



## Dağıtık kontrol ile akıllı şebekelerde geniş-alan yönetimi ve geleceğe dönük projeksiyonlar

Murat Akçin<sup>1\*</sup>, B. Baykant Alagöz<sup>1</sup>, Cemal Keleş<sup>1</sup>, Abdulkerim Karabiber<sup>2</sup>,  
Asım Kaygusuz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya

<sup>2</sup>Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bingöl

*05.08.2013 Geliş/Received, 11.11.2013 Kabul/Accepted*

### ÖZET

Artan nüfus ve bireylerin enerji taleplerinin sonucu olarak, enerjiye olan talep her geçen gün artmaktadır. Bu talebin mevcut şebeke yapısı ile karşılanması oldukça zor ve verimsiz olacaktır. Yüksek iletim kayıplarının neden olduğu verimsiz iletim, yenilenebilir kaynakların şebekeye entegrasyonunda yaşanan sorunlar, esnek olmayan talep ve ücretlendirme gibi problemler, geleneksel şebeke yapıları ile artan talebin karşılanmasını verimsiz ve sürdürülemez kılmaktadır. Arz-talep dengesinin sağlanması açısından mevcut şebekelerin verimli, çevre-dostu, esnek ve güvenilir olması beklentileri, akıllı şebekeler uygulamalarını gündeme getirmektedir. Akıllı şebeke uygulamaları, enerjinin üretim, iletim, dağıtım ve tüketim süreçlerinin her aşamasının gözlemlenebilir ve kontrol edilebilir olmasını, dolayısı ile etkin yönetilebilir olmasını amaçlamaktadır. Bu çalışmada, dağıtık kontrol uygulamaları ile akıllı şebekelerde geniş alan yönetimi irdelenmekte ve geleceğe dönük öngörüler sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** akıllı şebekeler, dağıtık kontrol, haberleşme, akıllı şebeke yönetim mimarisi

## Wide-area management of smart grid by distributed control and near future projections

### ABSTRACT

Due to increasing of world population and personal energy demand, overall energy demand rises day to day and therefore, it will be very difficult and inefficient to meet this increasing demand by conventional electrical grid structure in near future. The conventional electrical grids do not well suit for efficient and sustainable solutions related to reducing transmission losses, integrating renewable energy sources, flexible demand and energy pricing. Today, there is an urgent need for smart grid in order to balance energy demand and generation more efficient, more environmentally friendly, more flexible and reliably. For these proposes, smart grid should provide observable and controllable network structure from energy generation, transmission, distribution to consumption and thus it provides smart management of energy systems. This study presents methodologies and technologies developed for distributed control and wide-area smart management in smart grids. The paper also presents projections for the near future of smart grid applications.

**Keywords:** smart grids, distributed control, communication, smart grid management architecture

---

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya nüfusunun artması, fosil yakıtı dayalı enerji rezervlerinin azalması, teknolojik ve sosyal gelişim sonucunda bireyin gündelik yaşamında enerjiye olan bağımlılığının artması, yoğun sanayileşmenin ve verimsiz enerji tüketiminin çevresel etkilerinin görülmeye başlaması gibi etmenler, akıllı enerji yönetimini gündeme getirmiştir. Enerjinin üretim aşamasından başlayarak, iletim, dağıtım ve tüketime kadar uzanan bütün süreçleri kapsayan elektrik şebekesinin, gelişen teknolojik imkânlar ile daha verimli, daha güvenli, daha çevre dostu ve daha yönetilebilir kılınması çabaları akıllı şebeke kavramını doğurmuştur. Mevcut şebekelerin yetersiz kalması nedeni ile ortaya çıkan bu kavram, şebekelerin tam otomasyonu ve yüksek verimliliğini hedeflerken, haberleşmeden bilgi teknolojilerine, kontrol sistemlerinden yarı iletken teknolojilerine kadar birçok teknolojiyi bir araya getiren yeni bir model olarak karşımıza çıkmaktadır. Son zamanlarda, akıllı şebekelere olan ihtiyacın farkına varılmış ve haberleşme, bilgi teknolojileri, kontrol sistemleri, yarı-iletken teknolojileri gibi birçok sahada akıllı şebeke uygulamalarına dönük çalışmalar hız kazanmıştır [1-5].

Artan enerji ihtiyacının karşılanması için teknolojik gelişmeler kullanılarak, enerji potansiyelinin, verimli ve sürdürülebilir olarak kullanılması hedeflenmektedir. Bu amaçla geliştirilen daha yönetilebilir şebeke sistemleri, "akıllı şebekeler" ifadesi ile kavramsallaştırılmıştır. Akıllı şebekeler yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) kullanımını kolaylaştırarak, alternatif ve çevre-dostu kaynaklar için fırsatlar sunmaktadır [6]. Fosil yakıt rezervlerinin tükenme noktasına yaklaşması nedeni ile petrol zengini ülkeler dahil olmak üzere bütün dünya, YEK'lerden daha fazla istifade edebilme yollarını aramaktadır [6,7]. YEK'lerin daha verimli ve daha yaygın kullanılabilmesi, şebeke ile entegrasyon problemlerinin giderilmesine [8-10] ve depolama üniteleri gibi ikincil kaynaklarla desteklenmesine [11] bağlıdır. Günümüz elektrik şebekeleri bu ihtiyaca cevap vermemesine rağmen, kontrol ve haberleşme alanında yaşanan teknolojik gelişmeler şebekeyi daha yönetilebilir kılarak yakın gelecek için umut vadetmektedir.

Günümüzde akıllı şebeke uygulamaları üç temel alt başlıkta toplanabilir:

(i) Dağıtık üretim (Distributed generation) uygulamaları: Dağıtık üretim uygulamaları; enerji verimliliği, güvenilirliği ve YEK'lerin kullanımı için büyük öneme sahiptir. Akıllı şebekeler, küçük ölçekli enerji üretiminden yüksek güçlü enerji santrallerine

kadar çok geniş bir yelpazeye yayılan enerji kaynaklarının dağıtım şebekesi üstünde entegrasyonuna imkân sağlamalıdır [12-14]. Böylece YEK'lerin hane düzeyine kadar yaygınlaşmasına ve hanelerin kendi enerjisini üretmesine imkân sağlanacaktır. Bu durumda yerinde üretim ve tüketim ile iletim kayıplarının düşürülmesi sağlanarak enerji verimliliği artırılabilir. Klasik şebekede statik tüketici durumunda olan hanelerin dağıtık üretim imkanları ile üretken-tüketiciler (prosumers) haline dönüşmeleri beklenmektedir [15,16].

(ii) Dağıtık depolama (Distributed storage) uygulamaları: Enerji üretim fazlasının şebekeye dağılmış depolama sistemlerinde depolanması ve gerektiğinde enerji talebini karşılama üzere kullanılabilmesi hedeflenir [17]. Yüksek hacimli enerji depolama sistemlerinden hane tipi depolama sistemine kadar çok geniş ölçekte depolama sisteminin şebekeye dağıtılması YEK'ler gibi enerji sürekliliği olan kaynakların daha etkin kullanımı için önem arz etmektedir [18].

(iii) Talep taraflı yük yönetimi (Demand side load management) uygulamaları: Dağıtık üretim ve depolama olanaklarına sahip şebekelerde üretim-talep dengesi ve enerji fiyatları daha akıllı yönetilebilir. Enerji tüketiminin fazla olduğu zaman aralığı, şebeke elemanlarını zorlamaktadır. Tüketici yardımıyla bu sorun çözülmekle beraber enerji fiyatları ve enerji verimliliği artırılabilir [16]. Talebe bağlı olarak yürütülecek enerji üretim ve depolama stratejileri enerji verimliliğini önemli ölçüde arttıracaktır.

Yukarıda bahsedilen üç amaca yönelik uygulamalar etkin haberleşme ve kontrol araçları ile mümkündür. Güç sisteminin, anlık değişimlere cevap verebilmesi ve optimal çalışma durumlarını koruyabilmesi için şebeke durumlarının gerçek-zamanlı olarak gözlemlenebilir ve kontrol edilebilir olması gerekmektedir. Bunun için akıllı şebeke bileşenleri veri alma, veri işleme ve veri iletim kabiliyetine sahip olmalıdır. Bu, söz konusu güç bileşenlerin haberleşme ve programlanabilir kabiliyetine sahip akıllı sistemleri (mikroişlemcileri) içermesi ile mümkün olabilecektir. Bu birimlerin birbiri ile iletişiminin ve etkileşiminin yönetilmesi için haberleşme protokollerine (TCP/IP, ATM, SDH/SONET gibi), haberleşme altyapılarına (Modemler, yönlendiriciler, kablosuz haberleşme) ve sunuculara (Uygulama ve veri tabanları) ihtiyaç duyulacaktır [19, 20].

