun açılıp kapatılması vb.) ve farklı data iletim periyotları için harcadığı enerji pil voltajı ve üzerindeki akım gözlenerek karakterize edilmiştir. Şekil 65'de MicaZ pil voltajının, pil tek başına enerji sağlarken ve pil enerji üretici ile beslenirken zamana göre değişimi karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Sunulan sonuçlarda MicaZ iki farklı data transfer periyodu ile çalışmaktadır (1 saniye ve 2 dakika). 2 dakikalık durumda, sadece pil kullanıldığında pilin voltajı zamanla azalırken, enerji üretici de sisteme dahil edildiğinde pil voltajının sabit kaldığı görülmektedir. Bu deney sonucunda enerji üretici ile üretilen enerjinin MicaZ'nin enerji ihtiyacını karşılayabildiği gösterilmiştir.



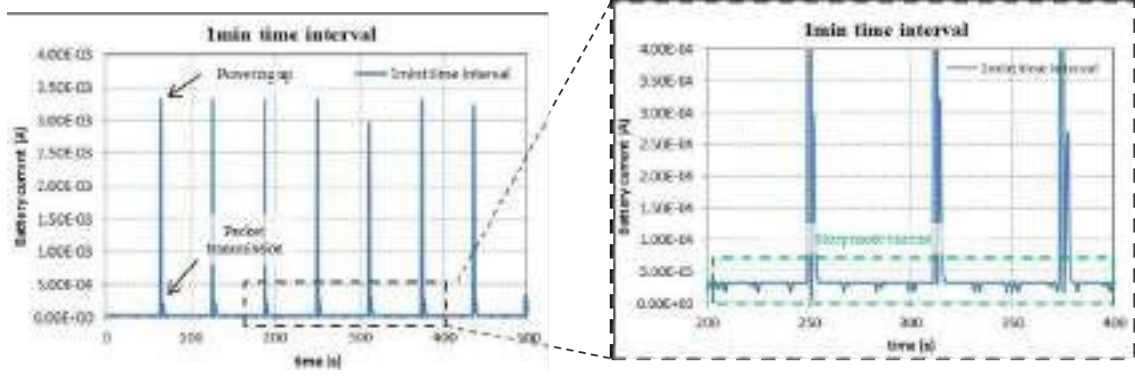
(a)



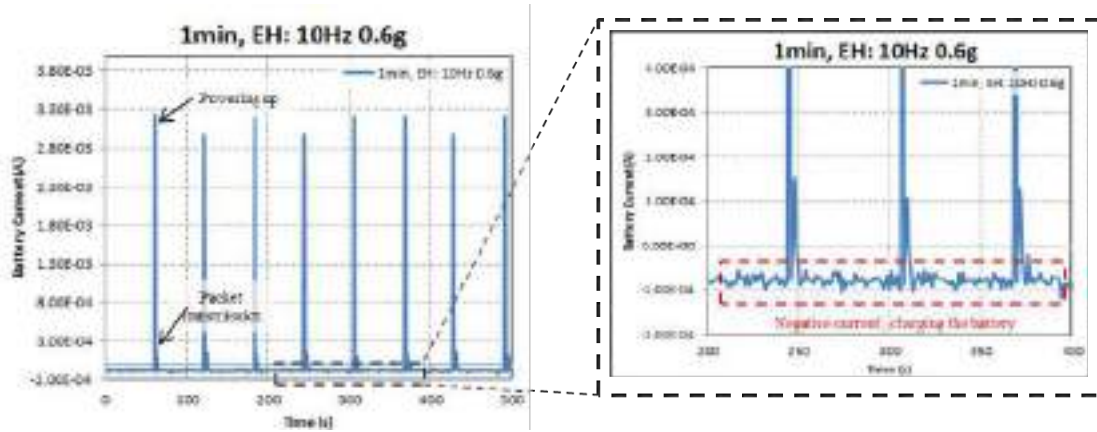
(b)

Şekil 65. Enerji üretici kullanıldığı (kırmızı) ve kullanılmadığı (mavi) durumlarda pil voltajının zamanla değişimi. Enerji üretici sisteme dahil edildiğinde, MicaZ'nin çalışma opsiyonuna göre (burada, data gönderme sıklığı) pil voltajının değişimi azalmakta ya da voltaj sabit kalmaktadır.

Şekil 66'de MicaZ'yi besleyen pil üzerinden geçen akımın zamanla değişimi görülmektedir. Şekil 66(a) sadece pil kullanıldığı durumdaki, 66(b) ise pil ile birlikte enerji üreticinin kullanıldığı durumdaki akımın zamanla değişimini göstermektedir. Grafiklerdeki tepeler, MicaZ'nin data gönderdiği anlarda pilden çektiği akımı göstermektedir. Fakat burada asıl incelenmesi gereken kısım MicaZ'nin atıl durumda olduğu zaman üzerinden geçen akımdır. Sadece pil ile beslenen sistemde bu akım pozitif değerdeyken, enerji üretici de sisteme dahil edildiğinde negatif olarak gözlenmektedir. Bu da pilin bu zamanlarda enerji üretici tarafından şarj edildiğini göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 66. Pil üzerinden geçen akım. (a) Sadece pil kullanıldığında, (b) pil ve enerji üretici birlikte kullanıldığında. MicaZ atılken ikinci durumda görülen negatif akım pilin şarj edildiğini göstermektedir. (100 microAmp civarı bir akım ile pilin dolmakta olduğu görülmektedir.)

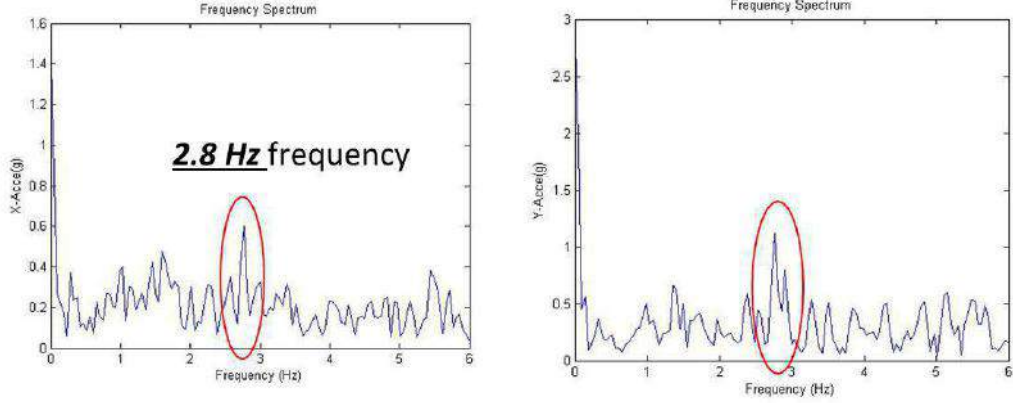
Tablo 7 ortalama pil akımının görev gerçekleştirme zamanı ve buna karşılık gelen pil ömründeki beklenen artışı göstermektedir. Enerji üreteçli ve enerji üreteçsiz test sonuçlarını karşılaştırdığımız zaman Görev gerçekleştirme zamanı 1 s'den 1 dakikaya çıktığı zaman enerji üreticinin yaklaşık 65 μA akım sağladığı gözlemlenmiştir. Görev gerçekleştirme zaman aralığı 1 dakikaya ayarlandığı zaman ortalama akım 72 μA 'den 6.3 μA 'e inmiştir. Bu durumda sistem tarafından harcanan güç 186.04 μW iken enerji üretici tarafından sağlanan güç 169 μW 'dır. Yani enerji üretici gerek duyulan gücün %90'ını karşılamaktadır ki bu pil ömrünün yaklaşık 10 kat artmasını sağlamaktadır.

Tablo 7. Ortalama pil akımı ve pil ömründeki artış.

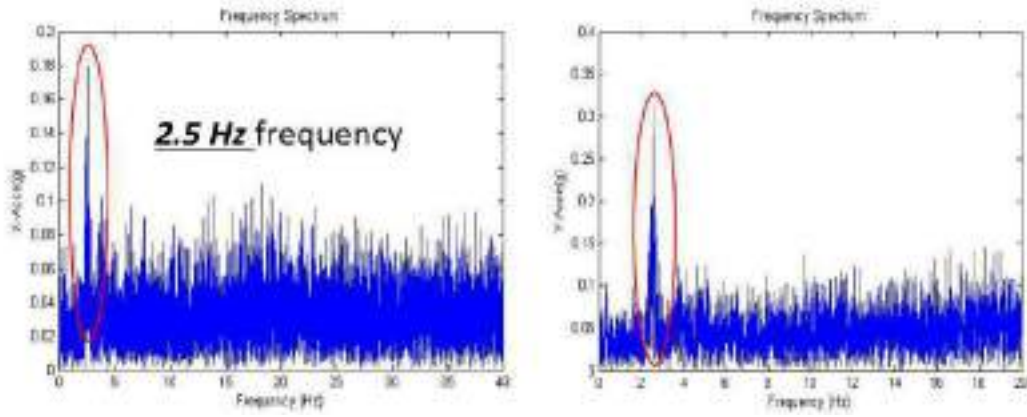
Task: Read acceleration (10x), average, transmit data Execution time	Average current on the batteries		Battery lifetime increment
	Without energy harvester	With energy harvester (7.4Hz & 0.4g)	
1 s	255 μ A	195 μ A	30%
20 s	99.7 μ A	38.1 μ A	161%
1 min	72 μ A	6.3 μ A	1042%

4.2.3 EM enerji üreticinin gerçek bir uygulamaya dahil edilmesi

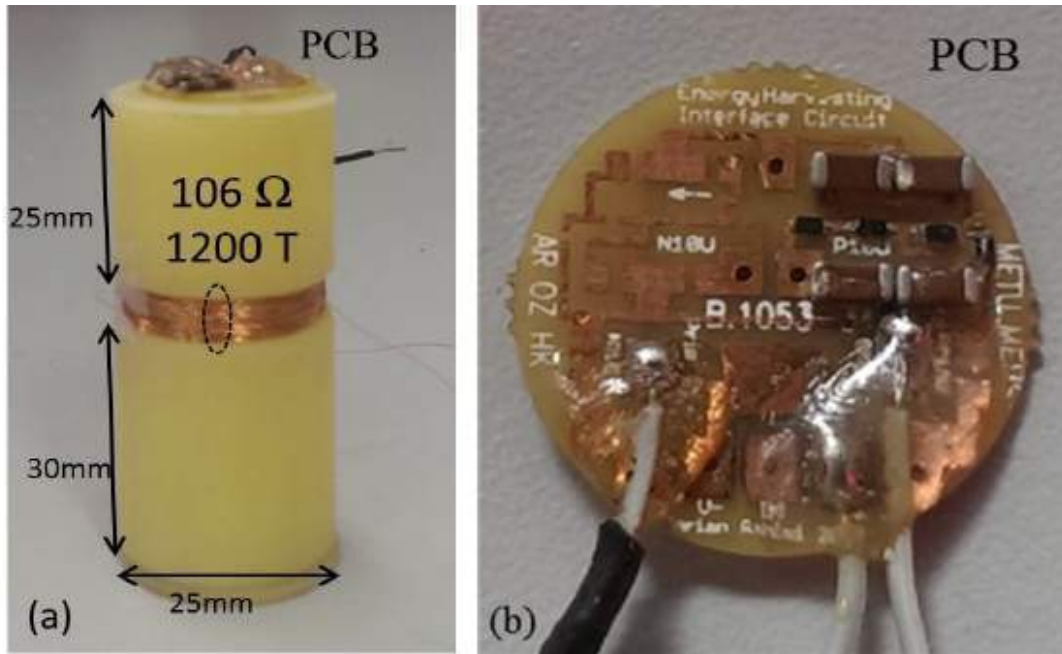
Yapılan çalışmaların gerçek bir uygulamaya aktarılması için EM enerji üreticinin koşan bir kişinin ürettiği titreşimlerle enerji üretimini sağlayabileceği ön görülmüş ve bu doğrultuda yeni bir tasarım yapılmıştır. Bu tasarımın yapılabilmesi için ilk olarak koşan bir adamın bileğine ve beline bağlanmış MicaZ modül ile x ve y ekseninde ne kadar ivme yaratıldığı ADXL202JE ivme ölçeri ile ölçülmüştür. Şekil 67 ve 68 koşucunun bileğinde ve belinde oluşan ivmenin frekans bandındaki dağılımını göstermektedir. Koşucunun bileğinde ve belinde ölçülen maksimum ivme sırası ile 2.8 ve 2.5 Hz frekanslarında gözlemlenmiştir. Bu değerler x ve y eksenleri için değişiklik göstermemektedir. Ölçülen değerler doğrultusunda çok düşük frekanslarda çalışabilecek bir EM enerji üretici tasarlanmış ve önerilen bu senaryo için kullanılmıştır. Şekil 69 bu amaç için tasarlanan ve optimize edilen EM enerji üreticini ve daha önceki tasarımda da kullanılan doğrultucu elektronik devresini göstermektedir. Tasarlanan sistemin toplam hacmi 29.5 cm³'dür ki bu yaklaşık C tipi bir pil boyutuna eşdeğerdir. Üreteçte 1200 bobin sarımı kullanılmıştır ve bobin direnci 106 Ω 'dur. Üst ve alt kapakta kullanılan sabit mıknatıslar 5.3 x 5.3 x 0.5 mm³ hacmindedir, tüp içerisinde kullanılan hareketli mıknatıs ise 10 mm çapında ve 10 mm yüksekliğinde silindirik bir mıknatıstır.



Şekil 67. Koşucunun bileğine bağlanan sensor modülü ile ölçülen x ve y eksenlerindeki ivmenin frekansa göre dağılımı.

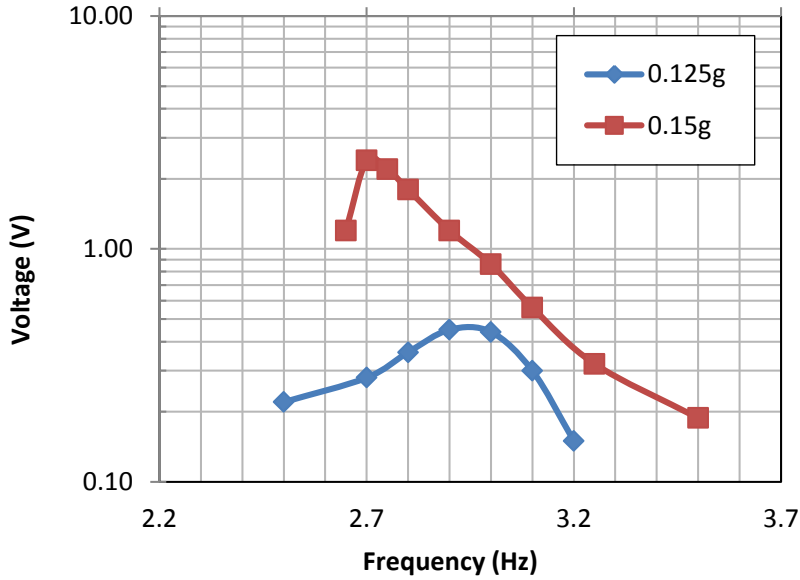


Şekil 68. Koşucunun beline bağlanan sensor modülü ile ölçülen x ve y eksenlerindeki ivmenin frekansa göre dağılımı.

