



Kablosuz Algılayıcı Ağ ve Hareketli Elektronik Cihazlarda Kullanılabilecek Enerji Üretim Yöntemleri

Hanefi Çınar

Bitlis Eren Üniversitesi, Enformatik Bölümü, Bitlis, 13100.

Musa Cıbuk

Bitlis Eren Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bitlis, 13100.

Fikri Ağgün

Bitlis Eren Üniversitesi, Enformatik Bölümü, Bitlis, 13100.

ÖZET

Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA), genellikle ulaşılması zor olabilecek coğrafik alanlar üzerinde rastgele dağıtılmış ve batarya ile enerji sağlayan birçok düğüm içeren ağlardır. Gelişen teknoloji ile gelecek yıllarda çevremizde milyonlarca algılayıcı düğümün yer alacağı öngörülmektedir. Bununla birlikte, düğümlerin genellikle hedeflenen işlevleri gerçekleştiremeden ya da maliyetini kurtaramadan bataryalarının tükenmesi nedeni ile yaşam sürelerinin sona ermesi bu ağlarda yaygın olarak karşılaşılan ve istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle düğümlerin “kur ve unut” mimaride çalışması gerekmektedir. Bu probleme çözüm üretmek adına, bilim insanları bir taraftan çok daha az enerji tüketen yeni düğümler geliştirirken, diğer taraftan da yenilenebilir enerji üretim yöntemleri geliştirmek sureti ile bataryaların yaşam süresini uzatma noktasında önemli ilerlemeler kaydetmektedirler. Hatta yakın zamanda, kendi ürettiği enerji kendisine yeten (nötr enerji) sistemler alanında da birçok çalışmanın yapıldığı gözlemlenmektedir.

Bu çalışmada KAA’larda kullanılabilecek yenilenebilir enerji üretim yöntemleri karşılaştırmalı olarak ele alınmaktadır. Ayrıca, yöntemlerin kullanılabilirliği irdelenerek, algılayıcı düğümlerin yaşam sürelerini uzatabilecek bu yöntemler üzerinde bir farkındalık oluşturulması ve bu alanda yapılacak yeni çalışmalara yön verilmesi hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Algılayıcı Ağ, Algılayıcı Düğüm, Enerji Üretimi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları.

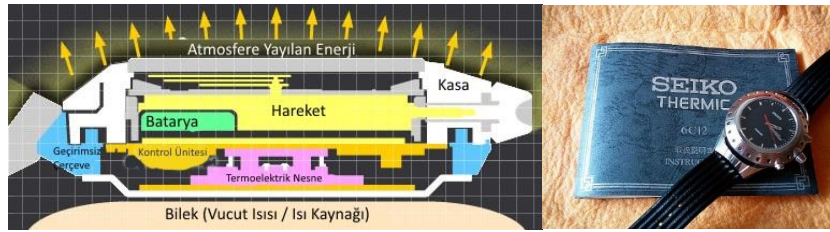
1 GİRİŞ

KAA’lar ve hareketli elektronik cihazların, günümüz dünyasının önemli elektronik aktörleri olarak çoktan yaşamımızda yer almaya başladığı şu günlerde, çevremizde yer alan radyo, müzik kutusu, saat, akıllı telefonlar ve bunun gibi binlerce cihazın yaygın olarak kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Bununla birlikte algılayıcı düğümler, bu tür cihazlar içerisinde veya giyilebilir birçok cihaz ile birlikte sahnede yerini almaya çoktan başlamıştır. Nesnelerin interneti (IoT – Internet of Things) [1], [2] ve makineler arası (M2M – Machine to Machine) [3], [4] haberleşme kavramları da yakın gelecekte