Akıllı şebekeler, dağıtık kontrol uygulamalarının enerji üretim, iletim ve tüketim süreçlerine verimli ve akıllı çözümler getirmektedir [21]. Bu uygulamalar ile hem

tüketiciler hem de enerji üreticileri, gerçek zamanlı enerji yönetimi araçları ile enerji tasarrufu, enerji güvenilirliği ve enerji sürekliliği avantajlarına kavuşabileceklerdir. Akıllı şebekeler ile gerçek zamanlı ölçme ve fiyatlandırma, akıllı yük atma (aşırı yükü kaldırmak için belirli bölgelerde kısa süre elektriği kesme) veya kaydırma, tüketim yönetimi, fiyat optimizasyonu ve enerji verimliliği için tüketiciyi aktif hale getirme, hibrit elektrikli araçların enerji şebekesine entegrasyonu, fotovoltaik sistem ve rüzgar türbinleri gibi alternatif ve dağıtık üretim kaynaklarının entegrasyonu gibi birçok yeni enerji kavramları literatüre kazandırılmıştır.

Bu çalışmada, akıllı şebekelerde haberleşme ve kontrol alanında elde edilen gelişmeler özetlenecek, bu gelişmeler ile sağlanabilecek dağıtık kontrol ve geniş-alan şebeke yönetimi konusunda değerlendirmeler yapılacaktır. Bu değerlendirmeler ışığında yakın geleceğin olası akıllı şebeke mimarisi ve uygulamalar için projeksiyon tutulacaktır.

## 2. AKILLI ŞEBEKELERDE DAĞITIK KONTROL MİMARİSİ (DISTRIBUTED CONTROL ARCHITECTURE IN SMART GRIDS)

Bir önceki bölümde değinilen beklentilerin geleceğin akıllı şebeke mimarilerinden karşılanabilmesi için şebeke ve güç bileşenlerinin durumlarının gözlemlenebilir ve kontrol edilebilir olması gerekmektedir. Çünkü sadece gözlemlenebilir ve kontrol edilebilir olan dinamik sistemler, yönetilebilirdir. Çok sayıda bileşenden oluşan karmaşık şebeke yapısının yönetilebilir olması, akıllı şebeke altyapısının şu üç temel teknoloji katmanına sahip olmasını zorunlu kılar:

- (i) Güç sistemleri katmanı
- (ii) Haberleşme sistemleri katmanı
- (iii) Kontrol sistemleri katmanı

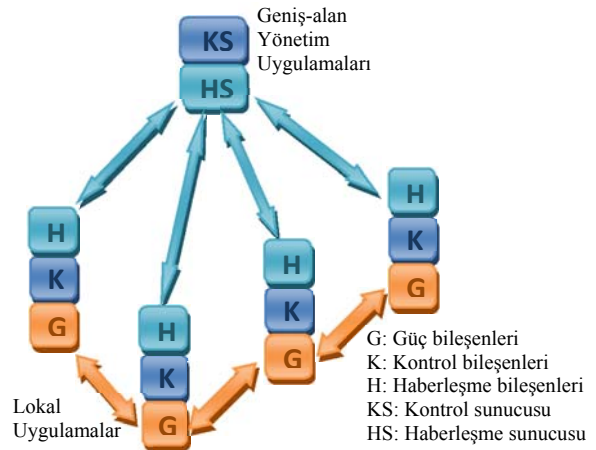
Şekil 1'de bu üç teknoloji katmanı ayrı ayrı betimlenmiştir. Şekil 2'de bu katmanları oluşturan bileşenlerin iç içe geçmesi sonucu açığa çıkan işlevsel ilişkileri tasvir edilmiştir. Bu katmanlara dayalı olarak sağlanan geniş-alan yönetim kabiliyeti dağıtık kontrol imkanları ile sağlanabilir.

Dağıtık kontrol, akıllı şebekenin güç katmanları bileşenlerinin bağımsız yerel kontrol birimlerine sahip olması durumudur. Şebekeye yayılmış kontrol yapılarının birbiri ile uyumlu ve sistem bütününde optimal çalışabilmesi geniş-alan yönetimi ile sağlanabilir. Akıllı şebeke geniş-alan yönetimi; şebekeyi oluşturan üretim, iletim, dağıtım, tüketim güç

bileşenlerinin ve süreçlerinin durumlarını ve elektriksel parametrelerini gözlemleyebilir ve uzaktan kontrol edebilir olmalıdır. Bunun için bileşenlere ait dağıtık kontrol yapılarının programlanabilir, yerel-alan ve geniş-alan haberleşme kabiliyetine sahip kontrol birimleri olarak tasarlanması gerekmektedir. Bu birimler, Şekil 2'de komşu haberleşme (H) ve kontrol (K) birimleri ile gösterilmiştir. Burada kontrol işlevleri, güç şebekesi bileşenleri (G) ile haberleşme ağı bileşenleri arasında ara yüz görevi görmektedir. Şekilde komşu KS ve HS yapıları ile temsil edilmiş olan geniş alan yönetim sistemi, geniş alan haberleşme ağı aracılığı ile dağıtık kontrol birimleri (H-K) ile irtibatlanmaktadır. Geniş alan yönetim sisteminden (KS-HS) gelen mesajlar dağıtık kontrol birimlerinin H birimleri tarafından alınır, K birimleri tarafından değerlendirilir ve G birimlerine uygulanarak şebeke üzerinde geniş-alan yönetimi sağlanır.



Şekil 1. Akıllı şebeke teknoloji katmanları (Smart grid technology layers)



Şekil 2. Katman bileşenlerinin birbiri ile olan işlevsel bağlantıları (Functional connections of layer components with each other)

Akıllı şebeke mimarisinin kontrol edilebilir ve gözlemlenebilir olabilmesi için geniş alan yönetim sistemlerinin, Şekil 2'de tasvir edilen üç yapısal

bileşene (H-K-G) sahip olan cihazlardan ve sistemlerden oluşması gerekmektedir. Bu cihazların işlevsel mimarisi, Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Yönetilebilir bir güç sisteminin işlevsel mimarisi (Functional architecture of a manageable power system)

Kontrol biriminin programlanabilir olması, işlemci ve bellek içeren kontrol kartları ile sağlanabilmektedir. Bu kartların analog ve dijital giriş-çıkış portlarının olması, sensörlerin ve güç sistemlerinin bu kartlara bağlanabilmesine imkan sağlamaktadır. Ayrıca, kart üzerinde haberleşme modülleri de sağlanarak, Ethernet, USB, RS-32, Wi-Fi, GSM/GPRS komple bir çözüm sunabilmektedir.

### 2.1. Akıllı Şebekeler İçin Haberleşme Sistemleri (Communications Systems For Smart Grids)

Günümüz kablolu ve kablosuz haberleşme teknolojilerinde kaydedilen gelişmeler, akıllı şebekelerin haberleşme katmanının inşasına ivme kazandırmıştır. Akıllı şebekelerin mimarilerinde haberleşme ihtiyacı yakın-alan (Bina ve tesis içi) ve uzak-alan (Şehir içi ve şehirlerarası) haberleşmelerinin her ikisini de kapsamaktadır. Milyonlarca kullanıcıya hizmet veren bir akıllı güç dağıtım altyapısının kendi içinde uyumlu çalışabilmesi ve haberleşebilmesi için yüksek bant-genişliklerine sahip yüksek hızlı veri iletim altyapısına ihtiyaç duyacaktır. Bu altyapı günümüzde gerek fiber teknolojisi ile gerekse kablosuz iletişim imkanları ile mümkün olmaktadır. IEEE tarafından akıllı şebeke uygulamaları için önerilmiş başlıca haberleşme teknolojileri ZigBee, WiMAX ve Kablosuz LAN (Wi-Fi) teknolojileri, GSM/GPRS, DASH 7 ve güç hatları üzerinden haberleşme (PLC)’dir.

Akıllı şebekelerin en büyük avantajlarından biri enerji kaynakları ile tüketiciler arasında çift yönlü bir haberleşme ağının kurulmasıdır [22]. Çift yönlü haberleşme, akıllı şebekelerin uygulanmasında önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Akıllı şebekelerin gerçek zamanlı haberleşme yeteneği kazanması, elektrik şebekelerinin modernizasyonu için bir dönüm noktası teşkil edecektir. Bu durumda veri merkezleri, üretici-tüketici tabanlı yazılımlar, dağıtık kontrol birimleri, geniş alan yönetim uygulamaları bu altyapı üzerinden haberleşebileceklerdir. Bu haberleşme altyapısı; bugün için fiber optik kablo, güç hattı üzerinden geniş bant iletim ve kablosuz teknolojiler içeren çeşitli iletişim yollarını barındıracak şekilde inşa edilebilmektedir [23]. Günümüz haberleşme teknolojilerinin akıllı şebekelerde kullanılma durumu, Tablo 1’de özetlenmiştir. Bu tablo var olan haberleşme teknolojilerinin farklı akıllı şebeke uygulamaları için mevcut durumunu ortaya koymaktadır. Bu tablo ayrıca, mevcut haberleşme çözümlerini ve bu alanda devam eden araştırmaları da göstermektedir [24].

