

GSM Şebekelerinin Elektrik Enerji İhtiyacının Hibrit Sistemle Karşılanmasının
Teknik ve Ekonomik Analizi

Emre Ütükler

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım 2020

Technical and Economic Analysis of Supplying the Electricity Energy Demand of GSM
Networks with Hybrid System

Emre Ütükler

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

November2020

GSM Şebekelerinin Elektrik Enerji İhtiyacının Hibrit Sistemle Karşılanmasının
Teknik ve Ekonomik Analizi

Emre Ütükler

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Termodinamik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Haydar ARAS

Kasım 2020

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Emre ÜTÜKLER'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "GSM Şebekelerinin Elektrik Enerji İhtiyacının Hibrit Sistemle Karşılanmasının Teknik ve Ekonomik Analizi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Haydar ARAS

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Haydar ARAS

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Bahadır DOĞAN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hasan Donat YILDIZAY

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Haydar Aras danışmanlığında hazırlamış olduğum “GSM Şebekelerinin Elektrik Enerji İhtiyacının Hibrit Sistemle Karşılanmasının Teknik ve Ekonomik Analizi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 23/11/2020

Emre Ütükler

ÖZET

Bu çalışmada sayıları sürekli artan baz istasyonlarının enerji ihtiyaçları analiz edilerek, enerji ihtiyaçlarının güneş enerjisinden üretilen elektrik ile karşılanmasına yönelik teknik ve ekonomik analizler yapılmıştır. Yaz aylarında yoğun göç sebebiyle nüfusu 10 katına çıkan Söğüt Cuması Yaylası'nda, şebeke bağlantısı olmayan fotovoltaik sistem ve hibrit fotovoltaik sistem ile baz istasyonunun ihtiyaç duyduğu elektriğin sağlanmasına ilişkin projeler tasarlanmıştır.

Güneş enerjisi sisteminin ürettiği enerjinin ve baz istasyonlarında tüketilen enerjinin coğrafi şartlara bağlı olması sebebiyle; enerji ihtiyacı güneş enerjisi sistemleriyle karşılanacak baz istasyonunun kurulacağı bölgenin nüfusu, demografik yapısı dikkate alınarak enerji ihtiyacı belirlenmiş, matematik ve özel konumu dikkate alınarak güneş enerjisi sisteminin üreteceği enerji belirlenirken internet tabanlı Solargis yazılımı yardımıyla bilgisayar destekli analiz, tasarım ve simülasyon tekniklerinden yararlanılmıştır. İletişim hizmetinin kamusal niteliği ve çağımızda taşıdığı önem gözetilerek, baz istasyonlarının enerji ihtiyacının elektrik şebekesi bulunmayan bölgeler ile enerji ihtiyacı elektrik şebekesinden yeterli düzeyde karşılanamayan bölgelerde güneş enerjisi vasıtasıyla karşılanması önceliklendirilerek bu bölgelere yönelik proje ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak, elektrik şebekesi bulunmayan bölgelerde baz istasyonunun enerjisinin jeneratör aracılığıyla ve güneş enerjisi sistemiyle sağlanmasının ekonomik ve teknik değerlendirmeleri yapılmış, güneş enerjisi sisteminin daha ekonomik ve çevre dostu olduğu tespit edilmiştir. Elektrik şebekesinin kapasitesinin yeterli olmadığı bölgelerde, baz istasyonu enerjisinin şebeke aracılığıyla karşılandığı sistemler ile hibrit güneş enerjisi sistemleri karşılaştırılmış, hibrit sistemlerin ekonomik ve teknik açıdan sunduğu avantajlar gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Hibrit Fotovoltaik Sistem, Verimlilik, Yeşil Baz İstasyonu,

SUMMARY

In this study, the energy needs of the base stations are analyzed. Subsequently, technical and economic analyzes have been made to meet energy needs with electricity which is generated from solar energy. Projects have been designed to provide the electricity needed by the base station using an off-grid connection photovoltaic system and a hybrid photovoltaic system in the Söğüt Cuması Plateau whose population has increased ten times due to heavy migration in the summer months.

Due to the fact that the energy produced by the solar energy system and the energy consumed at the base stations depend on the geographical conditions, the population and demographic structure of the region where the energy needs will be met by solar energy systems have been taken into consideration and the energy need has been determined accordingly. As a method, computer-aided analysis, design and simulation techniques (internet based Solargis software) have been used to determine the energy to be produced by the solar energy system, taking into account the mathematics and special position. Considering the public nature of the communication service and the importance it has in our age, projects and analysis studies have been carried out for these regions by prioritizing the energy need of base stations to be met by solar energy in regions where there is no electricity network and in regions where energy needs cannot be met at a sufficient level from the electricity network.

As a result, the economical and technical evaluations of the energy supply of the base station through a generator and solar energy system in regions where there is no electricity grid have been made and it has been determined that the solar energy system is more economical and environmentally friendly. In regions where the capacity of the electricity grid is insufficient, the systems where the base station energy is supplied by the hybrid solar energy system or only through the grid are compared, and the economic and technical advantages of hybrid systems are revealed.

Keywords: Efficiency, Energy, Green Base Station, Hybrid Photovoltaic System,

TEŞEKKÜR



İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| ÖZET | vi |
| SUMMARY | vii |
| TEŞEKKÜR | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | xi |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xiii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xiv |
| 1. GİRİŞ VE AMAÇ | 1 |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI | 3 |
| 3. TEORİK BİLGİ | 7 |
| 3.1. Güneş Enerjisi ve Işınımı | 7 |
| 3.1.1. Güneş açıları | 8 |
| 3.2. Fotovoltaik Teknoloji | 11 |
| 3.3. Fotovoltaik Sistem | 17 |
| 3.3.1. Fotovoltaik panel | 17 |
| 3.3.2. Aküler | 22 |
| 3.3.3. Şarj kontrol cihazı | 26 |
| 3.3.3.1. <u>PWM şarj kontrol cihazı</u> | 27 |
| 3.3.3.2. <u>MPPT şarj kontrol cihazı</u> | 27 |
| 3.3.4. Dönüştürücüler | 28 |
| 3.3.5. Güneş takip sistemleri | 29 |
| 3.3.6. Fotovoltaik sistemin diğer elemanları | 32 |
| 3.4. Fotovoltaik Sistem Tasarımı | 32 |
| 3.4.1. Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemler | 33 |
| 3.4.2. Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler | 34 |
| 3.4.3. Hibrit fotovoltaik sistemler | 35 |
| 3.4.4. Karma sistemler | 36 |
| 3.5. Radyo Ağ Teknolojisi | 37 |
| 3.5.1. Radyo ağ ekipmanları | 42 |
| 3.5.2. Dijital üniteler | 43 |
| 3.5.3. Radyo üniteleri ve antenleri | 44 |

İÇİNDEKİLER (devam)

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 3.5.4. Transmisyon ünitesi | 49 |
| 3.5.5. Güç üniteleri ve doğrultucu..... | 51 |
| 3.5.6. İklimlendirme üniteleri | 52 |
| 4. MATERYAL VE YÖNTEM | 54 |
| 4.1. Baz İstasyonu Kurulacak Bölgenin Tespiti | 54 |
| 4.2. Bölgeye Uygun Mobil Tasarruf Metodları | 57 |
| 4.2.1. Temel bant birimi..... | 58 |
| 4.2.2. Radyo üniteleri ve antenler | 60 |
| 4.2.3. Transmisyon üniteleri | 65 |
| 4.2.4. İklimlendirme üniteleri | 65 |
| 4.3. Fotovoltaik Sistem Analizi | 68 |
| 4.3.1. Üretilmesi gereken enerjinin belirlenmesi | 68 |
| 4.3.2. Fotovoltaik panelin seçimi | 70 |
| 4.3.3. Panel eğim açısının belirlenmesi..... | 70 |
| 4.3.4. Sistem kapasitesinin incelenmesi..... | 74 |
| 4.4. Söğüt Cuması Yaylası Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistem Tasarımı..... | 77 |
| 4.4.1. Akü ihtiyacının belirlenmesi ve akü seçimi | 77 |
| 4.4.2. Şarj kontrol cihazı seçimi..... | 82 |
| 4.5. Söğüt Cuması Yaylası Hibrit Fotovoltaik Sistem..... | 83 |
| 5. BULGULAR VE TARTIŞMA | 85 |
| 5.1. Maliyet Analizi | 85 |
| 5.1.1. Şebekeden bağımsız sistemin maliyet analizi | 85 |
| 5.1.2. Söğüt Cuması Yaylası şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem | 87 |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER | 90 |
| KAYNAKLAR DİZİNİ..... | 93 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| 3.1. Ankara enlem açısı | 8 |
| 3.2. Güneş açılarının gösterimi..... | 10 |
| 3.3. İletken, yalıtkan ve yarı iletkene ait bant enerji seviyeleri | 12 |
| 3.4. P tipi yarı iletken | 13 |
| 3.5. Yapısal elektrik alan | 13 |
| 3.6. Fotovoltaik akım..... | 14 |
| 3.7. Silisyum fotovoltaik hücre çeşitleri..... | 15 |
| 3.8. Çok eklemli fotovoltaik hücre | 16 |
| 3.9. Fotovoltaik hücre verimlerinin yıllara göre değişimi | 17 |
| 3.10. Fotovoltaik panel gölge açısı..... | 19 |
| 3.11. Açık devre gerilimi ve kısa devre akımı..... | 20 |
| 3.12. Akü çevrim sayısı deşarj derinliği..... | 24 |
| 3.13. Maksimum güç noktası izleme metodu..... | 28 |
| 3.14. Mikro dönüştürücü ve merkezi dönüştürücü karşılaştırılması | 29 |
| 3.15. İki eksenli güneş takip sistemleri | 30 |
| 3.16. Güneş takip sistemi verim | 31 |
| 3.17. Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem mimarisi | 34 |
| 3.18. Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem mimarisi | 35 |
| 3.19. Hibrit fotovoltaik sistem mimarisi..... | 36 |
| 3.20. Karma sistem mimarisi..... | 36 |
| 3.21. Fotovoltaik baz istasyonu | 40 |
| 3.22. Baz istasyonları kule ve kabin mimarisi..... | 41 |
| 3.23. Hücresel ağ topolojisi | 41 |
| 3.24. Baz istasyonu ve ekipmanları | 42 |
| 3.25. Antenin demet genişliği..... | 45 |
| 3.26. Transmisyon ağ mimarisine örnek | 50 |
| 3.27. Transmisyon işlemleri | 51 |
| 4.1. Türkiye güneş ışınımı haritası | 54 |
| 4.2. Söğüt Cuması Yaylası | 56 |
| 4.3. Söğüt Cuması Yaylası'nın Solargis haritasında seçimi..... | 57 |

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

| <u>Sekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| 4.4. Söğüt Cuması Yaylası'nın meteorolojik verileri | 57 |
| 4.5. Temel bant birimi yıllık enerji tüketimi | 60 |
| 4.6. Söğüt Cuması Yaylası yıllık sıcaklık eğrisi..... | 66 |
| 4.7. Aylık üretilmesi gereken enerji ve tüketilen enerji | 70 |
| 4.8. 36 ° Eğimde bir panelin üreteceği gücün hesaplanması | 71 |
| 4.9. 36 ° Eğimde 320 W panelin üreteceği enerjinin saatlik profili | 72 |
| 4.10. Farklı eğim açılarında panelin ürettiği aylık enerji | 73 |
| 4.11. Üretilen enerji aylık dağılım..... | 75 |
| 4.12. Üretilen enerji aylık profil | 75 |
| 4.13. Fotovoltaik sistemin ürettiği enerji profili..... | 76 |
| 4.14. Şebeke bağlantısı olmayan fotovoltaik sistemin mimarisi | 83 |
| 4.15. Hibrit fotovoltaik sistem mimarisi..... | 84 |
| 5.1. Şebekeden bağımsız sistem toplam maliyet | 86 |
| 5.2. Toplam maliyet grafiği | 87 |
| 5.3. Hibrit sistem toplam maliyet | 88 |
| 5.4. Hibrit teknoloji kar analizi..... | 89 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Cizelge</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| 4.1. Temel bant birimi enerji tüketimi | 59 |
| 4.2. Radyo üniteleri enerji tüketimi | 61 |
| 4.3. Radyo ünitelerinde uygulanan enerji tasarruf modelleri | 63 |
| 4.4. Yaz mevsiminde radyo ünitelerinin saatlik enerji tüketimi | 63 |
| 4.5. Bahar mevsimlerinde radyo ünitelerinin saatlik enerji tüketimi | 64 |
| 4.6. Kış mevsiminde radyo ünitelerinin saatlik enerji tüketimi | 64 |
| 4.7. Temmuz-Ağustos aylarında baz istasyonu toplam enerji tüketimi | 67 |
| 4.8. Baz istasyonu yıllık enerji tüketim profili | 68 |
| 4.9. Fotovoltaik panel elektriksel özellikler | 70 |
| 4.10. Farklı eğimli panelin üreteceği gücün saatlik profili (Solargis) | 72 |
| 4.11. Günlük enerji arzı ve talebinin aylık dağılımı (kWh) | 73 |
| 4.12. İhtiyaç duyulan minimum panel sayısı | 74 |
| 4.13. Sisteme ve akülere aktarılan enerji profili | 76 |
| 4.14. Enerji üretim ve tüketim değerlerinin karşılaştırılması | 78 |
| 4.15. Akü enerji kapasitesi kullanımı aylık profil | 78 |
| 4.16. Seçilen akünün elektriksel özellikleri | 81 |
| 4.17. Seçilen şarj kontrol cihazı teknik özellikleri | 82 |
| 4.18. Seçilen dönüştürücünün teknik özellikleri | 84 |
| 5.1. Şebekeden bağımsız sistem kurulum maliyeti | 85 |
| 5.2. Hibrit sistem kurulum maliyeti | 87 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklama</u> |
|------------------|---|
| G_{sc} | Güneş sabiti 1367 W/m ² , |
| G_{on} | Yer küreye ulaşan ışınım 1000 W/m ² , |
| G_t | Yüzeğe gelen ışınım (W/m ²), |
| \emptyset | Enlem Açısı (°), |
| δ | Deklinasyon açısı (°), |
| γ | Yüzey azimut açısı (°), |
| β | Eğim açısı (°), |
| α | Güneş yükseklik açısı (°), |
| ω | Saat açısı (°), |
| θ_z | Zenit açısı (°), |
| θ | Güneş geliş açısı (°), |
| $\gamma_{gölge}$ | Gölge açısı (°), |
| V_{oc} | Açık devre gerilimi (V), |
| V_{mp} | Maksimum güç noktası gerilimi (V), |
| $V_{dizi_{oc}}$ | Fotovoltaik dizi açık devre gerilimi (V), |
| $V_{dizi_{mp}}$ | Fotovoltaik dizi maksimum güç noktası gerilimi (V), |
| I_{sc} | Kısa devre akımı (A), |
| I_{mp} | Maksimum güç noktası akımı (A), |
| $I_{dizi_{sc}}$ | Fotovoltaik dizi kısa devre akımı (A), |
| $I_{dizi_{mp}}$ | Fotovoltaik dizi maksimum güç noktası akımı (A), |
| W_p | Fotovoltaik panel gücü (W), |
| W_{mp} | Maksimum güç (W), |
| W_{baz} | Baz istasyonu güç tüketimi (W), |
| W_{dizi} | Fotovoltaik dizi güç kapasitesi (W), |
| $E_{akü_{gsm}}$ | GSM akülerinde depolanan enerji (kWh), |
| $E_{akü_{pv}}$ | Fotovoltaik sistem akülerinde depolanan enerji (kWh), |
| $E_{akü}$ | Birim aküde depolanan enerji (kWh), |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler

Açıklama

| | |
|----------------|---|
| n_{panel} | Fotovoltaik panel sayısı, |
| n_{spanel} | Seri bağlı fotovoltaik panel sayısı, |
| n_{ppanel} | Parelel bağlı fotovoltaik panel sayısı, |
| $n_{akü}$ | Akü sayısı, |
| η_{pv} | Fotovoltaik panel verimi (%), |
| $\eta_{dön}$ | Dönüştürücü verimi (%), |
| $\eta_{şk}$ | Şarj kontrol cihazı verimi (%), |
| η_{kbl} | Kablolama verimi (%), |
| η_{pvsys} | Fotovoltaik sistem verimi (%), |
| DoD | Şarj Derinliği (%), |
| h_y | Sistem yedeklilik süresi (saat), |
| L_{panel} | Panel uzunluğu (m), |
| Mc3 | Fotovoltaik panel bağlantı ekipmanı, |
| Mc4 | Fotovoltaik panel bağlantı ekipmanı, |
| P | Pozitif yarı iletken, |
| N | Negatif yarı iletken, |
| P-N | Pozitif ve negatif eklem çifti |

Kısaltmalar

Açıklama

| | |
|------|--|
| AGM | Absorbent Glass Mat, |
| BBU | Base Band Unit, |
| EPDK | Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, |
| GSM | Global System for Mobile Communications, |
| LTE | Long Term Evaluation, |
| Max. | Maksimum, |
| Mbps | Mega bits per second, |
| MGM | Meteoroloji Genel Müdürlüğü, |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

| <u>Kısaltmalar</u> | <u>Acıklama</u> |
|---------------------------|--------------------------------|
| MIMO | Multiple Input Multiple Output |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking |
| NREL | National Renewable Energy |
| RBS | Radio Base Station |
| RRU | Remote Radio Unit |
| RU | Radio Unit |
| PWM | Pulse - Width Modulation |
| VRLA | Valve Regulated Lead Acid |

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Dünyamızdaki yaşamın, bu yaşamı mümkün kılan enerjinin kaynağı güneştir. Güneşin dünyamıza sunduğu enerjiyi, işlemlerini ve dönüştürmesini bilen insan toplulukları, uygarlık sahnesinde basamakları birer birer çıkarken, bu enerji üzerinde hakimiyet kuramayan, bu enerjiyi verimli kullanamayan topluluklar tarih sahnesinden bir bir silinmişlerdir. Enerji kaynakları üzerinde hakimiyet kurmak, elde edilen enerjiyi işleyerek yaşama katkı sağlamak, insanlığın ana gayelerinden birisi olmuştur. Matbaa yardımıyla bilginin aktarımını ve paylaşılmasını hızlandıran insanlık, enerjinin dönüşümü konusunda edindiği bilgilerin etkisiyle Sanayi Devrimi'ni gerçekleştirmiş, uygarlık için büyük bir dönüşümün kapısını aralamıştır.

Sanayi Devrimi'nin ardından yaşanan hızlı dönüşüm ve ilerleme, enerjiye duyulan ihtiyacın daha da artmasına sebep olmuş, bu enerji talebi dünyadaki sınırlı kaynakların hızlı tüketilmesine yol açmıştır. Sanayi Devrimi'nden günümüze, teknolojik gelişmelerin ortaya çıkardığı enerji talebi savaflara yol açmakta, dünyamızda sürdürülebilir hayatı tehdit etmektedir, bu yüzden sınırlı enerji kaynaklarının verimli tüketilmesi ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelim gezegenimiz için hayatidir.

Mobil iletişim ve bilgi teknolojilerinde yaşanan teknolojik gelişmelerin insan yaşamına dair sundukları, bu teknolojilerin hayatımıza hızlıca girmesini sağlamıştır. Günümüzde dünyanın her noktasıyla sağlanabilen mobil iletişim, matbaanın icadının insanlığa etkisinden çok daha fazlasını vaat etmektedir. Nesnelerin interneti, Endüstri 4.0 teknolojileri insanlığın sınırlarını aşmasını, engellerini ortadan kaldırmasını sağlayacaktır.

Bilgi teknolojilerinin hayatımızın her alanında etkinlik gösteriyor hale gelmesi, bu teknolojilerin ihtiyaç duyduğu enerjinin artmasına yol açmıştır. Bilgi teknolojileri günümüzde, üretilen elektrik enerjisinin %3'ünü tüketerek karbon emisyonunun %2'sine sebep olmaktadır. Bu tüketimin yüzde %7'sine mobil iletişimin tüm unsurlarını içeren radyo ağ şebekeleri sebep olmaktadır. Radyo ağ şebekelerinin tükettiği enerjinin %10'u kullanıcı terminalleri (cep telefonları) tarafından, geri kalanı ise baz istasyonları tarafından tüketilmektedir (Ayang, A. vd., 2016). Türkiye genelinde yaklaşık 190000 kurulu baz

istasyonu bulunmaktadır (TBMM, 2019). Dünya genelinde ise sadece 4G teknolojisine sahip baz istasyonu sayısı 6 milyondan fazladır ve her geçen gün artmaktadır (Chi, 2019).

Baz istasyonlarının nicelikleri ve küresel enerji gereksinimleri birlikte düşünüldüğünde; baz istasyonlarının iyi analiz edilerek, baz istasyonlarında enerji tasarruf çalışmalarının yürütülmesinin ve bu istasyonlarının enerji gereksinimlerinin sürdürülebilir enerji kaynakları ile karşılanmasının taşıdığı önem daha iyi anlaşılmaktadır. Tez kapsamında bu yönde analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2020 yılında Çin'in Wuhan bölgesinden tüm dünyaya yayılan Covid-19 salgını iletişim hizmetlerinin ne kadar önemli olduğunu herkese göstermiştir. Bu süreçte, birçok ülkede başta eğitim olmak üzere, temel haklar ve ihtiyaçların önemli bir bölümü mobil servisler aracılığıyla sağlanmıştır. Kamusal bir hizmet olan iletişimin, kapsadığı alan her geçen gün artsa da kırsal bölgelerde, coğrafi engeller sebebiyle şebekeye erişimi olmayan bölgelerde mobil iletişim sağlanamamaktadır. Bu durumun başlıca sebebi, elektrik şebekesine erişimi olmayan bölgelerde baz istasyonlarının güç ihtiyaçlarının dizel yakıt jeneratörleriyle karşılanmasının yüksek maliyetidir. Şebeke bağlantısı olmayan bölgelerde, güneş enerjisi ile baz istasyonunun enerji ihtiyacının ekonomik ve verimli bir şekilde sağlanması, mobil iletişimin dünyanın en ücra yerlerine dek ulaşmasını sağlayacak ve jeneratörlerin tükettiği yakıt dolayısıyla atmosfere salınan gaz miktarını düşürecektir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yenilebilir enerji kaynakları, yüksek enerji potansiyeline sahiptir. Bu kaynakların en önemlisi de kuşkusuz ki Güneş'tir. Güneş'ten Dünya'ya 1 saniyede ulaşan enerji yaklaşık olarak 1,7 MJ'dir (Ültanır, 1987). Başta güneş olmak üzere yenilebilir enerji kaynakları düzensiz enerji üretim profiline sahiptir. Örneğin, güneş enerjisinden gece ve bulutlu günlerde elektrik üretilmemekte, rüzgar türbinleri ile üretilen enerji miktarı rüzgar hızının düzensiz yapısı sebebiyle sürekli değişiklik göstermektedir. Bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilebilecek elektrik enerjisi potansiyelinin saatlik, günlük, aylık durumu incelenmeli, tüketilecek enerji için de saatlik, günlük, aylık enerji ihtiyaçları belirlenmeli ve yenilebilir enerji kaynaklarıyla sistemin ihtiyacının karşılanıp karşılanmadığı değerlendirilmelidir.

Baz istasyonlarında tüketilen enerjinin fazlalığı, bu alanda doğa dostu enerji çözümlerine yönelik çalışmaları gerekli hale getirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ilk kurulum maliyetlerinin fazla olduğu günümüzde, doğa dostu enerji çözümlerinin yaygınlaşmasında, ilk kurulum maliyetlerinin düşürülmesi ve sistemin kendi kendine yetecek hale getirilmesi büyük önem taşımaktadır. Düşük enerji tüketen baz istasyonları sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarıyla beslenen sistemlerin ilk kurulum maliyetleri düşürülerek doğa dostu enerji çözümlerinin baz istasyonlarına entegre edilme süreci hızlanacaktır (Ismail, M., vd., 2015). Baz istasyonlarında tüketilen enerjinin bir kısmını sabit olarak enerji tüketen transmisyon üniteleri, diğer kısmını ise hizmet alan insan sayısı ve kullanılan kapasite ile bağlantılı olarak enerji tüketen temel bant birimi ve radyo üniteleri oluşturmaktadır. Radyo ünitelerinin tükettikleri enerjinin de önemli bir kısmı, sinyal üretiminden kaynaklanan sabit profilli bir tüketimdir. Aktif kullanıcı sayısının az olduğu saatlerde, bu kullanıcıların ihtiyacı kadar radyo teknolojisinin aktif tutulması diğer ünitelerin ise pasif hale getirilmesi günlük enerji tüketimini %20 oranında azaltmaktadır (Prasad ve Bjerling, 2018).

Kırsal alanlarda, elektrik şebekesine erişimi bulunmayan bölgelerde baz istasyonlarına enerji sağlanmasında dizel jeneratörler tercih edilmektedir. Sürekli artan

petrol fiyatları ve dünyada karbon salınımına dair gelişmekte olan hassasiyet sebebiyle, baz istasyonlarına temiz enerji sağlanmasına ilişkin çalışmaların birçoğu bu doğrultuda şekillenmiştir. Bu bölgelerde fotovoltaik sistem ve jeneratörden oluşan kombine sistem aracılığıyla baz istasyonuna enerji sağlandığında tüketilen yakıtın %80 oranında azaldığı belirlenmiştir (Salihoddin, M. vd., 2018). Servis sürekliliğinin kesintisiz sağlanması gerektiğinden fotovoltaik paneller ve jeneratör ile baz istasyonunun süreklilik talep eden enerji ihtiyacının karşılandığı sistemlerde, panellerin uygun eğim açılarında monte edilmesinin tüketilen yakıt miktarını azalttığı gözlenmiştir (Kaldellis, J.K., 2010). Güneşin konumu, gün ve yıl içinde sürekli değiştiğinden dolayı üretilen enerji miktarı da günlük ve aylık olarak değişmektedir. Kurulumun yapılacağı bölgenin coğrafi konumuna göre en uygun açılarda yapılan panel montajı yıllık üretilen enerji miktarını arttıracaktır (Gunerhan, H., ve Hepbaşlı, A., 2007). Kış aylarında daha yüksek eğimlerde panel montajının yapılması, panel üzerine düşen ışınımın artmasına sebep olurken, yüksek eğimlerde panel montajının yapılması yaz aylarında panel üzerine düşen ışınımı azaltacaktır. Baz istasyonlarının yıl içinde tükettiği enerji miktarı gözetilerek eğim açısının belirlenmesi sürdürülebilir sistem tasarımı açısından önemlidir. Dört mevsim aynı miktarda enerji ihtiyacı bulunan güneş enerjisi sistemleri, ilkbahar ve yaz aylarına uygun eğim açıları ile konumlandırılmalıdır. Yaz aylarında güneş ışınımının daha fazla olması sebebiyle, yaz aylarında sistemin enerji ihtiyacı daha az güneş paneli ile karşılanabilmektedir (Aslanbaş, S. vd., 2020). Bahar aylarında güneş ışınımı için en uygun eğim açılarında göre panel montajı yapılarak, baz istasyonunun bu aylarda enerjisini karşılayabilecek sistem tasarlandığında, bu sistemin yaz aylarındaki enerji ihtiyacını da karşılayabildiği fakat kış aylarındaki ihtiyacı karşılayamadığı tespit edilmiş bu aylarda daha fazla güneş paneline ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Bu sebeple kış aylarında, güneş panellerinin karşılayamadığı enerji için jeneratör ile baz istasyonunun beslendiği enerji çözümlerinin ekonomik ve verimli olduğu gözlenmiştir (Prasad ve Bjerling, 2018).