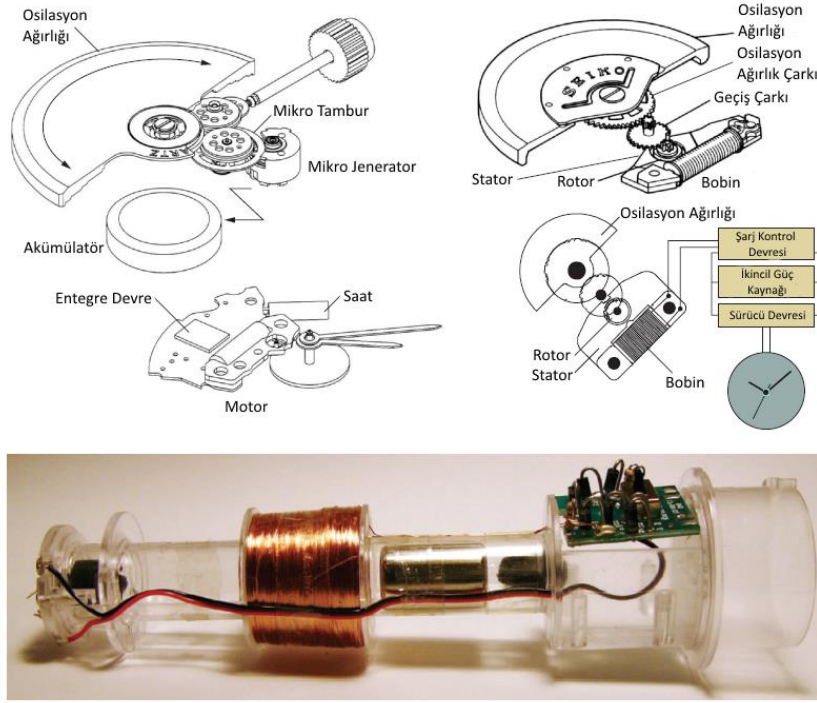
çevremizde milyonlarca elektronik cihazla birlikte yaşayacağımızı daha belirgin bir şekilde hissettirmektedir.

KAA'lar [5], [6] bilindiği gibi birçok düğüm içeren ve bu düğümlerin çevreden algıladıkları fiziksel nicelikleri işleyerek birbirleri üzerinden ve/veya merkezi bazı düğümler üzerinden istenen noktaya iletebilen ağlardır. Bu ağlarda geçmişten günümüze ağın yaşam süresini belirleyen en önemli faktör, düğümün kendisidir. Düğümler için ise yaşam ömrünü belirleyen en önemli faktör, batarya yaşam süresi olarak belirtilmektedir. Bataryası biten düğüm ölmekte ve çevresinde bağlantıyı sürdürebilecek herhangi bir düğüm olmaması durumunda ağın ilgili kısmından haber alınamamaktadır. Bu bağlamda KAA'larda enerji çok önemli bir kavram olarak görülmüş ve konu hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Literatürde, enerji verimli ortam erişim kontrol (OEK) protokolleri [7], yönlendirme katmanında enerji verimliliği üzerine geliştirilen protokoller [8] ve hatta düğümlerin, veri gönderimi gerekmeyen durumlarda yaşamlarının büyük bir kısmını uykuda geçirmelerini sağlayan birçok çalışmaya rastlamak mümkündür [9]–[11].

Yakın zamanda literatürde enerji verimliliği üzerine çalışmalar yapılırken, üretim bantlarında Mikro Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS), Nano Elektro-Mekanik Sistemler (NEMS), 3B yazıcılar, nano tüpler, nano şeritler halinde üretilen grafen gibi yeni malzemeler üzerindeki teknolojik gelişmeler ile çok daha az enerji tüketen ve çok daha küçük boyutlara sahip elektronik yongalar ve düğümler üretilmeye başlanmıştır. Bir yandan enerji verimli algoritmalar kullanılırken diğer taraftan enerji verimli elektronik sistemler ile batarya ömrü önemli miktarda uzatılabilmiştir. Daha da ötesi çok az enerji ile aylarca çalışabilen cihazları raflarda görmek sıradan bir durum haline gelmektedir. Fakat artan cihaz sayısının milyonlara ulaşılabilceği akıllı çevreler düşünülürse batarya değişiminin yine de büyük bir problem olarak görülmesi kaçınılmaz olacaktır. Bu nedenle, gelecekte inşa edilecek akıllı çevrelerde yer alacak olan KAA'lar ve diğer hareketli cihazlar için “kur ve unut” (deploy & forget) [12] mimarisinin önemli bir gereklilik olacağı öngörülmektedir. Çok sayıda cihazın bulunduğu bir ortamda bu cihazları kurduktan sonra onlarca yıl tekrar müdahale etmemek elbette çok daha makul bir yaklaşımdır. Bu doğrultuda, kendi ürettiği enerji kendisi için yeterli olabilecek (energy neutral) sistemler geliştirmek gerekecektir. Şekil 1’de gösterilen Seiko firmasının ürettiği termik enerjiyi kullanarak kendi enerjisini üretebilen kol saati ve yine Şekil 2’de gösterilen aynı firmanın ürettiği, titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren kol saati, nötr enerjili sistemler için örnek bir gelişme olarak görülebilir [13].