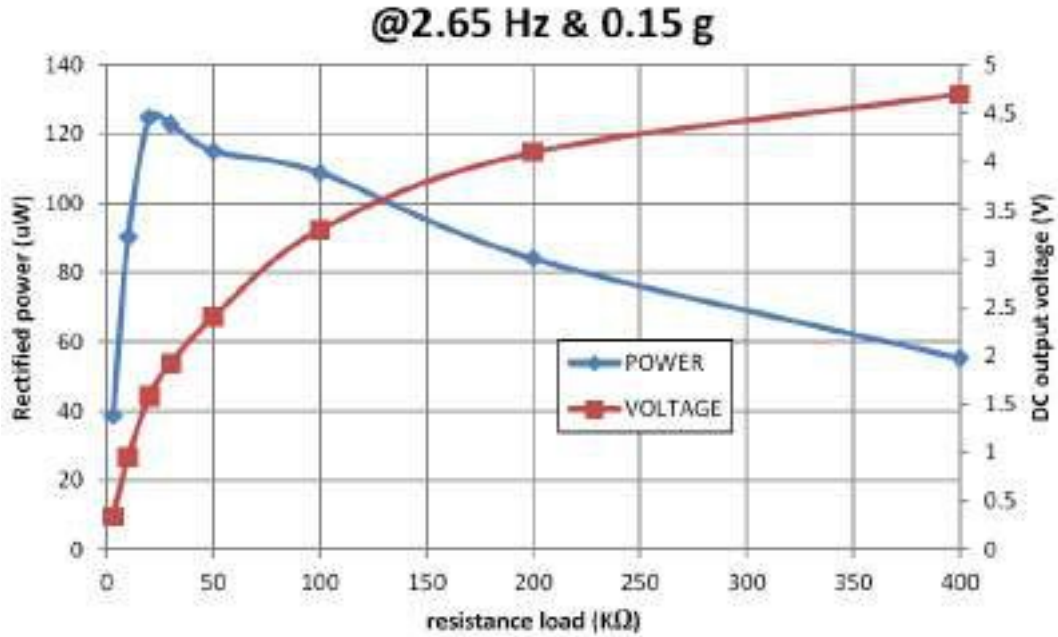


Şekil 69.(a) Çok düşük frekanslı titreşimler için tasarlanan EM enerji üretici ve (b) doğrultucu elektronik devresi.

Şekil 70 farklı titreşim değerleri için EM enerji üreticinden elde edilen bobin voltajının frekansa göre değişimini göstermektedir. Titreşimin büyüklüğü arttıkça üreticinin doğal frekansı daha küçük değerlere doğru kaymaktadır. Şekil 71 enerji üretici ve doğrultucu elektroniği sisteminden üretilen doğrultulmuş voltajın ve gücün yük direncine göre değişimini göstermektedir. Sistemden maksimum 120 μW DC güç 20 k Ω yük direnci sürerken elde edilmektedir.



Şekil 70. Düşük frekanslar için tasarlanan EM enerji üreticinin farklı ivme değerleri için frekansa karşı çıkış voltajı grafiği.

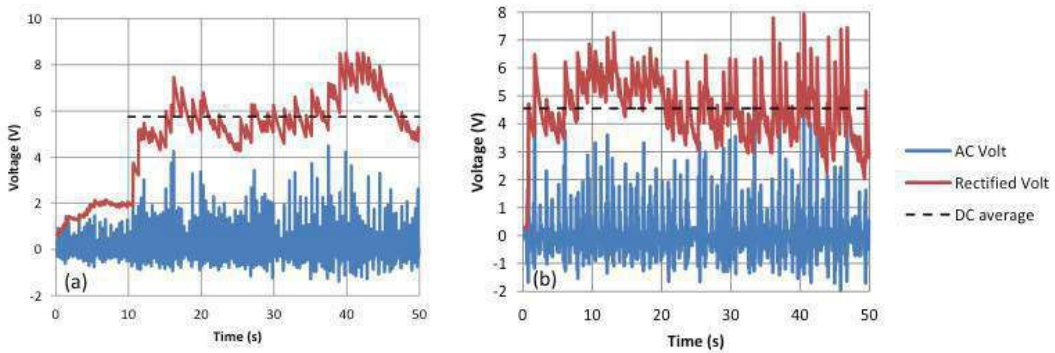


Şekil 71. Düşük frekanslar için tasarlanan EM enerji üretici ve doğrultucu elektronik devrenin 2.65 Hz ve 0.15g titreşim için yük direncine karşı çıkış voltajı ve gücünün değişimi.

Son olarak üretilen enerji üretici sistemi bir koşucunun bileğine ve beline bağlanarak üretilen voltaj 10 μ F'lık bir kapasitör ve 1.2 M Ω 'luk bir yük direnci üzerinden gözlemlenmiştir (Şekil 72). Şekil 73 bilekten ve belden ölçülen doğrultulmuş çıkış voltajını göstermektedir. Sistemin çıkışındaki DA voltajı bilek ve bel için sırası ile 4.6 ve 5.8 V'tur. Bu voltajlar sistemin bir WSN'i pilsiz olarak çalıştırılmasına imkan sağlanabileceğini göstermektedir. Sistemin çalıştırıldığı yük değeri hesaplanan optimum yük direncinden oldukça uzak olduğu da unutulmamalıdır. Bunlara ek olarak sistemin çıkışındaki voltaj değişken bir karakter göstermektedir, bunun sebebi çıkış voltajının regüle edilmemesidir. Sistemin çıkışına bir regülasyon devresi eklenerek sistem istenilen bir voltaja sabitlenip (örneğin 3 V) üreteç bir WSN ile birlikte koşucunun kalp atış hızını ölçüp ana bilgisayara gönderebilecek bir sistem yaratılabilir. Tablo 8 tasarlanan çok düşük frekanslı EM enerji üretici sisteminin özelliklerini göstermektedir.



Şekil 72. Üretilen enerji üretici sisteminin bir koşucunun bileğine ve beline bağlanmış görüntüsü.



Şekil 73. Koşucunun (a) bileğine ve (b) beline yerleştirilmiş çok düşük frekanslar için tasarlanmış enerji üretici sisteminin çıkış voltajının zamana göre değişimi.

Tablo 8.Çok düşük frekanslar için tasarlanmış EM enerji üretici sisteminin özellikleri.

Harvester Dimensions	Ø:25 mm, h:55 mm, 26.95 cm ³
Inertial Mass (NdFeB)	Ø:10 mm, h:10 mm, 5.7 gram
Input Vibration	2.65 Hz and 0.15g
Fixed Magnet (only Bottom)	5.3x5.3x0.5 mm ³
Saturation Magnetization	1.2 T
Coil Turns	1200
Coil Resistance	106 Ω
DC Output Voltage	1.9 V
Harvested power	120 μW _{rms}
Power Density	4.44 μW/ cm ³

4.2.4 Sonuç

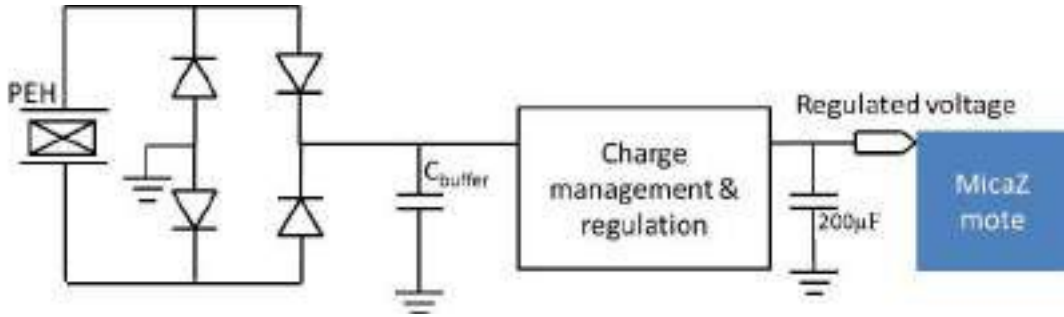
Bu çalışmada WSN düğümler ile bu düğümlerin pillerini şarj edecek bir elektromanyetik enerji üretici entegre edilmiştir. MicaZ düğümlerin harcadıkları güç ve şarj edilebilir pillerin dolma ve boşalma profilleri gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalarda düşük frekanslar için tasarlanmış enerji üretici ile WSN düğümlerin pillerinin şarj edilebildiği ve bu pillerin ömürlerinin 10 katı kadar artırılabilirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca MicaZ sensör düğümü ile koşan bir adamın belindeki ve el bileğindeki ivme ölçülmüş, alınan bu bilgi ile uygun frekanslarda çalışacak yeni bir EM enerji üretici tasarlanmıştır. Tasarlanan üreteç arayüz elektroniği ile birleştirilmiştir ve sistemin çıkışındaki DA voltajının bilek ve bel için sırası ile 4.6 ve 5.8 V olduğu gözlemlenmiştir.

4.3 Kablosuz duyurga ağlarında piezoelektrik enerji üretici kullanımı

4.3.1 Pil içermeyen kablosuz sensör düğümü

Çok düşük güçlü mikro-kontrolörlerin entegrasyon ve üretim verimliliğindeki gelişmeler birçok uygulamada geleneksel pillere gerek duyulmamaya başlanmıştır. Bu uygulamalar arasında birçok sensör bilgisini okuyup kablosuz iletişim kurabilen yoğun güçlü kablosuz sensör ağları da yer almaktadır. Kullanılan cihazların çok düşük güçte olması, bu cihazların ihtiyaç duyduğu gücün enerji üreteçleri tarafından sağlanmasını desteklemektedir. Öte yandan hasat için kullanılabilecek birçok çevresel titreşim rastgele tabiidir. Bu titreşimlerin süresi ve şiddeti belirli bir zaman olarak tanımlı değildir. Sensör düğümlerinin başlangıçta ihtiyaç duydukları enerji sağlansın ve birincil güç kaynaklarından kurtulabilmek için bu titreşimler ile düşük güçlü kablosuz sensör düğümlerinin enerjisini sağlayabilmek gerekmektedir.

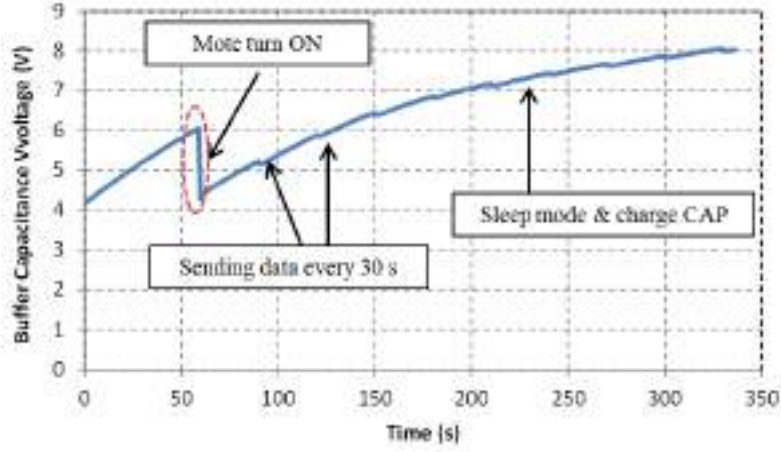
MicaZ sensör düğümünü sadece enerji üretici ile kaynak sağlayabilmek için, doğrultucu arayüz devresinin dışında bir şarj yönetimi devresine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple piezoelektrik enerji üretici Şekil 74'da görüldüğü gibi bir doğrultucu ve bir de regülasyon devresi ile sensör düğümüne bağlanmıştır. Enerji üretici sensör düğümü için gerekli enerjiyi sağlamak için ilk olarak doğrultucu yardımı ile aradaki tampon (Buffer) kondansatörü belirli bir değere kadar şarj etmekte, daha sonra ise sensör düğümüne 2 V sabit voltaj sağlamak için regülatörü aktif hale getirmektedir. Şarj yönetimi devresi yüksek voltajı istenen değere getirecek bir DC-DC çevirici ve voltaj yeterli seviyede değilse devreyi kapatacak bir kontrol devresi içermektedir.



Şekil 74. Enerji üreticili sensör düğümünün şematik gösterimi.

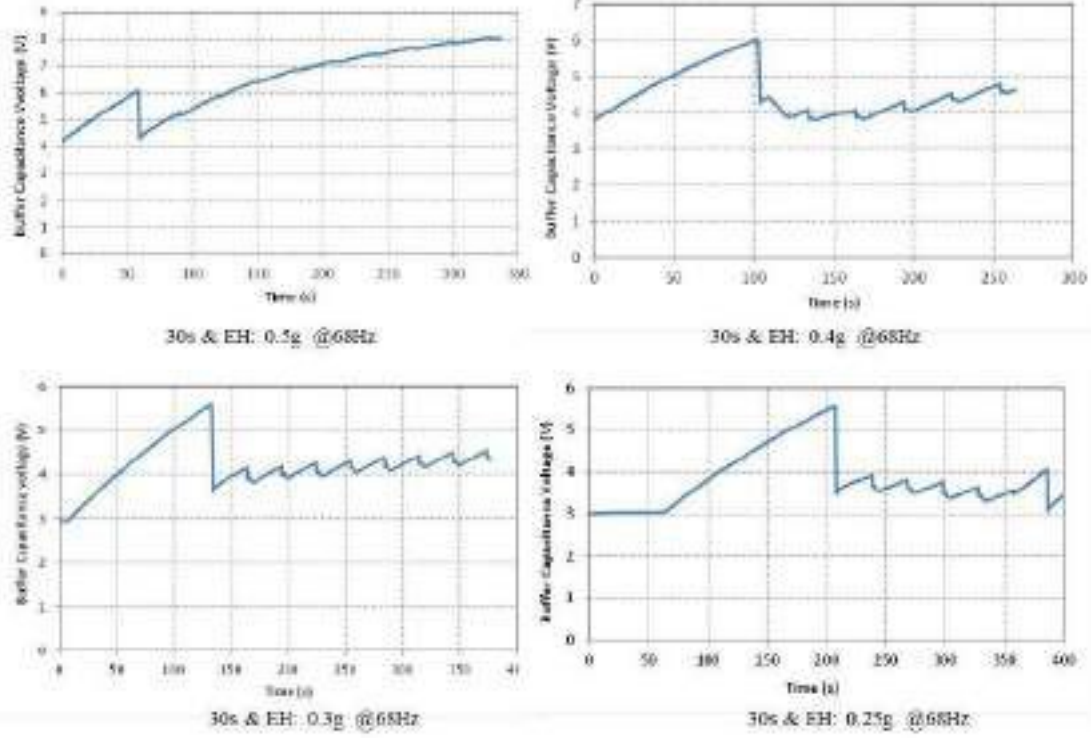
Tampon kapasitör üzerindeki voltajı ölçerek ve MicaZ düğümünün operasyonu gözlemlenerek enerji üreticinin ve MicaZ düğümünün güç uyumu test edilebilir. Bu sebeple güç uyumunu doğrulayacak bir test düzeneği hazırlanmıştır. Bu düzenekte V25W piezoelektrik üretici titreşim tablası yardımı ile rezonans frekansı olan 68 Hz ve farklı ivmelerde uyarılarak test edilmiştir. Enerji üreticinin çıkışındaki voltaj doğrultucu devre ile DA voltajına çevrilmiştir. Doğrultucu devrenin çıkışına 2.2 mF'lık bir tampon kondansatörü bağlanmıştır. Regülatör sistemi, doğrultulmuş giriş voltajı, V_{Buffer} , 4 V'a ulaştığı zaman aktif hale geliyor. MicaZ'nin sabitlenmiş voltaja güç kaynağı olarak bağlanması dışardan kontrol edilmektedir. Tampon voltajı eşik değerinden yüksek olduğu sürece regülatör aktif halde kalmaktadır. Eşik değeri DC-DC çeviricinin düzgün bir şekilde 2.5 V sabit DC voltaj üretebildiği alt sınır olan 2.8 V ile 3 V arasında olacak şekilde seçilmiştir. MicaZ düğüm ivme ölçer yardımı ile 10 kez ivmeyi ölçüp bunların ortalamasını alacak şekilde programlanmıştır. Düğümün kimliği (ID) ve ortalaması alınmış bilgi her 10 s, 20 s ve 30 s'de bir ana istasyona (base station) gönderilecektir. Bilgi gönderildikten sonra verici güç tasarrufu (standby) moduna geçecektir. RF vericinin yayın gücü -25 dBm olarak ayarlandı ki bu durumda en düşük akım tüketimi olan 8.5 mA akım harcanmaktadır. Yapılan testlerde ilk olarak tampon kondansatör şarj ediliyor ve daha sonra MicaZ düğüm

alışır hale getiriliyor. Gereklı eşik değerini ve zaman aralıklarını elde etmek için tampon kondansatörün voltajı gözlemlenmiştir. Şekil 75 MicaZ düğüm 30 s'de bir bilgi gönderirken ve enerji üreteci 0.5g ivme ile uyarıldığı koşullardaki alış modlarının tampon kondansatör voltajı üzerinde etkisini göstermektedir.