Güneş ışınımının, gün içinde akşam ve sabah saatlerinde, yıl içinde de kış aylarında azalması, gece ise hiç güneş enerjisi elde edilememesi güneş enerjisi sistemlerinde yedekliliğin sağlanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu sebeple güneş enerjisiyle elektrik ihtiyacı karşılanan sistemlerde jeneratör bulundurulmaktadır. Jeneratör aracılığıyla enerji yedekliliği sağlanan sistemlerde, daha az panel kullanılarak güneş enerjisi sisteminin maliyeti düşürülmektedir. Doğa dostu enerji çözümlerine duyulan ihtiyaç, artan petrol fiyatları ve

azalan fotovoltaik panel fiyatları sebebiyle jeneratörsüz çözümlere yönelmek büyük önem taşımaktadır (Anonim, 2020). Sadece güneş enerjisi ile enerji ihtiyacı karşılanan sistemlerin, güneş panellerinden sonraki en önemli unsuru akülerdir. Aküler aracılığıyla, paneller tarafından gündüz üretilen enerjinin depolanması ve enerji üretilmeyen zamanlarda kullanılması sağlanır. Çabuk bozunmaları, depolanan enerjinin tamamının sisteme geri verilememesi ve fiyatları sebebiyle sistem ihtiyaçlarına uygun akü seçimi önemlidir (Ponnusamy, M., 2013). Güneş enerjisi sistemleri sürekli gelişmekte, dezavantajlarını teknolojik gelişmeler ile ortadan kaldırmaktadır. Sürdürülebilir yaşam, bugüne olduğu kadar geleceğe de odaklandığından bu sistemler için yapılan değerlendirmelerin gelecekte meydana gelebilecek gelişmeleri de gözetenek yapılması yerinde olacaktır. Günümüzde güneş ışınlarından doğrudan elektrik üreten fotovoltaik hücrelerin verimleri %50'ye yaklaşmakta ve sürekli artış göstermektedir (NREL, 2020). Bu durum ileriki yıllarda bu hücrelerin ticarileşmesi halinde, aynı alanda 2 - 3 kat fazla elektrik üretimi anlamına gelmektedir. Günümüzde yüksek verimliliğe, derin deşarj oranına sahip lityum iyon bataryalar, güneş enerjisi sistemleri için teknik açıdan uygun olmalarına rağmen bu bataryaların maliyetleri oldukça yüksektir. Lityum – sülfür batarya teknolojilerinde kaydedilen ilerlemeler sayesinde, lityum iyon bataryalara göre daha ucuz ve daha verimli bir şekilde enerji depolama ihtiyacı karşılanabilecektir (Pang,Q., 2016).

İletişim, batarya ve güneş panelleri sistemlerinin doğru ve etkili analizi kapsamında tasarlanacak sistem ile enerjinin çok daha verimli kullanımı sağlanacaktır. Radyo ünitelerinin kabinlerden çıkarılarak fiber optik kablo ile radyo kulelerine monte edilmesi baz istasyonlarında tüketilen enerjiyi %33 azaltmıştır (Roy,S.N., 2008). Güneş enerjisi sisteminin önemli yapıtaşlarından birisi olan panellere, güneş ışınlarının daha uygun açılarla gelmesini sağlayan güneş izleme sistemleri, matematiksel veriler ya da sensörler aracılığıyla en uygun açığı belirleyerek panellerin maksimum ışıınımdan faydalanmasını ve maksimum güç elde etmesini mümkün kılmaktadır. Kuzey - güney ve doğu-batı doğrultularında açısız hareket yaparak maksimum güneş ışıınımdan faydalanmayı planlayan bu sistemlerde yıllık %30 oranında daha fazla enerji elde edildiği gözlenmiştir (Eke, R. ve Şentürk, A., 2012). Dinamik bilimi ve sensörler aracılığıyla gözlenen bu verimlilik düzeyi güneş enerjisi sistemlerinin tek bir mühendislik disiplinine indirgenemeyeceğini; kimya, fizik, coğrafya bilimleri ve makine, bilgisayar, elektronik mühendisliklerince yürütülecek koordine çalışmalarla bu sistemlerin verimliliğinin daha da artacağını göstermektedir. Teknolojik

gelişmelerin takip edilmesi sayesinde günümüzde yenilebilir enerji kaynaklarının olumsuz unsurları ortadan kaldırılarak sürdürülebilir yaşama daha fazla katkı sunulabilecektir.

Mobil iletişim, doğası gereği sürekli sağlanması gereken bir hizmet olduğundan, baz istasyonlarında şebeke bağlantılı güneş enerjisi sistemleri kullanılmamaktadır. Elektrik şebekesinde arıza yaşandığında, gerilim ve frekans değerlerinin bozulmasını önlemek ve güvenlik gerekçeleriyle şebeke bağlantılı sistemler enerji sağlayamaz hale gelmektedirler. Kesintisiz enerji ihtiyacı bulunan baz istasyonlarında, elektrik kesintilerinde enerji sağlayamıyor olmalarından ötürü şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler tercih edilmemektedir. Dönüştürücü teknolojisinde yaşanan gelişmeler sayesinde hibrit dönüştürücüler ile bu engel aşılmıştır (Arnedo,L., ve Blasko,V., 2011). Bu gelişme ile baz istasyonlarına ekonomik ve sürekli enerji sağlanması mümkün hale gelmiştir. Çalışmalar göstermektedir ki; sürdürülebilir enerjinin hayatımızda daha fazla yer etmesi, tüm insanların birlikte gösterdiği çaba ve hassasiyet, bilimlerin birlikte hareketinin oluşturduğu sinerji, enerji tasarrufuna yönelik çalışmalar ile mümkün olacaktır.

3. TEORİK BİLGİ

3.1. Güneş Enerjisi ve Işınımı

Gezegelimizdeki yaşamın ve tüketilen tüm enerjilerin ana kaynağı Güneş'tir. Güneş'in merkezinde hidrojen atomları birleşerek helyum atomu ve izotoplarına dönüşür. Saniyede 500 – 600 milyon ton hidrojenin helyuma dönüştüğü bu büyük nükleer tepkimelerin sonucunda 38×10^{22} kJ enerji açığa çıkar. Bu enerji ışınım yoluyla yayılır. Dünya'ya ışınım yoluyla, yaklaşık olarak 8 dakikada ulaşan güneş ışınlarının enerjisi de bir hayli yüksektir. Atmosfer sınırında, henüz atmosfer tabakasından geçmeden önce, güneş ışınlarına dik 1 m^2 alana güneş ışınlarının 1 saniyede bıraktıkları enerji G_{sc} güneş sabiti olarak anılır ve bu değer $1367 \text{ J}'$ dir. Güneş'ten Dünya'ya 1 saniyede ulaşan tüm enerji ise yaklaşık olarak $1,7 \text{ MJ}'$ dir (Ültanır, 1987).

Yer küre ve hava küreye ulaşan bu enerjinin bir kısmı hava ve bulutlar tarafından geri yansıtılırken %70'i doğrudan Dünya'ya ulaşır. Bulutlar, hava molekülleri, toz partikülleri yer küreye ulaşan güneş ışınlarının yansımaya sebep olurlar. Bu sebeple bir bölgenin hava basıncı, bulutluluk derecesi, o bölgeye ulaşan doğrudan ışınım miktarını etkilemektedir. Yer kürede bir m^2 alana saniyede ulaşan güneş enerjisi ortalama $1000 \text{ J}'$ dir (Boxwell, 2014). Bu enerjinin bir kısmını güneşten doğrudan gelen ışınlar oluştururken, diğer kısımlarını atmosferden ve yer küreden yansıyan ışınlar oluşturur.

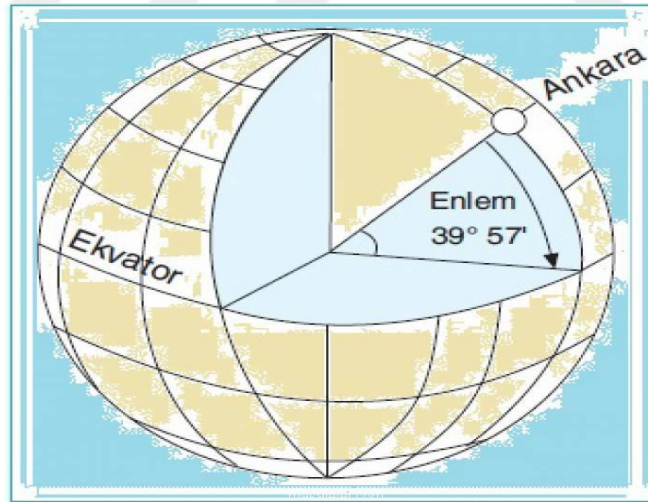
Güneş ışınımı, güneş ile dünya arasındaki uzaklığa bağlıdır. Elips bir eksenle güneşin etrafında dönen dünyaya ulaşan ışınım miktarı yıl içinde az da olsa farklılık gösterir. Bir bölgeye ulaşan ışınım miktarı, bölgenin güneşe olan uzaklığıyla ilişkilidir. Bir bölgenin enlemi, o bölgenin güneşe olan uzaklığını belirleyen unsurların başında gelir. Ekvatorun yörünge düzlemi ile yapmış olduğu, mevsimlerin oluşmasını sağlayan $23^\circ 27'$ eksen eğikliği, bir bölgenin güneşe olan uzaklığının yıl içinde değişmesine sebep olarak ışınım miktarını etkilemektedir. Enlem ve eksen eğikliği, bölgeye ulaşan yıllık güneş enerjisini ve bu enerjinin yıl içinde değişimini etkilerken, güneş ışınlarının gün içinde farklı ışınım düzeylerinde bulunmasına yol açan diğer etkenler de mevcuttur. Dünyanın kendi yörüngesi etrafında dönüşü sebebiyle, öğle vakitlerinde güneş daha dik açılarla geldiğinden bu

saatlerde güneş ışınımı daha fazladır. Bir yüzeye ulaşan ışınım düzeyini etkileyen diğer unsur ise yüzeyin eğimidir. Işınlr, yüzeyin yataydaki izdüşümüyle orantılı olarak yüzeye ulaşmaktadır.

Güneş ışınların bir yüzeye ulaşma düzeyini belirleyen tüm bu unsurlar zamansal ve açısal olarak formüle edilmiştir. Geometrik ve trigonometrik denklemler yardımıyla gün ve yıl içinde yüzeye ulaşan ışınım miktarı kolaylıkla belirlenebilmektedir.

3.1.1. Güneş açıları

Enlem açısı (ϕ), yerküre üzerinde bulunan bölgeden, yerkürenin merkezine çizilen doğrunun Ekvator ile yaptığı açıdır. Dünyanın şeklinden dolayı güneş ışınlarının bölgeye hangi açılarda ulaştığını belirler. Dünyanın şekli dolayısıyla güneş ışınlarının yerküreye en dik geldiği bölge Ekvator, en eğik geldiği bölge ise kutuplardır. Kuzey kutbu 90° , güney kutbu -90° enlem açısına sahiptir ve bu açı her bölge için yıl boyunca sabittir. Şekil 3.1.'de başkent Ankara'nın enlem açısı gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Ankara enlem açısı (Eskier,2017)

Deklınasyon açısı (δ), Dünya'ya ulaşan güneş ışınlarının Ekvator düzlemi ile yaptığı açı olarak tanımlanır. Dünya'nın yörünge düzlemi ile yaptığı, mevsimlerin oluşmasını sağlayan $23^\circ 27'$ açı sayesinde deklınasyon açısı yıl içinde sürekli değişiklik göstermektedir.

Deklinasyon açısı (δ);

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (3.1.)$$

olarak formüle edilmektedir. Denklemden yer alan n ifadesi deklinasyon açısının hesaplanacağı günün, “yılın kaçınıcı” günü olduğunu ifade etmektedir. 21 Mart ve 23 Eylül tarihleri arasında pozitif, bu tarihler dışında negatif olan deklinasyon açısı $-23,45^\circ$ ile $23,45^\circ$ dereceleri arasındadır.

Eğim Açısı (β), yüzeyin yatay ile yaptığı açıdır, 0° ile 180° dereceleri arasındadır.

Yüzey azimut açısı (γ), yüzeyin dikinin yatay düzlemdeki izdüşümü ile güney doğrultusundaki açıdır. Yüzey azimut açısı güneyde sıfır, doğuya doğru negatif (-), batıya doğru pozitif (+)'tir. Kuzey yarım kürede ve dönenceler dışında bulunan bir bölgeye güneş ışınları her zaman güneyden (güneydoğu, güney, güneybatı) ulaşacaktır. Belirtilen bölgeye güneş gün içinde sırasıyla güney-doğu, güney ve güney-batı yönlerinden ulaşır. Direkt güneyden ulaştığı öğle vakitleri, güneşin bölgeye gün içinde en yakın olduğu an olup, bölge en çok ışınımı bu vakitlerde alır. Açı hesaplamaları genellikle kuzey yarım küre referans alınarak yapıldığından, güney doğrultusu sıfır olarak kabul edilmektedir.

Güneş yükseklik açısı (α), güneşin bölgenin yatay yüzeyi ile yaptığı açıdır. Güneş doğarken ve batarken 0° 'dir. Güneş yalnızca dönenceler arasındaki bölgelere dik geldiğinden, güneş sadece bu bölgelerde, yüzey ile 90° 'lik açı yapabilir.

Saat açısı (ω), dünya kendi eksenini etrafında saatte 15° dönmekte, batıdan doğuya doğru açısal hareket yapmaktadır. Saat açısı, bu hareket sebebiyle, bölgenin yerel meridyeninin doğu veya batısı yönünde güneşin açısal yer değiştirmesi olarak ifade edilmektedir. Saat açısını hesaplamamız gerekirse,

Saat açısı (ω), bölgeden geçen meridyene yani güneş saatine bağlıdır. Aşağıdaki denklem ile formüle edilir.

$$\omega = 15 (\text{Güneş Saati} - 12) \quad (3.2.)$$

Zenit açısı (θ_z), güneşin yüzeye çizilen dik eksen ile yaptığı açıdır. Yükseklik açısı ile zenit açısının toplamı 90° 'dir. Güneş yüzeye dik geldiğinde zenit açısı 0° olur.

Güneş geliş açısı (θ), güneşin bir yüzeye geliş açısını ifade eder. Yukarıda tanımlanan tüm açılar, güneş ışınlarının bir bölgeye hangi açı ile ulaştığını hesaplamamızı sağlar. Sürekli değişen güneş geliş açısını ve bölgenin anlık ışınım değerlerini hesaplanmamız gerekirse, güneş geliş açısı (θ);

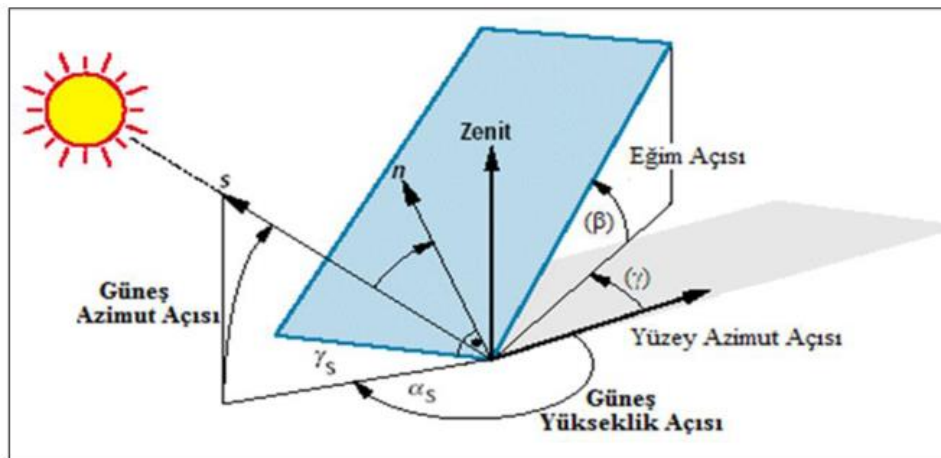
$$\cos\theta = \sin\delta\sin\varphi\cos\beta - \sin\delta\cos\varphi\sin\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\varphi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\sin\varphi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega \quad (3.3.)$$

olarak formüle edilmektedir. Bu formülden yola çıkarak anlık ışınım miktarı hesaplanmak istediğinde;

Anlık Işınım Miktarı (G_t);

$$G_t = G_{on} \times \cos\theta \approx 1000 \frac{W}{m^2} \times \cos\theta \quad (3.4.)$$

olarak formüle edilmektedir. Denklemden de görüldüğü gibi, yıl içinde herhangi bir zaman diliminde güneşin bölgeye hangi açıyla geleceği, teorik olarak ne kadar enerji bırakacağı kolaylıkla saptanabilmektedir. Şekil 3.2.'de ilgili güneş açıları gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Güneş açılarının gösterimi (Yılmaz, S. vd., 2015)

Bilgisayar yazılımları sayesinde, dünyanın herhangi bir bölgesinde, güneşin düz bir zemine belirlenen zaman aralığında ne kadar enerjisini aktardığı hesaplanabilmektedir. Bu programlar, uydular aracılığıyla en doğru konum bilgilerine sahip olmakta, meteorolojik veriler ve güçlü işlemciler yardımıyla kapsamlı hesaplamalar yapabilmektedir. Bu veriler aracılığıyla, tasarlanacak güneş enerjisi sistemlerinden ne kadar enerji elde edilebileceği gözlenebilmekte, sistemin hangi açılarda konumlandırıldığında daha çok verim elde edeceği tespit edilebilmektedir.

3.2. Fotovoltaik Teknoloji

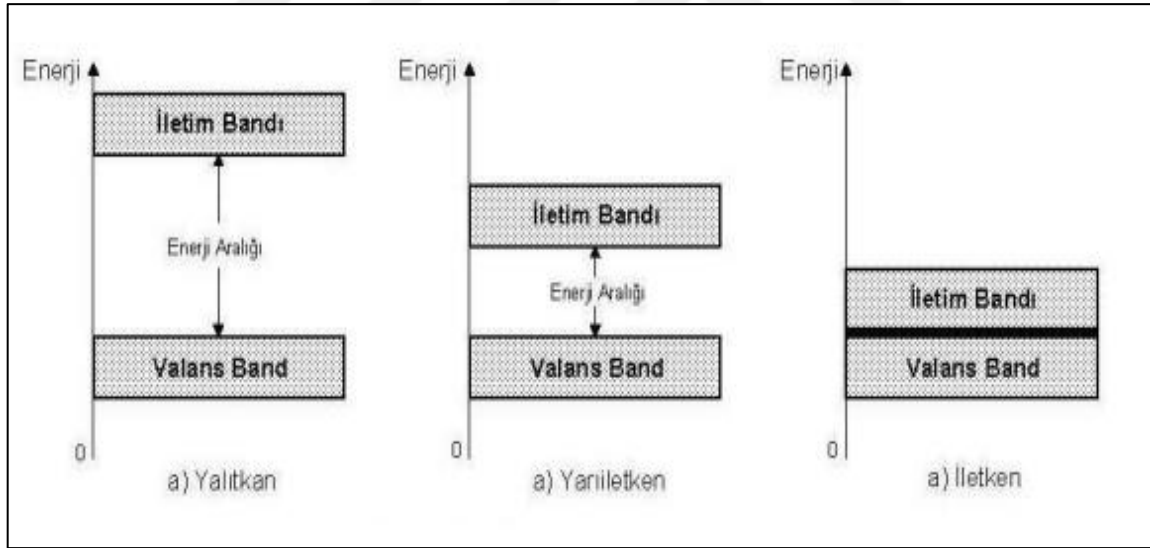
Fotovoltaik teknoloji güneşten yayılan fotonlar aracılığıyla doğrudan elektrik elde edilmesini ifade etmektedir. Bu teknolojik gelişmeler Bell Laboratuvarı'nda güneş pillerinin tanıtılmasıyla başlamış olmasına rağmen asıl ilerleme 1970'li yıllarda gözlenmiştir. Bu yıllarda Ortadoğu'da yaşanan petrol krizi, insanlığı yeni enerji kaynaklarına yönelterek, fotovoltaik teknolojinin gelişmesine zemin hazırlamıştır. Önceleri küçük ölçeklerde kullanılan fotovoltaik teknolojinin, uzay uygulamalarında da kullanılır hale gelmesiyle fotovoltaik teknoloji geniş bir araştırma alanına dönüşmüş, bu araştırmalar da yenilebilir enerjide önemli bulguların elde edilmesini sağlamıştır (Öztürk ve Kaya, 2014). Günümüzde güneş pilleri; hesap makinelerinden, güneş gemilerine ve büyük elektrik santrallerine dek geniş bir alanda enerji ihtiyacının karşılanmasını sağlamaktadır.

Fotovoltaik hücreler güneş ışınlarını doğrudan elektriğe dönüştürebilen, hareketli mekanik parçaları olmayan, bakım ve ömürleri uzun olan elektronik sistemlerdir. Fotovoltaik hücreler, yarı iletken maddeler olup, güneş enerjisini doğrudan elektriğe dönüştürürler. Yarı iletken bir diyot olarak çalışan fotovoltaik hücre, güneş ışığının taşıdığı enerjiyi iç fotoelektrik reaksiyondan faydalanarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür (Andreolli,2015).

Atomlarda bulunan elektronlar taşıdıkları enerji seviyelerine göre belirli bantlarda bulunurlar, valans bandındaki elektronların enerjileri düşük olup, bu bantta bulunan elektronlar iç içe, kristal bir yapıda bulunur ve bu elektronların hareket yetenekleri kısıtlıdır. İletim bandındaki elektronlar ise bu kristal elektron demetlerinden farklı olarak serbestçe hareket edebilmekte bir atomdan diğer atoma rahatlıkla geçebilmektedir. Bir elektronun

serbestçe hareket edebilmesi için elektrona valans bandından iletim bandına ulaşacak enerjinin verilmesi gerekmektedir.

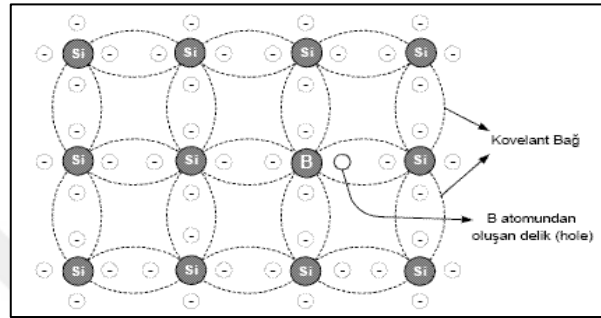
İletkenlerde bant aralığı çok küçük olduğu için elektronlar bu seviyeyi kolaylıkla aşarak atomlar arasında serbestçe hareket etmektedir. Şekil 3.3.'te görüleceği gibi yalıtkanlarda ise bu seviyenin aşılması için büyük bir enerjiye ihtiyaç duyulur. Örneğin, elmas (karbon) elektronlarının iletim bandına geçebilmesi için 7 eV enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Yarı iletkenlerde ise bu değer 1 eV seviyesindedir. Bu değerlerin aşılması halinde iletkenlik bandına geçen elektronun yerine yenisi gelerek, elektron akışı sağlanmakta, madde iletkenlik kazanmaktadır. Fotonlar, oldukça enerjik parçacıklar olup yarı iletkenlerdeki elektronların bant seviyesini aşmak için ihtiyaç duydukları enerjiyi bu elektronlara aktarabilmektedirler. Güneşten yayılan fotonların yarı iletken atomun elektronları tarafından soğurulmasıyla başlayan reaksiyon zincirinin sonucunda elektrik elde edilmesine fotovoltaik etki adı verilmektedir.



Şekil 3.3. İletken, yalıtkan ve yarı iletkene ait bant enerji seviyeleri (Birinci, 2015)

Yarı iletkenlerin sahip oldukları bu ayrıcalık elektrokimyasal özellik sayesinde, yarı iletkenler, başta güneş pilleri olmak üzere, doğrultucu diyot ve transistör üretiminde kullanılmaktadırlar. Fotovoltaik hücrelerin üretiminde en çok kullanılan yarı iletken silisyum, aynı zamanda doğada en çok bulunan elementlerin başında gelir. Yarı iletkenlerin fotovoltaik hücrelerde kullanılması için katkılanarak elektrokimyasal özelliklerinin bu elektrik üretimini sağlayacak yapıya dönüştürülmesi gerekir.

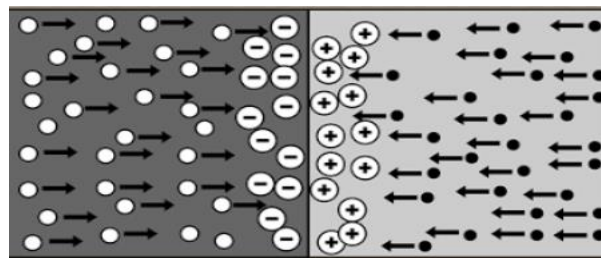
Yarı iletken maddelerin atomlarının son yörüngesinde 4 elektron bulunur. Atomların son yörüngesinde bulunan 4 elektronu ortaklaşa kullanarak, son yörüngelerinde 8 elektron bulunan kristal bir yapı oluştururlar. Bu kristal ve düzenli yapıya dışarıdan eklenen; son yörüngesinde 3 elektron bulunan periyodik cetvelin 3A grubundaki atom ile bu düzenli yapı bozularak Şekil 3.4.'de görülen P tipi yarı iletken elde edilir. Yarı iletken atomlarının son yörüngesinde 1 elektronun eksik olduğu bu alanlar (+) boşluk olarak isimlendirilir.



Şekil 3.4. P tipi yarı iletken (Anonim, 2015)

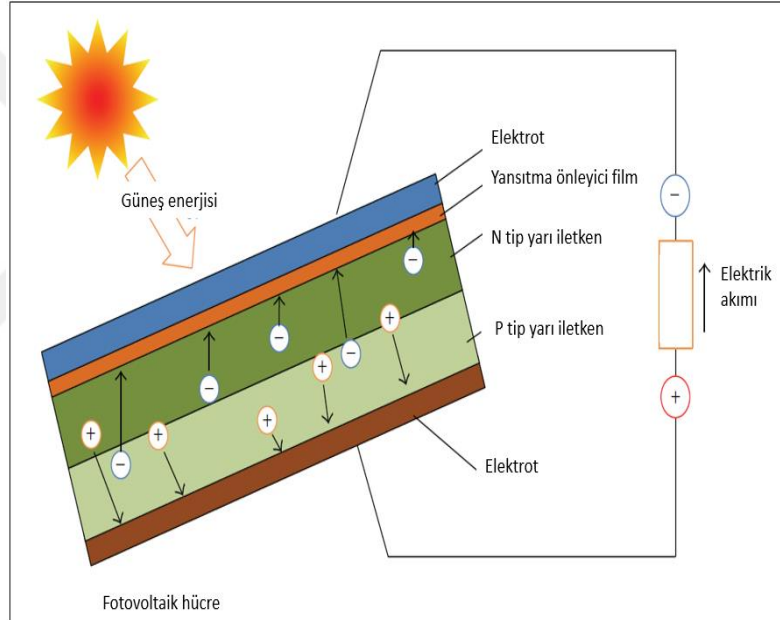
Kristal yapıya, son yörüngesinde 5 elektron bulunan periyodik cetvelin 5A grubu elementlerinin eklenmesiyle de N tipi yarı iletkenler elde edilir. N tipi yarı iletkenlerde kristal yapıya dahil olamayan serbest 1 elektron bulunurken, P tipi yarı iletkenlerde ise kristal yapıda 1 boşluk bulunur ve bu boşluğun + yük taşıdığı varsayılır. Bu iki durum da yarı iletkenlerin kimyasal özelliklerinin önemli ölçüde değiştirir.