İhtiyaca dönük olarak geliştirilen teknoloji ve yöntemlerin akıllı şebeke haberleşme sistemlerindeki yeri aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Geleneksel ve yeni nesil haberleşme sistemlerinde GSM/GPRS teknolojisi önemli bir yer tutmaktadır [25]. Bunun temel nedeni GSM/GPRS teknolojisi kullanılarak elde edilen çözümlerin hedeflenen noktalara kablosuz erişim sağlayabilmesidir. GSM, tüm dünyada uygulanan en popüler devre anahtarlamalı hücreli ağıdır. Bu ağ, (900-1800) MHz aralığında çalışır. Mimarisi dört temel bileşenden oluşur: mobil cihazları, baz istasyonu trafo merkezi, ağ anahtarlama trafo merkezi, ve işletim destekleme trafo merkezi. GSM, sabit hat telefon ağından sonra dünyanın en konuşlanmış haberleşme teknolojisi olma avantajına sahiptir. Bu durum, akıllı şebeke uygulamaları için bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında GSM, en güvenli haberleşme ağları arasında kabul edilmektedir [26].

GPRS, devre anahtarlamalı GSM ağı üzerinden paket tabanlı veri transferi sağlar. Böylece, GSM ağı üzerinden IP tabanlı ağ uygulamalarının gerçekleşmesine olanak tanır. GSM ile karşılaştırıldığında veri hızı çok daha yüksektir. Standardizasyon ve uyumlu çalışabilme sorunu halen mevcut olmasına rağmen, akıllı şebeke uygulamalarında GSM/GPRS kullanım alanı bulabilmektedir. GSM/GPRS’in, akıllı şebeke uygulamalarında uzaktan izleme amaçlı kullanımı daha yaygındır. Örneğin, GPRS teknolojisi ile trafo merkezinin uzaktan izlenmesi önerilmiştir [27]. Aynı zamanda yine GPRS tabanlı

çevrim içi güç kalitesi izleme yöntemi tartışılmıştır [28,29].

Tablo 1. Günümüz haberleşme teknolojilerinin akıllı şebekelerde kullanılma durumu; a:mevcut durumda kullanılan sistemler, b:kullanılması için araştırmaların sürdüğü sistemler, c:henüz kullanılmayan ancak çözüm geliştirilebilecek sistemler (Using situation of today's communication technologies in smart grids; a:the systems used in the present case, b:the researched systems for use, c:the systems not used yet but solution will be developed) [24]

	Kullanım Alanları	PLC Pwr. L. Comm.	ZigBee	WiFi	WiMAX	GSM ve GPRS	DASH 7
Üretim	Geleneksel üretim	c	b	b	b	a	b
	Dağıtık yenilenebilir enerji tabanlı üretim	c	b	c	b	a	b
İletim	İletim hattı izleme ve koruma	a	c	b	b	a	b
	İzolatör izleme	a	c	c	c	b	b
	FACTS izleme ve kontrolü	a	c	b	c	a	b
Dağıtım	Trafo otomasyonu ve koruma	a	b	a	b	a	b
	Dağıtım hattı izleme ve koruma	a	b	c	c	a	b
	Aygıt izleme ve koruma	a	b	a	c	a	b
Tüketici	Ev otomasyonu ve kontrolü	a	a	a	c	a	b
	Endüstriyel otomasyon ve kontrolü	a	a	a	c	a	b
	Otomatik sayaç okuma	a	a	a	b	a	b
	Elektrikli araçlar	b	b	b	c	a	b

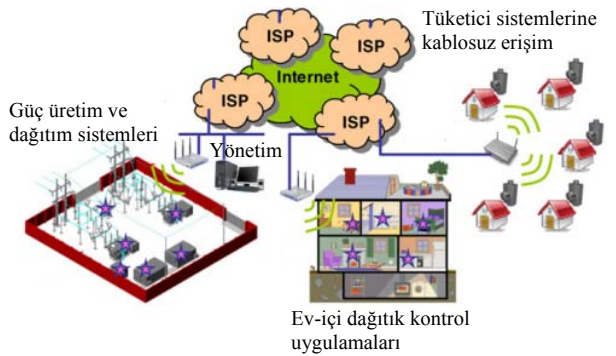
GSM/GPRS, ev alan ağı (Home Area Network-HAN) ortamında çok sayıda uygulama alanı bulmuştur. GSM/GPRS yoluyla ev izleme ve yük kontrolü kolaylıkla yapılabilir. Cihazların yük kontrolü ve otomasyonu, çeşitli alanlarda uygulanmaktadır. Yerel kullanıcı cep telefonu sayesinde her an ev ile iletişim halindedir. GSM/GPRS ile birlikte, cihazların kısa mesaj servisi (SMS) tabanlı uyarı ve kontrolü, yine GSM teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilebilir [26].

Kablosuz ağ teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte cihazlar arası kablolu haberleşme, yerini kablosuz haberleşmeye bırakmıştır. Genel olarak kablosuz sinyaller, iletim zayıflamasına ve gürültüye önemli ölçüde maruz kalmaktadır. Bu nedenle, kablosuz ağlar genellikle nispeten düşük veri hızları ile kısa mesafe bağlantıları sağlar [23].

WiMAX teknolojisi sabit, taşınabilir ve mobil erişimleri destekleyen bir geniş bant kablosuz erişim teknolojisidir. Görüş hattında olan veya olmayan, bir noktadan bir noktaya, bir noktadan çok noktaya ve çok noktadan çok noktaya uygulamaları desteklemektedir. Daha geniş alanlarda dağıtık enerji kaynakları arasındaki iletişim için uygun bir seçenek olarak kabul edilebilir. İdeal şartlarda 50 km'lik kapsama alanı içerisinde 70 Mbps hızlarda ses, veri ve görüntüyü hizmet kalitesi ve güvenlik gerekliliklerinde taşıyıp dağıtabilmektedir. WiMAX teknolojisi, düşük toplam kurulum maliyeti ve akıllı şebeke uygulamaları için geniş kapsama alanı ile birlikte güvenilir, yüksek veri hızı ve otomatik ağ bağlantısı sağlar. [30].

Wi-Fi teknolojisi, uyumlu cihazların kablosuz erişim noktaları aracılığıyla yerel alan ağına bağlanabilmeyi sağlamaktadır. Akıllı şebekeler için IEEE 802.11 (Wi-Fi) ve IEEE 802.16 (WiMAX) gibi standartlar getirilmiş olup bu standartların geliştirilmesi ve olgunlaştırılması yolunda çalışmalar devam etmektedir. IEEE 802.11 (Wi-Fi) ağlarında haberleşme için maksimum veri hızı 150 Mbps ve maksimum haberleşme mesafesi 250 m olarak belirlenmiştir. IEEE 802.16 standardında ise 50 km mesafede 100 Mbps hızında veri transferi sağlanabilmektedir [23, 31,32].

Şekil 4'te kablosuz haberleşme sistemleri için akıllı şebeke mimarisinin temsili yapısı görülmektedir. Bu yapıda internet ve internet servis sağlayıcı (ISP), dağıtık alt ağları (enerji santrali, akıllı şebekeye bağlı elektrikli cihazlara sahip akıllı evler, otomatik sayaç okuma altyapısına sahip haneler vb.) birbirine bağlarken omurga görevi görmektedir [23].