Şekil 1: Seiko firmasının ürettiği, termik enerjiden elektrik enerjisi üretebilen kol saati.



Şekil 2: Seiko firmasının ürettiği, titreşimden elektrik enerjisi üretebilen kol saati [13].

Bazı çalışmalarda, “sürdürülebilir” veya “neredeyse daimi” gibi kavramların kullanılmaya başlandığı düşünüldüğünde bilim dünyasının artık kendi enerjisini kendisi üretebilen ve uzun yıllar kendi başına çalışabilecek sistem tasarımı üzerine odaklandığı söylenebilir [14]. Bu çalışmada yenilebilir enerji kaynakları kullanılarak aynı eksenle sistem tasarımı üzerine farkındalığın oluşturulması ve yenilenebilir enerji kaynakları hakkında yapılabilecek yeni çalışmalara yön verilmesi hedeflenmektedir.

Çalışmanın ilerleyen kısımlarında, enerji üretimi ve KAA’larda kullanılabilecek enerji üretim mimarileri ele alındıktan (2. Bölüm) sonra, depolama teknolojileri (3. Bölüm) ve enerji kaynakları incelenmiş ve literatürde yer alan bazı çalışmalar karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek (4. Bölüm) gelecek çalışmalar için bazı öneriler sunulmuştur (5. Bölüm).

2 ENERJİ ÜRETİM MİMARİLERİ

Enerji üretiminde iki temel mimari yaklaşım söz konusudur [15].

- Üret–Kullan
- Üret–Depola–Kullan

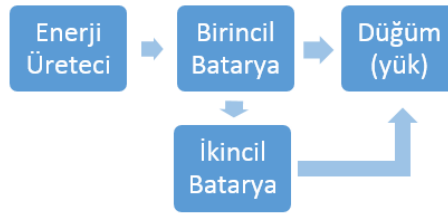
Üret–kullan mimarilerde enerji hemen kullanılmak üzere üretilir ve kullanılır. Enerjinin fazlası depolanmaz. Diğerinde ise üretilen enerji ihtiyaç duyulduğunda kullanılmak üzere depolanır. Şekil 3’te gösterilen bu mimaride sistemin ürettiği enerji her zaman sistemi çalıştıracak enerjiden ya daha fazla ya da bu enerjiye eşit miktarda olmalıdır. Aksi takdirde sistemin çalışması mümkün olmayacaktır.



Şekil 3: Üret-Kullan mimari

Üretilen enerji depolanmadığı için üretilen enerji miktarı doğrudan yüke aktarılmaktadır. Bu mimaride çalışan bir aygıt yeterli miktarda enerji üretebileceği durumlarda aktif konuma geçerek verisini iletir. Sonrasında ise kendisini kapatarak bir sonraki enerji üretim döngüsünü bekler. Bu sistemler basınç, parmak veya ayak ile kuvvet uygulanabilen enerji üretim yöntemlerinde kullanılabilir. Mesela butona basılarak piezo elektrik bir malzeme ile enerji üretilebilir ve bu enerji ile kablosuz olarak veri paketleri istenilen noktaya iletilebilir [16].

Diğer taraftan üret-depola-kullan mimaride ise enerji üretim sistemi tarafından üretilen enerji batarya(lar) üzerinde depolanarak ihtiyaç duyulduğunda yüke aktarılır. Şekil 4'te bu mimari şematize edilmiştir.