P tipi yarı iletken ile N tipi yarı iletken bir araya getirilerek P-N eklem oluşturulduğunda N tip yarı iletkende fazla bulunan elektronlar, P tipi yarı iletkenine doğru akmaya başlar. Bu durum yük dengesi oluşana kadar devam eder. P-N eklemde N yüzünde elektron akışı sebebiyle pozitif, P yüzünde de aynı akış sebebiyle negatif yük taşıyıcıları birikir. Bu olay sonucunda, eklem bölgesinde biriken yükler sebebiyle Şekil 3.5.'te görülen elektrik alan oluşur.



Şekil 3.5. Yapısal elektrik alan (Anonim, 2006)

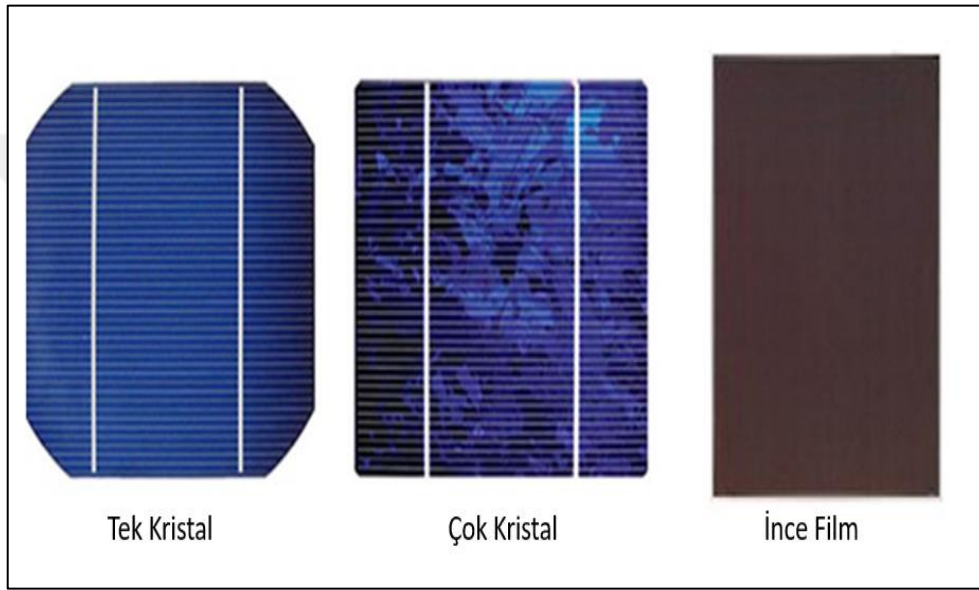
Işık sadece dalga yapısında olmayıp, foton adı verilen yüksek enerjili parçacıklara da sahiptir. Bu parçacıkların taşıdıkları enerji ışığın dalga boyuna göre değişiklik gösterir. Güneş ışınlarında bulunan fotonlar P-N eklem üzerine geldiklerinde, yeterli seviyede enerjiye sahip fotonlar, yarı iletkende bulunan elektronların bant aralığını aşarak iletim bandına çıkmasını sağlar. Elektronların iletim bandına çıkması, elektronların N yarı iletkene, boşlukların P yarı iletkene doğru akmasını sağlayarak elektrik akımını oluşturur. Oluşan bu akımın ardından eklemdaki elektrik alan azalır. Bunun sonucunda eklemden yeniden elektrik alan oluşması için de yükler yeniden ekleme doğru hareket eder ve yeniden elektrik alan oluşur. Böylelikle güneş ışınımı aracılığıyla akım oluşturan ve süreklilik taşıyan bir elektriksel yapı kurulur (Zhang vd., 2014).



Şekil 3.6. Fotovoltaik akım (Zhang vd., 2014)

P ve N eklemlerinden oluşan, fotonlardan soğurduğu enerji ile elektrik akımını üreten bu yapıya fotovoltaik hücre adı verilir. Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi P-N eklemlerin dışında fotovoltaik hücrelerde güneş ışınımının yansımalarını engelleyen bir yüzey, elektrotlar ve kablolar bulunur. Yaygın olarak kullanılan fotovoltaik hücreler, silisyum yarı iletkeninden elde edilmektedir. Bu hücrelerin elde ettiği enerji başta güneş ışınımına, güneş ışınında bulunan fotonların dalga boyuna ve yarı iletkenlerin başta bant enerjisi olmak üzere kimyasal özelliklerine bağlıdır. Fotovoltaik hücrede kullanılan yarı iletkenin daha düzenli bir kristal yapı göstermesi, P-N eklemlerde gerçekleştirilen bu elektrokimyasal kimyasal reaksiyonun verimini artırır.

Fotovoltaik hücreler P-N eklemeleri oluşturan yarı iletkenlerin isimleriyle anılırlar. İlk olarak kullanılan ve yaygın olarak kullanılmaya devam eden silisyum hücreler, madde yapısının çeşitliliğine göre tek kristalli, çok kristalli ve amorf silikon hücreler olarak sınıflandırılır. Bu hücelere ilişkin örnekler Şekil 3.7.'de yer almaktadır. Tek bir kristalden oluşan silisyum hücrelerin yapısı daha düzenli olduğundan bu hücrelerde üretilen enerji, daha düzensiz yapı sergileyen çok kristalli ve amorf silisyum hücelere oranla daha fazladır(Öztürk ve Kaya, 2014).

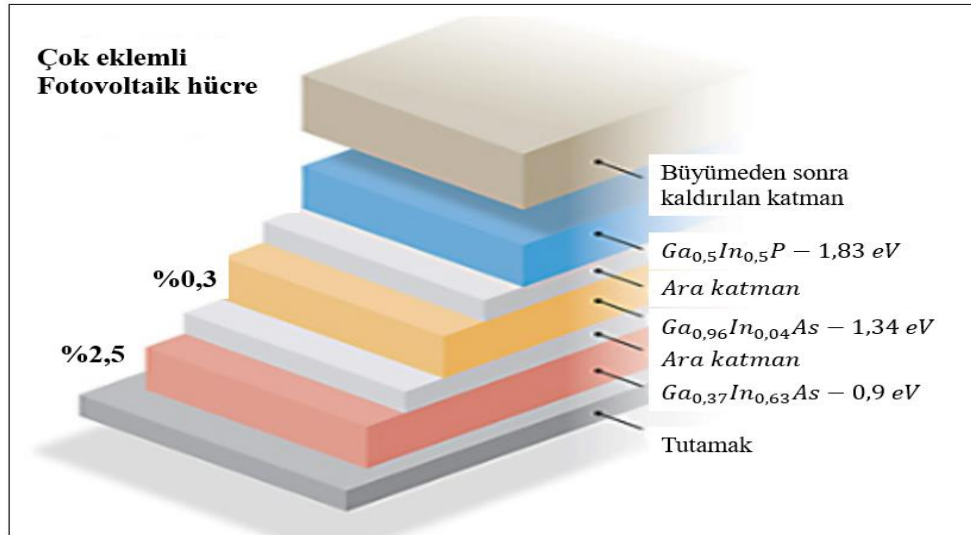


Şekil 3.7. Silisyum fotovoltaik hücre çeşitleri (Anonim, 2017)

Amorf silikon hücre, düzensiz bir madde yapısı sergilemesine rağmen çok küçük boyutlara sığdırılabilmesi sayesinde giyilebilir ve taşınabilir ünitelerde kullanılmaktadır. Bu hücrelerin verimleri tek kristal ve çok kristal hücelere göre oldukça düşüktür (Öztürk ve Kaya, 2014).

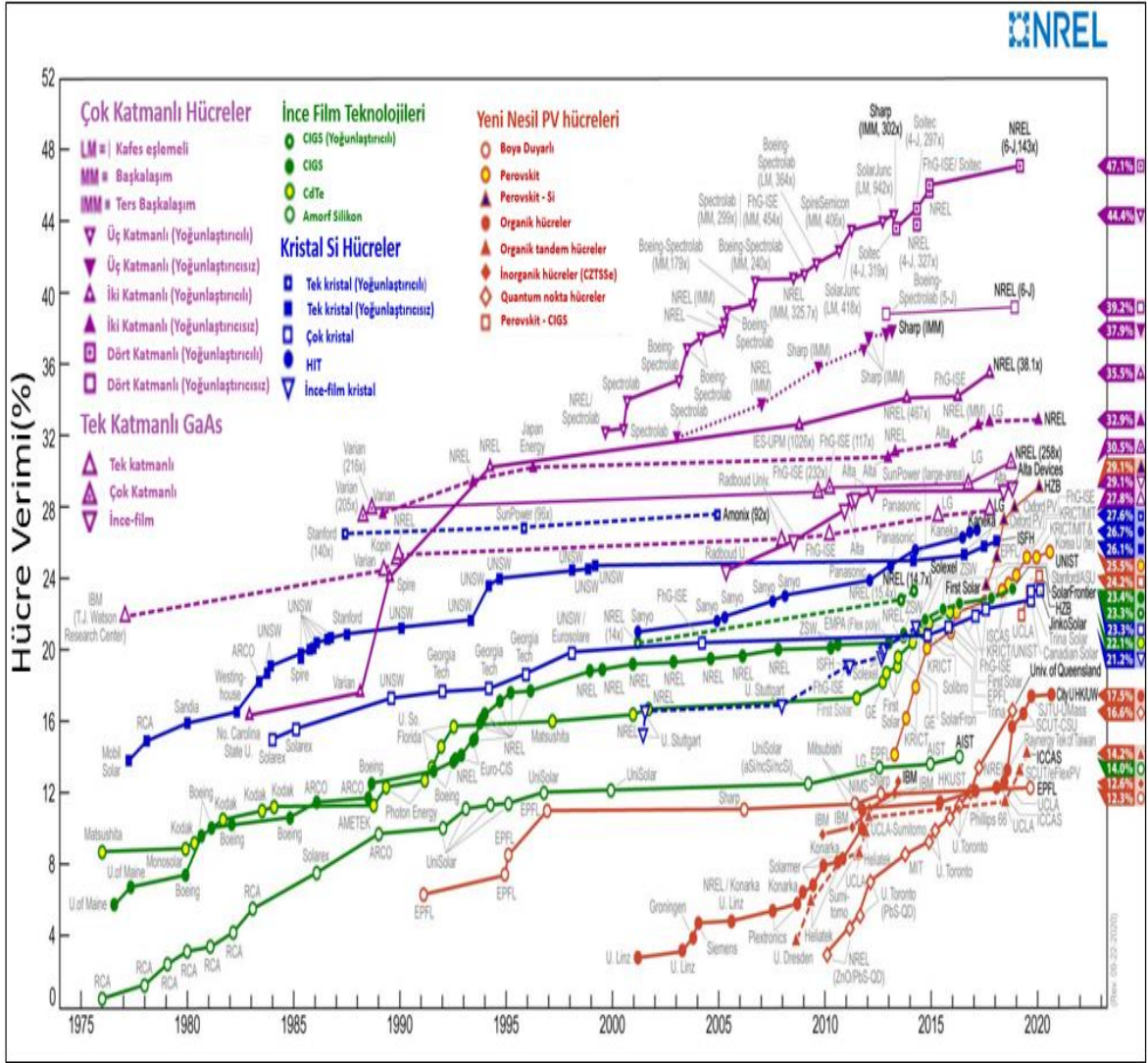
Silisyum elementinin dışında farklı yarı iletkenler kullanılarak elde edilen fotovoltaik hücreler de mevcuttur. Yarı iletken özellik gösteren elementlerin dışında, yarı iletken özelliğe sahip bileşikler ile de fotovoltaik hücreler üretilmektedir. Kadmiyum tellür, bakır indiyum diselenid, galyum arsenit hücreler yarı iletken özelliğe sahip bileşiklerden elde edilen fotovoltaik hücelere örnektir. Kadmiyum tellür hücrelerde yüksek verim elde edilmesine rağmen, kadmiyumun zehirli yapısı, bu hücrelerinin ticarileşmesini engellemiştir (Öztürk ve Kaya, 2014).

Tek bir P ve N ekleminden oluşan fotovoltaik hücre, fotondan yalnızca enerji bantı kadar enerji soğurur. Bu durum fotovoltaik hücrelerin verimlerini etkileyen en önemli unsurların başında gelmekte olup, bu sebeple bant enerjisinden düşük enerjili fotonlar yarı iletkenler tarafından soğurulamamakta, bant enerjisinden yüksek enerjili fotonların ise sadece bant enerjisi kadarlık enerjisi soğurularak elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Shockley ve Queisser'e göre bu engel sebebiyle tek eklemli bir fotovoltaik hücrenin verimi maksimum %33,7 olacaktır. Bu sınırın aşılması için ise çok eklemli yapılar geliştirilmiştir. Bu sayede yüksek enerjili fotonlar yüksek bant genişliğine sahip eklemlerce, düşük enerjili fotonlar, düşük bant genişliğine sahip eklemlerce soğurularak fotonların taşıdıkları enerji daha verimli kullanılabilir. Şekil 3.8.'de çok eklemli fotovoltaik hücrenin yapısı görülmektedir.



Şekil 3.8. Çok eklemli fotovoltaik hücre (NREL, 2020)

Optik boyalar ile farklı renk ve enerjilere sahip ışınların soğurulması ve geçirilmesi sağlanır. Bu sayede yarı iletkenlerin bant genişlikleriyle uyumlu enerjiye sahip fotonların ilgili yarı iletkenler tarafından soğurulması sağlanarak tasarlanan hücrelerin de verimleri de %25 seviyelerine ulaşmıştır. Bu çalışmaların yanında güneş ışınlarını yoğunlaştırarak tek bir hücreden daha fazla enerji elde edilmesine yönelik çalışmalar da mevcuttur. Tüm bu çalışmalar neticesinde, yoğunlaştırılmalı fotovoltaik hücrelerde %50'nin üzerinde, diğer hücrelerde ise 50'ye yakın verim elde edilmiştir. Şekil 3.9.'da fotovoltaik hücrelerin verimlerinin yıllara göre artışı gösterilmiştir. Birçoğu henüz ticarileşmeyen bu hücrelerin hayatımıza girmesi ile dar alanlarda daha yüksek enerji üretimi mümkün hale gelecektir.



Şekil 3.9. Fotovoltaik hücre verimlerinin yıllara göre değişimi (NREL, 2020)

3.3. Fotovoltaik Sistem

3.3.1. Fotovoltaik panel

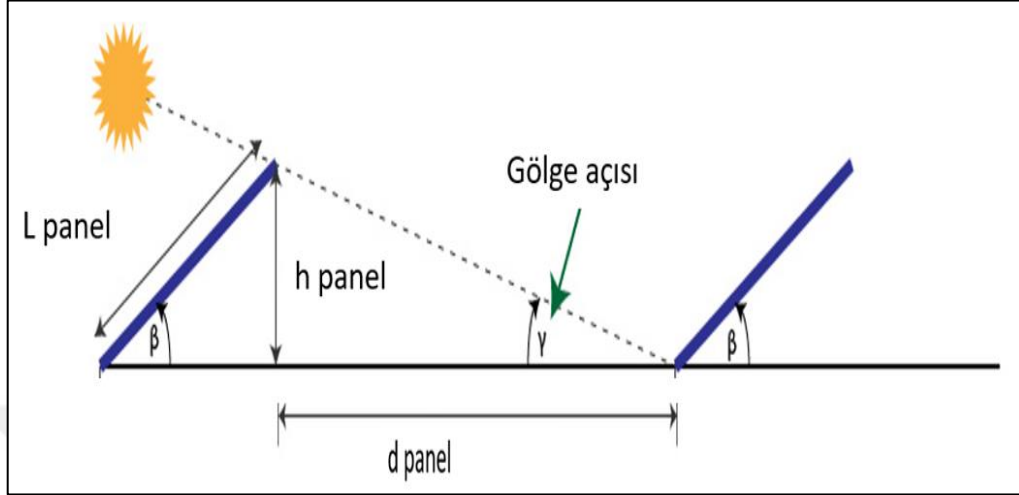
Kalınlıkları 0,25 – 0,35 mm arasında, boyutları ise 125 x 125 mm olan fotovoltaik hücrelerin seri ve paralel bağlanması ve dış etkilere karşı korumalı saydam (genellikle camdan) bir çerçeve içine yerleştirilmesi ile fotovoltaik paneller oluşturulur. Panellerde çok farklı sayılarda hücre bulunabileceği gibi ticari uygulamalarda genellikle 60 ve 72 hücreli paneller ile karşılaşmaktadır. Fotovoltaik panellerin kullanım ömürleri yaklaşık olarak 25 yıldır (Andreolli, 2015).

Üretim aşamasında, ihtiyaç duyulan gerilim ve akım değerlerine uygun olarak kullanılacak fotovoltaik hücrelerin sayısı ve dizilimleri belirlenerek fotovoltaik paneller tasarlanmaktadır. Bu tasarım sırasında hücrenin gerilim değerleri yüksek, akım değerleri düşük tutularak yüksek akım sebebiyle olası kayıpların önlenmesi amaçlanır. Fotovoltaik panellerin seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli unsur, fotovoltaik sistemin diğer ekipmanları ile uyumlu panellerin tercih edilmesidir. Akünün zarar görmesini engelleyecek, dönüştürücü ve şarj kontrol cihazının çalışabildiği aralıkta akım ve gerilim değerlerine sahip paneller tercih edilmelidir. (Öztürk ve Kaya, 2014).

Fotovoltaik paneller, seri ve paralel bağlanarak fotovoltaik diziler elde edilir. Fotovoltaik diziler sayesinde büyük enerji kapasitesine sahip güneş enerjisi sistemleri tasarlanmaktadır. Fotovoltaik paneller üzerlerine düşen güneş ışınımını enerjiye dönüştürdüklerinden bu sistemlerin, güneşin bölgeye ulaşma açısı gözetilerek montajının yapılması oldukça önemlidir. Sabit bir zemine kurulacak paneller için yaz aylarında uygun montaj açısı, bölgenin enlem açısından 15 derece az, kış aylarında ise bölgenin enlem açısından 15 derece fazla olması, bahar aylarında bölgenin enlem açısına eşit olması gerekmektedir (Boxwell, 2014).

Panellerin seri ya da paralel bağlanması, beslenecek sistem ve ekipmanlar dikkate alınarak belirlenir. Bununla birlikte paralel ve seri bağlantının kendi içinde çeşitli avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Paneller seri bağlandığında dizinin toplam gerilimi artarken akımı sabit kalmakta, paralel bağlandığında ise toplam akımı artarken gerilimi sabit kalmaktadır. Fotovoltaik hücreler ve paneller, üzerlerine düşen ışınım miktarınca enerji ürettiklerinden üzerlerine düşen ışınımın azalması bu hücre ve panellerin daha az enerji üretmesine yol açar. Bulutlu günler, gölgelenme, tozlanma gibi olumsuz durumlar daha az güneş ışığının hücrelere ulaşmasına ve daha az elektrik üretilmesine sebep olmaktadır. Hücrelerin olumsuz koşullar altında ürettiği akım ve gerilim değerleri, hücrelerin seri ve paralel bağlantıları sebebiyle panellerin toplam akım ve gerilim değerlerini olumsuz etkilemektedir. Seri bağlı hücrelerden birine gölgelenme sebebiyle güneş ışınları ulaşmadığında seri bağlı tüm hücrelerin akımı kesileceğinden hiçbir hücre enerji üretemeyecektir. Seri bağlı panellerin akım değerlerinin aynı olması sebebiyle, bir panelde yaşanan sorun serideki tüm panelleri aynı seviyede etkileyecektir. Panellerin paralel bağlanması halinde, sistemin gerilimi sabit

kalırken akımı artacaktır. Akımın yüksek değerlere ulaşması ise enerji kayıplarını arttıracaktır. (Öztürk ve Kaya, 2014).



Şekil 3.10. Fotovoltaik panel gölge açısı (Yiğit ve Atmaca, 2018)

Fotovoltaik panellerin güneş ışınımını optimize edecek eğimde montajının yapılmasının dışında, montaj sırasında dikkat edilmesi gereken diğer unsur, panellerin birbirlerini gölgelemeyecek şekilde montajlarının yapılmasıdır. Bu sebeple panellerin belirli uzaklıkta montajının yapılması, panellerin birbirini gölgelemesini engelleyerek verim sürekliliğini sağlayacaktır. Gölge açısı, güneşin paneli gölgeleyerek verimini düşüreceği açıyı ifade eder. Bu değerden daha düşük açılarda gelen güneş panelin gölgelenmesine sebep olur. Gölge açısının küçük olması panelin daha az gölgelenmesini sağlar. Şekil 3.10.'da görüldüğü gibi gölge açısı; panelin boyu (L_{panel}), panel eğim açısı (β) ve paneller arasındaki uzaklığa (d_{panel}) bağlıdır (Yiğit ve Atmaca, 2018).

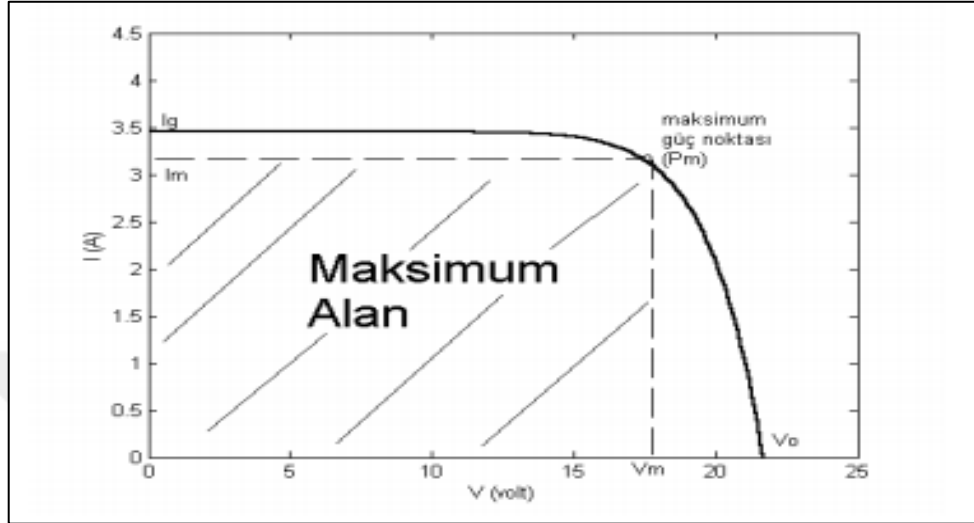
Gölge açısı hesaplanmak istendiğinde, Gölge açısı ($\gamma_{gölge}$):

$$\tan(\gamma_{gölge}) = \frac{L \sin(\beta)}{d_{panel}} \quad (3.5.)$$

ile formüle edilir.

Gerilim değeri 0,5 V düzeyinde olan fotovoltaik hücrelerin seri ve paralel bağlanarak oluşturdukları panellerde dikkat edilmesi gereken özellikler, panelin kısa devre akımı (I_{sc}),

açık devre voltajı (V_{oc}), maksimum güç kapasitesi (W_{mp}), maksimum güç sağladığı noktadaki akım (I_{mp}) ve voltaj (V_{mp}) ile verim (η_{pv}) değerleridir. Şekil 3.11.'de bir fotovoltaik hücrenin I – V eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.11. Açık devre gerilimi ve kısa devre akımı (MEB, 2012)

Açık devre akımı, panelin kısa devre durumunda sağladığı akım iken, açık devre gerilimi panel üzerinden hiç akım geçmediği durumda panelin uçları arasındaki gerilimdir. Maksimum güç ise 1000 W/m^2 ışınımında panelin üreteceği maksimum gücü belirtmektedir. Bu değerler yardımıyla fotovoltaik dizinin güç kapasitesi, üreteceği maksimum akım ve maksimum gerilim değerleri hesaplanır. Fotovoltaik dizideki paralel bağlı panel sayısı (n_{ppanel}) ile seri bağlı panel sayısı (n_{spanel}) sayısı bilindiğinde panelin sağlayacağı maksimum akım ve güç değerleri de tespit edilebilmektedir. Fotovoltaik serinin elektrik değerleri hesaplanmak istediğinde;

Fotovoltaik dizi güç kapasitesi (W_{dizi});

$$W_{dizi} = W_{mp} \times n_{panel} \quad (3.6.)$$

Fotovoltaik dizi kısa devre akımı (I_{dizi_sc});

$$I_{dizi_sc} = I_{sc} \times n_{ppanel} \quad (3.7.)$$

Fotovoltaik dizi açık devre gerilimi (V_{dizi_oc});

$$V_{dizi_{oc}} = V_{oc} \times n_{spanel} \quad (3.8.)$$

Maksimum güç noktasında dizi akımı ($I_{dizi_{mp}}$);

$$I_{dizi_{mp}} = I_{mp} \times n_{ppanel} \quad (3.9.)$$

Maksimum güç noktasında dizi gerilimi ($V_{dizi_{mp}}$);

$$V_{dizi_{mp}} = V_{mp} \times n_{spanel} \quad (3.10.)$$

şeklinde formüle edilmektedir. Görüldüğü gibi panellerin seri bağlantısı ilgili gerilim değerlerini arttırırken, panellerin paralel bağlantısı ilgili akım değerlerini arttırmaktadır.

Bu değerlerin, birlikte çalışacağı akünün gerilim değerleriyle uyumlu olması, akünün yapısını bozacak akım değerlerinde olmaması, dönüştürücü ve şarj kontrol cihazlarının çalıştığı değerler içinde bulunması gerekir. Bu sebeple oluşturulacak fotovoltaik dizinin seri ve paralel bağlantıları yapılırken, diğer ekipmanların desteklediği değerlere göre hareket edilmesi gerekmektedir (Boxwell, 2014).

Panel seçimi yapılırken farklı kapasitede panel alınmamasına dikkat edilmelidir. Farklı kapasitede panellerin bir arada seri ve paralel bağlanması elde edilecek enerji miktarını etkileyecektir. Farklı kapasiteli iki panel seri bağlandığında, iki panel de aynı akımı üreteceğinden yüksek kapasiteli panelin verimi düşecektir. Farklı kapasiteli iki panelin paralel bağlanması halinde ise panellerin gerilimi, kapasitesi düşük olan panelin gerilimine eşit olacaktır. Panellerin verimini gün ışınlarının spektral özellikleri, panelin üretildiği yarı iletken maddenin elektrokimyasal özellikleri, eğim açısı, fotovoltaik dizideki diğer paneller ile bağlantısı, gölgelenme, hücrenin temizliği belirler. Aktif hareket parçaları olmaması sebebiyle panellerin bakım maliyetleri düşüktür (Andreolli,2015).

Yaygın olarak, tek kristal ve çok kristal hücrelerden oluşan güneş panelleri kullanılmaktadır. Tek kristalden oluşan yapıları sebebiyle tek kristal panellerin verimi daha

yüksek olsa da çok kristal panellerin verimleri de giderek yükselmektedir (NREL,2020). Aynı enerji kapasitesine sahip panellerden tek kristal panel daha az alan kaplamaktadır. Bununla birlikte tek kristal silikon elde edilirken bu silikonun köşeleri kesildiğinden, aynı panel alanı içinde çok kristal hücreler daha fazla alanı aktif olarak kullanılırlar (Bkz. Şekil 3.7.). Bu durum sebebiyle, tek kristal hücrenin veriminin çok kristal hücrenin verimine oranı; tek kristal panelin veriminin çok kristal panelin verimine oranından daha fazladır.