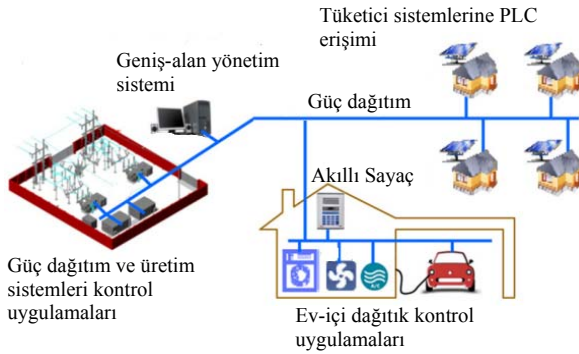


Şekil 4. Akıllı şebekelerde internet üzerinden (TCP/IP tabanlı) kablosuz haberleşme altyapısı (Wireless communication infrastructure via internet (TCP/IP-based) in smart grids) [23]

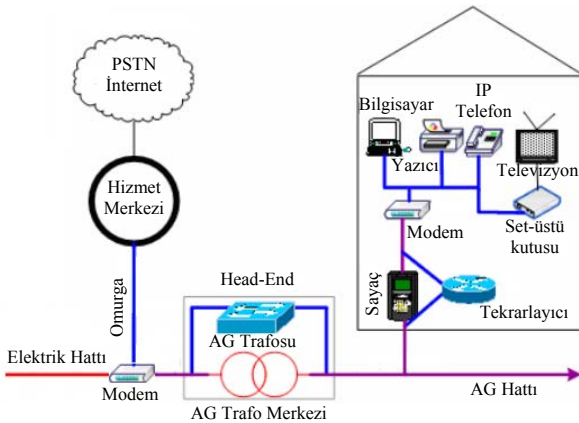
Güç hatları üzerinden haberleşme (Power Line Communication-PLC), enerji dağıtım hattı ile birlikte enerji iletim hattı üzerinden veri paylaşımı için geliştirilen bir teknolojidir. Elektrik hattı üzerinden

haberleşme teknolojisi, çift yönlü iletişim için mevcut güç hattı kablo altyapısı üzerinden modüle edilmiş taşıyıcı bir sinyalin bilgisini içerir. PLC teknolojisi, en eski ve yaygın kullanılan etkili bir yöntemdir [33]. PLC, dar bant PLC ve geniş bant PLC olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Dar bant PLC, (3-500) kHz olan bir haberleşme aralığına sahiptir. Geniş bant PLC teknolojisi, birkaç yüz Mbps veri hızı ile (2-250) MHz bant aralığı olan çalışma potansiyeline sahiptir. Dar bant PLC teknolojisi, yakın-alanda ölçümleme ve kontrol uygulamaları için daha uygundur. Geniş bant PLC ise, akıllı şebeke uygulamalarına ek olarak son kullanıcı multimedya ve internet hizmetleri için iletişim imkanı sunar [33]. Şekil 5 ve 6, bu konuda örnek uygulama ve sistemleri resmetmiştir.

PLC tabanlı çözümler kimlik doğrulamayı, veri bütünlüğü ve gizlilik ile ilgili güvenlik sorunlarını, esnek anahtar yönetim tekniklerini, 128 bit Gelişmiş Şifreleme Standartlarını (Advanced Encryption Technologies-AES) kullanarak ele almaktadır [34].



Şekil 5. Akıllı şebeke uygulamaları için geniş alan ve dar alan PLC haberleşme sistemlerini kullanan akıllı şebeke mimarisini (The smart grid architecture that uses wide and narrow area PLC communication systems for smart grid applications) [23]



Şekil 6. Elektrik hatlarından haberleşme (PLC) teknolojisi ve donanımları (Power line communication (PLC) technology and equipment) [35]

Şekil 6'da PLC teknolojisi ve donanımları gösterilmiştir. Bu teknolojiye AG trafo merkezinde Head-End kullanılarak ses ve veri, AG trafosu atlatılarak doğrudan elektrik hattına verilmektedir. Elektrik sayaçlarının yanında bulunan tekrarlayıcı ile alınan sinyal yinelenerek kuvvetlendirilmekte ve binadaki prizlere dağıtılmaktadır. Bina içi mevcut elektrik şebekesi, ev ve ofislerde ses, görüntü ve yüksek hızlı veri dağıtımı için hazır altyapı demektir. PLC yapı içi ağları, kullanıcıların veya tüketicilerin meskenlerde kullanmış oldukları akıllı elektrikli aygıtları birbirine ve internete, dahili elektrik tesisatı üzerinden bağlayabilen yeni teknolojilerdendir. Yapı-içi ağında, aynı elektrik prizi hem elektrik akımı sağlamakta, hem de ağa bağlı donanım için bir erişim noktası gibi davranmaktadır. Her kullanıcı, modem vasıtasıyla ayrıştırılmış olan ses ve veriyi kullanarak bilgisayara, telefona ya da uyumlu diğer donanımlara bağlanabilmektedir [35].

Ancak özellikle enerji dağıtım safhasında GSM/GPRS'in PLC üzerine bir üstünlüğü söz konusudur. Bununla birlikte IEEE 802.15.4 (ZigBee) tabanlı çözümler, PLC ve GSM/GPRS tabanlı çözümleri geride bırakacak performans sergileyebileceği görülmüştür [5]. IEEE 802.15.4, fiziksel katman ve ortam erişim denetimi için tanımlı, düşük hızlı, kablosuz ve kişisel alan ağları için belirlenmiş bir standarttır. ZigBee, düşük güç tüketimi ile birlikte haberleşmede düşük veri hızı gerektiren kablosuz cihazlar için geliştirilmiştir. ZigBee için potansiyel kullanım alanları; ev otomasyonu, bina otomasyon, enerji yönetimi ve verimlilik, endüstriyel kontrol, tüketici elektroniği ve haberleşme servisidir [36].

Akıllı şebeke haberleşme sistemlerinde devam eden çalışmaların çoğu tüketici bölgesi üzerine yoğunlaşmıştır. PLC, IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.4 (ZigBee) ve GSM/GPRS tabanlı geliştirilen çözümler, ev otomasyonu ve otomatik sayaç okuma (Automatic Meter Reading- AMR) gibi amaçlar için kullanılabilir. Önümüzdeki yıllarda önemli bir elektrik tüketicisi olarak karşımıza çıkacak olan hibrit elektrikli araçlar için GSM/GPRS tabanlı çözümler geliştirilmiş olup, diğer teknolojilerin uygulanabilmesi için çalışmalar sürdürülmektedir. IEEE 802.16 (WiMAX), araştırmacılar arasında fazla ilgi görmediğinden sadece AMR tabanlı uygulamalarda yer edinmiştir [24].

DASH7, yeni ve ticari amaçlar için geliştirilmiş bir teknolojidir. İlk aşamada askeri haberleşme sistemlerinde kullanılmış ve oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle tüketici ölçekli akıllı şebeke haberleşme sistemi için ideal teknolojiler arasındaki yerini almıştır [37].

Geleneksel kablolu haberleşme sistemleri (wireline networks), günümüz haberleşme altyapısını oluşturmaktadır. Bu altyapı için, uzak mesafelere kadar 155 Mbps ile 160 Gbps arasında veri haberleşmesine olanak sağlayan fiber optik hatlar üzerinden SONET/SDH ağları, orta mesafede (5.5 km) 10 Mbps'ye kadar DSL hizmetleri, kısa mesafede Ethernet teknolojileri örnek verilebilir. Hali hazırda kurulu olan bu haberleşme altyapısı, akıllı şebeke uygulamalarının haberleşme gereksinimlerine cevap verebilecek yeterliliktedir [23].

Tüketici hizmetine haberleşebilen akıllı cihazlar kazandırılmış olmakla birlikte, akıllı şebeke haberleşme sistemleri arasında standardizasyon ve uyumlu çalışabilme sorunları tamamen çözülmüş değildir. IEEE, IET, ISO, NIST gibi uluslararası düzenleyici kurumlar, akademik çevreler ve ABB, EPRI, Siemens, IBM, BPL Global, General Electric, Iberdrola gibi enerji hizmet şirketlerinin dünya genelinde gerçekleştirilebilir, sürdürülebilir ve kabul edilebilir standartlar ve çözümler geliştirmeye yönelik çalışmaları devam etmektedir.

## 2.2. Akıllı Şebekeler İçin Kontrol Uygulamaları (Control Applications For Smart Grids)

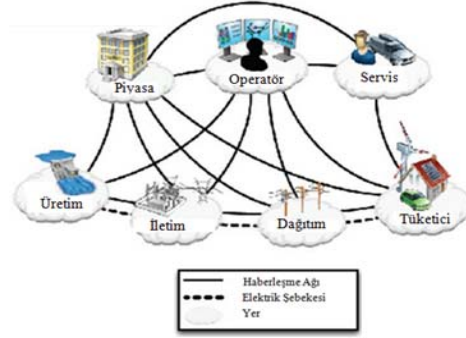
Akıllı şebekelerde kontrol, yerel ölçekte güç elektroniği elemanlarının kontrolünden geniş ölçekte yerel ve küresel olarak şebeke durumlarının ve koşulların kontrolü ve optimizasyonuna kadar uzanan geniş bir uygulama yelpazesini kapsar. Bu bölümde, yakın zamanda yapılan çalışmalara ve teknolojilere kısaca değinilmektedir.

Her güç sistemi bileşeninin kendine özgü bir yapısı ve bunun sonucu olarak kendine özgü kontrol gereksinimleri vardır. Ancak en genel anlamda güç sistemi kontrolü, yazılım ve donanımın birlikte kullanılmasını gerektirir. NIST (Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü) [38] tarafından önerilen enerji marketi, kontrol, haberleşme ve güç altyapısını tasvir eden akıllı şebeke kavramsal modeli Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu modele göre, operatörler bütün akıllı şebeke süreçlerini (Market, servis, üretim, iletim, dağıtım, tüketim) yönetmesi ve optimal şebeke durumlarının korunmasını sağlamalıdır.