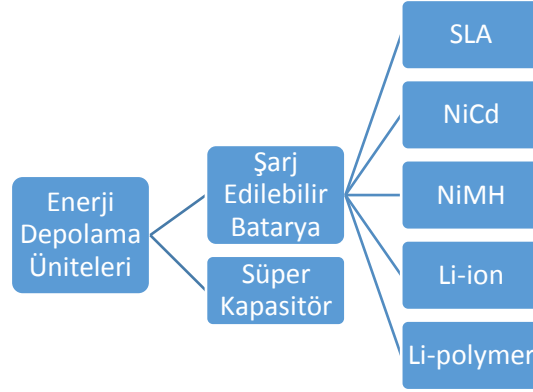


Şekil 4: Üret-Depola-Kullan mimari

Depolama ünitesi üretilen enerjinin doğrudan yükü beslemede yeterli olamayacağı senaryolarda çok elverişli olabilir. Ayrıca sistem, bazı zamanlarda yoğun enerji kullanımı gerektirirken zamanın diğer kısımlarında çalışmıyor ise sistemi bu durumda da batarya ile beslemek avantajlı olacaktır. KAA'lar bu şekilde çalışmaktadır. Düğümler haberleşme ihtiyacı duyduklarında önemli miktarda enerji harcayarak verilerini bir sonraki düğüme aktarırken, zamanın geri kalan kısmını ise genellikle uyku konumunda geçirirler. Birçok sistemde uyku konumunda geçirilen süre zamanın %99'unu kapsamaktadır [12]. Bu sistemlerde üretilen enerji o an kullanılabileceği gibi, enerji üretilemediği zamanlarda da kullanılabilir. Maliyetlerin artması bir dezavantaj olarak görülse de yük üzerinde sürekli enerjinin varlığı da günün her zamanında enerji üretemeyen veya sıklıkla aktif olması gereken sistemler için önemli olabilir. Ayrıca üretilen enerji kullanılmakta olan enerjiden fazla olduğunda da bu enerjinin depolanmasının ve ileride kullanılmasının mümkün olacağı düşünülmektedir. Birincil batarya tükendiğinde ise sistem şekil 4'te olduğu gibi ikincil bir batarya ile beslenebilir [17]. Örneğin böyle bir sistem güneş enerjisi ile enerji üretiyorsa geceleri enerji üretemeyeceği için bu enerjinin depolanması gerekecektir [18]. Bu noktada enerji kaynakları ve bu enerjileri depolama yöntemlerinden bahsetmek yerinde olacaktır.

3 ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ

Üret-depola-kullan mimaride üretilen enerjinin kullanılması için bataryalar üzerinde depolanması gerektiği ifade edilmişti. Burada kullanılabilecek batarya çeşitlerini ve bu bataryaların birbirlerine göre artı ve eksilerini belirtmek faydalı olacaktır. Şekil 5'te gösterildiği üzere, enerji depolamak için günümüzde şarj edilebilir batarya türleri veya süper kapasitörler kullanılmaktadır.



Şekil 5: Enerji depolama üniteleri

Şarj edilebilir bataryalar kimyasal yapıda enerji depolayabilen ve depoladığı enerjiyi kullandıktan sonra tekrar şarj edilerek depolamaya devam edebilen ürünleridir. Hâlihazırda üretimde mühürlü asitli (SLA - Sealed Lead Acid), nikel kadmiyum (NiCd), nikel metal hidrit (NiMH), lityum iyon (Li-ion) ve lityum polimer (Li-polymer) yapıda olan şarj edilebilir batarya türleri bulunmaktadır. Bu bataryaları enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, şarj ve deşarj verimliliği, kendi kendine deşarj oranı ve derinlemesine (tam) şarj olabildiği döngü sayısı gibi birçok parametre ile mukayese etmek mümkündür. Tablo 1’de bu bataryalara ait kıyaslamalar verilmiştir.

Tablo 1. Şarj Edilebilir Batarya Teknolojilerinin Kıyaslanması [15].

Batarya Tipi	Anma Gerilimi (V)	Kapasite (mAh)	Ağırlık Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Güç Yoğunluğu (W/kg)	Verimlilik (%)	Kendi Kendine Deşarj (% / Ay)	Hafıza Etkisi	Şarj Metodu	Tekrar Şarj Döngüsü
SLA	6	1300	26	180	70-92	20	Hayır	Trickle	500-800
NiCd	1,2	1100	42	150	70-90	10	Evet	Trickle	1500
NiMH	1,2	2500	100	250-1000	66	20	Hayır	Trickle	1000
Li-ion	3,7	740	165	1800	99,9	<10	Hayır	Darbe	1200
Li-polymer	3,7	930	156	3000	99,8	<10	Hayır	Darbe	500-1000

Tablo incelendiğinde lityum bataryaların en yüksek enerji ve güç yoğunluğuna ve verimliliğe sahip olduğu gözlemlenmektedir. SLA bataryalarda bu değerler en alt düzeyde seyredirken NiMH bataryaların ise yoğunluk değerlerinde, NiCd bataryalardan daha iyi olduğu fakat daha verimsiz olduğu görülmektedir. Burada dikkati çeken bir diğer nokta ise hafıza etkisidir. Hafıza etkisi nikel yapılı bataryalarda oluşan bir önceki şarj seviyesini hatırlama özelliğine verilen isimdir. Sonrasında yapılacak olan şarj işlemlerinde batarya son seviyeye göre şarj olur. Bu durum NiCd pillerde çok sık olarak gözlemlenirken, Ni-MH pillerde çok daha az görülür. Hafıza etkisi sık sık düşük seviyeli şarj yapılmasından dolayı oluşur. Algılayıcı düğümlerde enerji üretimi yapılacaksa bu durum sürekli yaşanacaktır. Hafıza etkisi neticesinde bataryanın kimyasal yapısı değişecek ve sonrasında pil hep o seviyede şarj olma eğiliminde olacaktır. Düşük akımlı uzun süreli dolun (Trickle charge) ve yüksek sıcaklıklardaki şarjlar da hafıza etkisini artırmaktadır. Lityum pillerde ise hafıza etkisi yaşanmamaktadır.