Günümüzde opak olmayan güneş panelleri tasarlanmakta, bu paneller bina dış cephelerinde kullanılarak, binaların enerji döngüsünde yer alması sağlanmaktadır. Bunun dışında panelin iki yüzeyine de güneş hücrelerinin yerleştirilerek yansıyan ışıklardan enerji edilmesinin amaçlandığı panellerden, yoğunlaştırılmalı panellere dek geniş bir yelpazede güneş panelleri üretilmektedir.

3.3.2. Aküler

Aküler, elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek depo eden yapılardır. Bu enerji depolama işlemi indirgenme ve yükseltgenme adı verilen bir dizi kimyasal tepkime aracılığıyla gerçekleştirilir. Depo edilen bu kimyasal enerji, sistem ihtiyaç duyduğunda yeniden elektrik enerjisine dönüştürülerek sistemlerin enerji ihtiyacı karşılanmaktadır. Kimyasal reaksiyonlar, elektrot adı verilen katılar ve elektrolit adı verilen kimyasal çözeltiler arasında gerçekleşmektedir. Metaller, metal oksit elektrotlar ve elektrolit sıvılar arasında gerçekleşen bu reaksiyonlardan dolayı zehirli gazlar salınmakta olduğundan akülerin iyi muhafaza edilmesi oldukça önemlidir (Öztürk ve Kaya, 2014).

Endüstriyel aküler; traksiyoner ve stasyonier aküler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Traksiyoner aküler, hareket eden sistemlerin ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde tasarlanmışlardır. Bu aküler malzeme kaldırma ve taşıma araçlarında, elektrikli taşıtlarda kullanılırlar. Hareket eden sistemler için tasarlanan bu aküler, anlık yüksek akım çekerek hareket eden, kaldırma ve taşıma işlemini gerçekleştiren makinelerin ihtiyaçlarını karşılarlar. Traksiyoner aküler, kesintisiz olarak, uzun süreli enerji ihtiyacı olan sistemler için değil, kısa süreliğine yüksek akım ihtiyacı bulunan, hareketli sistemler için tasarlanmışlardır. Stasyonier aküler ise sabit tesislerde kullanılan akülerdir, bu aküler anlık

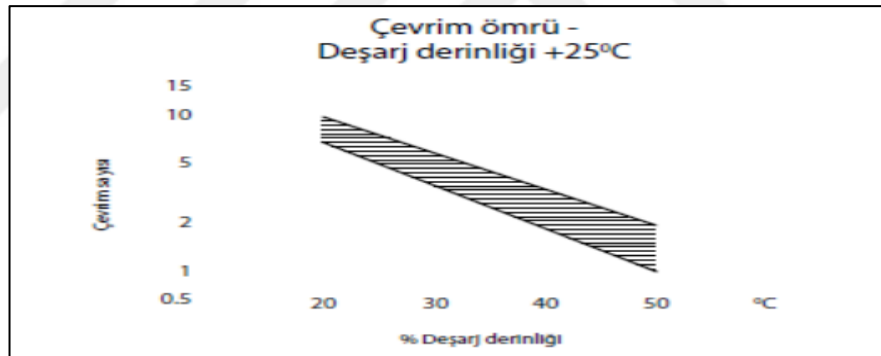
olarak yüksek elektrik akımı sağlamak yerine, daha düşük seviyelerde sabit ve sürekli akım sağlarlar (MEB, 2008). Güneş panellerinde ve baz istasyonu sistemlerinde stasyonier aküler kullanılmaktadır.

Akü seçimi yapılırken, elektrik üretecek sistem ile güç ihtiyacı karşılanacak sistem iyi analiz edilmelidir. Sürdürülebilir enerji kaynakları ile elektrik üretimi doğası gereği düzensiz bir yapıya sahiptir. Mevsimsel farklılıklar, hava durumu, gölgelenme güneş enerjisi sistemlerinde, rüzgarın hızı ise rüzgar türbinlerinde üretilen enerjinin miktarını etkilemektedir. Bu yüzden, yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretilen sistemler için seçilecek akünün, istenilen sürelerde şarj edilebilmesi, düzensiz elektrik akımından etkilenmemesi ve ihtiyaç duyulduğunda sistemi besleyebilmesi gerekmektedir. Ayrıca aküler hassas aletler olduklarından difüzyon etkisi sebebiyle kendi kendine deşarj olabilmekte, çevrim sayısının üzerinde şarj ve deşarj olduklarında kullanılamaz hale gelebilmektedirler.

Akü ömrünü belirleyen faktörlerden birisi çevrim sayısı diğeri de şarj derinliğidir. Akülerin içinde kimyasal tepkimeler gerçekleştiğinden aküler sürekli bozunma halindedirler. Aküler devamlı şarj ve deşarj oldukça, akünün iç kimyasal dengesi daha da bozulmakta ve bu durum akünün performansının düşmesine yol açmaktadır. Aküler belli sayılarda şarj ve deşarj döngüsünün gerçekleşmesinin ardından kullanılamaz hale gelirler. Bu şarj ve deşarj işlemlerinden oluşan döngü, akünün çevrim sayısı olarak ifade edilir ve akünün ömrü bu çevrim sayısı ile ilişkilidir. Şarj derinliği de aküde depolanan enerjinin ne kadarlık kısmında sürekli enerji boşaltma ve doldurma reaksiyonlarının gerçekleştiğini ifade eden kavramdır. Akülerin depoladıkları enerjinin büyük bir kısmını boşalttığı durumlarda, küçük bir kısmını boşalttıkları durumlara oranla akünün içinde çok daha fazla madde kimyasal reaksiyona dahil olur ve bu durum akünün kimyasal iç dengesinde daha fazla bozulmaya yol açar. Akülerin depoladıkları enerjinin tamamını boşaltmaları halinde akülerin kimyasal iç dengesinde meydana gelen bozulma çok daha yüksek seviyelerde olduğundan akülerin bu şekilde boşaltılması, şarj ömrünü kısaltmaktadır(MEB,2012). Bu sebeple akülerin depoladıkları enerjinin tamamını tüketmesine izin verilmez. Şarj derinliği, akülerin depoladıkları enerjinin ne kadarlık kısmının kullanılması gerektiğini ifade eder. Akülerin belirlenen şarj derinlikleri içinde şarj ve deşarj edilmesi, akülerin yüksek tahribata uğramasını önler. Örneğin %50 şarj derinliğine sahip bir aküde depolanan enerjinin

%50'sinden fazlasının kullanılması akünün önemli derecede zarar görmesine sebep olurken, bu değerin altında enerjinin kullanılması akünün ömrünün uzamasını sağlar.

Şarj derinliği ile çevrim sayısı arasında bir ilişki söz konusudur. Şekil 3.12.'de görüleceği gibi, akünün çevrim sayısı; aküde depolanan enerjinin daha küçük bir kısmı kullanılarak şarj – deşarj döngüsü gerçekleştirildiğinde daha fazladır. Aküde depolanan enerjinin daha yüksek kısmı kullanılarak şarj – deşarj döngüsü gerçekleştirildiğinde çevrim sayısı giderek azalmaktadır. Aküler kimyasal yapıları sebebiyle çevresel koşullardan etkilenmekte olduklarından akülerin bulunacağı ve kullanılacağı ortamın özellikleri de akü seçiminde önem taşımaktadır. Akülerin verimli çalışabildiği sıcaklık aralıkları farklılık göstermekte, sulu akü çeşitleri içlerinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonların ardından gaz salınımı yapmaktadır. Akü seçimi yapılırken bu unsurlar gözetilmeli, sulu akülerin havalandırma ünitesi bulunmayan iç ortamlarda ve yaşam alanlarında kullanılması önlenmelidir.



Şekil 3.12. Akü çevrim sayısı deşarj derinliği (YiğitAkü, 2020)

Akü seçimi, akülerin bakım gereksinimi, ortam sıcaklığı, yük profili, şarj derinliği gibi özellikler değerlendirilerek yapılmalıdır (Öztürk ve Kaya, 2014). Fotovoltaik sistemler, şebeke bağlantısı olan ve şebeke bağlantısı olmayan şekilde tasarlanabilir. Şebeke bağlantısı olan fotovoltaik sistemler, fazla enerji ürettiği durumlarda bu enerjiyi dönüştürücüler (inverter) yardımıyla şebekeye verirken, yeterli enerji üretmediği durumlarda ihtiyaç duyduğu enerjiyi şebekeden karşılar. Bu sistemler, elektrik şebekesinde yaşanan arıza sebebiyle şebeke elektriği kesildiğinde elektrik üretimini sonlandırır. Bu sebeple şebeke bağlantılı sistemlerde akülere çok fazla ihtiyaç olmayıp, sadece elektrik arızası durumunda bu akülere ihtiyaç duyulur. Şebeke bağlantısı olmayan sistemlerde ise, sistemin enerji ihtiyacının kesintisiz karşılanması için aküler kullanılmaktadır. Güneş enerjisinin

üretilemediği gece vakitlerinde, yeterince enerji üretilmeyen bulutlu günler ve kış günlerinde aküler aracılığıyla sistemin ihtiyaç duyduğu enerji karşılanabilmektedir. Bu sebeple fotovoltaik sistemlerde gündüz süresince şarj edilebilecek, gece boyunca enerji sağlayabilecek akü tipleri tercih edilmelidir. Bu aküler, her gün şarj ve deşarj olacaklarından yüksek çevrim sayısına ve deşarj derinliğine sahip olmalıdır. Fotovoltaik panellerle beslenen sistemin akım ihtiyacına göre yüksek akım ya da düşük akım sağlayan aküler tercih edilebilir.

Fotovoltaik sistemlerde kullanılacak akülerde istenen temel özellikler; yüksek miktarda boşalma durumunda akü veriminin azalmaması, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık, enerji girdisinin düzenli olmadığı uygulamalarda etkin kullanım, dengeleme dolumuna gereksinim duyulmaması, düşük iç direnç sayesinde kolay dolun ve enerji ihtiyacını karşılayacak düzeyde depolama kapasitesidir.

Aküler kullanılan malzemelere göre ve elektrolitin katı, sıvı ya da jel olmasına göre gruplandırılmaktadır. Kurşun oksit aküler en çok kullanılan akü çeşitlerinden biridir. Bu akülerin elektrolitin sıvı, katı ve jel olan çeşitleri bulunmaktadır. Sulu aküler bakım gereksinimleri sebebiyle fotovoltaik sistemlerde tercih edilmemektedir. Kurşun zehirli bir metaldir, bu sebeple kurşun oksit akülerin gaz salınımı yapmaması gerekmektedir. Geliştirilen VRLA (Valve Regulated Lead Acid - Valf Düzenlemeli Kurşun Asit) teknolojisi sayesinde kurşun asit aküler gaz salınımı yapmamakta ve bakım ihtiyacı duymamaktadır. Cam elyafa elektrolitin emdirildiği AGM aküler ve elektrolitin jel halinde bulunduğu jel aküler, VRLA akülere örnektir. VRLA akülerin, kendi kendine deşarj olma özellikleri oldukça düşüktür (20°C sıcaklıkta %2/ay). AGM aküler, jel akülere oranla daha hızlı şarj edilebilmektedir ve daha yüksek hacimsel enerji yoğunluğuna sahiptir. Jel akülerin ise şarj derinliği ve çevrim sayıları AGM akülere oranla daha yüksektir. Aynı çıkış gücüne sahip jel akünün 25°C ortam sıcaklığında %50 şarj derinliğinde çevrim sayısı 1200 iken, AGM akünün aynı şarj derinliğinde çevrim sayısı 400 - 600 arasındadır.

Jel aküler sıcaklık değişimlerinden daha az etkilenirken, AGM aküler daha fazla etkilenmektedir. Kurşun akülerin en önemli problemlerinden birisi anot elektrotta kimyasal reaksiyonlar sebebiyle zamanla meydana gelen sülfatlaşmadır. Bu olay şarj derinliğini ve akünün ömrünü azaltmaktadır. Geliştirilen kurşun karbon aküler ile bu sorunun üstesinden

gelinmesine ilişkin çalışmalarda önemli aşamalar kaydedilmiştir. Bu sayede kurşun aküler çok daha yüksek şarj derinliğine ve ömre sahip olacaklardır. (Öztürk ve Kaya, 2014). Kurşun akülerin dışında Nikel Metal Hidrit (NiMH) ve Nikel Kadmiyum (NiCd) aküler vardır. Bu akülerin kapasiteleri, depoladıkları enerji tamamen tüketilmeden şarj edildiklerinde azalmakta, bu durum da akülerin verimini olumsuz etkilemektedir. Fotovoltaik sistemlerde kullanılacak aküler, paneller tarafından enerji ihtiyacının karşılanmadığı durumlarda enerji sağlayacak, fotovoltaik panellerin sağladığı ihtiyaç fazlası enerjiyi depolayacak olduklarından NiMH ve NiCd aküler fotovoltaik sistemler için uygun değildir (SKIL, 2020).

Günümüzde lityum akülerin önemi gittikçe artmaktadır. Alkali bir metal olan lityum, hidrojen ve helyumun ardından en küçük kütleyle sahip elementtir. Aynı zamanda, doğada en çok bulunan elementlerden birisi olan lityumun, kimyasal özellikleri sebebiyle, akülerin temeli sayılan indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonlarında etkileşimi yüksektir. Bu etkileşim sebebiyle, lityum aküler hızlı şarj edilebilme özelliğine sahiptir. Bu özelliğinin yanında bu akülerde Lityum Metal Oksit ya da Lityum Metal Fosfat katot elektrotlarının kullanılması, daha az hacimde yüksek enerji depolanabilmesini olanaklı kılar (Öztürk ve Kaya, 2014). Lityum aküler; diğer akülere göre daha az yer kaplar, daha uzun çevrim sayısına sahiptir ve şarj derinlikleri daha yüksektir. Hızlı şarj edilebilen lityum akülerin şarj edilmesi için tamamen boşalması gerekmez. Zehirli gaz salınımı da olmayan lityum aküler, diğer akülere göre pahalıdır. Bu akülerin diğer dezavantajı ise üretildiği andan itibaren, kullanılmasalar dahi belirli bir raf ömrüne sahip olmalarıdır. Bu sebeple üretim tarihi eski olan lityum aküler tercih edilmemeli, yeni üretilmiş lityum akülerin kullanılmasına özen gösterilmelidir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda patlama riski bulunan lityum aküler, dış ortamda, yüksek sıcaklıkta güneşe maruz bırakılmamalıdır.

3.3.3. Şarj kontrol cihazı

Dizilerin gerilim değerleri, üzerlerine düşen ışınım değerleriyle orantılıdır. Diziler yeterince ışınım alamadıklarında gerilimleri düşer. Akü bağlantılı fotovoltaik sistemlerde dizilerin geriliminin düzensiz yapısı aküler için sorun teşkil etmektedir. Bu sorunlardan ilki dizinin gerilim değerinin akünün gerilim değerinin altına düşmesi halinde meydana gelir. Bu durumda aküden dizilere doğru bir ters akım oluşur ve depolanan enerji kaybedilir. İkinci

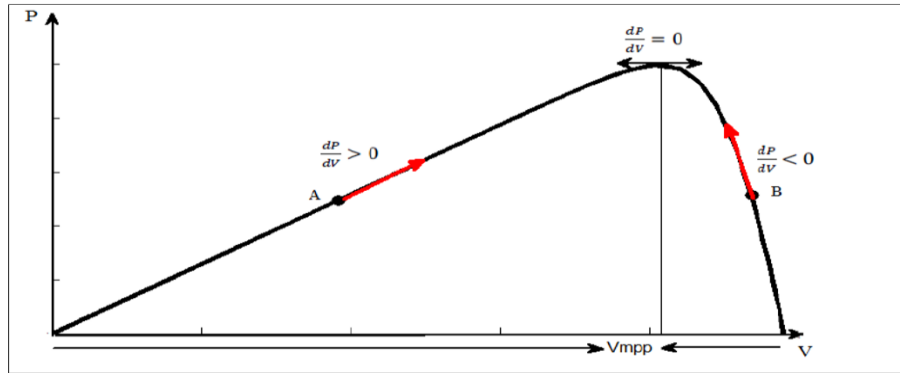
olumsuz durum ise akülerin belirli düzeyin altında akım ile şarj edilmesi halinde akülerin zarar görüyor olmasından kaynaklanmaktadır. Şarj kontrol cihazları, fotovoltaik dizilerde üretilen elektriğin akım ve gerilim değerlerini düzenleyerek akülerin ve panellerin zarar görmesini engellerken, enerjinin daha verimli kullanılmasını sağlar. Akülerde depolanan enerji, akü kapasitesine yaklaştıkça enerji depolama işlemi güçleşmektedir. Şarj kontrol cihazları akülerle uyumlu çalışabilen cihazlar olarak tasarlandıklarından dolayı uygun akım ve montaj değerleriyle aküleri şarj etmekte, akülerin daha hızlı bir şekilde tamamen dolmasını sağlamaktadırlar (Akyol, Ş.M., ve Kılıç, M., 2007).

3.3.3.1. PWM şarj kontrol cihazı

PWM, darbe genişlik modülasyonunun İngilizce karşılığı olan “Pulse - Width Modulation” kelimelerinin kısaltmasıdır. Bu şarj kontrol cihazları, akülerin ihtiyaç duyduğu gerilim değerleri doğrultusunda, panelin sağladığı gerilim ve akım değerlerini düzenleyerek akülerin uygun gerilim değerlerinde şarj edilmesini sağlarlar. Akülerin uygun gerilimde şarj edilmesine odaklanan bu kontrol cihazları, yüksek ışınlam altında dahi akü için yeterli olduğunu değerlendirdiği enerjiden fazlasının geçişine izin vermeyerek, bu enerjinin kaybolmasına yol açarlar (Çilli, 2018).

3.3.3.2. MPPT şarj kontrol cihazı

MPPT, maksimum güç noktası izleyicisinin İngilizce karşılığı olan “Maximum Power Point Tracking” kelimelerinin kısaltmasıdır. Bu kontrol cihazları, akülerden çok panellere odaklanmaktadır. MPPT şarj kontrol cihazları, panellerden gelen elektriğin akım ve gerilim değerini değiştirerek maksimum güç elde edilmesini amaçlarlar (Djilali, B., vd., 2017). Şekil 3.13.’de görüleceği gibi panelden gelen elektriğin gerilim değerleri değiştirilerek güç çıkışı gözlenir. Bu gerilim değiştirme ve gözlem sürecinde yapılan yakınsama ile maksimum güç noktasına ulaşılır. MPPT şarj kontrol cihazlarında panel tarafından üretilen maksimum enerjinin aktarılması amaçlanırken, PWM şarj kontrol cihazlarında akülerin ihtiyaç duyduğu akımın uygun gerilim değerlerinde düzenli bir şekilde aktarılması amaçlanmaktadır. MPPT şarj kontrol cihazları, anlık gölgeleme durumlarında yanlış yönde yakınsama yaparak üretilen elektriksel gücün azalmasına yol açabilmektedir. (Guerriero,P., vd., 2013).



Şekil 3.13. Maksimum güç noktası izleme metodu (Djilali, B. vd., 2017)

3.3.4. Dönüştürücüler

Güneş hücrelerinde doğru akım üretilir. Birçok elektronik cihazın bu elektriği kullanabilmesi için bu akımın alternatif akıma dönüştürülmesi gerekir. Bu işlem dönüştürücüler aracılığıyla gerçekleştirilir. Dönüştürücü bu işlemi, kontrol devreleri, anahtarlar veya transformatörler yardımıyla yerine getirir. Dönüştürücüler, fotovoltaik sistemin şebeke bağlantılı olmasına veya olmamasına göre farklılık gösterirler. Şebeke bağlantılı dönüştürücüler fotovoltaik paneller ile üretilen elektriğin dönüştürülerek şebekeye verilmesini ve ihtiyaç duyulduğunda şebeke elektriğinin dönüştürülerek kullanılmasını sağlarlar. Şebeke bağlantılı sistemlerde kullanılan dönüştürücüler ise sadece doğru akımı alternatif akıma dönüştürerek alternatif akım ile çalışan cihazların beslenmesini sağlarlar.

Şebeke bağlantılı dönüştürücüler, elektrik şebekesinde yaşanan arıza sebebiyle şebeke elektriğinin iletilmediği durumlarda fazın, gerilimin ve rezonansın bozulmaması gereği enerji aktarımını durdururlar. Şebeke bağlantılı sistemlerde bulunan yükler, güneş panelleri enerji üretse dahi bu vakitlerde üretilen elektriği kullanamazlar. Bununla birlikte hem şebeke bağlantılı sistemlerde, hem de şebekeden bağımsız sistemlerde çalışabilen hibrit dönüştürücüler de üretilmektedir. Bu dönüştürücüler sayesinde şebeke bağlantılı sistemlerde dahi yükler kesintisiz olarak beslenebilmektedir. Dönüştürücüler de tıpkı şarj kontrol cihazları gibi, panellerden iletilen gücü yönlendirirken kontrol metodlarından yararlanırlar, MPPT özelliği olan dönüştürücüler enerjinin daha verimli dönüştürülmesini sağlarlar.

Gölgelenme fotovoltaik panellerde istenilmeyen durumların başında gelmektedir. Bir paneldeki gölgelenme, sistemin seri ve paralel bağlantılı panellerinin tümünde üretilen elektrik enerjisinin miktarını etkilemektedir. Mikro dönüştürücüler kullanılarak gölgelenmenin diğer panellerde üretilen elektriğe etkisi büyük oranda azaltılmaktadır. Merkezi panellere göre çok daha ucuz olan bu cihazlar az sayıda panele bağlanarak, bu panellerin ürettiği akımı alternatif akıma dönüştürürler. Böylelikle Şekil 3.14.'te görüleceği gibi gölgelenen panelin, diğer panelleri olumsuz etkilemesi engellenir (Çilli, 2018). Mikro dönüştürücülerin kullanılması sistemin kurulum maliyetini arttırsa da bu cihazlar sayesinde paneller aracılığıyla üretilen düzensiz enerjinin daha düzenli bir şekilde aktarılması sağlanır. Mikro dönüştürücüler tüm dizi yerine bir ya da birkaç panelin akım dönüşümünü gerçekleştirirken merkezi dönüştürücüler tüm dizinin akım dönüşümünü gerçekleştirirler.



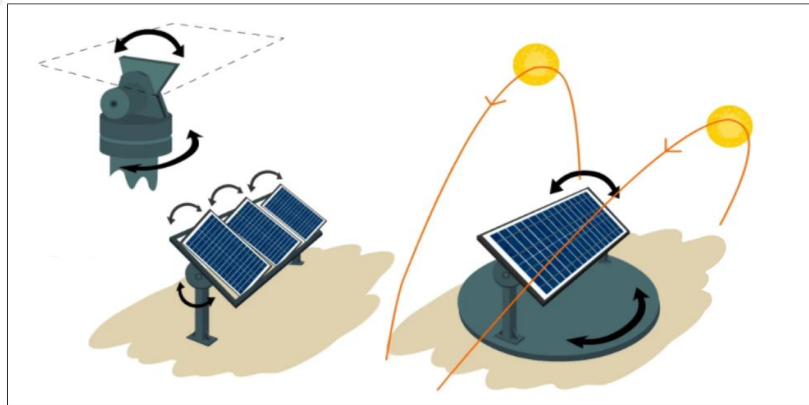
Şekil 3.14. Mikro dönüştürücü ve merkezi dönüştürücü karşılaştırılması (Carlos, 2019)

3.3.5. Güneş takip sistemleri

Eksen eğikliği, Dünya'nın kendi ve Güneş'in çevresindeki hareketi sebebiyle güneş ışınları fotovoltaik panellere her zaman aynı açıyla gelmemekte, fotovoltaik panellerden elde edilen enerji gün ve yıl içinde sürekli değişiklik göstermektedir. Güneşin gün içinde fotovoltaik sistemin kurulu olduğu bölgeye en dik açılarla geldiği öğle saatlerinde güneşten bölgeye ulaşan ışınım daha fazladır. Fotovoltaik paneller, öğle saatlerinde güneş ışınlarını dik alacak eğim açılarıyla monte edilmeleri halinde gün içinde bu saatlerde paneller yardımıyla daha fazla elektrik üretimi mümkün olmaktadır. Güneş önce yükselip, öğle saatlerinin ardından alçalmaya başladığından panellerin gün içinde güneşi en dik alacak şekilde monte edilmesi, sabit fotovoltaik sistemlerde diğer montaj açlarına oranla daha yüksek enerji elde edilmesini sağlar. Bununla birlikte sabit montaj, öğle vaktine uygun bir

açıda tasarlandığından, sabah ve akşam vakitlerinde güneş tarafından bölgeye ulaştırılan ışınımın önemli bir kısmı panelin yüzeyine ulaşamaz ve elektrik enerjisine dönüştürülemez. Yaz aylarında maksimum enerji üretimi amaçlanarak yapılan montaj, sonbahar ve ilkbaharı orta seviyede olumsuz etkilerken, kış aylarında enerji üretimini yüksek seviyede olumsuz etkileyecektir. İlkbahar ve sonbahar aylarında maksimum enerji elde edilecek şekilde panellerin montaj eğimi belirlendiğinde ise kış ve yaz ayları orta seviyede olumsuz etkilenecektir. Bu sebeple panellerin montaj eğim açıları belirlenirken, bahar aylarında, öğlen vakitlerinde gelen güneş ışınlarının açısına en uygun eğim açısı belirlenmektedir. Bu açı, fotovoltaik panellerin kurulduğu bölgenin enlem açısıdır.

Güneş takip sistemleri, güneşin gün içinde ve yıl içindeki geliş açlarına göre panelin kuzey – güney, doğu – batı eksenlerinde dönmesini sağlayarak güneş ışınlarının panele daha dik açılarla ulaşmasını sağlarlar. Şekil 3.15.'te de görüleceği gibi güneş takip sistemleri ile panellerin gün içinde elde edeceği enerjiyi arttırmak için paneller doğudan batıya doğru döndürülür. Yıl içinde ürettiği enerjinin artırılması için ise paneller kuzey güney yönünde döndürülür.