Donanım kısmı frekans, faz açısı, gerilim ve arıza gibi durum bilgilerini toplayarak yazılım sistemlerine iletir. Akıllı yazılımlar ile bilgilerin değerlendirilmesi veya durum tahminleri yapılır. Seçilen kontrol yöntemi ve sınır değerlerine bağlı olarak sistemin güncellenmesi yani aktif-reaktif güç artırma veya azaltma, jeneratörleri devreye alma veya çıkarma, arıza durumları için enerji kesme veya enerji verme işlemleri otomatik olarak bu

yazılımlar tarafından kontrol edilebilir. Kontrol sistemleri, güç sistemlerinin verimli çalışmasını sağlamakla kalmaz, sistemin çökmesini veya arzu edilmeyen bir duruma düşmesini engeller.

Yerel ölçekte kontrol uygulamalarına örnek olarak, jeneratörlerde gerilim kararsızlıklarının olumsuz etkilerini önlemek için otomatik voltaj regülatörleri (AVR) kullanılmaktadır. Statik VAR kompensatörler (SVC) ve yüksek gerilim doğru akım (HVDC) sistemlerinin kararlı çalışması için kapalı çevrim kontrol yapılarına ihtiyaç duyulmuştur. Rüzgar türbini gibi yenilebilir enerji sistemlerinin veriminin artırılması, kontrol uygulamaları ile sağlanabilmiştir [39]. Dönüştürücü bileşenlerin (DC/DC, DC/AC, AC/AC gibi) gerilim ve frekans kararlıklarının sağlanması için kapalı çevrim kontrol yapıları kullanılmaktadır [39].



Şekil 7. NIST akıllı şebeke kavramsal modeli (Smart grid conceptual model by NIST) [38]

Bu kısımda, akıllı şebeke uygulamaları için geliştirilmiş uluslararası standartlara değinmek faydalı olacaktır. Akıllı şebekelerde kontrol çalışmalarının sınırları, NIST tarafından standart hale getirilmiştir. NIST, Birleşmiş Milletler (US) çatısı altında kurulmuş ve akıllı şebekelerin standartlarını tanımlamada dünya çapında kabul görmüş bir oluşumdur. NIST standartlarını oluştururken IEEE (Elektrik Elektronik Mühendisler Enstitüsü) ve IEC (Uluslararası Elektrik Komisyonu)'nin görüşlerini değerlendirmektedir. IEEE bu standartları iki temel başlığa ayırmıştır:

- IEEE C37.118.1; ölçüm tanımlama ve sınır değerleri
- IEEE C37.118.2; bilgi haberleşme ve yapıları [40].

IEEE C37.118 standardı, 2005 yılında kararlı hal için güç ölçüm ünitelerinin ölçümlerini ve sınır değerlerini belirlemek amacıyla geliştirilmiştir [41]. Toplam vektör hatasının (TVH) hesaplanmasını ve senkronize fazörlerin tanımını veren bu standart, denklem (1) ve (2)'de ile ifade edilmiştir.

$$\bar{X} = \left( \frac{x_m}{\sqrt{2}} \right) e^{j\phi} \quad (1)$$

Burada,  $\frac{x_m}{\sqrt{2}}$ ;  $x(t)$  sinyalinin etkin değeri,  $\phi$ ; kosinüs fonksiyonu ile tanımlanmış anlık faz açısıdır.

$$THV = \sqrt{\frac{(x_r(n) - x_r)^2 + (x_i(n) - x_i)^2}{x_r^2 - x_i^2}} \quad (2)$$

Burada  $x_r(n)$  ve  $x_i(n)$  ölçülen değer  $x_r$  ve  $x_i$  hesaplanan değerlerdir.

TVH, faz açısı ve genlik değerleri için, hesaplanan değer ile ölçülen değer arasındaki hatayı göstermektedir. Bu standart sadece kararlı hal durum testi içindir. Güç sisteminde test edilen diğer durumlar; sinyalin frekansı, genliği, faz açısı, harmonik bozulma, tanımlanan bandın dışına çıkma olarak sıralanabilir. Bütün şebeke için bu durumların gözlemlenmesi ve kontrol edilmesi, dağıtık kontrol teknolojileri ile mümkün olabilecektir. Bu durumlar iki performans seviyesi ile tanımlanabilir. Düşük performans için seviye 1; daha az filtreleme, daha hızlı tepki ve daha yüksek performans için, seviye 2; daha iyi filtreleme, uygun hesaplama ve yavaş izleme uygulamaları için tanımlanmaktadır. IEEE C37.118 standardının uygulaması, IEC 61850'ı haberleşme standardını desteklemelidir [42].

Geniş alan ölçümleme sistemleri (wide-area measurement systems-WAMS) haberleşme ağını kullanan bir dağıtık sensör uygulamasıdır. Bu uygulamada, senkronize fazör ölçüm birimleri (phasor measurement units-PMU) ile şebeke gözlemlenebilirliğinin önemli ölçüde artırılacağı gösterilmiştir [43,44]. Geniş alan ölçümleme sistemleri, şebeke durumlarının dinamik kestirimine olanak sağlamış ve böylece dağıtık kontrol yöntemlerini uygulanabilir kılmıştır.

Şebekenin, sürekli hal parametrelerini optimize etmek için optimal güç akış kontrol (optimal power flow-OPF) metotları geliştirilmiştir [45,46]. Ancak, bu yöntem yerel dinamikleri ve değişimleri dikkate almamıştır. Lokal dinamikler, yük veya üretim değişimleri lineer kontrolörler tarafından yönetilmiştir. Gerçek zamanlı aktif güç dengelemesi PID tabanlı otomatik üretim kontrol (Automatic generation control-AGC) birimleri ile sağlanmıştır. Lokal olarak kontrol edilen reaktif kaynaklar, voltaj regülasyonu için kullanılmıştır. Örneğin, otomatik voltaj regülatörüne sahip jeneratörler (Automatic Voltage Regulators-AVRs), anahtarlamalı kapasite bankları gibi [47].

Üretim belirsizliği içeren yenilenebilir kaynakların bulunduğu bir akıllı şebekenin optimal güç yönetimi için geniş alan ölçme tabanlı dinamik stokastik optimal güç akış kontrol yöntemi (Wide-Area Measurement Based Dynamic Stochastic Optimal Power Flow Control-DSOPF) geliştirilmiştir [48]. Bu yöntem ile yenilenebilir kaynakların neden olduğu değişimler karşısında, optimal çalışma değerlerini korumak için anlık olarak şebekedeki yönetilebilir kaynakların, optimal kontrol stratejileri ile kontrol edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, yapay zeka algoritmaları (Yapay sinir ağları, bulanık mantık gibi) veya doğadan esinlenilerek geliştirilen optimizasyon algoritmaları (Genetik algoritma, parçacık-sürüsü), dağıtık kontrol uygulamaları için önerilen geniş alan yönetim stratejilerinde kullanılabileceği öngörülmüştür [49]. Bu yöntemler, adaptasyon ve öğrenme kabiliyetine sahip olmaları nedeni ile değişken sistem durumlarına ve akıllı şebekenin dinamik yapısına daha uygun olan akıllı kontrol uygulamaları sunması beklenmektedir.

Optimal üretim ve tüketim koşullarının yerel olarak yönetilmesi için mikro-şebeke (Microgrid) kontrol ve yönetim sistemleri geliştirilmiştir. Yenilenebilir kaynakların mikro şebeke düzeyinde hibrit DC ve AC entegrasyon problemleri için çeşitli kontrol yöntemleri önerilmiştir [8-10,50].

SCADA teknolojisi, dağıtık kontrol uygulaması için bir standart getirmektedir. SCADA verileri toplayıp, değerlendirip, sistemin verimli yönetimini sağlayan endüstriyel bir kontrol sistemidir. SCADA teknolojisi, dağıtık kontrolün yerel ve cihaz düzeyinde gerçekleştirilmesi için bir platform sunmuştur. SCADA'da, sistemin yönetimi için gerekli olan bütün bilgiler anlık olarak sensörler ve ölçüm cihazları ile toplanır [51]. SCADA yöntemi, otomasyona dayalı fabrikalar başta olmak üzere endüstriyel otomatik kontrol uygulamalarında verimli ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, SCADA'da, üzerinde karmaşık kontrol ve optimizasyon algoritmalarının gerçekleştirilebileceği bir kontrol platformuna dönüşmektedir. SCADA birimlerine sahip güç sistemlerinin, internet altyapısı (TCP/IP) üstünden geniş alan yönetimi, bulut kontrol mimarisini ortaya çıkarmaktadır. IP adreslemesi ile güç sistemleri, bulut yönetim ve uygulama sunucularının hizmetine girecektir [23,52].