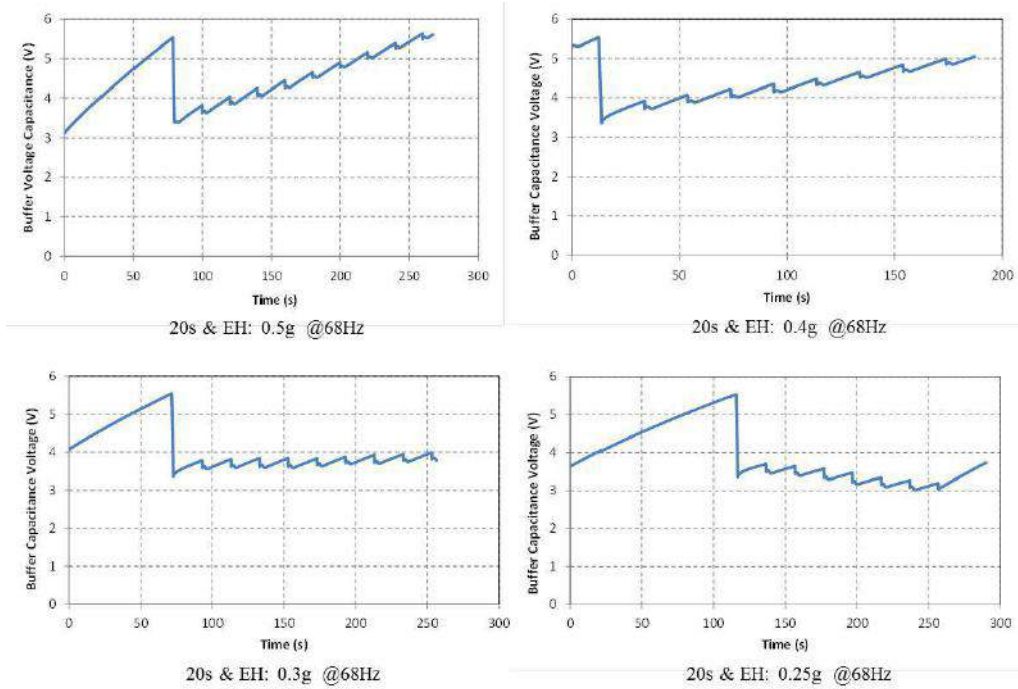


Şekil 75. MicaZ düğüm 30 s'de bir bilgi gönderirken ve enerji üreteci 0.5g ve 68 Hz'de uyarıldığı koşullarda tampon kondansatör üzerindeki voltajın zamana göre değişimi.

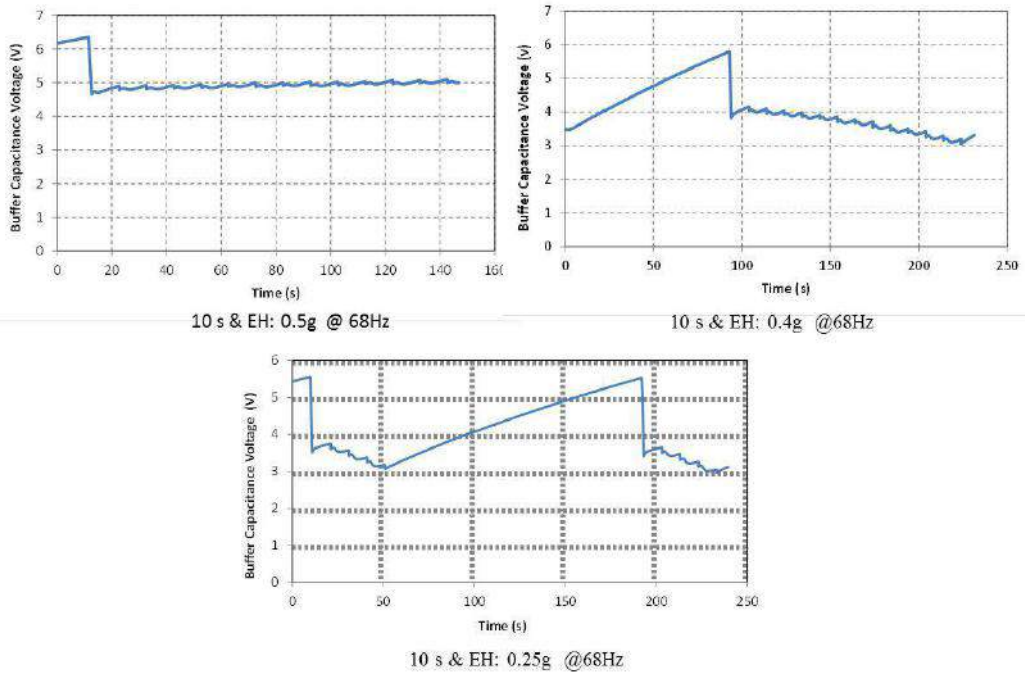
Şekil 76-78, MicaZ düğümü 30 s, 20s ve 10 s'de bir bilgi gönderdiği durumlar için 4 farklı ivme değeri ile çalıştırıldığı zaman tampon kapasitör üzerindeki voltajın değişimini göstermektedir.



Şekil 76.MicaZ düğüm 30 s'de bir bilgi gönderirken ve enerji üretici 68 Hz ve 4 farklı ivme ile uyarıldığı koşullarda tampon kondansatör üzerindeki voltajın zamana göre değişimi.



Şekil 77.MicaZ düğüm 20 s'de bir bilgi gönderirken ve enerji üretici 68 Hz ve 4 farklı ivme ile uyarıldığı koşullarda tampon kondansatör üzerindeki voltajın zamana göre değişimi.



Şekil 78. MicaZ düğüm 10 s'de bir bilgi gönderirken ve enerji üretici 68 Hz ve 4 farklı ivme ile uyarıldığı koşullarda tampon kondansatör üzerindeki voltajın zamana göre değişimi.

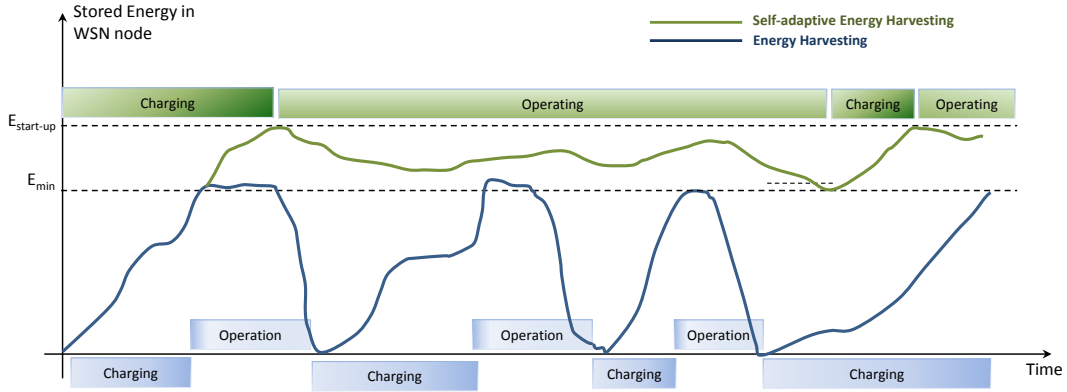
Test sonuçları bilgi gönderim süresi var olan titreşim seviyesine göre ayarlanabilir, böylelikle tampon kondansatör üzerindeki voltaj sabit tutulabilir. Bunu gerçekleştirmek için tampon kondansatör üzerindeki voltajı her operasyondan sonra MicaZ'deki ADC yardımı ile okuyarak bir önceki değer ile karşılaştırıp operasyon sıklığı ona göre ayarlanabilir. Bu sistemi gerçekleştirmek için MicaZ düğüm yeniden programlama ve modifikasyona ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca güç yönetimi devresi de MicaZ düğüm ve enerji üreticisine göre yeniden tasarlanmalıdır.

4.3.2 Enerji-Nötr Operasyon

Bir sistemin pilsiz bir şekilde çalışabilmesi için esas problem çevresel enerjilerin rastgele olmasıdır. Ortamdaki enerjinin yönetilmesi bu problemin aşılması için önemli bir adımdır. Yapılan çalışmalarda tipik bir sensör düğümünde harcanan gücün büyük bir kısmı radyo ünitesi dinleme ve gönderme modunda harcanmaktadır. Sensör düğümü çevreden gelen enerjiyi kontrol ederek gönderim aralığını buna göre ayarlayabilir. Böylelikle üretilen ve harcanan enerjinin birbirine eşit olmasını sağlayarak Enerji-Nötr bir sistem oluşturulabilir.

Bu çalışmada Enerji-Nötr bir operasyona sahip enerji üreteçli bir sensör ağı oluşturabilmek için uygulanabilir bir senaryo hazırlandı. Bu senaryoda tüm düğümlerin enerji kaynaklarındaki değişimler yerine tek bir düğümün enerji kaynağındaki değişim dikkate alınmıştır. Tüm ağın enerji üretim profili her bir

düğümün bilgisini ayrı ayrı ana istasyona iletmesi ile oluşturulabilmektedir. Kapasitör veya ultra-kapasitör gibi enerji depolayıcı elemanlar kullanarak üretilen enerjinin depolanması sağlanarak sadece enerji üretici ile çalışan pilsiz bir sistem oluşturulabilir. Tipik bir enerji üreteçli kablosuz sensör ağı (WSN) ilk olarak depolanmış enerji minimum enerji seviyesine gelene kadar şarj etme modunda çalışır. Enerji gerekli minimum seviyeye gelince enerjisinin tamamı bitene kadar çalışmaya devam eder ve bu döngü tekrarlanır. Adaptif görev döngüsü algoritması, enerji üreteçli sensör düğümlerin görev döngüsünü çevrede var olan enerjiye göre ayarlayarak otonom bir sistem oluşturmasını sağlar. Enerji üreteçli düğümün çalışma karakteristiğinin kendinden-adaptif hasatlı sistem ile karşılaştırılması Şekil 79'da gösterilmektedir. Kendinden-adaptif sistemde depolanan enerji belirlenen minimum ve maksimum değerler arasında tutularak sürekli operasyon sağlanmaktadır.



Şekil 79. Enerji Üreteç ve kendinden-adaptif pilsiz düğümün enerji karakteristiği.

4.3.3 Kendinden-Adaptif MicaZ Sensör Düğümü

Tasarlanan senaryoda her sensör düğümü kendi algıladığı bilgiyi göndermektedir. Sensör düğümündeki radyo telsizinin iki modu vardır: aktif ve uyku modları. Uyku modunda bütün üniteler kapalı durumdadır, aktif modda ise radyo telsizi paketler alabilir veya gönderebilir. Düğüm kimliği, ölçülmüş maksimum ve ortalama ivme, tampon üzerindeki enerji ve gönderim zaman aralığı ana istasyona bir görev olarak yayınlanır. Uyku modu süresi gönderim zaman aralığını belirler. Tasarlanan zaman aralığı düzenleyicinin en önemli avantajı düğümün performansını ve yaşam süresini var olan enerjiye göre maksimize etmesidir. Düzenleyici bunları gerçekleştirebilmek elde edilen ve depolanan enerjiye göre iki strateji uygular. İlk strateji belirli aralıklar ile ölçülen üretilen enerji artan bir eğilim izlerse gelen enerjinin bir kısmı depolanacaktır. İkinci strateji ise gelen enerji yeterli olmadığı durumda yerine getirilen görevler nötr-enerji oluşturacak şekilde düzenlenecektir.

Düğümün mikrokontrollerinde farklı çalışma modlarında ne kadar akım harcadığını, gönderici ve alıcıların yaklaşık çalışma süresi ve akım harcamaları, daha önceki çalışmalarımızda yer alıyor [75]. Bu değerleri bildiğimiz zaman görevlerin yerine getirilmesi sırasındaki harcanan enerjiyi ve uyku modunda harcanan gücü şöyle belirtebiliriz:

$$E_{con,TE} = \sum_I V_{PS} I_{con,i} \Delta t_i \quad (16)$$

$$P_{slp} = V_{PS} \bar{I}_{slp} \quad (17)$$

burada i farklı ögelerin numaralandırmasını göstermektedir. Hesaplanan değer güç yönetimi sisteminin başlatılmasında kullanılmıştır.

Voltajın örneklendirilmesi düğümdeki ADC arayüzü yardımıyla ve Δt zaman aralıkları ile gerçekleştirilmiştir. Δt zaman aralığındaki anlık varolan enerji E_{avai} ve üretilen enerji E_{harv} bir önceki tampon ölçümlere dayanarak şöyle yazılabilir.

$$E_{avai}(t) = E_{smp}(t) - E_{min} \quad (18)$$

$$E_{harv,pure} = \Delta E(\Delta t) - P_{spl} \cdot \Delta t \quad (19)$$

Uygulanan metod harcanan enerji ile üretilen enerji arasında bağlantı kurarak enerji nötr bir operasyon sağlanmasını amaçlamaktadır. Enerji nötr bir operasyon için her birim zaman sonundaki tampon enerji minimum enerjiden daha fazla olmalıdır. Hasatlanan enerji ulaşılabilir veya minimum enerji seviyesinden düşük ise toplam enerji düşmeye başlar ve sistem uyku moduna girer. Enerji seviyesi E_{min} 'in altına düştüğü zaman güç kaynağı kapatılır ve sistem şarj etme moduna girer. Uygulama gereksinimlerine göre ve sistem faydalarına göre minimum ve maksimum enerji aralıkları yüklenen göreve göre belirlenip enerji nötr koşullar aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$(E_{neut} - E_{min}) + \int_0^{TI} P_{harv} \cdot dt \Big|_{sleep} - E_{cons,net} > 0 \quad (20)$$

$$TI_{min} \leq TI \leq TI_{max} \quad (21)$$

$$E_{neut} > E_{min} \quad (22)$$

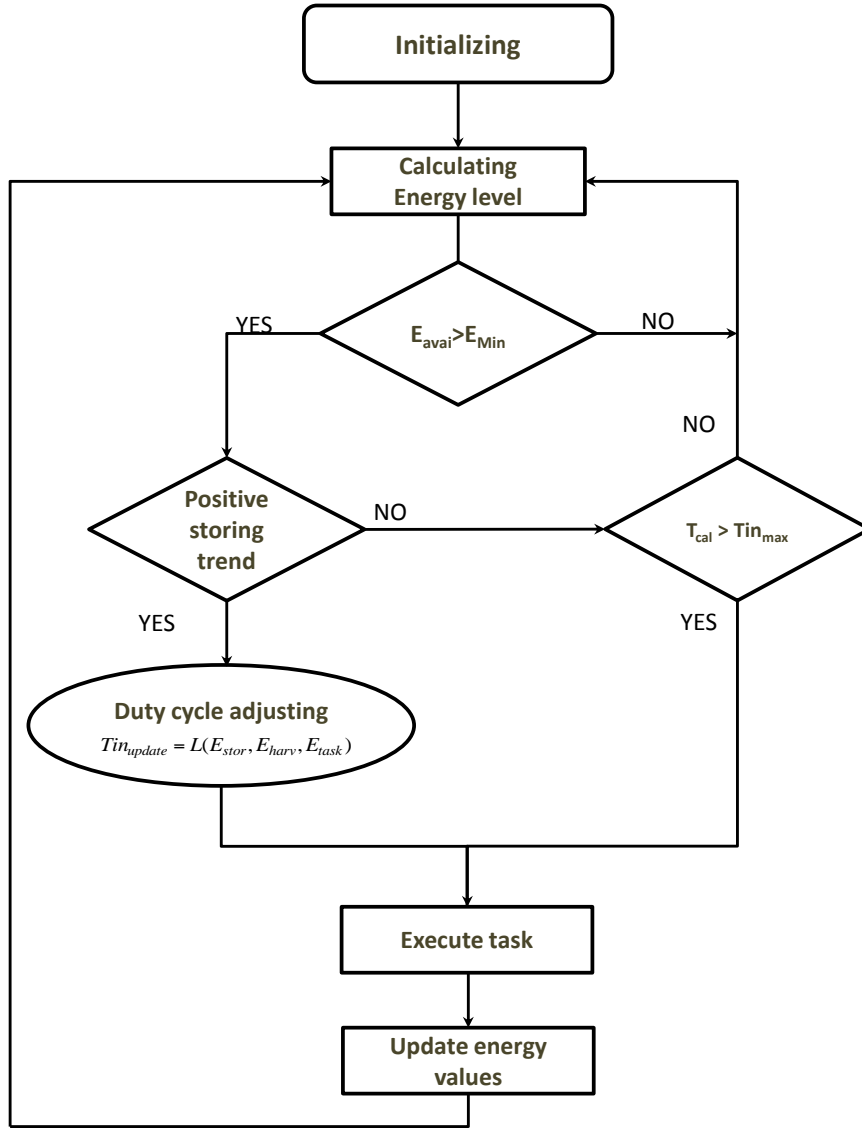
Denklem (20)'de verilen ilk terim enerji nötr enerji seviyesini göstermektedir, ikinci terim düğüm uyku modunda iken tampon kondansatör üzerinde depolanan enerjiyi ölçmektedir, son terim ise aktif modda tampon kondansatör üzerinde harcanan enerjiyi göstermektedir. Gelen titreşimin enerji seviyesi ve gücüne göre depolanan

enerji artan ($\Delta E_{harv}(\Delta t) > 0$) veya azalan ($\Delta E_{harv}(\Delta t) < 0$) bir eğilimde olabilir. Artan bir eğilim olduğunda en yüksek enerji seviyesi için maksimum performans elde edilmeye çalışılır, azalan enerji durumunda ise sistemin amacı enerji nötr bir operasyon için en uygun zaman birimini ayarlamaktır. Bu durumlar göz önünde bulundurularak alttaki katsayılar oluşturulmuştur.

$$\alpha = \frac{E_{con,TE}}{\Delta E_{harv}(\Delta t)} \quad \Delta E_{harv}(\Delta t) > 0 \quad (23)$$

$$\beta = \frac{E_{harv,pure}}{E_{min}} \quad \Delta E_{harv}(\Delta t) < 0 \quad (24)$$

Pozitif enerji yığılımı olduğu zaman aralığı TI_{min} ve α katsayısı ile bağıntılı olarak belirlenmektedir. Depolanan enerji azaldığı zaman nötr enerji seviyesi β katsayısı, var olan enerji yardımı ile hesaplanır, optimum zaman aralığı da hesaplanarak belirlenen koşullar ve yenilenen ölçümler ile güncellenir. Geliştirilen algoritmanın blok şeması Şekil 80'de örneklendirilmiştir.