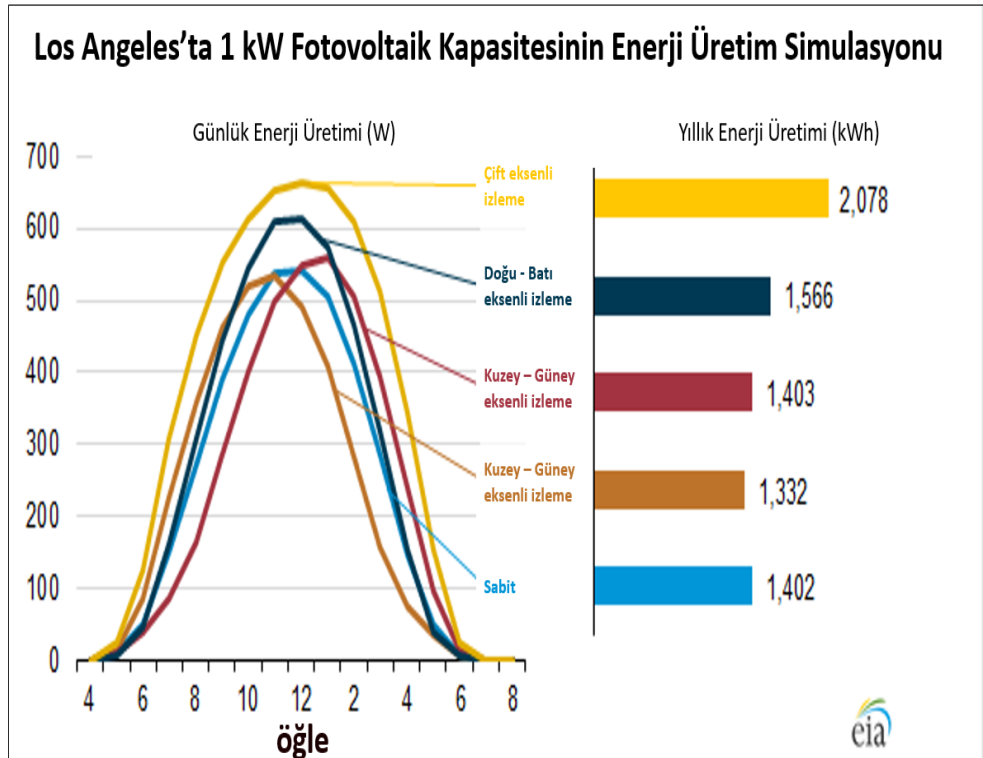


Şekil 3.15. İki eksenli güneş takip sistemleri (Lane, 2020)

Güneşin konumunu matematiksel denklemler ile tahminleyen takip sistemleri ile sensörler yardımıyla panelin en uygun konuma ulaşmasını sağlayan takip sistemleri mevcuttur. İlk tip takip sistemleri, matematiksel olarak modellendiklerinden bulutlu günlerde dahi aynı hareketi yaparlar. Sensörler yardımıyla kurulan takip sistemleri ise güneş ışınımını anlık ölçerek, hangi yönde daha fazla ışınım olduğunu belirler ve panelleri uygun konuma ulaştırır. Matematiksel modellenen takip sistemlerinde sürekli bulutlanmalar sistemi olumsuz etkilerken, sensörlü sistemlerde ani gölgelenmeler sistemi olumsuz

etkilemektedir. Kuş, uçak gibi varlıklar sebebiyle panelin gölgelenmesi halinde sensör yakınsama yapmaya çalışarak, sistemin uygun açıdan sapmasına yol açar. Sensörlü takip sistemlerinin diğer bir dezavantajı hassas nesnelere olan sensörlerin kolay deforme olmalarıdır. Uygun ölçüm yapamayan sensör sistemin veriminin düşmesine neden olacaktır.

Güneş panelleri hafif olmayan ekipmanlardır. Bu panellerin kullanılacak takip algoritmasına göre yapacakları açısal hareket, sistemin ürettiği enerjinin bir kısmının harcanmasına sebep olacaktır. Bu sistemlerin, hareketli ekipmanlara ve motorlara sahip olmaları sebebiyle bakım ihtiyacı bulunmaktadır. Ayrıca sabitlenmeyen sistemleri rüzgar gibi dış koşullar olumsuz etkilemektedir. Tek eksenli ve çift eksenli güneş takip sistemleri mevcuttur. Tek eksenli sistemler ya kuzey – güney doğrultusunda, ya da doğu – batı doğrultusunda açısal hareket yaparken, çift eksenli sistemler her iki doğrultuda da hareket edebilmektedir (Eke, R. ve Şentürk, A. , 2012). Lane'e (2020) göre fotovoltaik dizi fiyatını %50 arttıran bu sistemlerdence daha fazla panel tercih edilmelidir. Tek eksenli güneş takip sistemleri %20 oranında daha fazla enerji üretilmesini sağlarken, Şekil 3.16.'da görüleceği gibi çift eksenli takip sistemleriyle %30 - %40 oranında daha fazla enerji üretilmesi mümkün olmaktadır (EIA, 2014).



Şekil 3.16. Güneş takip sistemi verim (EIA,2014)

3.3.6. Fotovoltaik sistemin diğer elemanları

Sistemin diğer birimleri, sistem elemanları arasındaki bağlantı unsurlarıdır. Bunlar; kablolar, devre anahtarları, şalterler, bağlantı kutuları, elektrik sigortalarıdır. Bu ekipmanların birçoğu, açık alanda bulunacağından sert hava koşullarına dayanıklı malzemelerden seçilmelidir. Hasarlı bağlantılar, sisteme verilebilecek elektrik miktarını azaltır ve sistemin bütünüyle işlemez hale gelmesine neden olabilir.

Fotovoltaik sistemlerin bir diğer önemli unsuru kablolardır. Kablo kalitesi enerji verimliliğini etkilemektedir. Enerji verimliliğinden daha önemli durum ise kablo seçiminin sistem ve çevre güvenliğini doğrudan etkiliyor olmasıdır. İş sağlığı ve güvenliği açısından DC akım tehlikeli olduğundan yüksek güvenliğe sahip, yeterli çapta kabloların kullanılması gerekmektedir. Bu kabloların yüksek sıcaklık, yağmur, rüzgâr, kar gibi olumsuz hava koşullarından etkilenmemesine özen gösterilmelidir.

Kablolar şarj kontrol cihazları ile paneller, paneller ile diğer paneller arasındaki bağlantıları sağlarlar. Fotovoltaik panellere kablolar, konnektör adı verilen ekipmanlar ile bağlanır. Kablolar için gerekli olan tüm özellikler konnektörler için de gereklidir. Günümüzde fotovoltaik panellerde Mc3 ve Mc4 tipi konnektörler kullanılmaktadır.

3.4. Fotovoltaik Sistem Tasarımı

Fotovoltaik sistemler, sürekli sabit enerji üreten sistemler değildir. Geceleri enerji üretemeyen fotovoltaik sistemlerin, enerji üretim profili gün ve yıl içinde farklılıklar gösterir. Bu sebeple bu sistemler, enerji depolayan ya da enerji üreten diğer sistemlerle birlikte tasarlanırlar. Sadece gündüz vakitlerinde enerji üreten ve tüketen, enerji depolamayan, diğer sistemlerle entegrasyonu olmayan fotovoltaik sistemler nadiren bulunmakta olup, bu sistemlerin ürettikleri ihtiyaç fazlası elektrik değerlendirilememektedir. Fotovoltaik sistemler; batarya grupları ile birlikte tasarlanarak elektrik üretmedikleri vakitlerde dahi enerji sağlayabilirler. Elektrik şebekesiyle bağlantılı şekilde tasarlanıp, ihtiyaç duyulan zamanda şebekeden elektrik ihtiyacını karşılayabilir ve fazla enerji üretmeleri halinde bu enerjiyi de şebekeye iletebilirler. Bunların dışında diğer yenilenebilir

enerji kaynakları ile birlikte tasarlanarak ihtiyaç duyulan yüklere kesintisiz enerji sağlayabilirler.

3.4.1. Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemler

Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler, mevcut elektrik şebekesinden de faydalanan, yaygın olarak kullanılan fotovoltaik sistemlerdir. Elektrik şebekesinden faydalanmaları sayesinde, yüklerin her zaman enerji ihtiyaçları karşılanır, yük ihtiyacının her zaman karşılandığı bu sistemlerin tasarımı diğer sistemlere göre daha kolaydır. Bu sistemlerde gün boyunca üretilen elektrik ile yüklerin enerji ihtiyacı karşılanır ya da üretilen enerji elektrik şebekesine yöneltilir. Şebekeye yönlendirilen elektrik, elektrik dağıtım şirketi tarafından "aylık net ölçümlene" denilen bir düzenleme ile satın alınır (EPDK, 2019). Bu sistemlerde, panellerin yeterli güç üretmediği bulutlu günlerde ve hiç elektrik üretilmeyen gece vakitlerinde elektrik ihtiyacı şebekeden karşılanır.

Şebeke bağlantılı sistemlerde, panellerin, sistemin güç ihtiyacının tamamını karşılaması gerekmediğinden, bir iki panelle bile şebeke bağlantılı sistem tasarlanarak elektrik üretilebilir ve elektrik faturasının düşmesi sağlanabilir (Çilli, 2020). Şebeke bağlantısı olmayan sistemlerde, fotovoltaik panellerin enerji verimini etkileyen tüm durumlar, yüklerin çalışmasını etkilediğinden bu sistemlerin iyi analiz edilerek projelendirilmesi gerekirken, şebeke bağlantılı sistemler daha esnek şekilde tasarlanabilmektedir. Şebeke bağlantısı olmayan sistemler, yüklerin ihtiyaç duyduğu enerjiyi sürekli karşılamak durumunda olmalarına rağmen bu sistemlerde böyle bir gereksinim bulunmaması sebebiyle esnek tasarımlar gerçekleştirilebilmektedir.

Fotovoltaik paneller DC akım üretir, üretilen bu akımın şebekeye verilebilmesi için dönüştürücülere (inverter) ihtiyaç duyulur, Şekil 3.17.'de görüleceği gibi bu sistemlerin en önemli unsuru fotovoltaik paneller ve dönüştürücülerdir. MPPT ya da PWM kontrol algoritmalarını kullanan dönüştürücüler ve paneller ile bu sistemler kolaylıkla tasarlanabilir. Bu sistemlerin en önemli özelliği enerji depolama ihtiyacının bulunmamasıdır. Şebeke bağlantısı sebebiyle, paneller yardımıyla üretilen enerjinin depolanmasına ihtiyaç duyulmaz. Şarj ve deşarj döngülerinin akülerin ömrünü, performansını ve verimini etkilemesi sebebiyle pahalı bir ekipman olan akülerle tasarlanacak sistemlerin çok daha dikkatli tasarlanmaları

gerekirken, akü ihtiyacı bulunmayan şebeke bağlantılı sistemler kolaylıkla tasarlanabilmektedir. Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerde; dönüştürücü ve fotovoltaik paneller ana ekipmanlar olup, sistemin verimini arttırmak için optimizeler, şarj kontrol cihazları, mikro dönüştürücüler, doğrultucular ve güneş takip sistemleri kullanılabilir.



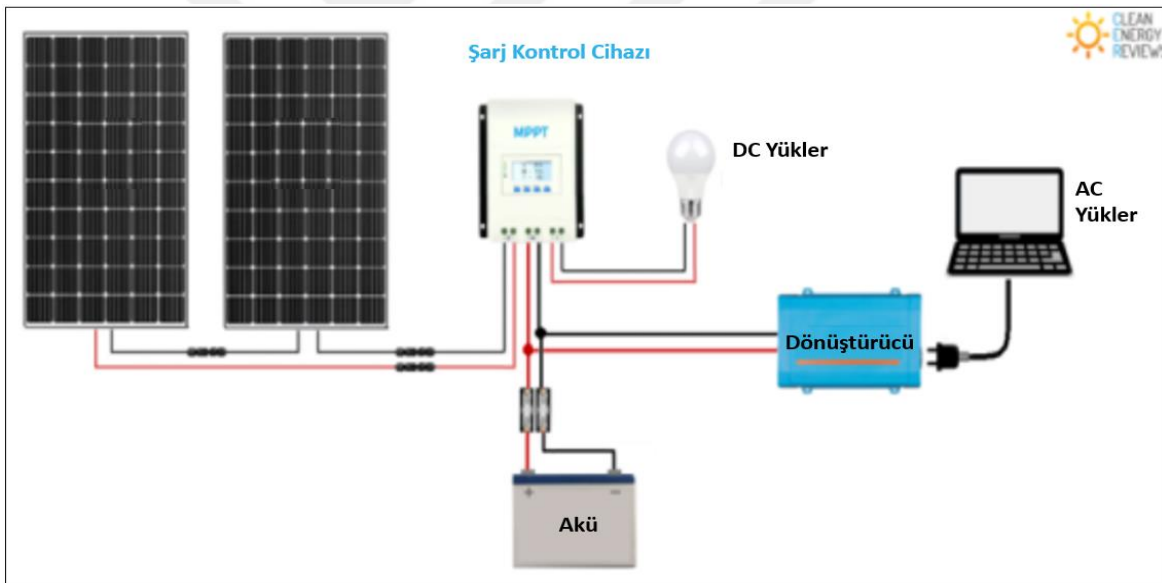
Şekil 3.17. Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem mimarisi (Newkirk, M. 2016)

Şebekeden alınan ve verilen elektrik, iki ayrı sayaç ile belirlenir. Ay sonunda yapılan hesaplamalara göre sistem ekside ise az da olsa elektrik faturası ödenirken, artıda ise dağıtım şirketi tarafından fazla üretilen enerji için sistem sahibine ödeme yapılır. Fotovoltaik sistemde doğabilecek arızaların elektrik şebekesinin diğer abonelerini etkilememesi için, gerilim/frekans değerlerinin bozulması durumunda, sistemi izole eden emniyet ve kontrol cihazlarının bulunması da önemlidir. Bu cihazlar genellikle şebeke uyumlu sistemler için tasarlanan dönüştürücülerin içinde bulunmaktadır. Bu sistemlerin en önemli dezavantajı ise elektrik şebekesi enerji üretmediği hallerde güvenlik gereği kendilerini kapatmaları ve yükleri beslememeleridir.

3.4.2. Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler

Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler daha çok elektrik şebekesi bulunmayan bölgelerde enerji ihtiyacını karşılamak için kurulurlar. Elektrik şebekesinin bulunmadığı kırsal bölgelerde, dağlık alanlarda, deniz fenerlerinde, gemilerde bu şekilde elektrik üretilmektedir. Güneş sadece gündüz enerji üretirken, yükler günün her saatinde enerjiye ihtiyaç duyacağından bu sistemlerin gündüz yüklerle yetecek kadar enerji üretmesinin

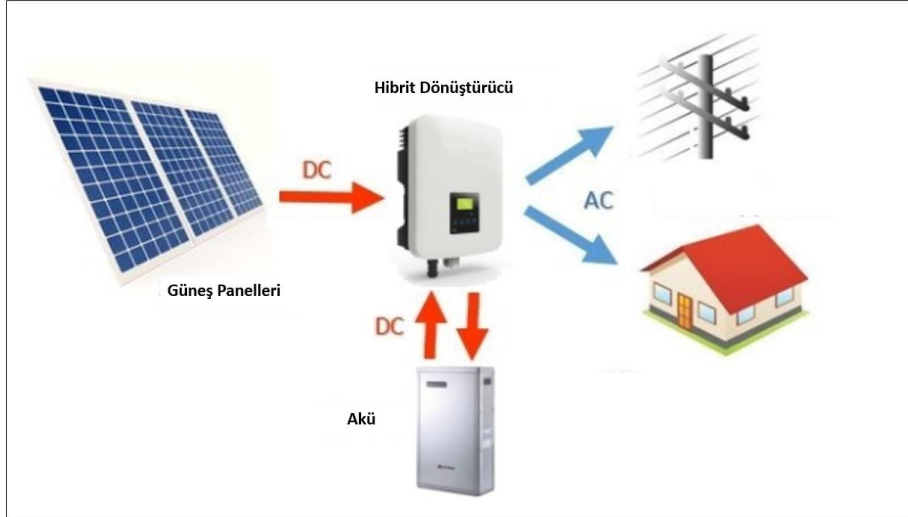
yanında batarya sistemlerinde enerjinin depolanmasını da sağlamaları gerekir. Bu sebeple sistemlerin tasarımı, şebeke bağlantılı sistemlere göre daha zordur. Panel sayısının, enerji verimini etkileyen unsurların belirlenmesi ve verimi artırıcı yöntemlerin uygulanması bu sistemler için büyük önem taşımaktadır. Akülerin maliyeti, hassas yapıları sebebiyle bu sistemler için panel ve akü seçimi oldukça önemlidir. Panellere ve akülere zarar vermeden elektrik üretecek ve tüketecek şekilde tasarlanması gereken bu sistemlerin en önemli iki unsuru fotovoltaik paneller ve akülerdir. Akülerin verimli bir şekilde şarj edilebilmesi için ise bu sistemlerde şarj kontrol cihazlarının bulunması gerekmektedir. Çoğu elektrikli alet alternatif akımla çalıştığından, doğru akımı alternatif akıma dönüştüren dönüştürücüler de bu sistemlerin önemli bir parçasıdır. Bu sistemlerde kullanılan ve verimin artmasını sağlayan diğer ekipmanlar ise optimizör, mikro dönüştürücüler ve güneş takip sistemleridir. Şekil 3.18.'de şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem örneği yer almaktadır.



Şekil 3.18. Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem mimarisi (Newkirk, M. 2016)

3.4.3. Hibrit fotovoltaik sistemler

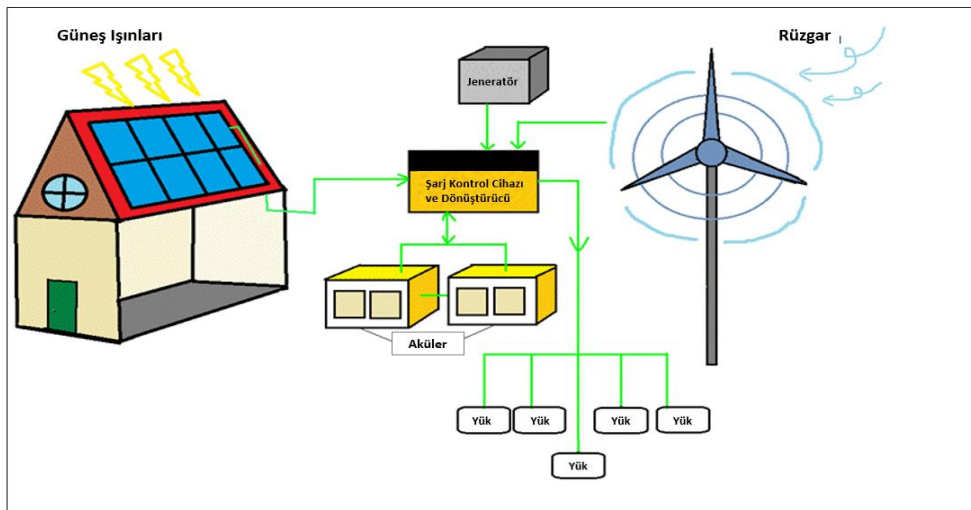
Hibrit sistemler, şebeke bağlantılı sistemler ile şebeke bağlantısı olmayan sistemlerin birleştirilmiş halidir. İki ayrı sisteme uygun olan merkezi dönüştürücü kullanılarak, sistemin elektrik arızası yaşandığında dahi enerji üretmesi ve tüketmesi sağlanır. Bu sistemlerde; paneller, aküler, şarj kontrol cihazları, iki ayrı sisteme uyumlu dönüştürücü bulunur. Şekil 3.19.'da hibrit sistem örneği yer almaktadır.



Şekil 3.19. Hibrit fotovoltaik sistem mimarisi (Newkirk, M. 2016)

3.4.4. Karma sistemler

Bu sistemlerde elektrik, farklı enerji üreten sistemler tarafından birlikte üretilir. Rüzgar türbini, dizel motor, yakıt pilleri ile fotovoltaik sistemlerin enerji üretmediği zamanlarda yüklerin enerji ihtiyacının karşılanması sağlanır. Rüzgar türbinin ürettiği enerji, rüzgar hızına bağlı olduğundan, bu yolla üretilen enerjinin profili de düzensizlikler içermektedir. Farklı sistemlerin birlikte enerji üretecek şekilde dizayn edilmesi ile enerji ihtiyacının kesintisiz bir şekilde karşılandığı bu sistemlerin tasarımı karmaşık yapıları sebebiyle daha zordur. Şekil 3.20.'de rüzgar türbini ve fotovoltaik panellerle oluşturulan karma sistem yer almaktadır.



Şekil 3.20. Karma sistem mimarisi (Anonim, 2016)

3.5. Radyo Ağ Teknolojisi

Yeni teknolojilerin hayatımıza girmesi, yeni teknolojilere uyum sağlanması kolay olmamasına rağmen, birçok teknolojik ürünün aksine akıllı telefonlar kısa bir sürede hayatımıza girmişlerdir. Yediden yetmişe her yaş grubundaki insanın rahatlıkla uyum sağladığı bu teknolojik gelişme, çağımız insanının iletişim ve haberleşme ihtiyacının boyutu konusunda bizlere ışık tutmaktadır. Uzak mesafeler ile önce harflerle, ardından ses ile haberleşme imkanı bulan insanlar günümüzde videolarla, dosyalarla, bilgilerle ve internet ile haberleşme olanağına sahiptir. Bu imkanlar yeni iş modellerine, bilgi ve deneyim aktarımına kapı aralamış, birçok sınırı ortadan kaldırmıştır. İnsanlar arasında, topluluklar arasında kurulan bu paylaşım; günümüzde toplumlar ve makineler arasında da kurulmakta bu durum sosyolojiden, endüstriye kadar birçok alanda uygarlığa yeni fırsatlar sunmaktadır. Akıllı makineler, yüksek kapasiteli bilgisayarlar ve bunlar arasında gerçekleşen hızlı iletişim, geçmiş yüzyıllarda imkansız gibi görünen birçok şeyi mümkün kılacak, yeni gelişmelerin kapısını aralayacaktır.

İletişim teknolojilerinin geldiği bu noktada; bilgi aktarımı ve dosya paylaşımı büyük önem taşımaktadır. Aktarılan bilgiler kadar, bu bilgilerin işlenmesi, hızlı iletimi ve depolanması da büyük öneme sahiptir. Hızlanan ve artan bilgi akışı için en önemli unsurlardan birisi de baz istasyonlarıdır. Baz istasyonları; sesin ve görüntünün elektromanyetik dalgalar aracılığıyla iletilmesini sağlayan, elektromanyetik dalgalar aracılığıyla internet erişimini mümkün kılan sistemlerdir. Alıcı, verici ve güç ünitelerinden oluşan baz istasyonları, sinyalleri yaymak için kule, direk, çatı, bina yüzeyleri ve kabinlere monte edilirler. Mobil iletişimin en önemli unsurlarından biri olan baz istasyonlarının kapsama alanı dışındaki bölgeler ile mobil iletişim kurmak mümkün değildir (BTK, 2020).

Kamusal bir hizmet olan iletişim, aynı zamanda birçok temel hak ve özgürlüğün de temel bir bileşenidir, bu sebeple dünyada iletişim kurulabilen alanların artırılması büyük önem taşımaktadır. Tüm dünyada bilgi ve iletişim ağlarının genişlemesine ve mobil iletişimin kapsamının artmasına duyulan ihtiyacın sonucunda ülkemizde ve dünyada baz istasyonu sayıları giderek artmaktadır. Bununla birlikte, akıllı telefonların hayatımıza girmesi, bilgi ve dosya paylaşımının artması sebebiyle mevcut baz istasyonlarının kapasitesi yeterli olmamakta, mobil iletişimin sağlandığı, baz istasyonları kurulu alanlarda dahi yeni

baz istasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple, günümüzde, daha önce mobil iletişim kurulmayan coğrafi bölgelerde mobil iletişimi mümkün kılmak için baz istasyonlarının kurulmasının yanında, mevcut iletişimin kalitesini ya da kapasitesini arttırmak için baz istasyonları da kurulmaktadır. Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı tarafından yapılan açıklamaya göre Türkiye genelinde yaklaşık 190000 kurulu baz istasyonu bulunmaktadır. Dünya genelinde sadece 4G teknolojisine sahip baz istasyonu sayısı 6 milyon civarındadır (Chi, 2019).

Bilgi ve iletişim teknolojileri, dünyada yıllık üretilen elektrik enerjisinin %3'ünü tüketmekte, yıllık karbon emisyonunun yüzde %2'sine yol açmaktadır. Bu tüketimin yüzde %7'sine ise mobil iletişimin tüm unsurlarını içinde barındıran radyo ağ ekipmanları sebep olmaktadır. Radyo ağ ekipmanlarının tükettiği elektrik enerjisinin %10'u kullanıcı terminalleri, geri kalanı ise baz istasyonları tarafından tüketilmektedir (Ayang, A. vd., 2016). Baz istasyonlarının nicelikleri ve küresel enerji gereksinimleri birlikte düşünüldüğünde; baz istasyonlarının iyi analiz edilmesinin, baz istasyonlarında enerji tasarruf çalışmalarının yürütülmesinin ve bu istasyonlarının enerji gereksinimlerinin sürdürülebilir enerji kaynakları ile karşılanmasının taşıdığı önem daha iyi anlaşılacaktır. Bu sayede fosil yakıtlar ve çevreye zarar veren enerji kaynakları aracılığıyla elde edilen elektriğe duyulan gereksinim azaltılarak, daha ucuz ve çevre dostu enerji kaynakları ile iletişim hizmetinin sürekliliği sağlanacaktır.

Küresel iletişim ve haberleşmenin, dünyanın her yerinde sürekliliğinin sağlanması konusunda en önemli engellerden biri, dünyanın her bölgesinde elektrik şebekesinin bulunmuyor olmasıdır. Bu durumun başlıca sebepleri coğrafi engeller, teknolojik yetersizlikler, ekonomi ve enerji kaynaklarının yetersizliğidir. Bu bölgelerde iletişim hizmeti sunabilmek için GSM operatörleri, dizel jeneratörler aracılığıyla elektrik üreterek baz istasyonlarının güç ihtiyaçlarını karşılamaktadırlar. Karbon salınımını arttırarak çevreye zarar veren bu durum, artan benzin fiyatları ve yüksek jeneratör fiyatları sebebiyle gün geçtikçe daha maliyetli bir hal almaktadır (Gadze, J.D., vd., 2016). Baz istasyonlarında enerji tasarrufuna yönelik çalışmaların artması, bu çalışmalarda başarı sağlanması ve bu sistemlerin enerji ihtiyaçlarının yenilenebilir enerji kaynakları aracılığıyla karşılanması hem çevreye verilen zararı azaltacak, hem de GSM operatörlerinin maliyet kaynaklı endişelerini ortadan kaldırarak, daha önce baz istasyonu kurulumu gerçekleştirilmeyen ücra köşelerde

dahi baz istasyonu kurulmasının önünü açacaktır. Böylelikle, çeşitli engeller sebebiyle dünyadan uzaklaşan bölgelerde yaşayan insanlar küresel iletişime dahil olup, tüm dünya ile etkileşim içinde olabileceklerdir.

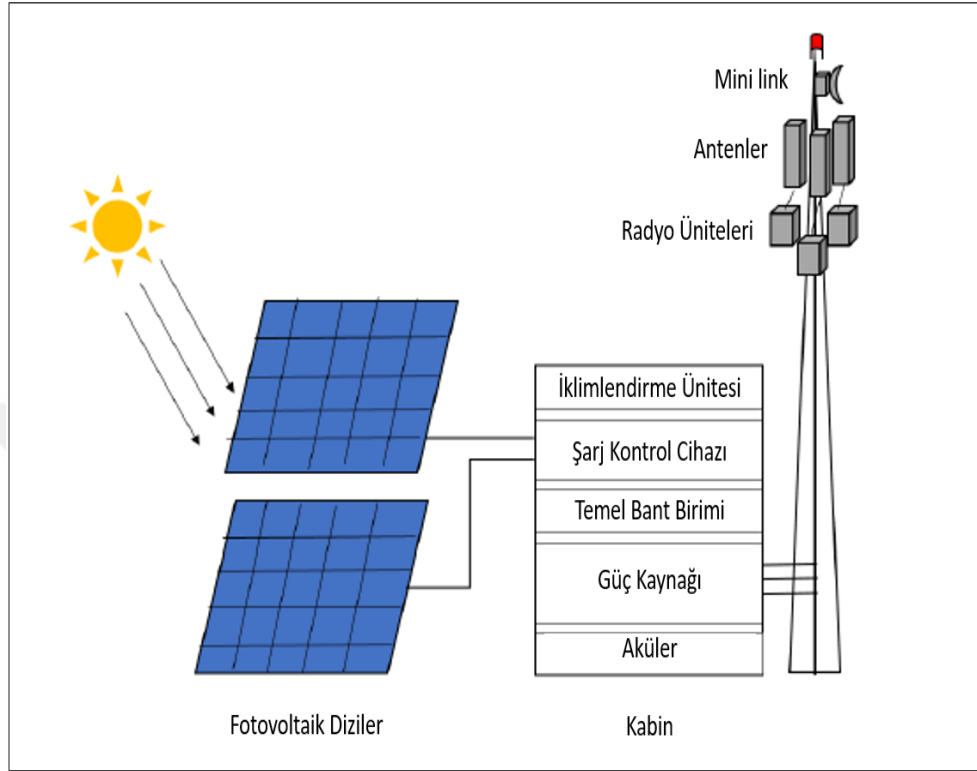
Baz istasyonlarında bulunan ekipmanların tespit edilerek, bu ekipmanların enerji tüketimine ilişkin bilgilerin saptanması, bu ekipmanların enerji tüketimini azaltmaya yönelik planlamaların yapılması oldukça önemlidir. Enerji tasarrufuna ilişkin bu çalışmaların, enerjinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasına ilişkin çalışmalarla birlikte yürütülmesi, enerjinin ve kaynakların verimli kullanılması açısından önemlidir. Birlikte yürütülecek çalışmalar, sürdürülebilir enerji kaynaklarının ilk kurulum maliyetlerinin ve alan gereksinimlerinin azaltılması konusunda katkı ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı konusunda motivasyon sağlayacaktır.