Akıllı sayaçların, hane veya site düzeyinde yerel enerji yönetimini sağlaması hedeflenmiştir. Dinamik enerji fiyatlamasına bağlı olarak kontrol edilebilen esnek talep uygulamaları (Talep taraflı yük yönetimi) programlanabilir akıllı sayaç sistemleri ile sağlanabilecektir. Dağıtık mikro-depolama sistemlerinin



[17] yerel yönetimi akıllı sayaç ile sağlanmalıdır. Ayrıca, çift yönlü akıllı sayaç uygulamaları ile yenilenebilir enerji kaynaklarının hane ve site ölçeğinde yönetimi ve dağıtık kaynak uygulamaları mümkün olabilecektir [20,51].

Arz-talep dengesinin (energy balance) en uygun yönetimi ve aşırı enerji üretiminin önlenmesi için düzenleyici enerji piyasalarının yönetimi (Regulating power markets) söz konusu olmuştur. Avrupa birliği enerji piyasasının dengelenmesi için, ACER (Agency for the Cooperation of Energy Regulators) tarafından, iletim ve dağıtım operatörlerinin uymak zorunda olduğu kurallar konmuştur. Anlık arz-talep dengesizliklerine işaret eden AC frekans sapmalarının izlenmesi ve düzeltilmesi yükümlülüğü iletim ve dağıtım operatörlerine bırakılmıştır. Arz talep dengesinin korunmasına dönük bir diğer yaklaşım, talep esnekliğine sahip olan enerji piyasalarında, dinamik enerji fiyatlaması ile arz talep dengesinin sağlanması söz konusudur [53-57]. Ancak, bu uygulama dinamik fiyatlamaya cevap verebilecek talep taraflı yük yönetimin kabiliyetine sahip akıllı şebekelerde etkin olarak işleyebilecek bir stratejidir. Bu itibarla, akıllı sayaç sistemlerinin yaygınlaştırılması ve talep esnekliğinin sağlanması önem arz etmektedir.

### 3. GELECEĞİN DÜNYASINA DÖNÜK PROJEKSİYONLAR VE FIRSATLAR (PROJECTIONS AND OPPORTUNITIES FOR FUTURE OF THE WORLD)

Şekil 2'de gösterilen sistem yapılarının inşası, hane düzeyinden sitelere, şehirlere, ülkelere ve küresel ölçekte çeşitli imkanlar ve fırsatlar sunacaktır.

Hane ölçeğinde fırsatlar:

a) Akıllı sayaçlar yardımı ile esnek fiyatlandırma sistemi uygulanabilecektir. Böylece tüketici kendi tercihleri doğrultusunda akıllı sayaçlar ile tüketimini elektrik fiyatının ucuz olduğu saatlere kaydırılabilecektir. Eğer, tüketici konutsal enerji depolama ünitelerine sahip ise düşük fiyatta iken satın alabileceği enerjiyi, enerjinin pahalı olduğu saatlerde kullanabilecek ya da kısa süreli kesintilerde enerji problemi yaşamayacaktır [8,9]. Bu şebekeye, önemli ölçüde talep esnekliği kazandıracaktır.

b) Geniş alan haberleşme sistemi (GSM/GPRS, PLC gibi) ile desteklenebilecek akıllı sayaçlar (AMR), tüketici bilgilerinin ve enerji sisteminin uzaktan yönetim ve testine imkan sağlayabilecektir. Ölçme, izleme ve arıza tespiti işlemleri uzaktan yürütülebilecektir [43,44]. Yerel tesisat sorunları ve hanenin enerji verimliliği

profilleri uzaktan değerlendirilebilecek ve tüketiciler bu konularda yönlendirilebileceklerdir.

c) Geniş alan (GSM/GPRS, PLC, uydu haberleşmesi) haberleşme kabiliyetine sahip akıllı sayaçlar, konutların multimedya hizmetlerinin (İnternet, telefon vs) güç-hattı üzerinden sağlanmasına olanak verebilecektir.

d) Dar alan, ev-içi cihaz haberleşmeleri (ZigBee, Wi-Fi, PLC vs.) ile cihazların uzaktan yönetimleri mümkün olabilecek, ayrıca ev cihazlarının kendi içinde haberleşebilmeleri, akıllı ev sistemlerinin daha bütünsel ve etkin bir yapıya kavuşmasını sağlayabilecektir [23,35].

e) Akıllı sayaçlar, yenilenebilir enerji sistemlerinin ve konutsal enerji depolama sistemlerinin evlerde kullanılmasını ve yönetimini kolaylaştırabilecektir. Böylece, hanelerin ve bireylerin enerji üreticisi durumuna gelmesi sağlanacaktır. Çift yönlü akıllı sayaçlar, evde üretilen fazla enerjinin satılabilmesine imkan vererek, hem tüketiciye hem de enerji üretimine katkı sağlayabilecektir. Tüketicilerin, bu kabiliyetler ile üretken-tüketici (prosumer) profiline kavuşmaları beklenmektedir. Hanelerin temiz yenilenebilir enerji kaynaklarına dayanan (Rüzgar+Güneş) üretken-tüketiciler haline dönüşmeleri, CO<sub>2</sub> salınımını düşürecek ve çevre dostu enerji üretimi ne katkı sağlayacaktır [17,18].

f) Elektrikli araçların artması ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan fazla enerji, taşımada kullanılacak ve çevre üstünde ağır baskısı olan taşımacılık biraz daha ucuz maliyetli ve çevre-dostu gerçekleştirilmesi mümkün olabilecektir.

Site ölçeğinde fırsatlar:

a) Yenilenebilir enerji kaynaklarının mikro şebeke düzeyinde entegrasyonu ile sitelerin şebekeye olan enerji bağımlılığı azaltılabilecek, çevre-dostu üretim ve tüketim desteklenebilecektir.

b) Site içi haberleşme ve site hizmetlerinin (Güvenlik, sulama ve site içi aydınlatma sistemleri) yönetimi ve kontrolü güç dağıtım hattı üstünden (PLC) sağlanabilecektir.

Şehir ölçeğinde fırsatlar:

a) Akıllı şebeke üstünden dağıtık sensör ve dağıtık kontrol uygulamaları şehir-içi hizmetlerinin (Aydınlatma, parkların sulanması, güvenlik gibi) yönetimi ve otomasyonunu sağlayabilecektir.

b) Katı-atık bertaraf tesislerinden elde edilen enerji, akıllı şebeke üstünden şehir içi hizmetlerin enerji ihtiyacında kullanılabilir [57].

c) Hane ve site düzeyinde YEK kullanılması, şehrin dışarıya olan enerji bağımlılığını azaltacaktır. Yenilenebilir enerji kaynakları verimli olduğu saatlerde, şehir enerji üretimi bakımından tamamen kendine yetebilir duruma gelebilecektir [6-8].

Ülke ölçeğinde fırsatlar:

a) Akıllı şebekeler ile yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın kullanımı sonucunda, petrole, doğalgaza, kömüre dayalı olan enerjiye bağımlılık azalacak ve ülkelerin enerji talebini karşılamada doğal kaynaklarının ağırlığı artacaktır. Bu çevre-dostu enerji üretiminin sağlanması yanında ülkenin ekonomisine ve sürdürülebilir kalkınmasına olumlu etkileri olacaktır [6,7].

b) Akıllı şebekeler sayesinde yerinde üretim ve tüketimin sağlanabilmesi ile iletim-dağıtım kayıpları ve masrafları azaltılabilecektir. Daha verimli ve güvenilir enerji kullanımı söz konusu olabilecektir [9,12].

c) Akıllı şebeke ile sağlanabilecek talep taraflı yük yönetimi stratejileri ve en uygun tüketim stratejileri uygulanabilecektir. Böylece enerji fiyatları makul seviyelerde tutulabilecek, ihtiyaç fazlası enerji arzı (Aşırı üretim) önlenilebilir olacaktır [53-57].

Küresel ölçekte fırsatlar:

a) Akıllı şebekeler ile YEK'lerin kullanımının artması, yerinde üretim ve tüketim ile verimliliğin artırılabilmesine, küresel ısınma gibi insan aktivitesinin çevre üzerindeki baskısının azaltılmasına ve dünyanın daha yaşanabilir kalmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

b) Küresel ölçekte birleşen akıllı şebekeler, enerji üretim ve tüketimine esneklik kazandırabilecek, ülkeler arasındaki enerji paylaşımına dayalı çekişmeleri ve kaygıları azaltacaktır. Küresel akıllı şebeke entegrasyonu ile enerji üreten ülkelerin enerji arzlarını dünya ile paylaşmaları kolaylaşabilecektir. Örneğin, çöl ortasında küçük ölçekli güneş paneli tarlası kuran bir yerel üretici, üretimini küresel pazarın hizmetine sunma avantajına sahip olabilecek, böylece enerji pazarı derinleşebilecektir. Bu imkanın sosyo-ekonomik etkileri, dünyayı daha küresel kılacak, ülke sınırları biraz daha önemini yitirir duruma gelecektir.

c) Küresel akıllı şebeke altyapısı üzerinden küresel ölçekte haberleşme, uzaktan ölçme ve kontrol imkanları iyileşecektir. Bu durum, uluslararası bilimsel araştırma ve gözlem istasyonlarının çalışmalarını kolaylaştırabilecektir.