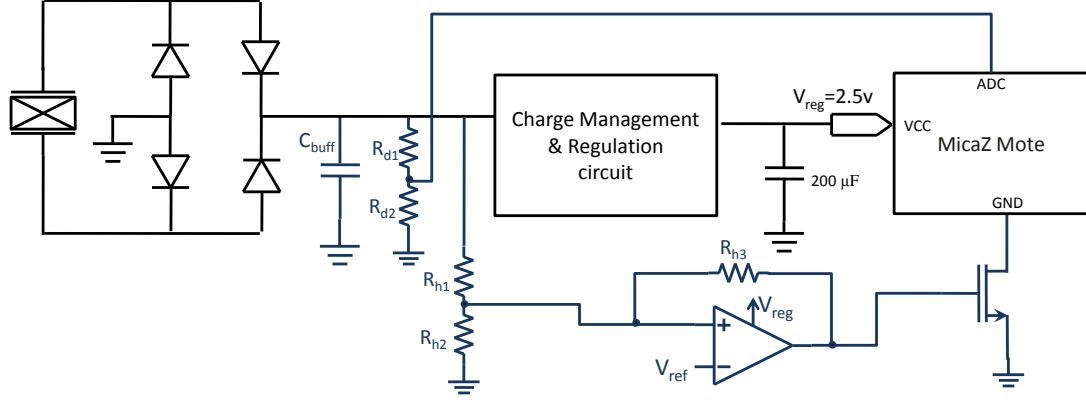


Şekil 80. Görev döngüsü (duty cycle) ayarlama algoritmasının blok şeması.

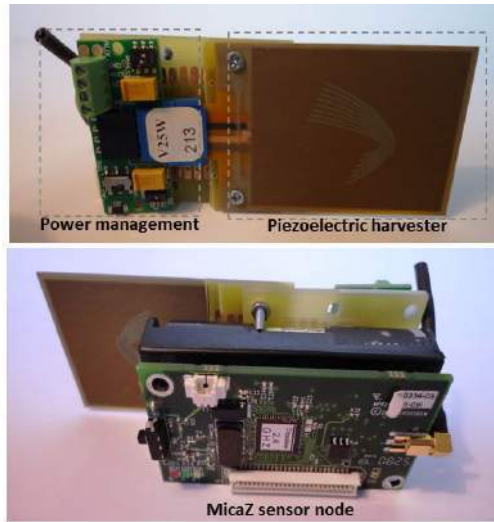
4.3.4 Enerji Üreteçli Kendinden-Adaptif Sensör Düzümü

Daha önceden belirtildiği gibi tipik çevresel titreşimler rastgele tabiattadırlar, yani titreşim süresi veya şiddeti sabit değildir veya zamana bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanamazlar ve stokastik oluşum olarak modellenemezler. Dahası bu titreşimler patlayıcıdır, yani anlık gelen titreşimlerden sonra uzun bir süre aktif olmayan beklemeler gelebilir. Bundan dolayı, algılama ve ağ protokolleri var olan güce adapte olacak şekilde tasarlanırsa bile, algılama ve ağ tabanlı algılayıcı uygulamalar için güç kaynağı sağlayabilmek için yeterli büyüklükte bir tampon enerji deposuna ihtiyaç duyulmaktadır. Enerjinin başlangıçta bu depoya yığılması sensör düğümünün başlangıç gücünün sağlanmasına ve dışardan bir enerji kaynağına olan ihtiyacın yok edilmesine yardımcı olur. Bu sebeple bizim sistemimizde piezoelektrik enerji üretici ile sensör düğümü arasında bir doğrultucu devre bir de güç yönetim devresi yer almaktadır (Şekil 81). Güçlü bir depolama için doğrultucu devre ve güç

yönetim devresi arasına 2.2 mF'lık bir tampon kondansatör yerleştirilmiştir. Kullanılan güç yönetim devresi sensör düğümüne 2.5 V sabit voltaj sağlamaktadır ve kondansatör üzerindeki voltaj ADC yardımı ile belli aralıklarla örneklendirilmektedir. Şekil 82 oluşturulan enerji üreteçli sensör düğümünü göstermektedir.



Şekil 81. Enerji üreteçli sensör düğümünün şematik gösterimi.

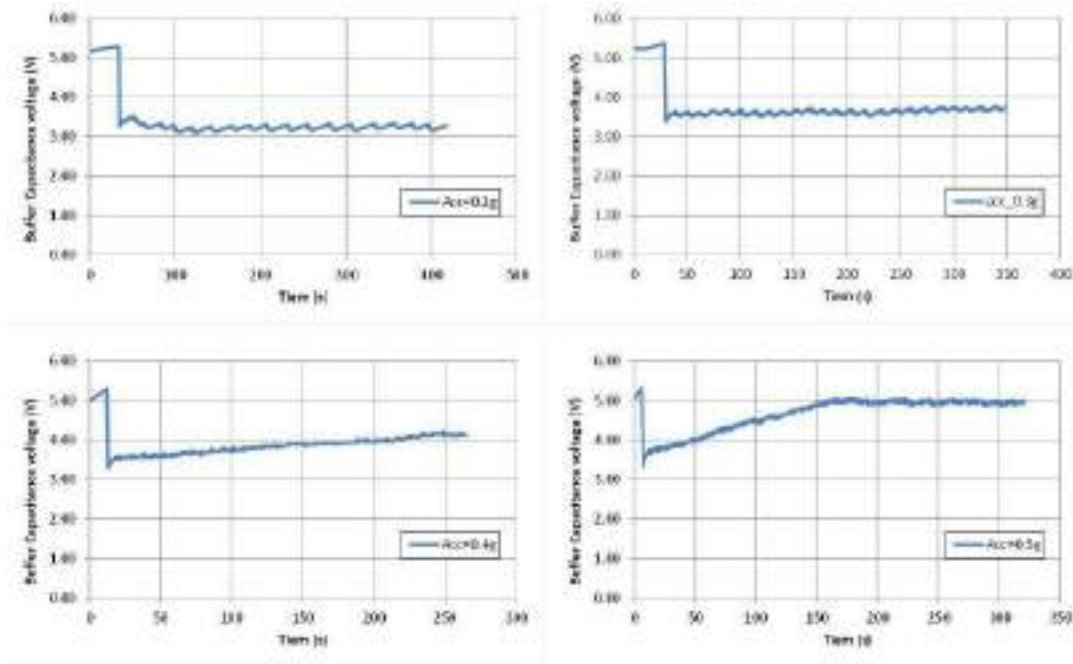


Şekil 82. Hazırlanan enerji üreteçli sensör düğümünün resmi.

Şekil 83 tampon kondansatör ve gönderilen bilginin görüntülenip enerji nötr operasyonun sağlanmasının yapılması için hazırlanan düzeneği göstermektedir. Bu ölçümlerde V25W piezoelektrik enerji üretici kullanılmıştır ve titreşim tablası kullanılarak rezonans frekansı olan 68 Hz'de ve farklı ivmelerde titreştirilmiştir. Şekil 84 tampon kondansatör voltajının farklı ivme değerleri ile yapın testlerden elde edilen zamana bağlı değişimini göstermektedir.



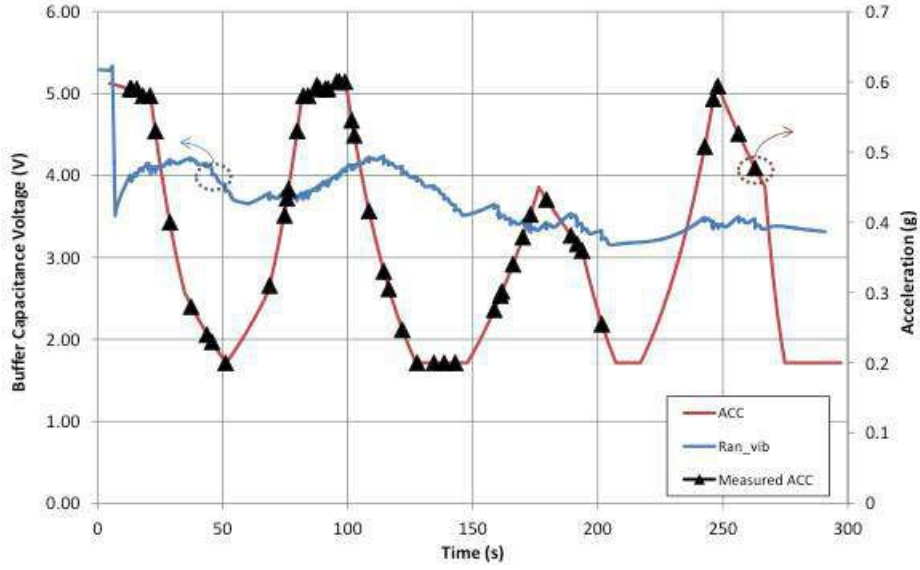
Şekil 83. Enerji-nötr enerji üreteçli sensör düğümü test düzeneği.



Şekil 84. Tampon kondansatör voltajının farklı ivme değerleri ile yapılan testlerden elde edilen zamana bağlı değişimi.

Denge durumunda çalışmanın avantajı bilginin ömrünün kısaltılması ve alınan bilginin yeniliğinin optimize edilerek ağ ekranına gönderilerek ölçüm bilgisinin maksimum hale getirilmesini sağlamasıdır. Böylelikle Şekil 84'de de görüldüğü gibi enerji istenilen seviyede tutulabilmektedir. MicaZ düğüm bilgi gönderim zamanını ayarlayarak düşük titreşimlerden gelen güce yetecek kadar bilgi gönderir veya enerji yüksek gelirse sonrası için depolama yapmasını sağlar.

Şekil 85 kendinden-adaptif MicaZ düğümün yarı rastgele titreşimler (kırmızı çizgi) ile uyarıldığı zaman elde edilen sonucu göstermektedir. Gönderim zamanı ve tampon kondansatör üzerindeki enerji seviyesi kondansatör voltajı ile değerlendirilebilir (mavi çizgi). Ana istasyon tarafından ölçülen zaman aralıkları ve ivmenin tepe değeri siyah üçgenler ile gösterilmiştir. Zaman aralıkları ve ivmedeki düşüş değerleri sırası ile kondansatör üzerindeki voltaj ve titreşim seviyesi ile tam uyum göstermektedir. Görev gerçekleştirme süresinin uyarım seviyesi ve tampondaki enerji durumu ile tam uyduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 85. Kendinden-adaptif MicaZ düğümün yarı rastgele titreşimler ile uyarıldığı zaman elde edilen sonuçlar.

4.3.5 Sonuç

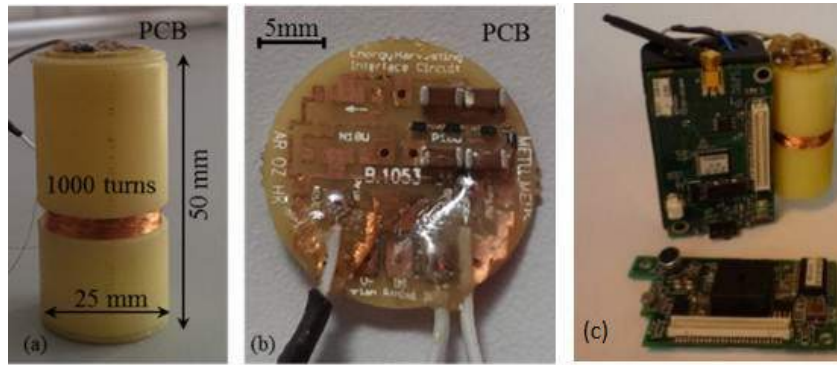
Bu çalışmada çevresel titreşimlerden enerji üretip kablosuz bir sensör düğümüne sabit voltajlı güç sağlayabilecek bir piezoelektrik enerji üretici ve güç yönetim devresi tasarlanmıştır. Güç yönetim devresi ve depolama kapasitörü MicaZ düğümün güç gereksinimlerine ve ortamdaki sağlanan enerjiye göre tasarlanmıştır. Bu amaç için ortamdaki enerjiye göre kendinden-adaptif bir sistem geliştirilmiştir. Tasarlanan sistemin enerji nötr operasyon ile çalışması piezoelektrik enerji üreticini titreşim tablası ile uyararak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen pilsiz enerji üreteçli sensör düğümünün gerçek hayattaki uygulamalarda kullanılabileceğini göstermiştir.

4.4 Enerji-nötr WSN'lerin ömür tahmini için enerji simülasyonu

Bu çalışma için temel olarak bir kablosuz algılayıcı düğümünün (KAD) enerji hasatı olarak veya olmadan etkinliğini sürdürme ömrünün enerji odaklı simülasyonu amaçlanmıştır. Önerilen simülasyon ise, gerçek ölçümlere dayalı olarak özelleştirilmiştir. Bu ölçümler de vibrasyon ile beslenen elektro-manyetik hasatçı donanımı olan MicaZ cihazlarından oluşan bir kurulum üzerinde denenmiştir. Vibrasyon algısı için MTS310 veri toplayıcı kartı kullanılmıştır. MicaZ cihazlarının çektiği akım, mikrokontrollör etkinliği, veri iletimi, dinleme ve LED etkinliği için ölçülmüştür. Enerji kaynağı olarak, ODTÜ'de geliştirilen bir hasatçısı (Şekil 86) kullanılmış, bu hasatçının deneysel karakterizasyonu sonucunda elde edilen güç ve voltaj verileri simülasyonda girdi olarak kullanılmıştır. Üretilen enerji hasatçı donanım çıktıları farklı

görev çevrimi doluluk boşluk yüzdelerine karşılık gelecek şekilde ölçülüp, kaydedilmiştir. Bahsedilen simülasyon için olan çıktılar aktif, ideal, uyku durumu süreçlerindeki düğümün her bir unsurunun güç tüketimi, akım çekimindeki değişim, enerji geliş süreci ve düğümün beklenen etkin yaşam süresi olarak gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, algılayıcı ağlar için ayırık olaylı simülasyon yazılımı ile benzetim yapılmıştır. Bu simülasyon da Atmega128 ve CC2420 birimlerini içeren MicaZ cihazı için özelleştirilmiştir. Bu yazılım da her bir MicaZ birimi için çekilen akımın değişimini farklı frekans ve genlikler için yapılan enerji sürelerine karşılık gösterir.