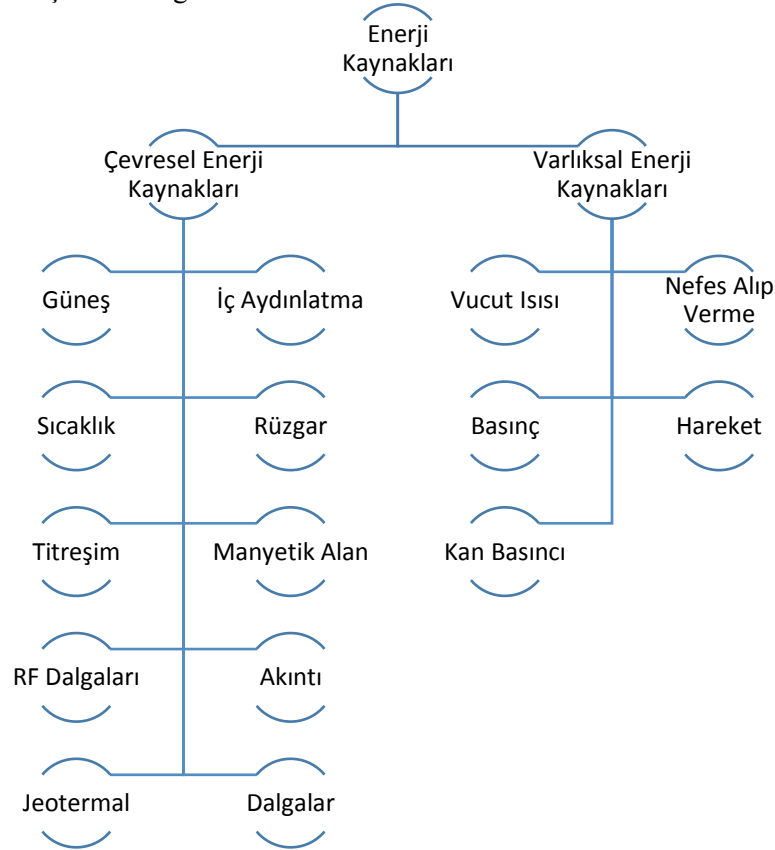
Bunun yanında lityum piller darbe kod modülasyonu (PCM – Pulse Code Modulation) ile şarj edilmelidir. Bu da beraberinde ekstra donanım maliyeti getirecektir. Ayrıca bu pillerin ömrü kötü şartlar altında NiMH pillere göre çok daha azdır. Bu pillerin üretim anından itibaren ortalama beş yıl ömürleri

vardır. Ayrıca 25° C üzerindeki sıcaklıklarda pil ömrünün sıcaklıkla ters orantılı olarak azaldığı bilinmektedir.

Tablo irdelendiğinde, her türlü hava şartlarında birçok farklı ortamda çalışması gereken hareketli elektronik cihazlar ve algılayıcı düğümler için NiMH pillerin kullanımının daha verimli olabileceği sonucu çıkarılabilir. Bu nedenlerden dolayı, yapılan birçok çalışmada bu pillerin tercih edildiği görülmektedir [15].

4 ENERJİ ÜRETİM KAYNAKLARI

Enerjinin korunumu kanununa göre enerji form değiştirebilir fakat yoktan var edilemez veya var olan enerji yok edilemez. Enerji üretimi hakkında yapılan çalışmaların tamamı, bu yasa temel alınarak yapılmaktadır. Hareketli elektronik cihazların veya algılayıcı düğümlerin çevremizde neredeyse her yerde bulunabileceği düşünüldüğünde, güneş, rüzgâr, RF dalgaları, manyetik alanlar gibi çevresel yenilenebilir enerji kaynaklarının birçoğundan elektrik enerjisi üretilebileceği ve bu aygıtlarda kullanılabileceği öngörülmektedir. Ayrıca hareket eden varlıkların (insanlar, hayvanlar gibi) hareketleri ve zemine uyguladıkları basınç gibi enerjilerden de elektrik enerjisi elde edilmesi mümkündür. Enerji kaynaklarına ait genel bir sınıflandırma Şekil 6’da gösterilmektedir.