#### **4. AKILLI ŞEBEKELERE DÖNÜŞÜM İÇİN BİR YOL HARİTASI (A ROADMAP FOR CONVERSION TO SMART GRIDS)**

Önceki bölümde bahsi geçen imkan ve beklentilerin gerçekleşebilmesi için şu hususların göz önünde tutulması gerekmektedir.

ölçeğinde yapılması gerekenler:

a) Akıllı sayaçlar, asgari olarak mikrobilgisayar, bellek ve haberleşme birimlerine sahip olmalıdır. Bu cihazlar hem geniş alan haberleşmesi (GSM/GPRS, PLC, uydu haberleşmesi) hem de bina içi güç sistemlerine erişim sağlayabilmesi için dar alan haberleşme modüllerine (ZigBee, Wi-Fi, PLC vs) sahip olmalıdır.

(b) Yenilenebilir enerji sistemlerinin (Güneş ve rüzgar) hanelerde yaygınlaştırılması ve akıllı sayaçlar ile yönetilebilir olması sağlanmalıdır. Böylelikle, programlanabilir akıllı sayaçlar tarafından ev içi yük yönetimi ve şebekeye enerji ihracı yönetimi gibi uygulamalar gerçekleştirilebilmelidir.

(c) Ev cihazlarının güç ünitesi, akıllı sayaçlar ile haberleşebilir ve yönetilebilir olmalıdır. Geleneksel cihazlara bu uyumu kazandırabilmek için akıllı prizler tasarlanmalıdır. Akıllı prizler, akıllı sayaçlar ile yönetilebilir olmalıdır.

d) Elektrikli araç şarj sistemleri garajlarda veya park yerlerinde kurulmalıdır.

Mahalle ölçeğinde yapılması gerekenler:

a) Yerel dağıtım şebekesinin güç hattından haberleşmeye (PLC) imkan sağlaması temin edilmelidir. Güç hattı haberleşme bileşenlerinin uzaktan izlenebilir ve yönetilebilir olması sağlanmalıdır.

b) Yerel üretim ve tüketimi desteklemek için yenilenebilir enerji ve depolama sistemleri kurulabilmeli ve buradan elde edilen enerjinin yerel tüketimi desteklemesi sağlanabilmelidir.

c) Yerel bazda şarj ve dolun istasyonları, elektrikli araçlara hizmet için yaygınlaştırılmalıdır.

Şehir ölçeğinde yapılması gerekenler:

a) Şehirlerin kendi elektriğini üretebilir duruma getirilmesi için çalışmalar yapılmalıdır. Her şehrin yakın bölgelerinde yenilenebilir enerji (Güneş ve rüzgar) üretim alanları kurulmalıdır. Ayrıca, katı-atık bertaraf tesisleri enerji üretim istasyonlarına dönüştürülmeli ve akıllı şebekeye entegre edilmelidir.

b) Şehir-içi enerji yönetimi için geniş alan yönetim uygulaması geliştirilmeli, böylece şehrin enerji haritası gerçek zamanlı olarak gözlemlenebilmeli ve enerji dengesi korunmalıdır. Yerel ücretlendirme, yenilenebilir kaynakları devreye alma veya devreden çıkarma, enerji ithali ve ihracı işlemlerinin yönetimi gibi görevleri yürütebilmelidir.

Ülke ölçeğinde yapılması gerekenler:

a) Bütün şehirlerin enerji durum ve taleplerini değerlendirebilen ve enerji trafiğini yöneten ulusal enerji kontrol ve yönetim sistemi kurulmalıdır.

b) Devlet destek programları ve gelişen teknolojinin sağlayacağı fiyat avantajlarına sahip yenilenebilir enerji kaynakları ile yerel üretim ve yerel tüketimi özendirerek tedbirlerin alınması ve mekanizmaların kurulması sağlanmalıdır.

Küresel ölçekte yapılması gerekenler:

a) Bütün ülkelerin enerji durum ve taleplerini değerlendirebilen ve enerji trafiğini küresel ölçekte yöneten küresel enerji kontrol ve yönetim sistemleri kurulmalıdır.

b) Akıllı şebeke araştırmaları ve standardizasyonu için bağımsız kuruluşlar kurulmalıdır. Bu kuruluşlar, akıllı şebekelerin, belirli standartlara uygun gelişimini ve entegrasyonunu sağlayacak tedbirleri alamaya ve yaptırımları uygulamaya yetkili kılınmalıdır.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, akıllı şebekelerin dağıtık kontrol ve geniş alan şebeke yönetimini sağlayabilecek haberleşme ve kontrol uygulamaları ve teknolojileri incelenmiştir. Bu uygulama ve teknolojilerin yardımı ile akıllı şebeke mimarisine projeksiyon tutulmuş ve akıllı şebeke uygulama fırsatları irdelenmiştir.

Enerji sistemlerinin daha akıllı yönetimi ve etkin kullanımı için haberleşme ve kontrol sistemlerini bünyesinde barındıran akıllı şebeke mimarilerinin, işlevsel olarak iç-içe geçmiş üç katmanlı yapıya sahip (güç-kontrol-haberleşme) olması gerektiği vurgulanmıştır. Bu katmanların birbirleri ile etkileşimi, optimal dağıtık kontrol ve geniş-alan şebeke yönetimine

imkan sağlayacaktır. Bu, enerji dağıtım şebeke durumlarını hem yerel ölçekte hem de küresel ölçekte daha gözlemlenebilir ve kontrol edilebilir kılacak dolayısı ile sistemin daha verimli, güvenilir ve çevre-dostu yönetimine imkan sağlayabilecektir.

Bu çalışma, yakın gelecekte hayata geçmesi mümkün olabilecek olan akıllı şebeke yapılarının daha iyi anlaşılmasına ve anlatılabilmesine katkı sağlamak amacı ile yapılmıştır. Bu yapılar üzerinden akıllı şebekelerin yakın geleceğine tutulan projeksiyonların konu ile ilgilenen akademik, endüstriyel ve kamusal paydaşlara yol gösterici olması ümit edilmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Cunjiang Y., Huaxun Z., Lei Z. (2012) 'Architecture Design For Smart Grid', Energy Procedia, vol. 17, pp. 1524-1528.
- [2] Liu C., Zeng Q., Liu Y. (2011) 'A Dynamic Load Control Scheme for Smart Grid Systems', Energy Procedia, vol. 12, pp. 200-205.
- [3] Brown R.E. (2008) 'Impact of Smart Grid on Distribution System Design', IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, pp. 1-4.
- [4] Galli S., Scaglione A., Wang Z. (2010) 'Power line communications and the smart grid', First IEEE international conference on smart grid communications (SmartGridComm), pp. 303-308.
- [5] Yi P., Iwayemi A., Zhou C. (2011) 'Developing ZigBee deployment guideline under WiFi interference for smart grid applications', IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, pp. 110-120.
- [6] Finn P., Fitzpatrick C., Connolly D., Leahy M., Relihan L. (2011) 'Facilitation of renewable electricity using price based appliance control in Ireland's electricity market', Energy, vol. 36, pp. 2952-2960.
- [7] Liu W., Lund H., Mathiesen BV. (2011) 'Large-scale integration of wind power into the existing Chinese energy system', Energy, vol. 36, pp. 4753-4760.
- [8] Eghtedarpour N., Farjah E. (2012) 'Control strategy for distributed integration of photovoltaic and energy storage systems in DC micro-grids', Renewable Energy, vol. 45, pp. 96-110.
- [9] Karabiber A., Keles C., Kaygusuz A., Alagoz B.B. (2013) 'An approach for the integration of renewable distributed generation in hybrid