Şekil 86. (a) Üretilen enerji üretici modülü ve (b) doğrultucu elektronik baskı devre kartı, (c) Elektromanyetik enerji üretici ile donatılmış MicaZ düğümü.

4.4.1 MicaZ düğümü için enerji tüketimi ölçümü

Algılayıcı düğümü için algılama ve veri iletimi etkinliklerinin her bir aşamasındaki enerji tüketimine yönelik yeterli ve güvenilir bilgi toplanması bu algılayıcı düğümün etkin yaşam süresinin kestirilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında örnek olarak MicaZ düğümünün 36 byte uzunluğundaki veri paketlerini gönderirken çektiği akım incelenmiştir. [75]daki çalışmaya göre MicaZ düğümünü enerji tüketimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$E_{con,i}(T) = \int_0^T V_{PowSup}(t) I_{con,i}(t) dt \quad (25)$$

denklemdaki $I_{con,i}(t)$ ifadesi I düğümü için çekilen akımını gösterirken, $V_{PowSup}(t)$ ifadesi de güç beslemesinin voltaj seviyesini ifade eder. Düğüm enerji tüketimi mikro kontrollör birimi (MKB), radyo ve algılayıcı birimlerinin tüketimi olarak ayrılabilir (26).

$$E_{con,i}(T) = E_{M,i} + E_{Ra,i} + E_{sen,i} + E_{Oth.Uni,i} \quad (26)$$

MKB, alıcı-verici, ivme alıcısının farklı durumları için 1 dakikalık yürütüm sürelerinin için çekilen akım değerleri table I deki gibi ölçülmüştür. Bu değerler ve belirtilen işlevsel süreler kullanılarak, her bir birim hesaplanmıştır.

Tablo 9. MicaZ düğümün farklı blokları tarafından harcanan akım.

Event	Current	Duration	Energy Consumption
MCU check	0.8 mA	300×760 µs	474 µJ
(10×) Reading Acc. sensor + MCU idle	~ 3.7 mA	670 ms	6.4 mJ
Radio power up	~60 mA	590 µs	92 µJ
MCU activation	7.8 mA	760 µs	15.41 µJ
MCU Idle	~ 4 mA	-	-
Packet send from MCU to radio	23.8 mA	840 µs	51.97 µJ
Listen channel	22 mA	7.16 ms	410 µJ
Radio calibration + packet TX (25dBm)	13.2 mA	960 µs	32.94 µJ
TX 0dBm	17.2 mA	-	-
TX -1dBm	16.2 mA	-	-
TX -3dBm	15.5 mA	-	-
TX -5dBm	13.8 mA	-	-
TX -7dBm	12.5 mA	-	-
TX -10dBm	11 mA	-	-
- TX 15dBm	10 mA	-	-
TX -25dBm	8.5 mA	*	*
RX	19 mA	-	-
Standby time	24 µA	59.091 s	3.687 mJ
LED	2.2 mA	-	-
Total	-	60 s	11.162 mJ (186.04 µW)

4.4.2 Simülasyonun gereklilikleri ve yapısı

MicaZ algılayıcı düğümü için yaşam süresini gözlemlerken enerji kaynağın boşalmasını adına uzun süre beklemek gerekmektedir. Dahası, enerji hasadı için geliş süreci çoğu zaman seyrek ve deterministik olmayan bir yapıdadır. Bu nedenle

de, bu zaman sınırlaması engelini aşmak ve enerji kaynağının boşalma sürelerini farklı işletim modları ve enerji hasat süreçlerine karşılık belirleyebilmek için bir simülatöre ihtiyaç vardır.

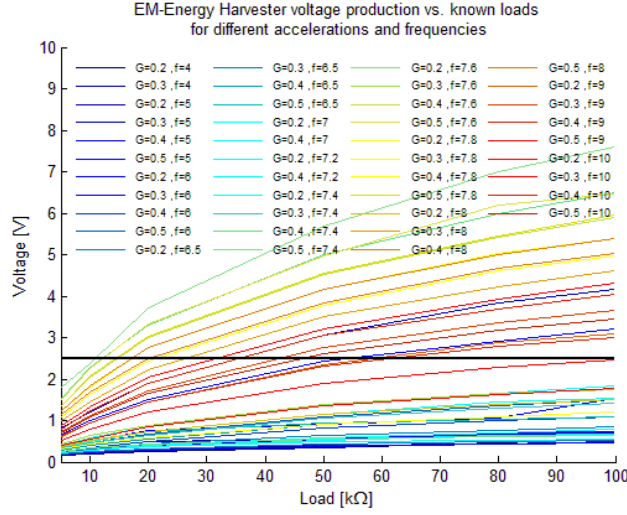
4.4.2.1 Simülatördeki Enerji Tüketim Birimleri

Kısım 4.4.1 içinde bulunan sonuçlara göre, MicaZ düğümünün her bir birimin enerji tüketimi simülatörde tanımlanmıştır. Algılama ve gönderme etkinlikleri için, MicaZ düğümü verilen görevleri bir devre süresince yapar. Bu süreç içinde de algılayıcının yaptığı kullanıcı tarafında belirlenen N sayıda okumayı, radyo ve mikrokontrolör birimlerinin etkinleşmesi takip eder. Algılayıcı ile örneklenen veriler mikrokontrollör birimi tarafından radyo birimine gönderilir. Radyo açılır ve kanalı dinlemeye başlar, bunu takiben veri paketleri gönderilir, arkasından da radyo birimi kapanır. Mikrokontrollör biriminin yaptığı denetleme ise sonraki işleme kadar etkin olur. Görev döngüsü, güç destek seviyesi, çevre vibrasyonu ve benzeri etkenler bu işlemin deney süresince tekrar sayısı belirler. Bu aşamalar ve gereken zaman Tablo 9daki değerler dikkate alınarak simülatöre uygulanmıştır.

4.4.2.2 Simülatördeki Enerji Üretim Birimleri

Simülasyon boyunca da enerji hasat sürecinin etkisi incelenebilir. Deney sonuçları, [75] çalışmasındaki gibi elektro-manyetik vibrasyon enerjisi ile beslenen bir hasatçı kurulumu ile elde edilmiştir. Enerji hasatçının, çalışma güç aralığını belirleyebilmek için bu deney, bilinen ivme, frekans değerlerine karşın enerji hasatçıya bağlı farklı yüklere göre yapılmıştır.

Dolu batarya için voltaj seviyesi yaklaşık olarak 2.5 V değerindedir. Enerji hasatçı ile bataryayı doldurabilmek için enerji hasatçının çıkış voltaj bataryanın uyku modundaki voltajından daha fazla olmalıdır. Bu demektir ki, enerji hasatçı bataryayı doldurabilmek için 2.5 V değerinin üzerinde bir vibrasyon koşulunda çalışmalıdır. Bu nedenle de, 2.5 V çıkış voltajı, güç üretmek için kabul edilebilir eşikdeğer olarak tanımlanabilir. Buna uygun bölgede güç üretimi yapabilecek vibrasyon kaynakları Şekil 87'de incelenmiştir.



Şekil 87.Farklı ivme frekanslarda uyarılan EM enerji üretici çıkışındaki voltajın yük direncine göre değişimi.

Sonraki aşamada da, MicaZ düğümün çalışırken enerji hasatçı olurken ve olmadan çektiği akımlar ölçülmüştür. Enerji hasatçısı yokken, MicaZ düğümün 1, 30 ve 60 saniyelik görev çevrimlerine karşılık sırasıyla 240 μ A, 44.7 μ A ve 41 μ A akımlarını çektiği gözlemlenmiştir. Tablo 10 de de enerji hasatçı varlığında elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Oluşan fark ise, enerji hasatçı olduğu zaman bataryaya aktarılan net akım değerini vermektedir.

Tablo 10. EM enerji üretici ile donatılmış MicaZ düğümde ihtiyaç duyulan ortalama akım değeri.

	Duty cycle	Acceleration			
		0.2g	0.3g	0.4g	0.5g
Freq 4 Hz	1 s	-	221 μ A	-	-
	30 s	-	4.82 μ A	-	-
	60 s	-	-5.17 μ A	-	-
Freq 5 Hz	1 s	-	-	-	206 μ A
	30 s	-	-	-	-2.32 μ A
	60 s	-	-	-	-10.9 μ A
Freq 7.2 Hz	1 s	-	-	-	92.9 μ A
	30 s	-	-	-	-89.8 μ A

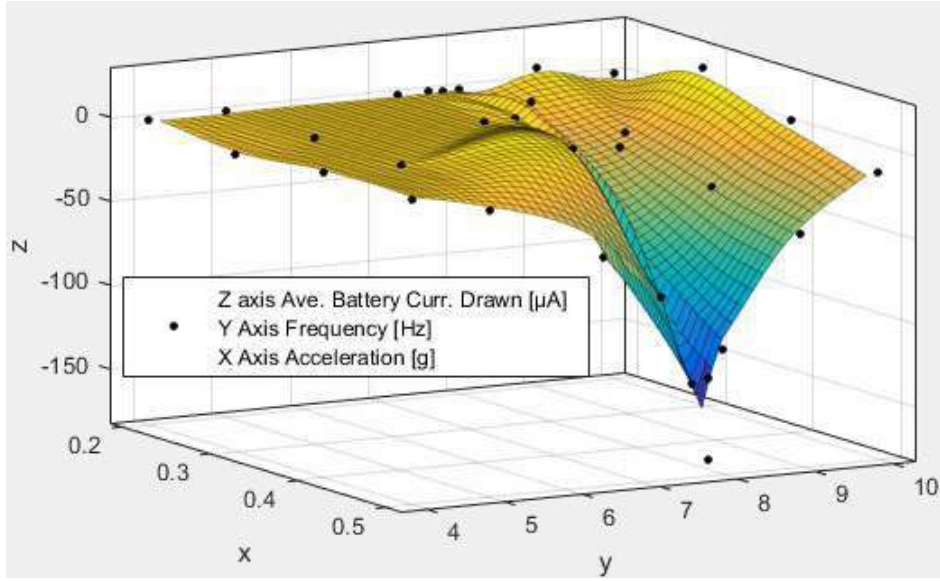
	60 s	-	-	-	-72.1 μ A
Freq 7.4 Hz	1 s	-	-	221 μ A	54.3 μ A
	30 s	-	-	25.6 μ A	-125 μ A
	60 s	-	-	-1.47 μ A	-172 μ A
Freq 7.6 Hz	1 s	-	-	152 μ A	64 μ A
	30 s	-	-	-34.9 μ A	-129 μ A
	60 s	-	-	-66.3 μ A	-126 μ A
Freq 7.8 Hz	1 s	-	245 μ A	125 μ A	79.5 μ A
	30 s	-	12.4 μ A	-58.1 μ A	-112 μ A
	60 s	-	9.01 μ A	-67.5 μ A	-123E μ A
Freq 8 Hz	1 s	-	143 μ A	1.06E-04	88.4 μ A
	30 s	-	-20.3 μ A	-65.6 μ A	-91.4 μ A
	60 s	-	-20.1 μ A	-64.6 μ A	-107 μ A
Freq 9 Hz	1 s	209 μ A	188 μ A	144 μ A	136 μ A
	30 s	20.3 μ A	-0.04 μ A	-25.2 μ A	-33.7 μ A
	60 s	7.70 μ A	-15.0 μ A	-30.6 μ A	-43.3 μ A
Freq 10 Hz	1 s	-	227 μ A	206 μ A	205 μ A
	30 s	-	26.5 μ A	11 μ A	-5.55 μ A
	60 s	-	19.9 μ A	4.95 μ A	-11 μ A

Sonraki aşamada da, MicaZ düğümün çalışırken enerji hasatçı olurken ve olmadan çektiği akımlar ölçümüştür. Enerji hasatçısı yokken, MicaZ düğümün 1, 30 ve 60 saniyelik görev çevrimlerine karşılık sırasıyla 240 μ A, 44.7 μ A ve 41 μ A akımlarını çektiği gözlemlenmiştir. Tablo 10da da enerji hasatçı varlığında elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Oluşan fark ise, enerji hasatçı olduğu zaman bataryaya aktarılan net akım değerini vermektedir.

Farklı durumlar için enerji hasadı ile gelen akımın ara değerleri Tablo 10'da belirtilen değerlerin interpolasyonu ile bulunabilir. MATLAB yazılımı üzerindeki "Fitting Tool"

uygulamasını kullanarak bu akım değerlerinin frekansa (y eksenini) ve ivmeye (x eksenini) göre Şekil 88'deki yüzey olarak çizilmiştir.

Şekil 88'de de görüldüğü gibi birçok frekans ve ivme değeri için pildeki akım değeri negatiftir. Bu enerji üreticinin pili şarj edebilecek kadar enerji üretebildiğini göstermektedir. Sonuçlara daha detaylı bakacak olursak ivmedeki artış üretilen enerjinin de artmasını sağlamaktadır. Enerji üreticinin rezonans frekansını 7.4 Hz olarak gözlemlendiğine göre bu üretici 7.4 Hz civarında titreşimlerin gözlemlendiği ortamlarda kullanılmak iyi sonuçlar verebilir.

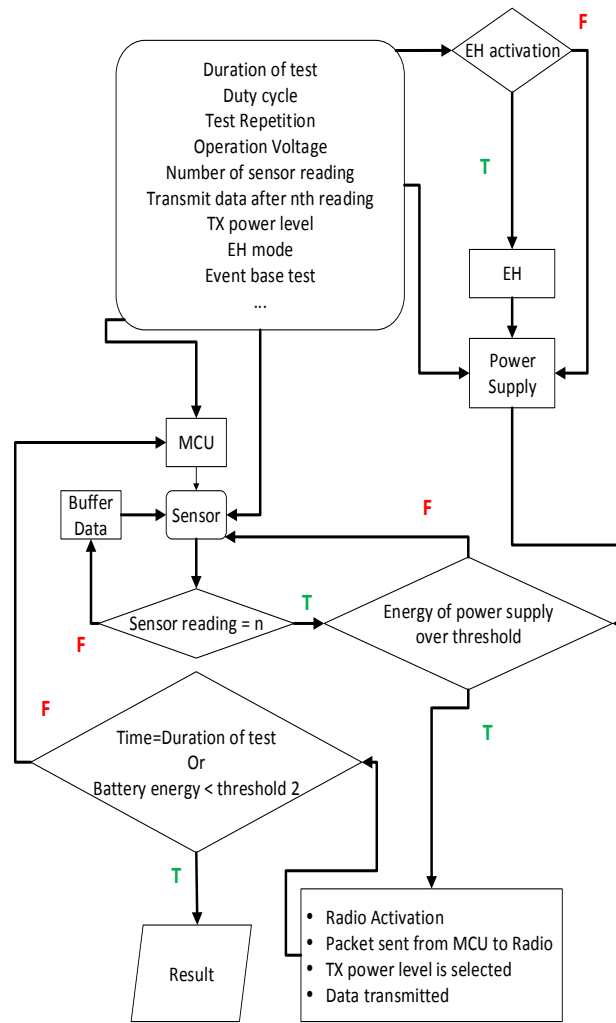


Şekil 88. MicaZ görev döngüsü 60 s olarak ayarlanıp EM enerji üreticisi ile donatıldığı zaman pilden çekilen ortalama akım değeri değişimi.

4.4.3 Simülasyonun Özellikleri

- Çekilen akım ve MicaZ cihazını farklı birimlerinin işlem süreleri gibi sabit girdiler laboratuvar deneyleri ile elde edilmiştir. (Tablo 9)
- Simülasyonun süresi ve çevrim döngüsü kullanıcı tarafından ayarlanabilir.
- Gönderim gücü seviyesi sabit bir değere atanabildiği gibi güç beslemesi ile gelen enerjiye de bağlıdır.
- Alınan veriler ninci okumadan sonra gönderilebilir. Bu demektir ki, eğer $n > 1$ ise, ninci okumaya kadar alınan veriler arabellekte saklanır, sonrasında gönderilir.
- Gönderim süreci de algılayıcı okumasına bağlı olabilir. Örnek olarak da, verinin bir eşik değeri altında ya da üstünde olmasına bağlı gönderim (rastgele gönderim) yapılabilir.