Şekil 6: Enerji Kaynakları

Dış ortamda kullanılmakta olan aygıtlar için çevresel enerji kaynaklarından enerji üretimi uygun bir çözüm olabilirken, insan veya hayvan gibi bir canlının vücuduna yerleştirilen bir aygıt için varlıksal enerji kaynaklarını kullanmak daha verimli olacaktır. Kullanım alanına göre bu şekilde seçim işlemi yapılabileceği gibi bu enerji kaynaklarından en verimli olan bir veya birkaçı bir arada kullanılabilir. Dış ortamda yer alan algılayıcı bir düğüm için güneş enerjisi ile enerji üretilebilirken hem güneş enerjisi hem de rüzgâr enerjisinden faydalanılarak üretilen enerji miktarı daha yüksek seviyelere ulaştırılabilir.

Güneş ışınlarından enerji üretimi, KAA'larda yaygın olarak kullanılmakta olan bir yöntemdir. [18]'de yer alan düğüm üzerinde bulunan 5,84 cm x 5,84 cm güneş panelinden ürettiği 3,11V gerilim ve 276 mW enerjiyi 2500 mAh kapasitesindeki NiMH bataryasında depolanmaktadır. HydroWatch adı verilen bu düğümler, gün içerisinde 30 dakika güneş ışığı görebilmesi durumunda günlük enerjisini karşılayabilmektedir. [19]'da 9,525 cm x 6,35cm boyutlarında güneş paneli kullanan Heliomote düğümü önerilmektedir. Bu panellerden 3,3V gerilim ve 198 mW enerji üretilmekte ve HydroWatch gibi NiMH bataryada depolanmaktadır. Bu düğüm aynı zamanda üzerinde yer alan enerji kontrol ünitesi sayesinde enerji miktarını ölçebilmekte ve bu doğrultuda çalışma şeklini düzenleyebilmektedir. [20]'de yer alan Fleck1 düğümü ise düşük güçlü işlemci ve radyo kullanmasının yanı sıra 100cm²'lik güneş paneli ile 2100mWh/gün enerji üretimine olanak sağlayabilmektedir. Kurulum alanı geniş olan yerlerde böyle büyük panellerin kullanılması bilhassa çok fazla enerji ihtiyacı olan küme başı ve baz istasyonu gibi düğümler için çok kullanışlı olabilir.

Diğer taraftan [21]'de bahsi geçen enerji üretim sistemi veri iletim modunda 10mA ve veri alma modunda ise 22mA enerji harcayan bir düğüm [22] kullanmakta olup hem güneş enerjisinden hem de rüzgâr enerjisinden enerji üretmektedir. Melez enerji kaynaklardan enerji üreten bu sistem aynı zamanda 22F değerinde bir süper kapasitör ve 70 mAh akım sağlayan li-polymer ikincil batarya kullanmaktadır. Heliomote gibi 9,525 cm x 6,35cm boyutlarında güneş paneli kullanan bu sistem güneş panellerinden 400mW enerji üretmektedir.

Bunlara ek olarak titreşim [23]–[26], termal [27]–[30], RF [31]–[33] veya insanların nefes alıp vermesi ve hatta kan basıncından [34] dahi enerji üreten sistemler mevcuttur. Literatürde konu hakkında farklı birçok çalışma mevcut olup burada güncel bazı örneklemeler ile yetinilmiştir.

5 DEĞERLENDİRME VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu kısımda enerji üretim yöntemlerinin verimlilikleri kısaca değerlendirildikten sonra enerji üretim yöntemleri gelecekte neler vadedebilir sorusuna yanıt bulunması hedeflenmektedir. Sonrasında yaygın olarak kullanılabilecek bazı enerji üretim yöntemlerine yönlendirme yapılması öngörülmektedir. Tablo 2'de kullanılmakta olan yöntemler hakkında elde edilen enerji üretim miktarları paylaşılmıştır. Burada üretilen enerji miktarları incelendiğinde termal ve RF enerji kaynakları haricinde üretilen tüm enerjilerin aygıtlar için yeterli olabileceği öngörülmektedir. Bu kaynaklarında küçük enerjiler gerektiren uygulamalarda kullanılması mümkündür.