Rüzgar enerjisi, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi sürekliliği olmayan bir yapıya sahiptir. Elektrik üretimindeki bu düzensizliklerin, coğrafi ve matematiksel analizlerinin doğru yapılmaması, elektrik ihtiyacının sürdürülebilir enerji kaynakları ile karşılanamamasına sebep olmaktadır. Bu yüzden doğru analiz çalışmaları, elektrik ihtiyacının karşılanması açısından oldukça önemlidir.

Doğru analiz çalışmaları yürütülmemesi, ihtiyaç duyulan elektriksel gücün karşılanabilmesi için gereğinden fazla enerji üreten panel ve türbin kullanılmasına da yol açmaktadır. Sistemlerde enerji tasarrufuna ve sistemlerin enerji ihtiyaçlarının sürdürülebilir enerji kaynaklarıyla karşılanmasına yönelik çalışmalar birlikte yürütüldüğünde, sürdürülebilir enerji kaynaklarındaki kesintili ve düzensiz özellik gösterebilen enerji üretiminin yol açtığı zorluklar aşılabılır ve ihtiyaç duyulan enerji hem verimli bir şekilde üretilirken hem de verimli bir şekilde tüketilebilir.

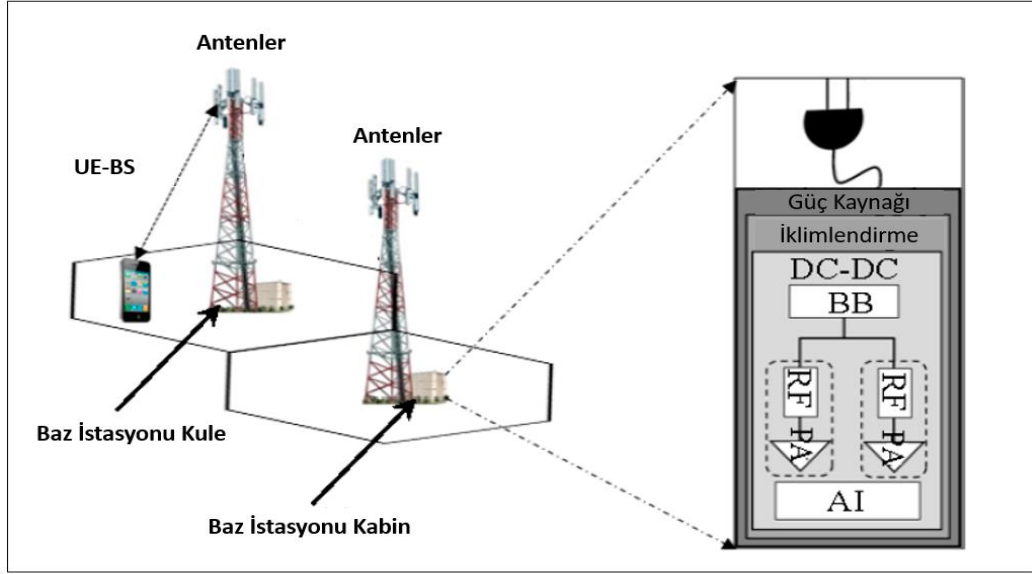
Baz istasyonları tarafından tüketilen enerjinin profilini doğru oluşturabilmek, Şekil 3.21.'de örneği görülen fotovoltaik paneller aracılığıyla tasarlanacak sistem için oldukça önemlidir. Bu enerjinin profili baz istasyonlarında bulunan ekipmanların enerji ihtiyaçlarına bağlıdır. Ekipmanların enerji gereksinimi iklim ve doğa şekilleri başta olmak üzere coğrafi unsurlara, baz istasyonu aracılığıyla sağlanan servisin yoğunluğuna bağlıdır (Görgün, H., vd., 2015). Baz istasyonlarında gereksinim duyulan ekipmanların incelenmesi;

baz istasyonu kurulumu yapılan bölgede ihtiyacı karşılayacak mobil iletişim hizmetlerinin verilmesi ve ekipmanların tükettikleri enerjilerin tespiti açısından önem taşımaktadır.



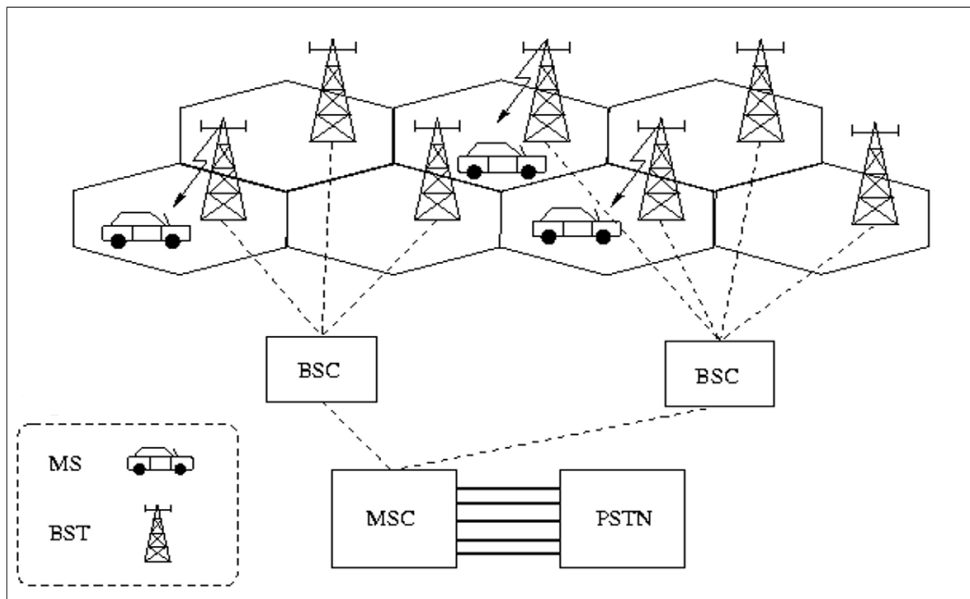
Şekil 3.21. Fotovoltaik baz istasyonu (Prasad ve Bjering, 2018)

Baz istasyonlarının kulelerine yerleştirilen, farklı yönleri gören antenler aracılığıyla baz istasyonları ve mobil cihazlar arasında sinyal alışverişi olmaktadır. Baz istasyonun sinyal alıp verebileceği bu alan baz istasyonunun kapsama alanını oluşturur. Baz istasyonlarının konumu, antenlerin montaj açıları ve gücü, ilgili baz istasyonunun ne kadar geniş bir alanda kapsama sağlayacağını ve bu kapsamanın şiddetini belirlemektedir. Genellikle baz istasyonlarına antenler 3 farklı yönde 120 derecelik açılarla yerleştirilir. Konuma ve ihtiyaca yönelik farklı montaj senaryoları olsa da, 3 farklı yönde 120 derecelik açılarla antenlerin monte edildiği bu sahalarda kapsama alanı altıgen hücre şeklinde modellenmektedir. Altıgen hücrelerin birleşmesi ile arı peteği görünümüne sahip geniş bir iletişim ağı meydana gelmektedir. Baz istasyonlarının kurulumu, bu geniş ağın içinde sürekli ve kesintisiz iletişimin sağlanması dikkatli bir şekilde yerine getirilmeli, arı peteği görünümlü iletişim ağında kapsama boşluğu bulunmamalıdır. Şekil 3.22.'de hücre yapısı ve baz istasyonu mimarisi görülmektedir.



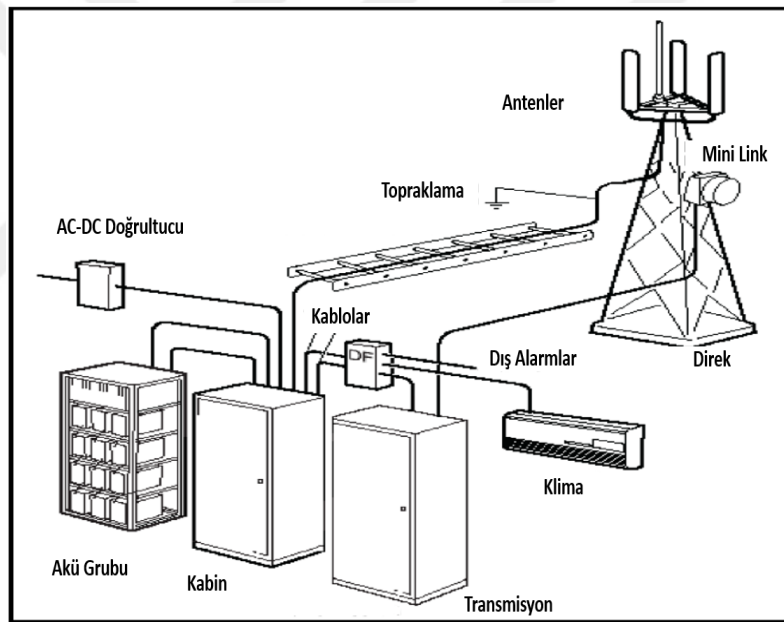
Şekil 3.22. Baz istasyonları kule ve kabin mimarisi (Alsharif, M.H., 2017)

Cep telefonları en iyi sinyali veren baz istasyonuna sinyal göndererek bu baz istasyonu ile iletişime geçer, bu baz istasyonu cep telefonu kullanıcısının konum bilgilerini santrale iletir. Santrallerde tüm kullanıcıların konum bilgileri bulunmaktadır. Kullanıcı arama yapmak istediğinde, aranan kişinin konum bilgilerine de sahip olan santral aranan kişiyi kapsayan baz istasyonu ile iletişime geçer. Bu ikinci baz istasyonu aranan kişi ile sinyal alışverişinde bulunarak konuşmanın gerçekleşmesini sağlar. Bu yapıya ilişkin görsel Şekil 3.23.'de yer almaktadır.



Şekil 3.23. Hücresel ağ topolojisi (Walters, L.O, ve Kritzinger, P.S., 2000)

Mobil iletişimin sağlanmasında kullanıcılar ve baz istasyonları arasında, bir de baz istasyonları ile diğer baz istasyonları, santraller, veri merkezleri arasında etkileşim kurulur. Baz istasyonlarının kullanıcılar ile etkileşimini; 2G, 3G, 4G dijital üniteleri, RU adı verilen radyo üniteleri ya da RRU adı verilen uzak radyo üniteleri ve antenler sağlar. Diğer baz istasyonları ve santraller ile etkileşim ise transmisyon ekipmanları ve mini link antenleri ile sağlanır. Bu temel ekipmanlar, istasyonun sürekli hizmet vermesinde kullanılan mobil iletişimin ana ekipmanlarıdır. Bu ekipmanların yanında sistemde bulunan aküler, doğrultucular, alarm kutuları, klima ve diğer ekipmanlar ise sistemin kalite ve performans sürekliliğine katkı sağlayan yardımcı ekipmanlardır (Prasad ve Bjerling, 2018). Transmisyon üniteleri ve radyo üniteleri ayrı kabinlerde bulunabileceği gibi tek bir kabinde de bulunabilirler. Baz istasyonu ve ekipmanlarına ilişkin şema Şekil 3.24.'te yer almaktadır.



Şekil 3.24. Baz istasyonu ve ekipmanları (Ericsson, 2010)

3.5.1. Radyo ağ ekipmanları

Baz istasyonlarının kullanıcılar ile etkileşimini sağlayan kısımdır. Radyo üniteleri ve dijital ünitelerden oluşur. Dijital üniteler sistemin vereceği hizmete ilişkin ara yüzleri, yazılımları ve donanımları içeren kısımdır. Her iletişim teknolojisinin dijital ünitesi farklı olup, baz istasyonunun hangi teknolojide iletişim hizmetini vereceğini dijital üniteler belirler. 2G teknolojisi, kullanıcılar arasında seslerin aktarılmasına yönelik bir teknolojidir.

Bu teknolojinin ardından daha hızlı veri aktarımı ile kullanıcılar arasında görüntülü konuşmayı mümkün kılan 3G teknolojisi hayatımıza girmiştir. Son olarak da ülkemizde LTE (4,5G) teknolojisi aktif olarak kullanılmaktadır. Bu teknoloji diğerlerine göre daha hızlı veri iletimini mümkün kılarak bilgilerin, dosyaların en kısa sürede aktarımını ve hızlı internet bağlantısını mümkün kılar. Başta Çin olmak üzere dünyanın birçok ülkesinde kullanılmaya başlayan 5G teknolojisinin tüm dünyada yaygınlaşması, veri iletim kapasitesini ve hızını artırarak mesafeleri ortadan kaldıracaktır. Ülkemizde baz istasyonlarında 2G, 3G, 4,5G teknolojilerinin dijital üniteleri kullanılmakta, bu teknolojilerin sağladığı ses, video ve internet hizmetleri kullanıcılara sunulmaktadır.

Yeni nesil iletişim teknolojileri, eski nesil teknolojilere göre çok daha gelişmiş teknolojilerdir. Yeni teknolojileri sunan ekipmanların eski teknolojileri sunan ekipmanlara göre çok daha pahalı olması ve binlerce baz istasyonunda kısa bir sürede kurulum ve montaj çalışmalarının yürütülmesinin zorluğu sebebiyle eski nesil iletişim teknolojilerine sahip ekipmanlar uzun bir süre daha baz istasyonlarında kullanılacaktır. Mobil operatörler sundukları mobil iletişim hizmetini bu teknolojiler arasında paylaştırarak, baz istasyonu ekipmanlarını verimli ve ekonomik kullanmakta, sundukları mobil hizmetin kalitesini arttırmaktadırlar. Örneğin, sesli arama öncelikle 2G teknolojisine sahip ekipmanlar aracılığıyla sağlanırken, 3G ve 4,5G teknolojisine sahip ekipmanların kapasitesi sesli arama hizmeti için meşgul edilmeyerek yüksek teknolojilere sahip ekipmanların kapasiteleri daha verimli kullanılmaktadır.

3.5.2. Dijital üniteler

Dijital üniteler, baz istasyonlarında iletişim teknolojilerine ait yapılardır. Ülkemizde 2G, 3G ve LTE dijital üniteleri baz istasyonlarında kullanılmaktadır. Baz istasyonunda tek bir dijital ünite ile iletişim hizmeti sunulabileceği gibi, yüksek kapasiteye sahip, kaliteli mobil iletişim hizmeti için dijital üniteler birlikte kullanılmaktadır. Enerji kesintisi başta olmak üzere olumsuz durumlarda dahi servis sürekliliğinin sağlanması, mobil iletişimin başlıca gerekliliklerindedir. Farklı teknolojilerin bir arada bulunduğu baz istasyonlarında, sistemde bulunan akülerin enerji seviyelerinin belirlenen eşik değerlerin altına düşmesi halinde sırasıyla LTE ve 3G ekipmanlarının enerjisi kesilerek, mobil arama hizmetinin sürekliliği sağlanabilmektedir.

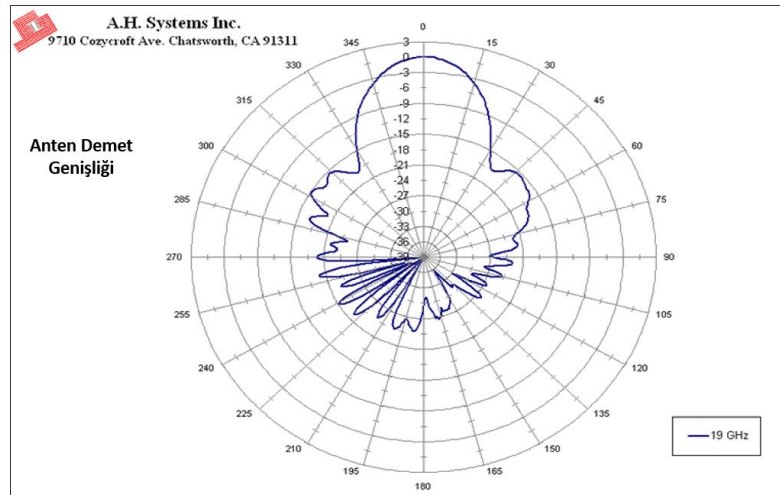
Dijital üniteler, baz istasyonunun kapasitesini (aynı anda kaç kişiye hizmet vereceğini) belirleyen yapılardır. Dijital ünitelerin kapasitesi, baz istasyonunun kapsama alanındaki kişilerden kaçının aynı anda sesli konuşma, görüntülü konuşma ve mobil internete bağlanacağını belirler. Bu yüzden baz istasyonu kurulacak bölgede bulunan insanların ve mobil cihazların sayısı, kullanıcıların sesli konuşma, görüntülü konuşma ve internet ihtiyaçları belirlenerek baz istasyonları kurulmakta ve baz istasyonlarına dijital üniteler eklenmektedir. Dijital ünitelerin hiçbir kullanıcıya hizmet vermediği anda dahi tükettiği sabit enerjinin yanında, aynı anda hizmet verdiği kullanıcı sayısı ile orantılı değişken bir enerji tüketimi de mevcuttur (Görgün, H., vd., 2015). Bu sebeple dijital üniteler, tam kapasite servis sağladıkları durumlarda maksimum düzeyde enerji tüketirler. Günün hangi saatlerinde hangi servislerin kullanıldığı, yılın hangi aylarında ve günlerinde hangi servislerin kullanıldığı incelenerek dijital ünitelerin saatlik, günlük ve aylık elektrik tüketim miktarları öngörülebilir. 2G, 3G ve LTE dijital ünitelerinin bir arada bulunduğu kabinlerde bu ihtiyaçlara yönelik analizler yapılarak, çeşitli periyotlarda LTE ya da 3G dijital ünitelerin deaktivasyonu gerçekleştirilerek enerji tasarrufu gerçekleştirilebilir. Mobil trafiğin düşük olduğu gece saatlerinde 3G dijital ünitesinin deaktivasyonu sayesinde görüntülü konuşmaların LTE dijital ünitesi üzerinden gerçekleştirilmesi sağlanabilir. Bu durumda veri trafiğinin az olduğu saatlerde, aynı kalitede servis vermeye devam edilirken enerji tasarrufu da gerçekleştirilebilecektir. Dijital ünitelerin bir ucu radyo ünitelerine (RU) ya da uzak radyo ünitelerine (RRU) bağlıdır. Diğer ucu ise baz istasyonlarının diğer baz istasyonları, santral ve veri merkezi ile iletişimini sağlayarak geniş bir alanda veri iletimini gerçekleştiren transmisyon ünitesine bağlıdır.

3.5.3. Radyo üniteleri ve antenleri

Radyo üniteleri, kullanıcılar ve dijital ünite arasında sinyal iletimini sağlayan ekipmanlardır. Dijital ünitelerdeki veriler, radyo üniteleri aracılığıyla yüksek frekanslı sinyallere dönüştürülerek antenlere iletilir. Aynı şekilde kullanıcıların mobil cihazlarından antenlere iletilen sinyaller, radyo üniteleri yardımıyla dijital ünitelere iletilir. 2G, 3G ve LTE teknolojilerinin ayrı ayrı radyo üniteleri bulunur, bu üniteler ilgili dijital ünitelere ve antenlere bağlanır. Dijital üniteler ve antenler arasında bulunan radyo üniteleri, konumları sebebiyle farklı şekilde isimlendirilmektedir. Radyo üniteleri (RU) kabin içinde dijital ünitelerin yanında bulunur ve çift eksenli kablolarla antenlere bağlanırken, direklerle monte

edilen uzak radyo üniteleri (RRU) antenlerin yakınında bulunur ve bu ünitelerin dijital üniteler ile bağlantıları fiber optik kablolar ile sağlanır. Uzak radyo ünitelerinde, dijital ünite ile bağlantının fiber optik kablolar ile sağlanması ve ünitelerin antenlere yakın olması sebebiyle güç kaybı daha az olup, sinyal iletimi daha verimli bir şekilde gerçekleştirilmektedir (Ayang, A.vd., 2016).

Radyo ünitelerine bağlanan iki tip anten vardır. İlki 360° açı ile sinyalleri her yöne iletirken, diğer tip antenler ise monte edildiği yönde sinyal iletimini gerçekleştirmektedir. Radyo üniteleri, sinyalleri belli bir güç değerinde antenlere iletmektedir. Antenlere ulaşan bu sinyaller; belli bir yönde sinyal ileten antenler ile daha uzak mesafelere iletilmektedir. Monte edildiği açısal aralıkta sinyal ileten antenler birden fazla kullanılarak ve farklı yönlerde monte edilerek tüm yönlerde kapsama sağlarlar. Antenlerin 120° açısal aralıklarla konumlandırıldığı montaj baz istasyonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durumda her anten 120°lik dairesel alan içinde sinyal iletimini gerçekleştirir. Baz istasyonu kurulan bölgenin ihtiyaçlarına göre, daha fazla sayıda antenin daha dar açısal aralıklarla monte edilmesi ile daha geniş bir dairesel alanda kapsama sağlanabilir. Bir başka ifade ile aynı güç çıkışına sahip antenler ne kadar geniş açısal aralıkta sinyal yayar ise antenlerin oluşturduğu sistemin kapsadığı dairesel alanın çapı küçülecektir. Şekil 3.25.'te bir antenin sinyal iletebildiği dairesel aralık ve mesafeler ölçeklendirilmiştir. Bu anten 30°lik daire dilimi içinde servis sağlamak için kurulduğunda 36 birim çapında bir daire dilimini kapsayabilmekte, 60°lik daire dilimi içinde servis sağlamak için kurulduğunda 24 birim çapında bir daire dilimini kapsayabilmektedir.



Şekil 3.25. Antenin demet genişliği (AH Systems, 2020)

Bölgelerin coğrafi özellikleri, nüfus yoğunlukları ve bu nüfusun ihtiyaçları göz önünde bulundurularak anten montajları ve montaj açıları belirlenmektedir. Örneğin yamaca kurulan bir baz istasyonunda, her yöne anten montajının yapılmasına gerek yoktur. Yamaçtan bakıldığında daha dar bir açı içinde yerleşim var ise bu açı gözetilerek montaj yapılabilir. Bir dağın eteklerine kurulan bir köy, dağın zirvesini merkez alan 120°lik bir daire diliminin içinde konumlanmışsa, bu 120° açı gözetilerek anten montajı yapılmalıdır. Bu 120°lik daire dilimi içinde; 30° açısal aralık ile 4 anten montajı yapılabileceği gibi, 60° açısal aralık ile 2 antenin de, 120° açısal aralık ile tek bir antenin de direğe montajı gerçekleştirilebilir. 30 ° açı ile monte edilen 4 anten, diğer açısal aralıklarla monte edilen antenlere göre daha geniş bir daire dilimi içinde kapsamayı sağlayacaktır. Sinyal iletimine ilişkin montaj açılarıyla birlikte bir diğer önemli unsur radyo ünitelerinin çıkış gücüdür. Radyo ünitesinin çıkış gücü arttıkça daha uzak mesafelere sinyal iletimi gerçekleştirilebilmektedir.

Mobil operatörler, Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu tarafından lisanslanan frekansları kullanarak iletişim hizmetini yerine getirirler. Ülkemizde lisanslı 800 MHz, 900 MHz, 1800 Mhz, 2100 MHz, 2600 MHz frekansları mobil haberleşmede kullanılmaktadır. Tahsis edilen bu frekanslardan, yapılan ihaleler ile mobil operatörlere ihtiyaçları doğrultusunda bant genişliği tahsis edilir. Mobil operatörler, belirtilen bu frekanslarda bant genişliği satın almış ise hizmet verebilmektedir. 1000 MHz'nin altındaki frekansların dalga boyu yüksek, frekansları düşüktür. Bu frekansların yüksek dalga boyları sayesinde geniş bir alanda kapsama sağlanabilmektedir. Yüksek frekansların ise kapsama alanları düşük olmasına rağmen kapasiteleri yüksektir. Yüksek frekanslar aracılığıyla daha geniş bir frekans aralığı kullanılarak, daha yüksek kapasite ve hızlarda hizmet verilmektedir. Mobil operatörler, stratejilerine göre düşük frekansları 2G teknolojisine tahsis edip 2G teknolojisinde geniş bir alanda kapsama sağlamayı tercih edebilecekleri gibi, şehirlere göre daha az mobil trafiğin olduğu kırsal alanlarda, 3G ve 4G teknolojileri için düşük frekansları tahsis ederek geniş alanlarda düşük kapasiteli kapsamayı da tercih edebilmektedir.

Radyo üniteleri dijital verileri belirli frekanslara dönüştürerek, filtreleyerek antenlere iletirler. Radyo ünitelerinin 800 MHz, 900 MHz, 1800 Mhz, 2100 MHz, 2600 MHz frekansta hizmet veren modelleri mevcuttur. İlgili bölgede, ihtiyaç duyulan 2G, 3G ve LTE teknolojilerini sağlayan dijital üniteler bu radyo ünitelerine bağlıdır. Her dijital ünite, tek bir

frekansta hizmet veren radyo ünitesine bağlanmakta ve ilgili bölgede ilgili teknoloji, mobil operatör tarafından planlanan frekans aracılığıyla kullanıcılara iletilmektedir. Radyo ünitelerinin yalnızca belirlenen frekansta hizmet vermesine karşın, antenler aynı anda birden fazla frekansın yayılmasını sağlayabilmektedir. Bu sebeple antenlere birden fazla radyo ünitesi bağlanabilir. Örneğin; bir antene 2G, 3G, LTE teknolojilerine tahsis edilen frekanslarda sinyal iletecek 3 ayrı radyo ünitesi bağlanabilir.