- Güç eşik seviyesi için de farklı değerler seçilebilir. Bu eşik seviyeleri dinamik gönderim gücü seviyesi ya da rastgele veri gönderimi politikaları ve benzeri uygulamalarda kullanılabilir.
- Hasat edilen enerji, deterministik ya da rastgele olarak varsayılabilir.
- Simülasyon çıktıları aşağıdakileri içerir:
 - Güç beslemesi enerjisinin zamana göre değişimini gösteren eğri.
 - Farklı birimlerin güç beslemesini kullanma oranlarını gösteren çubuklu grafikler ve sonuç kutuları.
 - Akım değişimi için zamana karşı bir eğri.



Şekil 89. Simülasyonun akış şeması.

4.4.4 Simülasyon sonuçları

4.4.4.1 Simülasyon Sonuçları İçin Pratik Değerlere Göre Karşılaştırma Ve Doğrulama

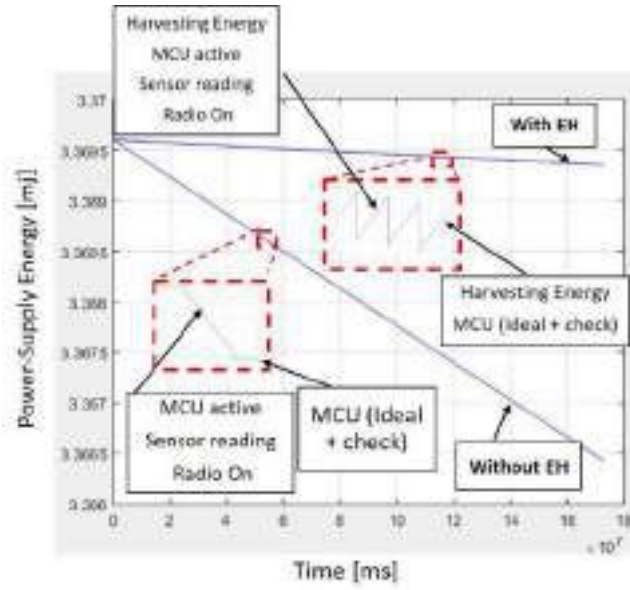
Simülatör çıktısı ve gerçek değerleri karşılaştırmak adına 48 saatlik bir deney planmıştır ve simüle edilmiştir. Gönderim güç seviyesi için en az akımın çekildiği -25dBm değeri seçilmiştir. İvme algılayıcısı 10 okuma yapar , 10uncu okumadan sonra radyo birim açılır ve veriler gönderilince tekrar kapanır. Güç beslemesi için simülasyon boyunca değişmeyen sabit bir voltaj değeri varsayılmıştır ve bu değer de 2.5 V değeridir. MicaZ düğümün diğer birimleri de seçili değil olarak işaretlenmiştir.

Enerji hasatçısı için vibrasyon kaynağının frekansı 7.4Hz ve ivmesi 0.4g seçilmiştir. 48 saat için güç beslemesi enerji değişimi Şekil 90'da gösterilmiştir. Burada gözlemlenmiştir ki, hasatçı olmadığı duruma karşı enerji hasatçı kurulan sistemin güç beslemenin % 90 lık kısmını karşılamaktadır. Bu gözlem de deneysel veriler ile tam uyum içerisinde olup, enerji hasatçısının 65µA değerindeki akımı karşılayarak %1042 oranında batarya ömrünün uzamasını sağlamaktadır [76]. Sonuç olarak da , simülatörün batarya ömrünü tahmin etmedeki keskinliği sınanmıştır. Bütün birimler için etkin oldukları süreler Tablo 11 üzerinde gösterilmiştir.

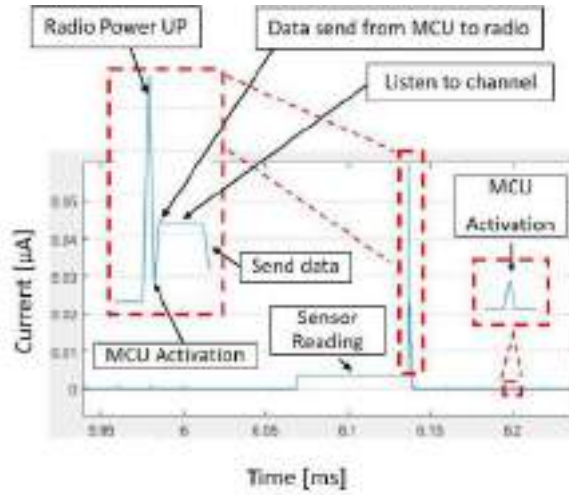
MicaZ düğümü için akım değişimi göstermek simülatörün bir diğer özelliğidir. Akım değişimi için yapılan simülasyon sonucu Şekil 91'de gösterilmiş olup, [76] çalışmasında gösterilen Şekil 92 ile benzerlik göstermektedir.

Tablo 11. Kısım 4'te yer alan senaryo için MicaZ'nin aktivite zamanı.

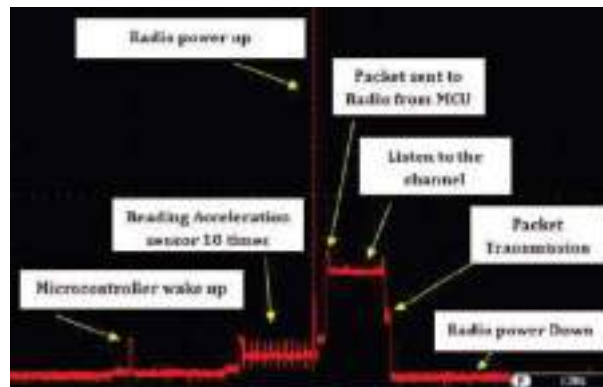
Component	mode	Time (msec)	Total Time(msec)
MCU	IDLE	1981440	172800000
	ADC NR	0	
	EXT STANDBY	0	
	SAVE	0	
	POWER STANDBY	169960320	
	POWER DOWN	0	
	MCU-check	852480	
	MCU Activation	2880	
	Packet sent From MCU to Radio	2880	
Radio	Power UP	2880	51840
	Listen	20160	
	send	28800	
	receive	0	
	Sleep	0	
	Idle	0	
Accelerometer sensor	read	1929600	1929600
LED	red	0	0
	yellow	0	
	green	0	



Şekil 90. Güç kaynağının 48 saatlik zaman aralığındaki enerji değişimi. (MicaZ EM enerji üretici ile donatılmış ve donatılmamış durumlar için).



Şekil 91. Sadece ivme ölçer aktifken MicaZ akımının zamanla değişimi.



Şekil 92. Sadece ivme ölçer aktifken ve radyo düşük güç ile çalışırken gözlenen MicaZ akımı [76].

4.4.4.2 Rastgele Enerji Hasadı Sürecinin Benzetimi

Enerji hasatçı KAD düğümünün enerji simülasyonu için ayrı zaman dilimli bir yapı temel alınmıştır. Simülasyon süresi de eşit uzunluktaki N zaman diliminden oluşmaktadır. Zaman dilimleri için enerji tüketimi ve enerji hasadı olaylarının eş zamanlı olabileceği de varsayılmıştır. Rastgele enerji gelişi sürecini simüle etmek adına iki farklı senaryo düşünülmüştür. İlk senaryo için, her zaman diliminde enerji gelme olasılığı q diye tanımlanırken, gelmeme olasılığı 1-q olmaktadır.

Ek olarak da hasat edilen enerjinin ayrı zaman dilimleri arasında bağımsız olduğu varsayılırsa, enerji hasat süreci bir Bernoulli süreci olmaktadır. Simülasyon değerleri için, T_i rastgele değişkenini i zaman dilimi için hasat edilen enerji olarak ve S_N değişkeninin de simülasyon sonunda elde edilen enerji olarak tanımlayalım.

$$T_i = \begin{cases} 1 & q \text{ olasılığı ile enerji hasadı yapılırken} \\ 0 & 1 - q \text{ olasılığı ile enerji hasadı yapılmadığında} \end{cases} \quad (27)$$

$$S_N = T_1 + T_2 + \dots + T_i + \dots + T_N \quad (28)$$

Yapılan simülasyon için seçilen N değerleri çok büyük olduğundan, enerji gelme olayının toplam süreç içerisindeki oranın q'ya yakın olduğunu söyleyebiliriz. Bu nedenle de, hasat edilen enerji toplamda Denklem (29) ile hesaplanan enerjiye yakın olur. Simülasyon değerleri ve matematiksel değerler Tablo 12 de karşılaştırılmıştır.

$$\text{Total_Harvested_En} = \text{ETS} \times N \times q \quad (29)$$

ETS değeri de bir zaman dilimde gelebilecek enerji miktarını temsil etmektedir.

Tablo 12. Üretilen enerji değerleri Her zaman aralığında hasatlanabilen enerji = 1.6937e-04

Duration (N)	Number of energy arrival	Prob. Of Harvesting Energy (q)	Total Harvested Energy result	
			Math.	Simul.
180000	126181	0.7	21.341	21.3716
180000	35696	0.2	6.0974	6.0459
300000	119700	0.4	20.3247	20.2739
300000	269901	0.9	45.7306	45.7139

İkinci senaryoda ise, ilk senaryodan farklı olarak zaman dilimlerinde gelen enerji miktarlarının bir Markov zincir üzerinden birbirine bağlı olduğu düşünülmüştür. Bu zincir de, eğer indirgenemez ve aperiodyk olma koşullarını sağlıyorsa , hasat edilen enerji durumunun özebir durağan dağılımı olur.

Örnek olarak ise, (6) ve (7)de gösterildiği gibi bir Markov zinciri oluşturulup, simülasyon sonucuna göre Tablo 13deki gibi bir karşılaştırma yapılmıştır.

$$P = \begin{bmatrix} p(NE^{T_i}|NE^{T_{i-1}}) & p(E^{T_i}|NE^{T_{i-1}}) \\ p(NE^{T_i}|E^{T_{i-1}}) & p(EH^{T_i}|E^{T_{i-1}}) \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 \\ 0.8 & 0.2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\pi = [0.6667 \quad 0.3333] \quad (32)$$

Tablo 13. Üretilen enerji değerleri

Duration (N)	Number of energy arrival	Harvestable Energy for a time-slot (ETS)	Total Harvested Energy result	
			Math.	Simul.
120000	39786	1.6937e-04	6.7749	6.7387

4.4.4.3 Rastgele Enerji Üretimi ve adaptif verici gücünün simülasyonu

WSN'deki verici güç seviyesinin ayarlanması ağın enerji verimliliği performansını değerlendirmek için önemlidir. Bu kısım için Kısım V'te yer alan senaryo göz önüne alınmıştır. Bu kısımdaki tek farklılık verici gücü ayarlanabilir moda alınmıştır, yani enerji seviyesi ayarlanabilmektedir. Ayarlanabilir verici gücünün yaşam ömrü üzerindeki etkiyi görebilmek için simülasyonlar 0 dBm ile başlatılmış ve güç kaynağı seviyesi ilk seviyenin %99, %98 ve %97'sine indiği zaman sırası ile -1dBm, -3dBm ve -5dBm. Eğer güç kaynağı seviyesi ilk değerinin %97'sinin altına inerse verici gücünün -25 dBm'e (En düşük enerji tüketimine sahip mod) değişmesi ayarlanmıştır. Dahası enerji üreteçten gelen gücün rastgele bir tabiatta olması için frekansı 7.4 Hz ile 0.25 Hz arasında değişmektedir ve titreşim ivmesi 0.4g olarak ayarlanmıştır.

Tablo 14. Kısım 4'te belirtilen senaryo için MicaZ EM enerji üretici ile donatıldığında radyo vericisinin aktif olma zamanı.

Component	mode	Time (msec)
Radio TX	0 dBm	128330
	-1 dBm	88210
	-3 dBm	87340
	-5 dBm	88030
	-25 dBm	125420

4.4.5 Sonuçlar

Kablosuz ağlar için uygulamaları geliştirir ve eniyileştirirken iyi bir simülasyon aracı çok yardımcı olabilir. Bu çalışmada da, bir kablosuz algılayıcı ağ düğümünün etkin yaşam ömrünün tahmini için özelleşmiş bir simülatör önerilmiştir. MicaZ algılayıcı için enerji hasatçı donanımıyla birlikte bir sına ortamı kurulmuştur. Sınama ortamında da gözlemlenen sonuçlar simülatörün enerji tüketimini ve çekilen akım değişimleri için keskin sonuçlar verdiğini doğrulamıştır. Bu simülatörün de büyük algılayıcı ağları için genişletilmesi ve sonuç olarak da kablosuz algılayıcı ağları için etkin bir tasarım aracı olması mümkündür. Farklı düğümler için (TelosB, IRIS) bu simülatörü kalibre ederek güç/enerji tüketimi ve akım değişimlerinin simüle edilmesi olasıdır.

5 TARTIŞMA/SONUÇ

Bu proje kapsamında, ortamdaki yenilenebilir enerjiyi hasatlayarak kendi enerji depolama birimlerinde gerektiği gibi depolayan kablosuz ağ yapılarının teorik modellemesi, optimizasyonu, tasarımı, prototiplemesi ve deneysel verifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma, ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Prof. Dr. Elif Uysal Bıykoğlu ve Prof. Dr. Haluk Külâh'ın araştırma gruplarında ortak olarak yürütülmüştür. Proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları uluslararası konferans ve bilimsel dergilerde yayınlanarak literatüre önemli katkılar sağlanmıştır.

Bu proje için yapılan kuramsal ağırlıklı çalışmalar kapsamında çoğunlukla enerji hasatçı haberleşme ağlarını hedef alan, enerji verimliliği üzerine kurulu haberleşme senaryoları ve problemleri üzerinde durulmuştur. Bunun temel sebebi, çevrimiçi çözümlerin uygulanabilir ve denenebilir gerçek zamanlı haberleşme protokollerine dönüşebilmeleri açısından oldukça önemli olmalarıdır. Bu proje özelinde, ilgili literatürlerde daha önceden detaylı bir şekilde araştırılmamış olan çevrimiçi problemler ve çözümleri üzerinde durulmuştur. Çevrimiçi problem için yapılan çalışmalarda gözlemlenen genel sonuç, kuramsal olarak eniyi çözümler algoritmik zaman karmaşıklığı açısından var olan KAA düğümlerinin donanımları için uygun olmazken, daha düşük karmaşıklıkta olan çevrimiçi çözümlerin kuramsal eniyi çözümlere yakın performans sergilemesi olmuştur.

Bu bağlamda da yapılan ilk çalışma, değişken paket trafiğine uyum sağlayan bir göndermecin, iletim sürecini enerji verimliliği açısından eniyileştirmesi ve bunun sonucunda ortaya çıkan enerji gereksinimi incelemiştir. İlgili problem için önerilen çevrimiçi 'Tembel Çizelgeleme' algoritması, benzetim deneyleriyle sınanmıştır.

Sonraki çalışmada ise, enerji hasatçı ve algılayıcı bir göndermecin, güncelleme gönderim sürecini, güncellemelerin alındığı tarafta gözlemlenen ortalama ve en yüksek 'bilgi yaşı' açısından eniyileştirmesi problemi incelenmiştir. Bu problem için de, eniyi çevrimdışı / çevrimiçi çözümler gösterilmiş ve çevrimdışı çözümün yapısını yola çıkan eniyialtı çevrimiçi politika olarak 'Dengeli Güncelleme' (BU) politikası önerilmiş ve bu politikanın bilinen pratik sistemlerde uygulanmakta olan Açgözlü (Greedy) politikaya göre büyük bir üstünlük sağladığı gösterilmiştir.

Diğer çalışmada da, çoklu antenli bir merkeze enerji hasatçı kullanıcılar tarafından kanal kestirimi geribildirim en enerji verimli şekilde yapılması gösterilmiş ve geribildirim paketlerinin sabit yerine değişken uzunluklu çekildiğinde başarımın

önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Bütün sonuçlar ise, benzetim deneyleri ile desteklenmiştir.

Deneysel ağırlıklı çalışmalarda ise, öncelikle enerji üreteçleri ile ilgili spesifikasyonların belirlenmesi konusunda çalışmalar yapılmış, daha sonra ortamda var olan enerji kaynakları arasında titreşim enerjisi üzerine odaklanarak, çeşitli titreşim frekansları, genlikleri, vb. altında elde edilebilecek enerji miktarı çeşitli enerji çevrim yöntemleri (elektromanyetik, piezoelektrik, vs) uygunlukları, kablosuz algılayıcı ağı düğümlerinin bulunabileceği ortamlar da dikkate alınarak, incelenmiştir. Proje kapsamında yapılan çalışmalarda, ortamdaki titreşimlerin karakterlerinin belirlenmesi, piezoelektrik enerji çevrim metodunu kullanan enerji üreteçlerinin karakterizasyonu ve piezoelektrik enerji üreteçleri için doğrultucu devrelerin geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır.