- DC/AC microgrids', *Renewable Energy*, vol. 52, pp. 251-259.
- [10] Guerrero J.M., Vasquez J.C., Matas J., de Vicuna L.G., Castilla M. (2011) 'Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 158-172.
- [11] Prasad A.R., Natarajan E. (2006) 'Optimization of integrated photovoltaic-wind power generation systems with battery storage', *Energy*, vol. 31, pp. 1943-1954.
- [12] Alagoz B.B., Kaygusuz A., Karabiber A. (2012) 'A user-mode distributed energy management architecture for smart grid applications', *Energy*, vol. 44, pp. 167-177.
- [13] Bayod-Rujula A.A. (2009) 'Future development of the electricity systems with distributed generation', *Energy*, vol. 34, pp. 377-378.
- [14] Kaygusuz A., Gül O., Alagöz B.B. (2012) 'Yenilenebilir Dağıtık Üretim Koşullarının Güç Sistemlerinin Yük Akışına Etkilerinin Analizi', *EMO Bilimsel Dergi*, vol. 2, no. 4, pp. 77-85.
- [15] Grijalva S., Tariq M.U. (2011) 'Prosumer-based smart grid architecture enables a flat, sustainable electricity industry', *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Conference*, pp. 1-6.
- [16] Jarventausta P., Repo S., Rautiainen A., Partanen J. (2010) 'Smart grid power system control in distributed generation environment', *Annual Reviews in Control*, vol. 34, pp. 277-286.
- [17] Vytelingum P., Voice T.D., Ramchurn S.D., Rogers A., Jennings N.R. (2010) 'Agent-based micro-storage management for the smart grid', *The ninth international conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS'10)*, pp. 39-46.
- [18] Toledo O.M., Filho D.O., Diniz A.S.A.C. (2010) 'Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 506-511.
- [19] Kabalci E., Kabalci Y., Develi I. (2012) 'Modelling and analysis of a power line communication system with QPSK modem for renewable smart grids', *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 34, pp. 19-28.
- [20] Depuru S.S.S.R., Wang L., Devabhaktuni V. (2011) 'Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 2736-2742.
- [21] Rech D., Harth A. (2012) 'Towards a Decentralised Hierarchical Architecture for Smart Grids', *Proceedings of the 2012 Joint EDBT/ICDT Workshops*, New York, USA, pp. 111-115.
- [22] Zhang Y., Sun W., Wang L., Wang H., Green R.C., Alam M. (2011) 'A Multi-Level Communication Architecture of Smart Grid Based on Congestion Aware Wireless Mesh Network', *North American Power Symposium (NAPS)*, Boston, MA, pp. 1-6.
- [23] Wang W., Xu Y., Khanna M. (2011) 'A survey on the communication architectures in smart grid', *Computer Networks*, vol. 55, pp. 3604-3629.
- [24] Usman A., Shami S.H. (2013) 'Evolution of Communication Technologies for Smart Grid applications', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 191-199.
- [25] Lee P., Lai L. (2007) 'A practical approach to wireless GPRS on-line power quality monitoring system', *IEEE Power engineering society general meeting*, pp. 1-7.
- [26] Nassar M., Dabak A., Kim I.H., Pande T., Evans B. (2012) 'Cyclostationary noise modeling in narrowband powerline communication for smart grid applications', *IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*, pp. 3089-3092.
- [27] Kong L., Jin J., Cheng J. (2005) 'Introducing GPRS technology into remote monitoring system for prefabricated substations in china', *IEEE second international conference on mobile technology, applications and systems*, pp. 6.
- [28] Lee P., Lai L. (2007) 'A practical approach to wireless GPRS on-line power quality monitoring system', *IEEE Power engineering society general meeting*, pp. 1-7.
- [29] Lee P., Lai L. (2008) 'A practical approach to wireless power quality, energy and facilities monitoring system', *IEEE Power and energy society general meeting-conversion and delivery of electrical energy in the 21st century*, pp. 1-3.
- [30] Cantekinler M.K., Çetin T., Daşdemir, Ö. (2008) 'WiMAX/3N Karşılaştırma Raporu', BTK, SAS Raporları, Ankara.
- [31] Rengaraju P., Lung C.H., Srinivasan A. (2012) 'Communication ,WiMAX technology for smart grids', *Eighth international wireless communications and mobile computing conference (IWCMC)*, pp. 666-670.
- [32] Parikh P., Kanabar M., Sidhu T. (2010) 'Opportunities and challenges of wireless

- communication technologies for smart grid applications', IEEE power and energy society general meeting, pp. 1-7.
- [33] Galli S., Scaglione A., Wang Z. (2010) 'Power line communications and the smart grid', First IEEE international conference on smart grid communications (SmartGridComm), pp. 303–308.
- [34] Berganza I., Sendin A., Arriola J. (2008) 'Prime: powerline intelligent metering evolution', Smart Grids for distribution, IET-CIRED, CIRED Seminar, IET, pp. 1-3.
- [35] Güneş M. (2004) 'Enerji hatları üzerinden haberleşme (Powerline Communication): Mevcut düzenlemelerin değerlendirilmesi ve ülkemize yönelik öneriler', Telekomünikasyon Kurumu.
- [36] Egan D. (2005) 'The emergence of ZigBee in building automation and industrial control', Computing Control Engineering Journal, vol. 16, pp. 14-19.
- [37] Norair J. (2009) 'Introduction to dash7 technologies', Dash7 Alliance Low Power RF Technical Overview.
- [38] Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability. NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards (2009), Release 1.0, U.S. National Institute of Standards and Technology Special Publication 1108 (online). Available at [http://www.nist.gov/public\\_affairs/releases/upload/smartgrid\\_interoperability\\_final.pdf](http://www.nist.gov/public_affairs/releases/upload/smartgrid_interoperability_final.pdf).
- [39] Camacho E.F., Samad T., Garcia-Sanz M., Hiskens I. (2011) 'Control for Renewable Energy and Smart Grids', The Impact of Control Technology. T. Samad and A.M. Annaswamy. Editors, Available at [www.ieeeccs.org](http://www.ieeeccs.org).
- [40] Martin K. (2011) 'Synchrophasor Standards Development- IEEE C37.118 & IEC 61850', Proceedings of the 44th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii.
- [41] IEEE standard for Synchrophasors for Power Systems, IEEE C37.118- 2005.
- [42] Kanabar M.G., Voloh I., McGinn D. (2012) 'A review of smart grid standards for protection, control, and monitoring applications', 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp. 281-289.
- [43] De La Ree J., Centeno V., Thorp J. S., and Phadke A. G. (2010) 'Synchronized phasor measurement applications in power systems', IEEE Trans. Smart Grid, vol.1, pp. 20-27.
- [44] Karlsson D., Hemmingsson M., Lindahl S. (2004) 'Wide area system monitoring and control-Terminology, phenomena, and solution implementation strategies', IEEE Power Energy Mag., vol. 2. no. 5, pp. 68-76.
- [45] Chandy K. M., Low S. H., Topcu U., Xu H. (2010) 'A simple optimal power flow model with energy storage', Proc. 49th IEEE Conf. Decision Control (CDC), Atlanta, GA, Dec., pp. 15–17.
- [46] Lavaei J., Low S.H. (2010) 'Convexification of optimal power flow problem', Proc. 48th Annu. Allerton Conf. Commun., Control, Comput., Monticello, IL.
- [47] Kundur P. (1994) 'Power System Stability and Control', New York: Mc-Graw-Hill.
- [48] Liang J., Venayagamoorthy G.K., Harley R.G. (2012) 'Wide-Area Measurement Based Dynamic Stochastic Optimal Power Flow Control for Smart Grids With High Variability and Uncertainty', IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 1.
- [49] Venayagamoorthy G.K. (2011) 'Innovative Smart Grid Control Technologies', IEEE Power and Management Meeting, pp. 1-5.
- [50] Oyarzabal J., Jimeno J., Ruela J., Englar A., Hardt C. (2005) 'Agent based micro grid management systems', IEEE International conference on Future Power Systems, pp. 6-11.
- [51] Mak S. T., Farah N. (2012) 'Synchronizing SCADA and smart meters operation for advanced smart distribution grid applications', Innovative Smart Grid Technologies Conference, Washington, USA, pp. 1-7.
- [52] Hongseok K., Young-Jin K., Yang K., Thottan M. (2011) 'Cloud-based Demand Response for Smart Grid: Architecture and Distributed Algorithms', IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp. 398-403.
- [53] Lund H., Andersen A.N., Østergaard P.A., Mathiesen B.V., Connolly D. (2012) 'From electricity smart grids to smart energy systems - A market operation based approach and understanding', Energy, vol. 42, pp. 96-102.
- [54] Pillai J.R., Heussen K., Østergaard P.A. (2011) 'Comparative analysis of hourly and dynamic power balancing models for validating future energy scenarios', Energy, vol. 36, pp. 3233-3243.
- [55] Faria P., Vale Z. (2011) 'Demand response in electrical energy supply: An optimal real time pricing approach', Energy, vol. 36, pp. 5374-5384.
- [56] Yousefi S., Moghaddam M.P., Majd V.J. (2011) 'Optimal real time pricing in an agent-based

retail market using a comprehensive demand response model', Energy, vol. 36, pp. 5716-5727.

- [57] Baran B., Alagöz B.B., Kaygusuz A., Akçin M. (2013) 'Geleceğin Akıllı Şebekelerinde Kentsel Katı Atık Tabanlı Dağıtık Elektrik Üretimi', Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesi'nin Geleceği Sempozyumu, Ankara.