Tablo 2. Enerji Üretim Kaynaklarının Ürettiği Enerji Miktarları

Enerji Kaynağı	Literatürde Üretilen Enerji Miktarı
Güneş [15]	15 – 100 mW/cm ²
Rüzgâr [15]	1200 mWh/gün
Titreşim [23]	1,38 – 50mW
Termal [12], [23]	34 - 60μW
RF [33]	6,6 – 192 μW
Parmak Hareketi [34]	2,1 – 19 mW
Ayak Basıncı [34]	5 – 67W
Nefes Alıp Verme [34]	0,4 – 1 W
Kan Basıncı [34]	0,37 – 0,93W

Güneş enerjisi en ucuz, kolay elde edilebilir ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Bunun yanında rüzgâr enerjisi de yenilenebilir ve kolay elde edilebilir bir enerji kaynağı olmasına karşın düğüm veya hareketli elektronik cihazlar için boyutları çok büyük olabilir. Ayrıca hareket halindeki nesnelerde kullanım alanı da oldukça kısıtlı olacaktır. Ayrıca rüzgâr enerjisinin dönüştürme verimliliği de güneş enerjisine göre daha düşüktür. Bunun yanı sıra kullanılacak olan aygıt bir insanın üzerinde olacağı

titreşim, hareket, ayakkabı basıncı, nefes alıp verme ve kan basıncı gibi enerji kaynakları da enerji üretimi için düşünülmesi gereken seçenekler arasında yer almaktadır. Ayrıca insan hareketinden 67W'a kadar enerji üretilmesi çok önemli bir potansiyeli göstermektedir. Nefes alıp verme ve vücut sıcaklıklarından neredeyse 1W dolaylarında yüksek miktarda enerji üretebilmekte mümkündür. Bu enerjinin kullanım alanı insan faktörü ile sınırlı olmasına karşın bilhassa giyilebilir aygıtlara ait uygulamalarda tercih edilmemesi için hiçbir neden bulunmamaktadır.

Kullanımı gün geçtikçe artan RFID etiketlerinin RF sinyalleri ile beslenerek kendi enerjilerini üretebilmeleri gelecekte bu teknolojinin çok daha yaygın olarak kullanılacağını da göstermektedir. Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere gelecek sistemler kendi ürettiği enerji kendisine yetebilen sistemler olmalıdır. Bu kapsamda dünya üzerinde var olan manyetik alan, denizlerdeki gel git olayları, dalga hareketleri, yeryüzünde meydana gelen ısı farklılıkları, insan vücudundaki titreşimler ve bunun gibi birçok enerji kaynağı üzerinde de gelecekte çalışmaların yapılmasına ihtiyaç vardır..

REFERANSLAR

- [1] S. Li, L. Da Xu, and S. Zhao, "The internet of things: a survey," *Inf. Syst. Front.*, vol. 17, no. 2, pp. 243–259, 2015.
- [2] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Comput. Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.
- [3] G. Lawton, "Machine-to-machine technology gears up for growth," *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. 37, no. 9, pp. 12–15, 2004.
- [4] M. Chen, J. Wan, and F. Li, "Machine-to-machine communications: Architectures, standards and applications," *KSII Trans. Internet Inf. Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 480–497, 2012.
- [5] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Comput. Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, 2008.
- [6] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Comput. Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [7] V. Ngo and A. Anpalagan, "A detailed review of energy-efficient medium access control protocols for mobile sensor networks," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 383–396, 2010.
- [8] S. Ehsan and B. Hamdaoui, "A survey on energy-efficient routing techniques with QoS assurances for wireless multimedia sensor networks," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 14, no. 2, pp. 265–278, 2012.
- [9] H. Pham and S. Jha, "An adaptive mobility-aware MAC protocol for sensor networks (MS-MAC)," *2004 IEEE Int. Conf. Mob. Ad-hoc Sens. Syst. (IEEE Cat. No.04EX975)*, no. Figure 2, pp. 558–560, 2004.
- [10] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks," *Proc. 4th Int. Conf. Embed. networked Sens. Syst. (SenSys 2006)*, pp. 307–320, 2006.
- [11] I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, J. Min, and M. L. Sichitiu, "Z-MAC: A hybrid MAC for wireless sensor networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 16, no. 3, pp. 511–524, 2008.
- [12] C. Ó. Mathúna, T. O'Donnell, R. V. Martinez-Catala, J. Rohan, and B. O'Flynn, "Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks," *Talanta*, vol. 75, no. 3, pp. 613–623, 2008.
- [13] J. a. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," *IEEE*