İlgili taşıyıcı frekansta mobil operatörün satın almış olduğu bant genişliği kullanılarak sinyaller iletilir. Bu bant genişliği, verilecek mobil hizmetin kapasitesini ve kalitesini doğrudan etkiler. Artan mobil teknolojiler, daha büyük bant genişliklerine ihtiyaç duymaktadırlar. Örneğin; 3G teknolojisi için 5 MHz bant genişliğine sahip taşıyıcılar kullanılırken, 4G teknolojisinde 10 MHz ve 20 MHz bant genişliğine sahip taşıyıcılar kullanılmaktadır. Operatöre ilgili taşıyıcı frekansta tahsis edilen bant genişliği, belirtilen frekansta kullanılacak taşıyıcı sayısını belirler. Örneğin; 3G teknolojisinde kullanacağı 2100 MHz taşıyıcı frekansta, 30 MHz bant genişliği satın alan mobil operatör, 6 taşıyıcı ile 3G teknolojisine ait mobil veri alışverişini gerçekleştirebilecektir. Taşıyıcı sayısının veri trafiğine ve kapasitesine etkisi tek şeritli ve çok şeritli otoyola benzetilebilir. Tek şeritli otoyolların araç kapasitesi daha az olup bu otoyollarda araç trafiği daha ağır akmaktadır. Çok şeritli otoyollarda ise hem araç kapasitesi daha fazla hem de trafik akışı daha hızlıdır. Tıpkı çok şeritli otoyollarda olduğu gibi, daha fazla sayıda taşıyıcı ile servis sunulan frekanslarda veri akışı daha hızlı, kullanıcı ve veri iletim kapasitesi daha yüksektir.

Radyo üniteleri, belli güç değerlerinde (80W, 120W, 160W) radyo sinyallerini yayarlar. Bu güç değerleri ile radyo ünitesinin sinyalinin ulaşabileceği mesafe ve baz istasyonunun kapsama alanı doğru orantılıdır. Radyo ünitesinin sinyal gücü arttıkça, sinyal daha uzak mesafelere dek ulaşabilmekte, istasyonun kapsama alanı artmaktadır. Çok uzun mesafeler boyunca baz istasyonlarının sinyal iletmesi, uzak mesafelerde bulunan mobil cihazlarla etkileşim kurulmasını sağlamasına rağmen, bu durum beklenen ölçüde geniş bir kapsama alanı sağlamaz. Çünkü baz istasyonlarının aksine, cep telefonlarında bulunan antenler çok uzak mesafelere sinyal iletimini gerçekleştiremediklerinden baz istasyonu ve telefon arasında sinyal alış veriş gerçekleşmez. Ayrıca cep telefonu antenlerinin uzak mesafelere sinyal iletimi gerçekleştirmesi, cep telefonunda depolanan enerjinin hızlı bir şekilde tüketilmesine de yol açmaktadır. Bu sebeplerle baz istasyonlarından yüksek güçte

sinyal iletilmesi tercih edilmez iken, radyo istasyonu tarafından sağlanan gücün taşıyıcılar arasında paylaşılması ve sinyal iletiminin bu taşıyıcılar aracılığıyla gerçekleştirilmesi tercih edilir. Taşıyıcılar, ilgili frekansta mobil operatöre tahsis edilen bant genişliğinde, sinyalin iletilmesi planlanan uzaklık ve ihtiyaç duyulan kapsama alanına göre 20W/30W/40W/60W çıkış güçlerinde sinyalleri iletirler. Örneğin, 2100 MHz taşıyıcı frekansta, 30 MHz bant genişliği tahsis edilmiş bir mobil operatör, 120 W çıkış gücüne sahip bir RRU ile sinyal iletimi gerçekleştirerek, 3G mobil iletişimi sağlayacaktır. 3G teknolojisinin kullandığı bant genişliği 5 MHz olduğundan tahsis edilen 30 MHz bant genişliği içinde 6 taşıyıcı ile mobil iletişim gerçekleştirilebilir. Bu sinyal iletimi 6 taşıyıcı kullanılarak gerçekleştirildiğinde, radyo ünitesinin 120 W olan çıkış gücü 6 taşıyıcı arasında paylaşılacak, her bir taşıyıcı 20 W gücünde sinyal iletacaktır. Bu durumda taşıyıcı sayısının çok olması sebebiyle hızlı ve kaliteli veri akışı, daha dar bir kapsama alanında sağlanacaktır. 120 W çıkış gücüne sahip bir RRU kullanılarak 3G mobil servisinin 4 taşıyıcı aracılığıyla sunulması halinde ise her bir taşıyıcı 30 W çıkış gücü ile sinyal iletimini gerçekleştirecektir. Bu durumda 6 taşıyıcıya oranla daha yavaş, daha düşük kapasiteli fakat daha geniş bir kapsama alanında 3G servisi sunulacaktır.

Baz istasyonlarında dijital ünite sayısı kadar RRU, her RRU'ya da bir anten bağlanır. Her bir RRU, bağlı bulunduğu antenin sinyal yaydığı alanda taşıyıcılar aracılığıyla sinyal iletir. Baz istasyonunun hizmet vereceği alan ve ihtiyaç duyulan kapasite gözetilerek RRU seçimi ve anten montajı yapılmalıdır. Belli bir yönde yoğun bir yerleşimin diğer yönlerde ise cılız bir yerleşimin görüldüğü alanlarda, yoğun yerleşimin olduğu alana bakan antene yüksek çıkış gücüne sahip RRU bağlanmalı, cılız yerleşimin olduğu bölgelere bakan antenlere ise düşük çıkış gücüne sahip RRU bağlanmalıdır. Bununla birlikte farklı yönlere bakan antenlere tek bir RRU bağlanarak, taşıyıcıların farklı yönlerdeki antenler ile frekans iletimi sağlanabilir. RRU sayısı azaltılarak ya da belli yönlerde düşük güç çıkışına sahip RRU'lar tercih edilerek güç tasarrufu sağlanabilir.

Radyo ünitelerinde radyo dalgaları farklı polarizasyonlara bölünerek aynı dalga spektrumu daha verimli kullanılmaktadır. Radyo ünitelerinden farklı polarizasyonlar aracılığıyla aynı bilgiler iletilerek, kullanıcıların bu farklı polarizasyonlar aracılığıyla bilgiyi alması sağlanır. Multiple Input & Multiple Output (MIMO) olarak isimlendirilen bu akışta, verilerin daha hızlı ve daha güvenli aktarılması amaçlanır (Dhuheir, M., vd.,2017). Mobil

cihazların kullanımının az olduğu saatler, günler ve mevsimlerde bu özellik devre dışı bırakılarak güç tasarrufu sağlanabilir (Prasad ve Bjerling, 2018). Antenlerin hiçbir kullanıcıdan sinyal almadığı zamanlarda ilettiği sinyaller ve bilgiler incelenerek bu anlarda çeşitli algoritmalar yardımıyla RRU'lar ve antenler devre dışı bırakılabilir. Baz istasyonlarının kurulacağı bölgeye göre anten sayılarının, taşıyıcı sayılarının, RRU sayı ve bağlantı konfigürasyonlarının belirlenmesi, günün çeşitli saatlerinde RRU, taşıyıcı (carrier) ve antenlerde güç tasarrufu sağlayacak yazılımların ve yapıların oluşturulması oldukça önemlidir. Bu sebeple baz istasyonunun coğrafi analizinin iyi yapılması, bölge nüfusunun mevsimsel yapısının ve günlük mobil hizmet ihtiyaçlarının tespit edilmesi oldukça önemlidir.

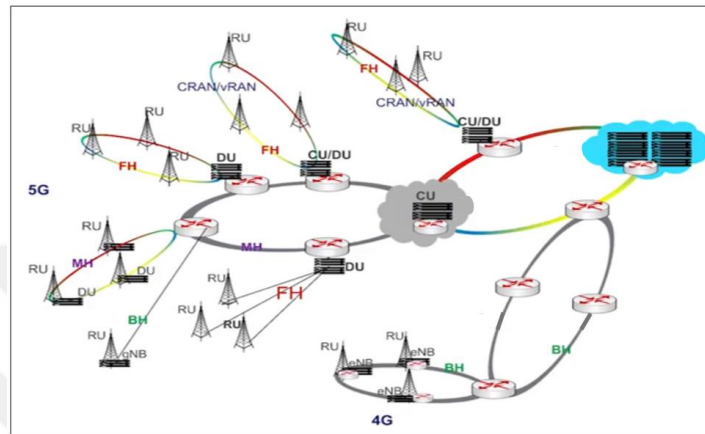
3.5.4. Transmisyon ünitesi

Mobil iletişim; baz istasyonları, santraller ve veri merkezleri arasındaki kesintisiz veri akışı ile sağlanmakta olup, verilerini santrallere ve veri merkezlerine iletemeyen baz istasyonu kullanıcılara hizmet veremez. Transmisyon ünitesi baz istasyonu ile veri merkezleri arasında veri alışverişini mümkün kılan yapıdır.

Baz istasyonu ile santraller arasında transmisyon ağı kurularak veri iletimi gerçekleştirilir. Baz istasyonlarının birbirleriyle sinyal alışverişinde bulunarak, birbirlerinin sinyallerini taşıyarak kurdukları transmisyon ağı aracılığıyla veriler, veri merkezine iletilir. Baz istasyonlarının birbirleriyle bir zincir, bir ağ gibi etkileşim içinde oldukları bu yapıda, her baz istasyonunun kendisi kadar bu baz istasyonun etkileşim halinde olduğu diğer baz istasyonları da önemlidir. Etkileşim içinde bulunan bir baz istasyonunun sinyal iletimini gerçekleştirememesi, diğer baz istasyonlarının da veri merkezi ile etkileşimini engeller ve tüm baz istasyonlarının servis dışı kalmasına neden olur. Bu yüzden baz istasyonlarının birden fazla baz istasyonu ile etkileşim içinde bulunarak verilerini birden fazla yoldan veri merkezine ilemesi baz istasyonlarının servis dışı kalmaması açısından önemlidir. Şekil 3.26.'da görüleceği gibi ağ mimarileriyle transmisyonun sürekliliği sağlanmakta, istasyonların birden çok saha ile etkileşimi mümkün olmaktadır.

Transmisyon işlemi sırasında veri iletimi fiber optik kablolarla, mini link adı verilen antenlerle sağlanmaktadır. İnternet altyapısının olmadığı, kablo hattının bulunmadığı baz

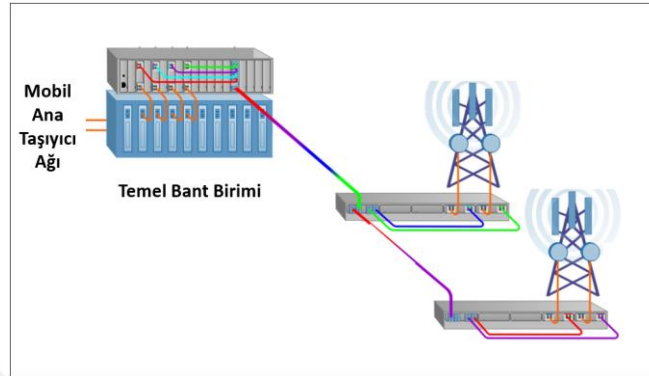
istasyonlarında veri iletimi kablosuz olarak, antenler aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu istasyonlarda antenlerin birbirleriyle etkileşime geçebilecek şekilde konumlandırılmaları, anten konfigürasyonlarının bu doğrultuda yapılması gerekmektedir. Uzak mesafelerde bulunan baz istasyonları arasında veri iletimi mini link antenleri ile sağlanacak ise bu antenler için hassas ayarlamaların yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.26. Transmisyon ağı mimarisine örnek

Transmisyon ünitesi; dijital üniteler, transmisyon hattı (fiberoptik internet bağlantı noktası, mini link) ve güç kaynağına bağlıdır. Bu ünitelerin ihtiyaç duyulan transmisyon yapısı doğrultusunda 2, 6, 20 kart yuvasına sahip modelleri bulunmaktadır (Ericsson, 2004). İlgili baz istasyonunun sadece bir baz istasyonu ile etkileşim içinde olduğu transmisyon modelinde, 2 kart yuvası bulunan transmisyon üniteleri yeterlidir. Bu üniteye, ilgili saha ile bu saha ile etkileşim içinde bulunan sahanın kartları yerleştirilir. Şekil 3.27.'de bu transmisyon yapısı yer almaktadır. Toplama merkezi olarak hizmet veren baz istasyonlarında 20 kart yuvasına sahip transmisyon üniteleri bulunur. Bu baz istasyonlarında bulunan 20 kart yuvasına sahip ünite, ilgili saha ile 19 sahanın veri etkileşimini ve bu sahaların veri merkeziyle iletişim kurmasını sağlar. Diğer 19 saha ile veri etkileşimi, 19 ayrı fiber hat ile sağlanabileceği gibi, farklı sayılarda fiber hat ve mini link kullanılarak da, 19 farklı mini link anteni kullanılarak da sağlanabilir. Bir baz istasyonunun transmisyon ünitesinin tükettiği güç, etkileşimde bulunduğu ve transmisyon işlemini gerçekleştirdiği saha sayısı ile doğru orantılıdır. Yalnız bir saha ile etkileşim içinde olan baz istasyonlarında, transmisyon ünitesinin tükettiği enerji daha azdır. Transmisyon ünitelerinin tükettiği enerji, mobil servislerin kullanıcı yoğunluğuna göre değişiklik göstermez (Görgün, H., vd., 2015). Mobil iletişimin sürekliliği gereği transmisyon üniteleri her zaman aktif olarak çalışarak, baz

istasyonlarının diğer baz istasyonlarıyla, santralle ve veri merkezleriyle etkileşim içinde bulunmasını sağlarlar. Hiçbir kullanıcı ilgili baz istasyonundan hizmet almasa bile transmisyon ünitesi aracılığıyla baz istasyonları arasında kurulan etkileşim devam eder.



Şekil 3.27. Transmisyon işlemi

3.5.5. Güç üniteleri ve doğrultucu

İletişim hizmetinin sürekliliği ve önemi sebebiyle baz istasyonlarının her koşulda servis sunması beklenmektedir. Elektrik kesintilerinin yaşandığı durumlarda dahi sistemin beslenmesi gerektiğinden baz istasyonlarında enerji yedekliliği yapılmaktadır. Jeneratörler ve aküler yardımıyla enerji kesintileri sırasında sistemler beslenmektedir. Enerji kesintisinin yaşandığı durumlarda yedek enerji kaynağının verimli kullanılması, kesinti boyunca yedek enerji kaynağının enerji sağlayabilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, baz istasyonlarında yedek enerji kaynağının verimli kullanımıyla servis sürekliliğinin sağlanması için çeşitli kontrol mekanizmaları tasarlanmaktadır. Sistemin beslendiği akünün voltajı belirli bir değerin altına düştüğünde jeneratör çalıştırılarak akülerin ve jeneratörlerin etkin kullanılması sağlanabilir. Kademeli olarak sistem elemanlarının deaktivasyonu ile yedek kaynakların tükenmesi engellenerek, sistemin servis vermeye devam etmesi sağlanabilir. Örneğin, akü gerilimi belirlenen değerlerin altına düştüğünde sırasıyla LTE servisi ve 3G servisi kapatılarak istasyonun sadece 2G servisi sağlaması sağlanabilir.

Transmisyon ünitesi, radyo ünitesi ve dijital üniteler 48V DC akımla çalıştığından, şebeke tarafından sağlanan AC akım, doğrultucu yardımıyla DC akıma dönüştürülerek, sistemin enerji ihtiyacı karşılanır. Sistem elemanlarının DC akım ile çalışması, baz istasyonlarının güneş panelleriyle elde edilen doğru akımla beslenmesi konusunda bir

avantajdır. Rectifier ve inverter ekipmanlarına ihtiyaç duyulmadan baz istasyonlarının güneş panelleriyle doğrudan beslenmesi sayesinde akımın dönüştürülmesi sırasında meydana gelen enerji kayıpları önlenecektir. Baz istasyonları sistemlerinde de şebeke bağlantısız fotovoltaik sistemlerde de aküler kullanılmaktadır. İki sistem birlikte inşa edildiğinde aküler hem fotovoltaik sistemlerde hem de baz istasyonu sisteminde ortak olarak kullanılacaktır. Baz istasyonları sistemlerinde aküler bulunduğundan, fotovoltaik sistemler daha az aküye gereksinim duyacaktır.

3.5.6. İklimlendirme üniteleri

Klima ve diğer soğutma yöntemleri, sistemin ısınarak zarar görmesini engellemek için baz istasyonlarında bulunurlar. Baz istasyonları yüksek sıcaklık altında tam ve gereği gibi hizmet sunamaz, bu yüzden kabin sıcaklığının optimum sistem performansının sağlandığı $20^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ arasında bulunması amaçlanır. Kabin izolasyonu ile dış ortam ile ısı alışverişi önlenerek, sıcak havalarda kabin sıcaklığının artması engellenebilir. Serbest soğutma (free cooling) sistemleri de baz istasyonu kabinlerinde kullanılmaktadır. Bu sistemlerde fanlar yardımıyla ısınan havanın dışarı atılması, soğuyan havanın içeri alınması sağlanır. Böylelikle iç ortamın sıcaklığı dış ortam ile eşitlenir. Bu sistemde, fan hızının kabinin ve dış ortamın sıcaklığına göre düzenlenmesi ile enerji tasarrufu gerçekleştirilebilir.

Baz istasyonu kabinlerinde en çok kullanılan soğutma cihazı klimalardır. Klimalar, doğal soğutma sistemlerine nazaran yüksek enerjiye ihtiyaç duyarlar. Binlerce baz istasyonunda klima kullanıldığını düşündüğümüzde, ülkemizde ve dünyamızda üretilen enerjinin azımsanmayacak bir miktarının klimalar tarafından tüketildiği görülecektir. Klimaların verimli kullanılması bu açıdan büyük önem taşımaktadır. Klimanın tükettiği enerjinin azaltılması için, kontrol üniteleri, doğal soğutma sistemleri, izolasyon ve klima ekipmanının birlikte kullanıldıkları iklimlendirme sistemleri dizayn edilebilir. Doğal soğutma sistemlerinin yeterli olmadığı durumlarda klimanın aktif edilmesi ile klima kullanımı azaltılarak iklimlendirme sistemlerinde enerjinin verimli kullanılması sağlanabilir.

Klimaların ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi, baz istasyonunun ana ekipmanlarının ihtiyaç duyduğu toplam enerjiye yakın değerdedir. Diğer baz istasyonu ekipmanlarının aksine klimaların alternatif akım ile çalışması sebebiyle fotovoltaik paneller yardımıyla

enerji ihtiyacı karşılanan baz istasyonlarında klimanın kullanılabilmesi için, doğru akımı alternatif akıma çeviren dönüştürücülerin kullanılması gereklidir. Ek ekipmanlara ihtiyaç duyulması da kurulum maliyetini arttıracaktır. Bunun yanında klimanın yüksek enerji tüketimi sebebiyle sistemin enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için daha fazla panel, akü ve şarj kontrol cihazına ihtiyaç duyulması da sistemin kurulum maliyeti arttıracaktır.

Klimaların enerji tasarrufuna yönelik çalışmalar, baz istasyonunun enerji tüketimini büyük oranda azaltacak olması ve fotovoltaik sistemin kurulum maliyetini düşürecek olması sebebiyle oldukça önemlidir. Klimaların enerji tasarrufuna ilişkin çalışmalarda DC inverter klimalar önemli bir yer tutmaktadır. Normal klimalarda ortam sıcaklığı değiştiğinde, klima motoru tam güç çalışmakta, ortam istenilenden daha fazla soğumaktadır. Bu durum enerjinin verimsiz kullanımına neden olmaktadır. Ek olarak AC motor, DC motora göre daha fazla enerji tüketmektedir. DC inverter klimalarda, klima içinde bulunan dönüştürücü ile AC akım DC akıma dönüştürülerek motor farklı güç değerlerinde çalıştırılmaktadır. Böylelikle sıcaklık farkının az olduğu durumlarda motorun düşük kapasiteyle, sıcaklık farkının fazla olduğu durumlarda motorun tam kapasiteyle çalışması sayesinde istenilen sıcaklık değerlerine çok daha kısa sürede ulaşılarak enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Güneş panellerinde DC akım üretilmesi sebebiyle, tamamen DC akımla çalışan ya da tamamen DC akım ile çalışmasa dahi motor, fan ve çeşitli ekipmanları DC akım ile çalışan klimalara yönelik çalışmalarda önemli aşama kaydedilmesi halinde klimalar, günümüze nazaran çok daha verimli bir biçimde güneş paneli sistemlerinde kullanılacaktır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Baz İstasyonu Kurulacak Bölgenin Tespiti

Fotovoltaik sistem ile beslenen baz istasyonunun kurulacağı bölgenin doğru seçilmesi enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için oldukça önemlidir. Kurulumu yapılacak bölge belirlenirken;

1. Mobil operatörün ülke genelinde sağladığı servis düzeyinin artmasına katkı sağlanması,
2. Bölgenin, baz istasyonunun enerji ihtiyacını karşılayabilecek düzeyde güneş enerjisi potansiyelinin bulunması,
3. Bölgede fotovoltaik sistem kurulum ve işletim maliyetlerinin düşük olması kriter olarak belirlenmiştir.

Bu belirlenen kriterler gözetilerek, Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından yıllık ışınlam değerlerine göre hazırlanmış Şekil 4.1.'de yer alan Türkiye ışınlam haritası incelenmiştir. Yapılan incelemede, fotovoltaik baz istasyonu kurulumu yapılacak en uygun bölgelerin, Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve Akdeniz Bölgesi olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Türkiye güneş ışınlamı haritası (MGM,2018)

Akdeniz Bölgesi ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde aynı düzeyde elektrik enerjisi üretimini sağlayacak fotovoltaik sistem, diğer bölgelere göre daha az fotovoltaik panele gereksinim duymaktadır. Akdeniz Bölgesi'nin yaz aylarında yoğun göç alması sebebiyle yaz aylarında bölgenin mobil iletişim trafiği artmaktadır. Bu sebeple bölgenin yaz aylarında yeni baz istasyonu kurulumuna ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde ise mevsimsel olmayan, süreklilik taşıyan mobil iletişim ihtiyacı bulunmaktadır. Bu iki enerji tüketim profili değerlendirildiğinde; Akdeniz Bölgesi'nde mobil iletişim ekipmanlarının tükettiği enerjinin yaz aylarında arttığı kış aylarında azaldığı, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde mobil iletişim ekipmanlarının tükettiği enerjinin sabit olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple, Akdeniz Bölgesi'nde kurulacak baz istasyonları yazın daha fazla enerji tüketirken kışın daha az enerji tüketecektir. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde kurulacak baz istasyonları ise bölgede mevsimsel göç dalgası yaşanmaması sebebiyle her mevsim aynı düzeyde enerji tüketecektir.

İki bölgede bulunan baz istasyonlarının enerji tüketim profillerinden, güneş enerjisi için daha uygun olanı Akdeniz Bölgesi'nin enerji tüketim profilidir. Fotovoltaik panellerden elde edilen enerji yazın artmakta, kışın ise azalmaktadır. Bu sebeple Akdeniz Bölgesi'nde kurulacak baz istasyonunun enerji ihtiyacı Güney Anadolu Bölgesi'nde kurulacak baz istasyonuna göre çok daha az panel ile karşılanabilecektir.

Baz istasyonu kurulumu yapılacak en uygun bölgenin Akdeniz Bölgesi olarak belirlenmesinin ardından, Akdeniz Bölgesi'nde baz istasyonunun kurulacağı bölgenin yerleşim tipi belirlenmelidir. Akdeniz Bölgesi hem kent nüfusunun fazla olduğu hem de kırsal nüfusun fazla olduğu bir bölgemizdir. Bölgede yapılan incelemelerde kırsal alanlarda mobil iletişime ihtiyaç duyulduğu, kent alanlarında ise yazları artan nüfus sebebiyle mobil iletişime ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, fotovoltaik paneller için kentlerde uygun alan bulmanın zorluğu ve gölgelenme sebebiyle kırsal alanların kent alanlarına göre çok daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Akdeniz Bölgesi'nde kırsal alanlara yönelik yapılan araştırmalarda, yazları yoğun göç alan yaylaların, fotovoltaik paneller ile enerji ihtiyacı karşılanacak baz istasyonu kurulumu için en uygun alanlar olduğu belirlenmiştir.

Yazları yoğun göç alan Akdeniz yaylalarına yönelik inceleme yaptığımızda ise Antalya ilinde bulunan Söğüt Cuması Yaylası'nın kış aylarında 300 olan nüfusunun yaz aylarında 3000'e çıktığı, yaz aylarında yaşanan bu artış sebebiyle de elektrik şebekesinde düzensizlikler olduğu belirlenmiştir (Milliyet,2020). Bu bölgeye kurulacak baz istasyonunun güneş panelleriyle enerji ihtiyacının karşılanması, hem mobil operatörün kapsama alanını genişletecek, hem de baz istasyonunun elektrik şebekesinin yaşadığı düzensizliklerden etkilenmesini engelleyecektir.

Söğüt Cuması Yaylası, Antalya ilinin Kumluca ilçesinde bulunmakta olup bölgenin rakımı 1497 metredir. Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi yayla yakınlarında bulunan dağlık araziler ve yükseltisi sebebiyle baz istasyonu kurulumuna oldukça uygundur. Bunun yanında yükseklik sebebiyle sıcaklığın düşmesi, fotovoltaik panellerin verimini arttırmaktadır.



Şekil 4.2. Söğüt Cuması Yaylası (Hürriyet, 2020)

Veritabanında bulunan 25 yıllık meteoroloji verileri sayesinde dünya üzerindeki tüm bölgelerin ışınlam, sıcaklık, rüzgar değerlerini anlık, günlük ve saatlik sunabilen Solargis yazılımında bölge haritadan seçilerek incelenmiştir. İlgili incelemeye ilişkin veri Şekil 4.3.'te bulunmaktadır.



Şekil 4.3. Söğüt Cuması Yaylası'nın Solargis haritasında seçimi

Oldukça kolay bir ara yüze sahip olan yazılımda bölgenin seçilmesinin ardından bölgenin coğrafi özelliklerine ulaşılmıştır. Şekil 4.4.'de de görüldüğü gibi bölgenin yıllık hava sıcaklık ortalaması 8,3 °C, yıllık ışınım değeri ise 1923 kWh/m²'dir. Yağış miktarı oldukça az olan bölgede yılda sadece iki gün kar görülmektedir. Fotovoltaik panellerin verimleri ışınım ile doğru, sıcaklıkla ters orantılıdır (Pepple V.B.O., vd., 2009). Tüm bu özellikler birlikte değerlendirildiğinde, bölge fotovoltaik teknoloji ve mobil iletişim teknolojileri açısından uygun bulunmuştur.

| Solar ışınım | | | | Meteorolojik veri | | | |
|---|------------|---------------------------|--|---|-------|----------------------|--|
| Küresel yatay ışınım (GHI) | GHI | 1757 kWh/m ² ▶ | | Hava sıcaklığı | TEMP | 8.3 °C ▶ | |
| Doğrusal normal ışınım (DNI) | DNI | 1923 kWh/m ² ▶ | | Rüzgar hızı | WS | 3.1 m/s | |
| Dağılık yatay ışınım (DIF) | DIF | 596 kWh/m ² ▶ | | Bağıl nem | RH | 63 % | |
| Dağılık ışınımın küresel ışınım oranı | D2G | 0.34 | | Yağış olarak çökebilecek su | PWAT | 15 kg/m ² | |
| GHI mevsimselliği | GHI season | 3.6 | | Yağış miktarı (yağmur) | PREC | 782 mm | |
| DNI mevsimselliği | DNI season | 2.3 | | Karlı günler | SNOWD | 2 gün | |
| Yüzey albedosu | ALB | 0.13 | | Soğutma derecesi günleri | CDD | 258 derece gün | |
| | | | | Isıtma derecesi günleri | HDD | 3511 derece gün | |
| Aylık istatistikler Saatlik profiller | | | | Aylık istatistikler Saatlik profiller | | | |

Şekil 4.4. Söğüt Cuması Yaylası'nın meteorolojik verileri (Solargis)

4.2. Bölgeye Uygun Mobil Tasarruf Metodları

Baz istasyonunun kurulacağı yerin belirlenmesinin ardından kullanılacak iletişim ekipmanlarının tespiti gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. Temel bant birimi

Bölgenin ihtiyaçları gözetilerek kabin ve dijital ünitelerin seçilmesi oldukça önemlidir. LTE telekomünikasyon teknolojisi aracılığıyla veri iletimi çok daha hızlı, 3G ve 2G teknolojilerinde ise veri iletimi daha yavaştır. Bölgesel ihtiyaçlar gözetilerek sunulacak teknolojilerin belirlenmesi baz istasyonu kurulum maliyetini ve enerji tüketimini etkileyecektir. Söğüt Cuması Yaylası'nda yazın artan nüfusun; mobil internet, görüntülü ve sesli arama ihtiyaçlarının birlikte karşılanmasına yönelik baz istasyonu kurulumu amaçlanmıştır. Bu kapsamda 2G, 3G ve LTE telekomünikasyon teknolojilerinin her birinde servis sağlanacak ve bu teknolojilerin dijital üniteleri kullanılacaktır.