Günlük hayatta rastlanan titreşimlerin analizini yapabilmek için MicaZ modülünde yer alan 2-eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Yapılan ölçümlerin doğruluğunun anlaşılması için ilk önce bir titreşim üretici ile sabit genlik ve frekansta bir titreşim üretilmiş ve bu MicaZ tarafından ölçülmüştür. Bu sayede ivmeölçer tarafından ölçülen dijital bilginin gerçek sayılar dönüştürülmesi için gerekli formül elde edilmiştir. Dolayısı ile ölçülen ivmenin zamana bağlı değişimi ve frekans spektrumu elde edilmiştir. Daha sonra ise kurulan ivmeölçer sistemi ile koşan bir insanın salınım frekans karakteristikleri gözlemlenmiştir. Koşan bir insanın bileğine yerleştirilen düzenek ile titreşim frekansları karakterize edilmiş ve baskın frekansın 2.8Hz civarında olduğu saptanmıştır. Elektromanyetik enerji üreteçlerinin bu seviyedeki düşük frekanslarda çalışmak için piezoelektrik üreteçlere göre uygun olduğu düşünülmüştür. Daha yüksek frekanslı uygulamalar için (ör. Kapılardaki, camlardaki titreşimlerden enerji elde etmek (>40 Hz)) kullanılacak enerji üreticinin piezoelektrik üreteç olmasının daha avantajlı olduğu düşünülmüştür.

Düşük frekanslı EM üreteç uygulaması kapsamında, koşucular üzerinde taşınabilir sensör sistemlerinde kullanılacak 2.5-2.8 Hz aralığındaki titreşimlerde çalışabilecek bir elektromanyetik enerji üretici tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Üreteç 2-3Hz, 0.15-0.2 g gibi düşük değerli titreşimlerle test edilmiş, daha sonra ise doğrultucu elektronik devre ile birleştirilerek testler tekrarlanmıştır. Testler sonucunda, üreticinin 2.65 Hz 0.15 g titreşimlerde 120 μ W DC güç (20 k Ω yük direnci ile) üretebildiği görülmüştür. Daha sonra, sistem bir koşucunun el bileğine ve beline bağlanarak test edilmiş ve 1.2 M Ω yük üzerinde 5 V civarında DC voltaj üretebildiği gösterilmiştir.

Projemizin birinci döneminde, enerji üreticileri üzerinde yukarıda sözü geçen çalışmalara paralel olarak, enerji üreticilerinin kullanılacağı Kablosuz Algılayıcı Ağı uygulama test düzeneğinin hazırlanması doğrultusunda çalışmalar yapılmıştır. Duyarga ağı (KAA) düğümlerini oluşturan MicaZ sistemlerinin spesifikasyonları incelenmiş, ve aşağıda ayrıntısıyla anlatıldığı gibi, belirli bir çalışma gerilimi altında çeşitli operasyonel durumlarda kullandıkları akım (dolayısıyla güç) değerleri ortaya konulmuştur.

Yukarıda belirtilen EM enerji üretici dışında, daha küçük boyutlu (AA pil boyutlarında) ve biraz daha yüksek frekanslarda çalışan (~10 Hz) çeşitli EM enerji üretici prototipleri üretilmiş ve doğrultucu devreleri ile birlikte karakterizasyonları yapılmıştır. Bu üreticiler arasından en yüksek DC gücü üreten prototip seçilmiş ve bu prototipin WSN'ler için alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılıp kullanılamayacağına araştırılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar kapsamında bu üreticilerle pillerin şarj edilebildiği, pillerin şarj karakteristiğinin standart şarj cihazları ile şarj edildikleri duruma benzerliği ve bu yöntemle MicaZ düğümleri kullanan **bir KDA'nın çalışma ömrünün 10 kata kadar arttırılabildiği literatürde ilk kez gösterilmiştir**. Bu çalışma projenin önemli bir çıktısıdır: bir adet duyarga düğümünün tüm protokol işlevlerini yapar halde, görev döngüsü yeterince düşük seçilmiş olarak, tamamen elektromanyetik enerji hasat üreticinden beslenecek şekilde (yani batarya seviyesi titreşim enerjisi ile tamamen takviye edilecek şekilde) çalışabildiği gösterilmiştir.

Daha yüksek güç döngülerinde de aynı enerji-nötr çalışmayı tekrarlayabilmek için piezoelektrik elemanlar tedarik edilmiş ve karakterizasyonları tamamlanmıştır. Bu aşamadan sonra MicaZ düğümü bir piezoelektrik enerji üretici ile beraber test edilmiştir. Bu amaç ile, daha önce testleri yapılan bir üreticinin çıkışındaki alternatif akım bir doğrultucu ile doğrusal akıma çevrilmiş ve bir tampon kapasitör üzerine depolanmıştır. Devre, depolanan voltaj belli bir değeri aştığı zaman bir regülatör devresini aktif hale getirecek ve 2.5 V'luk sabit bir voltaj ile sensör düğümünü sürmeye başlayacak şekilde tasarlanmıştır. Depolanan voltaj belli bir değer altına düştüğü zaman ise regülasyon kaybolmakta ve regülatör devresi kapatılmaktadır. Böylece kapasitör üzerinde yeniden yük birikimi sağlanmaktadır. Bu devrenin optimizasyonu için farklı testler yapılmıştır. Ayrıca tasarlanan devre farklı enerji üreticileri ile de test edilmiştir. Yapılan bu çalışmalar sonucunda, 68 Hz ve 0.3g'lik sürekli titreşim ortamında, MicaZ düğümünün 30 saniyede bir ana bilgisayara veri aktarması için gerekli enerjinin tamamının kullanılan enerji üreticiden sağlanabildiği görülmüştür. Titreşim miktarı ile veri gönderme sıklığı arasında bir optimizasyon

yapılabilmektedir. **Bu şekilde, piezoelektrik enerji üreticileri kullanılarak KDA'larda enerji-nötr operasyon deneysel olarak literatürde ilk kez gösterilmiştir.**

Kablosuz duyarga ağlarının enerji verimliliği açısından optimizasyonuna yönelik olarak durum-bazlı bir senaryo üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Senaryoya göre, duyarga düğümü, ana istasyona periyodik olarak bilgi göndermek yerine, sadece ölçülen parametre (ör. ivmelenme) belli bir değeri aştığında veri gönderimi yapacaktır. Bu çalışmada, Mica-Z modülü anlatılan senaryoya göre programlanmış ve piezoelektrik enerji üretici ve üreticinin doğrultma ve regülasyon devreleri ile beraber, pilsiz olarak çalıştırılmıştır. Daha önceki dönemde yapılan testlerde, üretilen enerji ile, ancak 10s'de bir periyodik olarak data gönderilebiliyordu. Fakat durum-bazlı senaryo ile, eğer gerekli olursa, aynı koşullarda üretilen enerji ile her 1 saniyede 1 data göndermenin mümkün olabileceği, ve dolayısıyla sistemin enerji veriminin arttırıldığı gösterilmiştir.

Daha sonra, yine piezoelektrik enerji üreticileri ile MicaZ düğümler kullanılarak, **enerji üreticili kendinden adaptif bir sensör düğümü üzerinde çalışılmıştır.** Buradaki senaryoda MicaZ düğümü bilgi gönderim zamanını ayarlayarak düşük titreşimlerden gelen güce yetecek kadar bilgi gönderir veya enerji yüksek gelirse sonrası için depolama yapmasını sağlar. Kendinden-adaptif MicaZ düğüm, yarı rastgele titreşimler ile de uyarılmış ve ana istasyon tarafından ölçülen zaman aralıkları ve ivmedeki düşüş değerlerinin sırası ile kondansatör (enerji deposu) üzerindeki voltaj ve titreşim seviyesi ile tam uyum içinde olduğu gösterilmiştir. Görev gerçekleştirme süresinin uyarım seviyesi ve tampondaki enerji durumu ile tam uyduğu gözlemlenmiştir.

Son olarak, bu dönem içinde, duyarga ağlarının enerji ihtiyacı ve üretilen enerjinin tahmin edilebilmesi, farklı çalışma senaryolarının kolayca karşılaştırılabilmesi ve sensör düğümünün çalışma süresinin kestirilebilmesi amacıyla bir simülatör tasarlanmış ve Matlab ortamında kodlanmıştır. Geliştirilen simülatörde, daha önceki dönemlerde MicaZ modülleri ve çeşitli enerji üreticileri üzerinde yapılan enerji harcama/üretim testlerinin sonuçları, çalışma modlarının süreleri ve enerji tüketimleri vs. girdi olarak kullanılmıştır. Bunun yanında, enerji, paketler halinde, sabit ya da probabilistik olarak modellenmiştir. Bu şekilde geliştirilen simülatörde elde edilen üretilen ve harcanan enerji değerleri hem matematiksel hesaplarla hem de test sonuçları ile karşılaştırılmış ve bu sonuçları başarıyla modelleyebilecek hassaslıkta sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Örneğin, deneysel olarak gösterilen 10 katlık pil ömrü artışı, geliştirilen simülatörde de aynı şekilde bulunmuştur. Elde

edilen sonular göstermektedir ki geliştirilen simülatör sayesinde duyarga ağlarının hızlı ve basit bir biçimde modellenmesi ve çalışma koşullarının belirlenmesi mümkün olacaktır.

Sonuç olarak, proje kapsamında, kendi enerjisi üreten duyarga ağları ile ilgili olarak hem kuramsal hem de deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kuramsal çalışmalar ile ilgilenilen probleme yeni yaklaşımlar getirilmiş, deneysel çalışmalarda kablosuz duyarga ağlarının pil ömürlerinin uzatılabildiği ya da pilsiz çalıştırılabildiği ilk kez gösterilmiştir. Proje, başlangıçta öngörüldüğü gibi, kendi enerjisi üreten duyarga ağlarının günlük hayatta kullanılabilir hale gelebilmeleri için önemli olan ve yukarıda özetlenen çıktıların oluşturulmasına olanak sağlamıştır.

6 KAYNAKLAR

- [1] P. Glynne-Jones and N.M. White, "Self-powered systems: A review of energy sources," *Sensor Review*, Vol. 21, No. 2, pp. 91-97, 2001.
- [2] S. Roundy, "Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion," Ph.D. Thesis in Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, 2003.
- [3] M. Mizuno et. al., "Investigation of a resonance microgenerator," *J. of Micromech. Microeng.*, Vol 13, pp. 209-216, 2003.
- [4] S. Meninger et. al., "Vibration-to-electric energy conversion," *IEEE Trans. on VLSI Systems*, Vol. 9, No. 1, pp. 64-76, 2001.
- [5] C.B. Williams et. al., "Analysis of a micro-electric generator for microsystems," *Sens. and Actuators A* Vol. 52, pp. 8-11, 1996.
- [6] R. Amirtharajah, A.P. Chandarakasan, "Self-powered signal processing using vibration based power generation," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 22, May 1998.
- [7] T. Sterken et. al., "An Electret-Based Electrostatic Micro-Generator," *Digest of Transducers 2003*, pp. 1291-1295.
- [8] E. E. Aktakka, R. L. Peterson, and K. Najafi, "A self-supplied inertial piezoelectric energy harvester with power- management IC," *Proc. of Int. Solid-State Circuits Conf.*, pp. 120-121, Feb. 2011.
- [9] Y. K. Ramadass, and A. P. Chandrakasan, "An efficient piezoelectric energy harvesting interface circuit using a bias-flip rectifier and shared inductor," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 45, no. 1, pp. 189-204, Jan. 2010.
- [10] M. Marzencki, Y. Ammar, and S. Basrouf "Integrated power harvesting system including a MEMS generator and a power management circuit," *Sensors & Actuators A: Phys.*, vol. 145-146, pp. 363-370, 2008.
- [11] X. Cao, W. J. Chiang, Y. C. King and Y. K. Lee "Electromagnetic energy harvesting circuit with feedforward and feedback DC-DC pwm boost converter for vibration power generator system," *IEEE Trans. on Power Elect.*, vol. 22, no. 2, pp. 679-685, Mar. 2007.
- [12] T. Galchev, J. McCullagh, R. L. Peterson and K. Najafi "A vibration-harvesting system for bridge health monitoring applications," *Proc. of PowerMEMS 2010 Workshop*, Leuven, Belgium, pp. 179-182, Nov. 30-Dec. 3, 2010.
- [13] L. Wang, T. J. Kazmierski, B. M. Al-Hashimi, S. P. Beeby, and R. N. Torah "An integrated approach to energy harvester modeling and performance

- optimization,” Proc. of Behavioral Modeling and Simulation Workshop, San Jose, CA, USA, pp. 121-125, Sept. 20-21, 2007.
- [14] A. Rahimi, O. Zorlu, A. Muhtaroglu and H. Kulah “A compact electromagnetic vibration harvesting system with high performance interface electronics,” EUROSENSORS XXV, Athens, Greece, Sept. 4-7, 2011.
- [15] M. Ghovanloo and K. Najafi, “Fully integrated wideband high-current rectifiers for inductively powered devices,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 39, no. 11, pp. 1976–1984, Nov. 2004.
- [16] A. Rahimi, O. Zorlu, A. Muhtaroglu and H. Kulah “A vibration-based electromagnetic energy harvester system with highly efficient interface electronics,” Proc. of 16th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Beijing, China, pp. 2650-2653, Jun. 5-9, 2011.
- [17] İ. Sarı, T. Balkan, and H. Kūlah, "An Electromagnetic Micro Power Generator For Low Frequency Environmental Vibrations Based on The Frequency Up-Conversion Technique" IEEE Journal of MEMS, Vol. 19, No. 1, pp. 14-27, January 2010, (doi: 10.1109/JMEMS.2009.2037245)
- [18] E. T. Topal, Ö. Zorlu, H. Kūlah, A. Muhtaroglu, "A Cr-Ni Thermoelectric MEMS Energy Harvester for Low Profile Applications," International Conference on Energy Aware Computing, ICEAC 2011, December 2011, Istanbul.
- [19] H. Uluşan, K. Gharehbaghi, O. Zorlu, A. Muhtaroglu, and H Kūlah, “An Efficient Integrated Interface Electronics for Electromagnetic Energy Harvesting from Low Voltage Sources,” accepted to International Conference on Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems, Transducers’13 to be held in Barcelona, Spain, on June, 2013.
- [20] H. Uluşan, K. Gharehbaghi, Ö. Zorlu, A. Muhtaroglu and H. Kūlah, “A Fully Integrated and Battery-Free Interface for Low-Voltage Electromagnetic Energy Harvesters,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 7, pp. 3712-3719, 2015.
- [21] L. Beker, H. Kulah, and A. Muhtaroglu, “Piezoelectric cantilever prototype for energy harvesting in computing applications,” in IEEE Intl. Conf. Energy Aware Computing (ICEAC), 2011.
- [22] L. Beker, O. Zorlu, H. Kulah, and A. Muhtaroglu, “Hybrid energy harvesting from keyboard,” in IEEE Intl. Conf. Energy Aware Computing (ICEAC), 2011.
- [23] L. Beker, A. Muhtaroglu, and H. Kūlah, “A novel method for piezoelectric energy harvesting from keyboard,” in Proceedings SPIE Smart Structures and Materials NDE, 2012.