- Pervasive Comput.*, vol. 4, no. 1, pp. 18–27, 2005.
- [14] M. M. Tentzeris, A. Georgiadis, and L. Roselli, “Energy Harvesting and Scavenging [Scanning the Issue],” *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 11, pp. 1644–1648, 2014.
 - [15] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, “Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 13, no. 3, pp. 443–461, 2011.
 - [16] J. A. Paradiso and M. Feldmeier, “A Compact , Wireless , Self-Powered Pushbutton Controller,” *Ubicomp 2001 Ubiquitous Comput.*, pp. 299–304, 2001.
 - [17] X. Jiang, J. Polastre, and D. Culler, “Perpetual environmentally powered sensor networks,” *2005 4th Int. Symp. Inf. Process. Sens. Networks, IPSN 2005*, vol. 2005, pp. 463–468, 2005.
 - [18] J. Taneja, J. Jeong, and D. Culler, “Design, modeling and capacity planning for micro-solar power sensor networks,” *Proc. - 2008 Int. Conf. Inf. Process. Sens. Networks, IPSN 2008*, pp. 407–418, 2008.
 - [19] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman, and M. B. Srivastava, “Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems,” *Proc. IPSN*, vol. 25, no. C, p. -272005, 2005.
 - [20] P. Corke, P. Valencia, P. Sikka, T. Wark, and L. Overs, “Long-duration solar-powered wireless sensor networks,” *Proc. 4th Work. Embed. networked sensors*, pp. 33–37, 2007.
 - [21] C. Park and P. H. Chou, “AmbiMax: Autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes,” *2006 3rd Annu. IEEE Commun. Soc. Sens. Adhoc Commun. Networks, Secon 2006*, vol. 1, no. c, pp. 168–177, 2007.
 - [22] C. Park, J. Liu, and P. H. Chou, “Eco: an ultra-compact low-power wireless sensor node for real-time motion monitoring,” *IPSN 2005. Fourth Int. Symp. Inf. Process. Sens. Networks, 2005.*, pp. 398–403, 2005.
 - [23] A. Harb, “Energy harvesting: State-of-the-art,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2641–2654, 2011.
 - [24] J. G. Rocha, L. M. Gonçalves, P. F. Rocha, M. P. Silva, and S. Lanceros-Mendez, “Energy harvesting from piezoelectric materials fully integrated in footwear,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 3, pp. 813–819, 2010.
 - [25] P. D. Mitcheson, T. C. Green, and E. M. Yeatman, “Power processing circuits for electromagnetic, electrostatic and piezoelectric inertial energy scavengers,” *Microsyst. Technol.*, vol. 13, no. 11–12, pp. 1629–1635, 2007.
 - [26] C. R. Saha, T. O’Donnell, N. Wang, and P. McCloskey, “Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 147, no. 1, pp. 248–253, 2008.
 - [27] A. Cuadras, M. Gasulla, and V. Ferrari, “Thermal energy harvesting through pyroelectricity,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 158, no. 1, pp. 132–139, 2010.
 - [28] E. J. Carlson, K. Strunz, and B. P. Otis, “A 20 mV input boost converter with efficient digital control for thermoelectric energy harvesting,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 45, no. 4, pp. 741–750, 2010.
 - [29] J. P. Carmo, L. M. Goncalves, and J. H. Correia, “Thermoelectric microconverter for energy harvesting systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 3, pp. 861–867, 2010.
 - [30] V. Leonov and P. Fiorini, “Thermal matching of a thermoelectric energy scavenger with the

- ambience,” *Proc. 5th Eur. Conf. Thermoelectr. (ECT 07)*, no. 3, pp. 129–133, 2007.
- [31] M. Mi, M. H. Mickle, C. Cape, and H. Swift, “RF Energy Harvesting with Multiple Antennas in the Same Space,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 47, no. 5, pp. 100–105, 2005.
- [32] A. P. Sample, D. J. Yeager, P. S. Powledge, A. V. Mamishev, and J. R. Smith, “Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 11, pp. 2608–2615, 2008.
- [33] S. S. Clark, J. Gummeson, K. Fu, and D. Ganesan, “Towards Autonomously-Powered CRFIDs,” no. October, 2009.
- [34] T. Starner, “Human-powered wearable computing,” *IBM Syst. J.*, vol. 35, no. 3.4, pp. 618–629, 1996.