- [24] T. T. Le, J. Han, A. Von Jouanne, S. Member, K. Mayaram, and T. S. Fiez, "Piezoelectric Micro-Power Generation Interface Circuits," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 6, pp. 1411–1420, 2006.
- [25] Kushino, Y.; Koizumi, H., "Piezoelectric energy harvesting circuit using full-wave voltage doubler rectifier and switched inductor," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE* , vol., no., pp.2310,2315, 14-18 Sept. 2014.
- [26] G. Ottman, H. Hofmann, A. Bhatt, G. Lesieutre, "Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply," *IEEE Trans. Power Electron.* 17 (5) (2002) 669–676.
- [27] G. Ottman, H. Hofmann, A. Bhatt, G. Lesieutre, "Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode," *IEEE Trans. Power Electron.* 18 (2) (2003) 696– 703.
- [28] E. Lefeuvre, a. Badel, C. Richard, L. Petit, and D. Guyomar, "A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 126, no. 2, pp. 405–416, Feb. 2006.
- [29] S. Chamanian, Ö. Zorlu, H. Külah, and A. Muhtaroglu, "An adaptive piezoelectric energy harvesting interface circuit with a novel peak detector," Accepted to publish in 2015 5th Annual International Conference on Energy Aware Computing Systems and Applications (ICEAC).
- [30] Guibas, Leonidas and Zhao, Feng, *Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach*, Morgan Kaufman Publishers, San Francisco, CA, 2004.
- [31] Jun Zheng and Abbas Jamalipour, "Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective", A John & Sons, Inc, and IEEE, 2009.
- [32] W. Heinzelman, "Application specific protocol architectures for wireless networks", PhD Thesis, MIT, 2000.
- [33] K. Sohrabi et al., "Protocols for self-organization of a wireless sensor network", *IEEE Personal Communications* 7(5) (2000)16-27.
- [34] K. Akkaya and M. Younis , "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks" , *Ad Hoc Network*, Elsevier , vol. 3 , no. 3 , pp.325 -349 , 2005.
- [35] Al-Karaki A. Kamal , "Routing Techniques in Wireless Sensor networks: A Survey" , *Security and Networks* , vol. 11 , no. 6 , pp.6 -28 , 2004.
- [36] R.V. Biradar, V. C. Patil, S. R. Sawant and R. R. Mudholkar , "Classification and Comparison of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks" , *Special Issue on Ubiquitous Computing Security Systems* , vol. 4 , no. 2 , pp.704 -711 , 2009.

- [37] S. Guo and O. Yang , "Energy-Aware Multicasting in Wireless Ad hoc Networks: A Survey and Discussion" , Computer Communications, Elsevier , vol. 30 , no. 9 , pp.2129 -2148 , 2007.
- [38] N. Tekbiyik and E. Uysal-Biyikoglu, "Energy efficient wireless unicast routing alternatives for machine-to-machine networks," in Journal of Network and Computer Applications, 2011.
- [39] Q. Wang, M. Hempstead and W. Yang , "A Realistic Power Consumption Model for Wireless SensorNetwork Devices" , Proc. 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad HocCommunications and Networks , vol. 1 , pp.286 - 295.
- [40] S. Ehsan and B. Hamdaoui , "A Survey on Energy-Efficient Routing Techniques with QoSAssurances for Wireless Multimedia Sensor Networks" , IEEE Commun. Surveys Tuts. , vol. 14 , no. 2 ,pp.265 -278 , 2011.
- [41] H. Zhou, D. Luo, Y. Gao and D. Zuo , "Modeling of Node Energy Consumption for Wireless Sensor Networks" , Wireless Sensor Network , vol. 3 , no. 1 , pp.18 -23 , 2011.
- [42] S. Chalasani, J. M. Conrad, "A Survey of Energy Harvesting Sources for Embedded Systems," in Southeastcon, 2008. IEEE In Southeastcon, 2008. IEEE (2008), pp. 442-447.
- [43] Winston K.G. Seah, Z.A. Eu, and H.P. Tan, "Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting – Survey and Challenges," in Proceedings of the 1st International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology (Wireless VITAE), May 17-20, 2009, Aalborg, Denmark.
- [44] W. K. Seah, Z. A. Euy, H.-P. Tan, "Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) - Survey and Challenges," in 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory, and, Aerospace and ElectronicSystems Technology (Wireless VITAE), pp. 1-5, 2009.
- [45] K. Lin, J. Hsu, S. Zahedi, D. Lee, J. Friedman, A. Kansal, V. Raghunathan, M. Srivastava, "Helio mete: Enabling long-lived sensor networks through solar energy harvesting," in Proceed- ings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), San Diego, CA, USA, p. 309, 2005.
- [46] R. Torah, P. Glynne-Jones, M. Tudor, T. O'Donnell, S. Roy, S. Beeby, "Self-Powered Autonomous Wireless Sensor Node Using Vibration Energy Harvesting," Measurement Science and Technology 19 (12).

- [47] R. S. Liu, P. Sinha and C. E. Koksal, "Towards Achieving Perpetual Operation In Rechargeable Sensor Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking (TON)*, submitted for publication, 2010.
- [48] Y. Levron, D. Shmilovitz, L. Martinez-Salamero, "A Power Management Strategy for Minimization of Energy Storage Reservoirs in Wireless Systems With Energy Harvesting," in *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 58, no. 3, pp. 633-643, March 2011.
- [49] V. Sharma, U. Mukherji, V. Joseph, and S. Gupta, "Optimal energy management policies for energy harvesting sensor nodes," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 4, pp. 1326–1336, 2010.
- [50] R. Srivastava and C. Koksal, "Basic performance limits and tradeoffs in energy-harvesting sensor nodes with finite data and energy storage," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 21, no. 4, pp.1049–1062, Aug 2013.
- [51] C. K. Ho and R. Zhang, "Optimal energy allocation for wireless communications powered by energy harvesters," in *Proc. IEEE ISIT*, Jun. 2010, pp. 2368–2372.
- [52] C.M.Vigorito, D.Ganesan, and A.G.Barto, "Adaptive control of duty cycling in energy-harvesting wireless sensor networks," in *Proc. IEEE SECON*, San Diego, CA, Jun. 2007, pp. 21–30.
- [53] B. Bacinoglu and E. Uysal-Biyikoglu, "Finite-horizon online transmission scheduling on an energy harvesting communication link with a discrete set of rates," *Communications and Networks, Journal of*, vol. 16, no. 3, pp. 393–300, June 2014.
- [54] O. Ozel and S. Ulukus, "Information-theoretic analysis of an energy harvesting communication system," in *Proc. IEEE PIMRC*, Istanbul, Turkey, Sep. 2010, pp. 330–335.
- [55] Ozel, O.; Ulukus, Sennur "Achieving AWGN Capacity Under Stochastic Energy Harvesting", *Information Theory, IEEE Transactions on*, pp. 6471 - 6483 Volume: 58, Issue: 10, Oct. 2012.
- [56] M. Gorlatova, A. Wallwater, and G. Zussman, "Networking low-power energy harvesting devices: Measurements and algorithms," in *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, pp. 1602 –1610, April 2011.
- [57] J. A. Paradiso and M. Feldmeier, "A compact, wireless, self-powered pushbutton controller," in *Proc. Ubicomp*, Oct. 2001, pp. 299–304.
- [58] J.M.Rabaey, M.J.Ammer, J.L.daSilva, D.Patel, and S.Roundy, "PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking," *Computer*, vol. 33, no. 7, pp. 42–48, Jul. 2000.

- [59] W. Weber, "Ambient intelligence: Industrial research on a visionary concept," in Proc. ISLPED, Aug. 2003, pp. 247–251.
- [60] S. Meninger, J. O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A. Chandrakasan, and J. H. Lang, "Vibration-to-electric energy conversion," IEEE Trans. VLSI Syst., vol. 9, no. 1, pp. 64–76, Feb. 2001.
- [61] Blasco, P.; Gunduz, D.; Dohler, M., "A learning theoretic approach to energy harvesting communication system optimization," in Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE, vol., no., pp.1657-1662, 3-7 Dec. 2012
- [62] B. Tan Bacinoğlu, "Finite Horizon Online Energy-Efficient Transmission Scheduling Schemes for Communication Links", Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ocak 2013.
- [63] Transmission completion time minimization in an energy harvesting system J Yang, S Ulukus Information Sciences and Systems (CISS), 2010 44th Annual Conference on, 1-6
- [64] M. A. Antepi, E. Uysal-Biyikoglu, H. Erkal, "Optimal Packet Scheduling on an Energy Harvesting Broadcast Link ", IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol. 29, No.8, September 2011: pp. 1712-1731.
- [65] [H. Erkal, F. M. Ozcelik and E. Uysal-Biyikoglu, "Optimal Offline Broadcast Scheduling with an Energy Harvesting Transmitter ", EURASIP Journal On Wireless Communications and Networking, 2012
- [66] Special issue on energy harvesting in wireless networks S Ulukus, K Huang, R Zhang, NB Mehta, L Tassiulas Communications and Networks, Journal of 14 (2), 115-120
- [67] A general framework for the optimization of energy harvesting communication systems with battery imperfections B Devillers, D Gündüz Communications and Networks, Journal of 14 (2), 130-139
- [68] B. Prabhakar, E. Uysal-Biyikoglu and A. El Gamal, "Energy-efficient Transmission over a Wireless Link via Lazy Scheduling," in Proc. IEEE/ACM INFOCOM 2001, pp. 386-394.
- [69] 20 V, 0.5 A Very Low VF MEGA Schottky Barrier Rectifier in Leadless Ultrasmall SOD882 Package, NXP Semiconductors, Nijmegen, The Netherlands, Jan. 2010.
- [70] T. T. Le, J. Han, A. Von Jouanne, S. Member, K. Mayaram, and T. S. Fiez, "Piezoelectric Micro-Power Generation Interface Circuits," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 41, no. 6, pp. 1411–1420, 2006.

- [71] Kushino, Y.; Koizumi, H., "Piezoelectric energy harvesting circuit using full-wave voltage doubler rectifier and switched inductor," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE , vol., no., pp.2310,2315, 14-18 Sept. 2014.
- [72] S. Roundy, P. K. Wright, Jan Rabaey, "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes," Computer Communications, Volume 26, Issue 11, 1 July 2003, Pages 1131-1144, ISSN 0140-3664.
- [73] R. Gangula, D. Gesbert and D. Gündüz, "Optimizing Feedback in Energy Harvesting MISO Communication Channels" (Bkz. **Ek 4**)
- [74] R. Zviedris, A. Elsts, G. Strazdins, A. Mednis, and L. Selavo, "Lynxnet: Wild animal monitoring using sensor networks." ser. Lecture Notes in Computer Science, P. J. Marrn, T. Voigt, P. I. Corke, and L. Mottola, Eds., vol. 6511. Springer, 2010, pp. 170–173.
- [75] Chamanian, S.; Baghaee, S.; Ulsan, H.; Zorlu, Ö.; Kùlah, H.; Uysal-Biyikoglu, E. Powering-up Wireless Sensor Nodes Utilizing Rechargeable Batteries and an Electromagnetic Vibration Energy Harvesting System . Energies 2014, 7, 6323-6339.
- [76] S. Baghaee, H. Ulsan, S. Chamanian, O. Zorlu, E. Uysal-Biyikoglu, and H. Kulah, "Demonstration of Energy-Neutral Operation on a WSN Testbed Using Vibration Energy Harvesting," European Wireless 2014 (EW2014), Barcelona, Spain, 14-16th May 2014.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. HALUK KÜLAH
Proje No:	112E175
Proje Başlığı:	Haberleşme Ağlarında Enerji Hasatı Yöntemi Kullanımının Eniyileme ve Gerçekleşmesi
Proje Türü:	Uluslararası
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	ÖZGE ZORLU
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/11/2012 - 01/11/2015
Onaylanan Bütçe:	365730.0
Harcanan Bütçe:	250097.01
Öz:	<p>Kablosuz duyurga ağları (KDA), günümüzün bilgi ve iletişim teknolojileri altyapısında önemli bileşenler olmuşlardır. Bu noktada KDA'ların çalışma ömrü kritik bir parametre olarak görülmektedir. İletişim düğümlerinin ağ içindeki ömrü, KDA mimarisi, çevresel etkenler ve pil kapasitesi ile ilintilidir. Alternatif enerji kaynakları olarak enerji hasatı sistemleri kullanmak, pil ömrünü uzatmak ve ağ içinde verimli bir iletişim yapısı oluşturmak açısından en etkin yollardan biri olarak görülmektedir.</p> <p>Bu projenin temel amacı, yukarıda belirtilen kapsamda, ortamdaki yenilenebilir enerjiyi kullanan ve bu enerjiyi kendi bataryalarında gerektiği gibi depolayarak harcayan ve düğümler arasındaki iletişim enerji verimli olarak optimize edilmiş bir kablosuz ağ yapısı geliştirmektir. Bu proje için yapılan kuramsal ağırlıklı çalışmalar kapsamında çoğunlukla çevrimiçi problemler ve çözümleri üzerinde durulmuştur. Bu bağlamda da yapılan ilk çalışma, değişken paket trafiğine uyum sağlayan bir göndermecin, iletim sürecini enerji verimliliği açısından eniyileştirmesi ve bunun sonucunda ortaya çıkan enerji gereksinimi incelemiştir. İlgili problem için önerilen çevrimiçi 'Tembel Çizelgeleme' algoritması, benzetim deneyleriyle sınanmıştır. Sonraki çalışmada ise, enerji hasatçı ve algılayıcı bir göndermecin, güncelleme gönderim sürecini, güncellemelerin alındığı tarafta gözlenen ortalama ve en yüksek 'bilgi yaşı' açısından eniyileştirmesi problemi incelenmiştir. Bu problem için de, yeni çevrimdışı / çevrimiçi çözümler gösterilmiş ve çevrimdışı çözümün yapısından yola çıkan eniyialtı çevrimiçi politika olarak 'Dengeli Güncelleme' (BU) politikası önerilmiştir. Diğer çalışmada ise, çoklu kullanıcı bir haberleşme sisteminde, enerji hasatçı kullanıcıların kanal kestirimi için geribildirim paketlerini enerji verimli şekilde bir merkeze gönderme problemi çalışılmıştır.</p> <p>DeneySEL ağırlıklı çalışmalar enerji üreteçlerinin tasarımı, üretimi, karakterizasyonu ve bu üreteçlerin KDA'larda kullanımına yöneliktir. Her ortamda bolca bulunan titreşimin enerji kaynağı olarak kullanılmasına karar verilmiş ve bu enerjiyi kullanan ve düşük frekanslarda çalışan elektromanyetik enerji üreteçleri geliştirilmiştir. Daha sonra bu üreteçlerle pillerin şarj edilebildiği ve bu yöntemle MicaZ düğümleri kullanan bir KDA'nın çalışma ömrünün 10 kata kadar arttırılabildiği literatürde ilk kez gösterilmiştir. Uygulamaya yönelik olarak, koşan bir insanın bileğinde titreşim karakteristiği incelenmiş ve buna uygun elektromanyetik enerji üreteçleri de tasarlanmıştır.</p> <p>Daha yüksek frekanslı titreşimlere yönelik olarak piezoelektrik enerji üreteçleri ile çalışmalar yapılmış ve geliştirilen KDA prototipleri pilsiz olarak çalıştırılabilmişlerdir. Burada, enerji-nötr operasyon ve enerji üreteçli kendinden adaptif sensör düğümleri yine literatürde ilk kez deneysel olarak gösterilmişlerdir.</p> <p>Bu çalışmalar kapsamında elde edilen deneysel ve kuramsal sonuçları birleştiren, enerji-nötr KDA'larda ömür tahmini için bir enerji simülatörü de geliştirilmiştir. Simülatör oluşturulurken teorik formülasyon yerine deneysel sonuçlardan faydalanılması nedeniyle bu çalışma da özgün değere sahiptir.</p> <p>Sonuç olarak, proje kapsamında enerji hasatlı KDA'lar konusuna hem kuramsal hem de deneysel açıdan özgün çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarla enerji hasatı yönteminin KDA'larda hem pil ömrünü uzatmak hem de enerji-nötr çalışmayı sağlamak amacıyla kullanılabileceği gösterilmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	enerji hasatı, kablosuz ağ, kablosuz algılayıcı ağları, titreşim enerjisi, ağ optimizasyonu

Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	<p>1- Energy Harvesting Communication Networks: Optimization and Demonstration: The E-CROPS Project (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>2- Routing with Mutual Information Accumulation in Energy-Limited Wireless Networks (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>3- Towards a Vibration Energy Harvesting WSN Demonstration Testbed (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>4- Powering-up Wireless Sensor Nodes Utilizing Rechargeable Batteries and an Electromagnetic Vibration Energy Harvesting System (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>5- Demonstration of Energy-Neutral Operation on a WSN Testbed Using Vibration Energy Harvesting (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p>

TÜBİTAK