Baz istasyonlarının kapasitesini belirleyen unsurlardan biri de temel bant birimlerinin anten bant genişlikleridir. Her temel bant biriminin desteklediği azami anten bant genişliği değerleri mevcuttur. Bu değerler uyarınca, temel bant birimlerine radyo üniteleri bağlanabilmektedir. Anten bant genişliği; bağlanacak dijital üniteleri, anten (sektör) sayısını, radyo ünitesi sayısını, taşıyıcıların sayısını ve anten bağlantılarını etkilemektedir.

Bir bölgede 480 MHz anten bant genişliğine sahip temel bant birimi kullanıldığında, baz istasyonu 4000 mobil cihazdan sinyal alabilmektedir. 480 MHz anten bant genişliğine sahip temel bant birimi kullanılarak, LTE teknolojisinde 600 Mbps indirme kapasitesinde hizmet verilebilmekte, 2G teknolojisinde ise 24 TRX ile hizmet verilerek aynı anda 168 kişinin sesli arama yapabilmesi sağlanabilmektedir. Bu kapasite Söğüt Cuması Yaylası'nın yaz aylarında mobil iletişim ihtiyacının karşılanması için yeterlidir. Bu kapsamda baz istasyonu kabineye iki temel bant birimi kurulumu yapılarak, ilkinden LTE servisinin, ikincisinden 2G + 3G servisinin sunulması planlanmıştır. Kurulumu yapılacak iki temel bant birimine, 2G, 3G ve LTE dijital üniteleri eklenerek, 2G, 3G ve LTE servisleri sağlanacaktır.

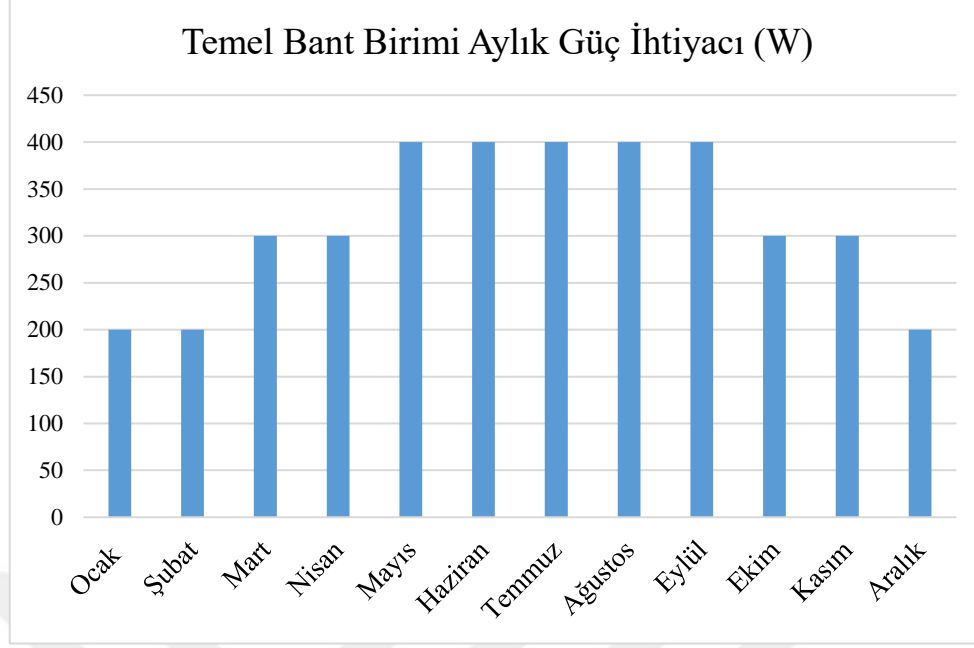
Temel bant birimlerinin tükettiği enerjiyi; kullanılan anten bant genişliği, anten sayı ve bağlantıları, radyo ünitesi sayı ve bağlantıları etkilemektedir. Örneğin, temel bant biriminin desteklediği azami bant genişliği kullanılacak şekilde anten ve radyo ünitesi kurulumları gerçekleştirildiğinde temel bant birimi tarafından çok daha fazla enerji tüketilecektir. Temel bant birimlerinin sürekli mobil cihazlarla sinyal alış verişinde bulunmaları sebebiyle sabit (pasif) enerji tüketimi, mobil cihazların (aktif olarak

kullanıldıkları durumlarda (sesli ve görüntülü konuşma, internetten veri iletimi vs.) veri trafiği ve aktif cihaz sayısı ile orantılı olan değişken (aktif) enerji tüketimi mevcuttur. Bu sebeple mobil veri akışının fazla olduğu saatlerde temel bant birimlerinin enerji tüketimi fazla, veri akışının az olduğu ya da hiç olmadığı saatlerde ise enerji tüketimi sabit ve daha azdır. Temel bant birimlerinin maksimum güç tüketimi 200 Watt, normal koşullarda güç tüketimi ise yaklaşık olarak 150 Watt'tır. Gün içinde veri akışının hiç olmadığı ya da oldukça az olduğu zaman aralıklarında güç tasarrufu modelleriyle tüketim azaltılabilmektedir. Gün içinde belirli saatlerde, taşıyıcı sayısının azaltılması, 3G servisi kapatılarak bu servisin sağladığı hizmetlerin diğer servisler üzerinden sağlanması uygulanabilecek yöntemlerden bazılarıdır.

Söğüt Cuması Yaylası nüfusu, yaz aylarında 3000, kış aylarında ise 300 civarındadır. Kış aylarında bölgede yaşamaya devam eden nüfusun iletişim teknolojilerine duyduğu ihtiyacın, yaz aylarındaki nüfusa oranla daha az olduğu düşünülerek, kış aylarında LTE servisinin deaktivasyonu gerçekleştirilecektir. İlkbahar ve sonbahar aylarında ise 2G, 3G ve LTE teknolojisinin kapasitesi düşürülerek temel bant birimlerinin daha az güç tüketmesi sağlanacaktır. Bu kapsamda, Mayıs ayından Eylül ayına kadar 5 ay boyunca 2G, 3G ve LTE servislerini sağlayan iki temel bant birimi yüksek kapasite hizmet verecek; Mart, Nisan, Ekim, Kasım aylarında bu iki temel bant birimi ortalama kapasitede hizmet sunacak; kış aylarında ise yalnızca 2G ve 3G hizmeti veren temel bant birimi ortalama kapasitede hizmet verecektir. Bu durumda temel bant birimleri; yılın 5 ayında 400 W, yılın 4 ayında 300 W, yılın 3 ayında ise 150 W güç tüketeceklerdir. Gün içinde veri trafiğinin az olduğu saatlerde ise ekipmanların kapasitesi düşürülerek temel bant birimlerinin bu saatlerde normal kapasitede güç tüketimi sağlanacaktır. Çizelge 4.1.'de temel bant birimlerinin toplam enerji tüketimi, Şekil 4.5.'te ise temel bant birimlerinin yıllık enerji tüketiminin aylara göre dağılımı yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Temel bant birimi enerji tüketimi

| Teknoloji | Enerji Tüketimi | Enerji Tüketimi (Maksimum) |
|------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 2G+3G | 150 W | 200 W |
| LTE | 150 W | 200 W |



Şekil 4.5. Temel bant birimi yıllık enerji tüketimi

4.2.2. Radyo üniteleri ve antenler

Sinyal iletimini sağlayan radyo ünitelerinin ve antenlerin montajına ilişkin tasarım oldukça önemlidir. Antenlerin demet genişliği, hangi açısız aralıklarla montajlarının yapıldığı, radyo ünitesi sayısı ve taşıyıcı sayısı baz istasyonunun kapsama alanını ve sinyal kalitesini doğrudan etkilemektedir. Genellikle antenlerin 120° açısız aralıklarla kurulumu yapılarak dairesel alan içinde sinyal vermesi sağlanmaktadır. Söğüt Cuması Yaylası'na hizmet verecek baz istasyonu, tepenin yamacına kurulacağından ve baz istasyonunun arkasında tepe bulunacağından 360° daire dilimi içinde sinyal iletilmesine ihtiyaç yoktur. Bu sebeple 120° açısız aralıklarla kurulumu yapılacak 2 anten ile yayla yerleşimlerini içine alan, 240°lik daire dilimi içinde sinyal alışverişi gerçekleştirilebilecektir. Bu kapsamda 2G teknolojisi için 2 radyo ünitesi, 3G teknolojisi için 2 radyo ünitesi ve LTE teknolojisi için 2 radyo ünitesi kullanılacaktır. ODI antenlerin aynı anda farklı frekanslarda sinyal iletimi gerçekleştirebilmeleri sebebiyle, 120°lik açısız aralıklarla kurulumu yapılan 2 ODI antenin her birine 2G, 3G, LTE dijital ünitelerine ait 3 radyo ünitesi bağlanacaktır.

Ülkemizde mobil iletişim 800, 900, 1800, 2100, 2600 MHz frekans bantları aracılığıyla sağlanmaktadır. Frekans, dalga boyu ile ters orantılı olduğundan düşük frekans

bantlarının dalga boyları daha yüksek ve kapsama alanları daha geniştir. Kentlerde yüksek frekans bantları ile dar alanda yüksek kapasiteye sahip sinyal iletimi tercih edilirken, kırsal alanlarda daha geniş kapsama alanı ihtiyacı dolayısıyla düşük frekans bantlarıyla sinyal iletimi tercih edilir. Bu sebeple Söğüt Cuması Yaylası'nda, 2G teknolojisi 900 MHz, 3G teknolojisi 2100 MHz, LTE teknolojisi 800 MHz frekans bantları aracılığıyla servis vereceklerdir. Ek olarak yüksek frekanslar aracılığıyla sinyal ileten radyo üniteleri daha fazla enerji tüketmektedirler (Aselsan, 2020).

Radyo üniteleri sinyalleri 80W – 120W - 160 W güçlerinde iletmekte, bu güçler de sinyalin ulaşabileceği uzaklığı etkilemektedir. Baz istasyonu ile telefonun sinyal alışverişinde bulunacağı düşünüldüğünden ve telefonların sinyal iletebileceği uzaklıklar sınırlı olduğundan, radyo ünitelerinin tüm güç çıkışı, tek bir taşıyıcı kanal üzerinden yönlendirilmemektedir. Radyo ünitelerinin ileteceği sinyal gücü kanallara bölünerek, kapsama alanı içinde daha hızlı ve kaliteli servis sunulmakta, bir kanal üzerinde 20W – 30W ve 40 W çıkış gücünde sinyal iletilmektedir. Bu durum gözetildiğinde 1 taşıyıcı ile LTE servisi sağlayabilecek olan radyo ünitesi için 80 W sinyal gücüne sahip radyo ünitelerinin kullanılması, 3 taşıyıcı ile 3G servisi sağlayabilecek olan radyo ünitesi için 120 W sinyal çıkış gücüne sahip radyo ünitelerinin kullanılması yeterli olacaktır. 2G teknolojisinde ise ihtiyaçlar gözetilerek 80 W sinyal çıkış gücüne sahip radyo üniteleri kullanılacaktır. Bununla birlikte LTE veri iletimini arttırmak için LTE radyo üniteleri ve antenler arasında 2x2 MIMO bağlantısı kurularak veri iletim hızı arttırılacaktır.

Radyo ünitelerinin güç tüketimini incelediğimizde 120 W çıkış gücüne sahip bir radyo ünitesinin normal enerji tüketimi 300 W, maksimum enerji tüketimi ise 440 W'dir; 80 W çıkış gücüne sahip bir radyo ünitesinin normal enerji tüketimi 270 W, maksimum enerji tüketimi ise 350 W'dir(Huawei, 2018). Çizelge 4.2.'de radyo üniteleri güç tüketimi yer almaktadır.

Çizelge 4.2. Radyo üniteleri enerji tüketimi

| Teknoloji | Frekans Bandı | Çıkış Gücü | Enerji Tüketimi | Enerji Tüketimi (Maksimum) |
|-----------|---------------|------------|-----------------|----------------------------|
| 2G | 900 MHz | 80 W | 270 W | 350 W |
| LTE | 800 MHz | 120 W | 270 W | 350 W |
| 3G | 2100 MHz | 120 W | 300 W | 440 W |

Radyo ünitelerinin güç tüketim değerleri; taşıyıcı sayısı, aktif servis alan kullanıcı sayısı, anten bağlantıları ile ilişkilidir. Radyo ünitelerinin güç tüketimini saatlik, aylık, mevsimlik incelemek, baz istasyonunun ihtiyaç duyacağı elektriksel gücün tespit edilmesini sağlayacaktır.

Yaz aylarında kullanıcı sayısının çokluğu sebebiyle LTE teknolojisi 2 radyo ünitesinin her birinde 1 taşıyıcı ve 2x2 MIMO bağlantısı ile, 3G teknolojisi 2 radyo ünitesinin her birinde 3 taşıyıcı ile, 2G teknolojisi ise 2 radyo ünitesinin her birinde 8 TRX ile servis verecektir. Günü veri trafiğinin yüksek olduğu, orta seviyede olduğu ve düşük olduğu saatler olarak üçe ayırarak, gün içinde belirli saatlerde enerji tasarrufu sağlanabilir ve sistemin fazla enerji tüketmesi engellenebilir; 02.00 – 07.00 arası veri akışının en az; 01.00 – 02.00 ve 07.00 – 08.00 saatleri arası veri akışının orta seviyede; 00.00 - 01.00 ile 08.00 - 24.00 saatleri arası ise veri akışının en yoğun olduğu saatlerdir. Bölge nüfusunun yaz aylarında 10 katına çıkması, kış aylarında ise azalması sebebiyle bölgede veri trafiği, aylık ve mevsimlik farklılıklar göstermektedir. Bu sebeple mevsimlik göçler ve nüfus değişimleri gözetilerek, yıl içinde veri trafiğinin azaldığı aylara yönelik enerji tasarrufu çalışmaları da yapılmıştır.

Radyo ünitelerinin tükettiği enerjinin azaltılmasına ilişkin; LTE teknolojisinin devre dışı bırakılması, LTE teknolojisinde MIMO bağlantısının pasifize edilmesi, 3G teknolojisinin devre dışı bırakılması, 3G teknolojisinin taşıyıcı sayısının azaltılması, 2G teknolojisinde TRX sayısının azaltılması yöntemleri uygulanmıştır. Radyo ünitelerinde, ünitelerin devre dışı bırakılması haricindeki enerji tasarruf yöntemleri uygulandığında, ünitelerin normal seviyede enerji tükettiği, üniteler servis dışı kaldığında ünitelerin enerji tüketmediği, hiçbir tasarruf yöntemi uygulanmadığında ise maksimum düzeyde enerji tükettiği varsayılarak planlamalar yapılmıştır. Çizelge 4.3.'te mevsimlere ve trafik yoğunluğuna göre uygulanan tasarruf metotları gösterilmiştir.

Çizelge 4.3.'te görüleceği gibi, yaz aylarında (Mayıs ve Eylül dahil) LTE teknolojisinde veri trafiğinin en az olduğu 02.00 – 07.00 arasında MIMO bağlantısının pasif hale getirilmesi, 3G teknolojisinin veri trafiğinin az ve orta seviyede olduğu 00.00 – 08.00 arasında servis dışı bırakılması, 2G teknolojisinde ise veri trafiğinin az olduğu 02.00 – 07.00 saatleri arasında TRX sayısının azaltılması ile enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Çizelge 4.3. Radyo ünitelerinde uygulanan enerji tasarruf modelleri

| Mevsim | Trafik | LTE RRU 800 MHz | 3G RRU 2100 MHz | 2G RRU 900 MHz |
|-------------------|--------|-----------------|--------------------------------|---------------------------|
| | | Tasarruf Metodu | | |
| Yaz | Az | MIMO Pasif | Servis Dışı | TRX Sayısının Azaltılması |
| | Orta | Uygulanmadı | Servis Dışı | Uygulanmadı |
| | Yüksek | Uygulanmadı | Uygulanmadı | Uygulanmadı |
| İlkbahar-Sonbahar | Az | MIMO Pasif | Servis Dışı | TRX Sayısının Azaltılması |
| | Orta | MIMO Pasif | Taşıyıcı Sayısının Azaltılması | TRX Sayısının Azaltılması |
| | Yüksek | MIMO Pasif | Taşıyıcı Sayısının Azaltılması | TRX Sayısının Azaltılması |
| Kış | Az | Servis Dışı | Uygulanmadı | TRX Sayısının Azaltılması |
| | Orta | Servis Dışı | Uygulanmadı | Uygulanmadı |
| | Yüksek | Servis Dışı | Uygulanmadı | Uygulanmadı |

Radyo ünitelerinin yaz mevsiminde günlük ve saatlik enerji tüketimi hesaplanarak Çizelge 4.4.'te gösterilmiştir. Bu hesaplamalara göre radyo ünitelerinin yaz aylarında bir günde tükettiği maksimum enerji 46,08 kWh, bir saatte tükettikleri maksimum enerji ise 2,88 kWh'dır.

Çizelge 4.4. Yaz mevsiminde radyo ünitelerinin saatlik enerji tüketimi

| Saat | Yaz Mevsimi Anlık Enerji Tüketimi (W) | | | | | | Toplam Enerji Tüketim |
|-----------------------|---------------------------------------|----------|------------------|-------------|------------------|----------|-----------------------|
| | LTE RRU 800 MHz | | 3G RRU 2100 MHz | | 2G RRU | | |
| | Max. Güç | Tasarruf | Max. Güç | Servis Dışı | Max. Güç | Tasarruf | |
| 00.00 - 01.00 | 700 | | | x | 700 | | 1400 Wh |
| 01.00 - 02.00 | 700 | | | x | 700 | | 1400 Wh |
| 02.00 - 03.00 | | 540 | | x | | 540 | 1080 Wh |
| 03.00 - 04.00 | | 540 | | x | | 540 | 1080 Wh |
| 04.00 - 05.00 | | 540 | | x | | 540 | 1080 Wh |
| 05.00 - 06.00 | | 540 | | x | | 540 | 1080 Wh |
| 06.00 - 07.00 | | 540 | | x | | 540 | 1080 Wh |
| 07.00 - 08.00 | 700 | | | x | 700 | | 1400 Wh |
| 08.00 - 09.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 09.00 - 10.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 10.00 - 11.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 11.00 - 12.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 12.00 - 13.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 13.00 - 14.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 14.00 - 15.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 15.00 - 16.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 16.00 - 17.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 17.00 - 18.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 18.00 - 19.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 19.00 - 20.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 20.00 - 21.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 21.00 - 22.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 22.00 - 23.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| 23.00 - 24.00 | 700 | | 880 | | 700 | | 2280 Wh |
| Toplam Tüketim | 16,00 kWh | | 14,08 kWh | | 16,00 kWh | | 46,08 kWh |

Çizelge 4.5. Bahar mevsimlerinde radyo ünitelerinin saatlik enerji tüketimi

| Saat | Bahar Mevsimleri Anlık Enerji Tüketimi (W) | | | | Toplam Enerji Tüketim |
|-----------------------|--|-----------------|-------------|------------------|-----------------------|
| | LTE RRU 800 MHz | 3G RRU 2100 MHz | | 2G RRU | |
| | E. Tasarruf | E. Tasarruf | Servis Dışı | E. Tasarruf | |
| 00.00 - 01.00 | 540 | | x | 540 | 1080 kWh |
| 01.00 - 02.00 | 540 | | x | 540 | 1080 kWh |
| 02.00 - 03.00 | 540 | | x | 540 | 1080 kWh |
| 03.00 - 04.00 | 540 | | x | 540 | 1080 kWh |
| 04.00 - 05.00 | 540 | | x | 540 | 1080 kWh |
| 05.00 - 06.00 | 540 | | x | 540 | 1080 kWh |
| 06.00 - 07.00 | 540 | | x | 540 | 1080 kWh |
| 07.00 - 08.00 | 540 | | x | 540 | 1080 kWh |
| 08.00 - 09.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 09.00 - 10.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 10.00 - 11.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 11.00 - 12.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 12.00 - 13.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 13.00 - 14.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 14.00 - 15.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 15.00 - 16.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 16.00 - 17.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 17.00 - 18.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 18.00 - 19.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 19.00 - 20.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 20.00 - 21.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 21.00 - 22.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 22.00 - 23.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| 23.00 - 24.00 | 540 | 700 | | 540 | 1780 kWh |
| Toplam Tüketim | 12,96 kWh | 11,2 kWh | | 12,96 kWh | 37,12 kWh |

Çizelge 4.6. Kış mevsiminde radyo ünitelerinin saatlik enerji tüketimi

| Saat | Kış Mevsimi Anlık Enerji Tüketimi (W) | | | | | Toplam Enerji Tüketim |
|-----------------------|---------------------------------------|------------------|-------------|------------------|----------|-----------------------|
| | LTE RRU 800 MHz | 3G RRU 2100 MHz | | 2G RRU | | |
| | Servis Dışı | Max. Güç | Servis Dışı | Max. Güç | Tasarruf | |
| 00.00 - 01.00 | x | | x | 700 | | 700 Wh |
| 01.00 - 02.00 | x | | x | 700 | | 700 Wh |
| 02.00 - 03.00 | x | | x | | 540 | 540 Wh |
| 03.00 - 04.00 | x | | x | | 540 | 540 Wh |
| 04.00 - 05.00 | x | | x | | 540 | 540 Wh |
| 05.00 - 06.00 | x | | x | | 540 | 540 Wh |
| 06.00 - 07.00 | x | | x | | 540 | 540 Wh |
| 07.00 - 08.00 | x | | x | 700 | | 700 Wh |
| 08.00 - 09.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 09.00 - 10.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 10.00 - 11.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 11.00 - 12.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 12.00 - 13.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 13.00 - 14.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 14.00 - 15.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 15.00 - 16.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 16.00 - 17.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 17.00 - 18.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 18.00 - 19.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 19.00 - 20.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 20.00 - 21.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 21.00 - 22.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 22.00 - 23.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| 23.00 - 24.00 | x | 880 | | 700 | | 1580 Wh |
| Toplam Tüketim | 0 | 14,08 kWh | | 16,00 kWh | | 30,08 kWh |

Nüfusun yaz sonunda şehirlere göç etmesi sebebiyle, ilkbahar ve sonbaharda günün tüm saatlerinde LTE servisi MIMO özelliği pasifleştirilerek sağlanmış, 3G ve 2G servislerinde taşıyıcı ve TRX sayısı azaltılarak hizmet verilmiştir. Bu sayede bahar aylarında bir günde tüketilen ortalama enerji 38,08 kWh'a, bir saatte tüketilen maksimum enerji ise 1,88 kWh'a düşürülmüştür. Kış aylarında LTE teknolojisi gün boyu servis dışı bırakılmış, 2G ve 3G teknolojisinde taşıyıcı sayısı azaltılarak servis verilmiştir. Bu sayede kış aylarında bir günde tüketilen ortalama enerji 30,2 kWh'a, bir saatte tüketilen maksimum enerji ise 12,60 kWh'a düşürülmüştür. Radyo ünitelerinin; Çizelge 4.4.'te yaz mevsimindeki, Çizelge 4.5.'te bahar mevsimindeki, Çizelge 4.6.'da kış mevsimindeki enerji tüketimi saat saat gösterilmiştir.

4.2.3. Transmisyon üniteleri

Transmisyon ünitelerinin tükettiği enerji, baz istasyonunun etkileşimde bulunduğu baz istasyonu sayısı ile bağlantılıdır. İlgili baz istasyonu aracılığıyla verilerini santral ve veri merkezlerine aktaran baz istasyonu sayısı transmisyon ünitesinin tükettiği enerjiyi etkilemektedir. Günümüzde 2, 6, 20 kapasiteli transmisyon üniteleri ile baz istasyonlarının transmisyon işlemleri gerçekleşmektedir. Ünitelerin kapasitesi, etkileşimde olduğu baz istasyonu sayısı ünitelerin güç tüketimi ile doğru orantılıdır. Baz istasyonlarının transmisyonu fiber optik kablolarla ya da transmisyon antenleri ile sağlanır. Örneğimizde baz istasyonunun elektrik şebekesi olmayan bir alanda kurulması sebebiyle transmisyonu, anten ile sağlanacaktır. Kırsal alanda kurulacak baz istasyonunun bir saha ile etkileşime geçerek transmisyonunun sağlanması yeterli olacağından 2 saha kapasiteli transmisyon ünitesi tercih edilmiştir. Bu özelliklere sahip transmisyon ünitelerinin güç tüketimi 100 - 200 W arasında değişmektedir. Baz istasyonunun servis verebilmesi için transmisyonunun sürekli sağlanması gerektiğinden, seçilen transmisyon ünitesi günün her saati, yılın her ayı aynı enerji tüketimini gerçekleştirecektir. Bu sebeple baz istasyonunda kullanılan transmisyon ünitesinin yılın her günü ve her saati tükettiği güç 200 W olacaktır.

4.2.4. İklimlendirme üniteleri

Baz istasyonlarında ekipmanların zarar görmesini engellemek için soğutma sistemleri kullanılır. Pasif soğutma sistemleri (free cooling) sistemleri ve klimalar

aracılığıyla kabin sıcaklıklarının $20^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ arasında tutulması sağlanır. Klimalar yüksek enerji tüketimleri sebebiyle, baz istasyonlarında diğer soğutma yöntemlerinin etkin ve verimli olmadığı durumlarda aktif edilmektedir.

Söğüt Cuması Yaylası 1497 metre yükseklikte bulunmaktadır, bu sebeple Antalya iline göre sıcaklık değerleri çok daha düşüktür. Solargis yazılımı aracılığıyla, bölgenin koordinatları ($36^{\circ}41'16''$, $30^{\circ}22'45''$) girilerek bölgenin aylık ve günlük sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.6.'da görüleceği gibi bölgenin yıllık en yüksek sıcaklık değeri Temmuz ayında saat 15.00 - 16.00 saatleri arasında gerçekleşen $23,9^{\circ}\text{C}$ 'dir. Baz istasyonu kabinlerinin pencereleri bulunmadığından dış ortam ile ısı alışverişi oldukça azdır. Bununla birlikte ekipmanların tükettiği enerji yoğunluğuna bağlı olarak ısınacağı ve küresel ısınma etkisiyle yaşanabilecek rekor sıcaklık seviyeleri de gözetilerek serbest soğutma sistemleri ile baz istasyonu kabininin temmuz ve ağustos aylarında soğutulmasına karar verilmiştir. Klimalar, bölgede sıcaklık değerinin nadiren 20°C 'nin üstüne çıkması, yüksek enerji tüketmeleri ve DC –AC dönüşümüne ihtiyaç duymaları sebebiyle tercih edilmemiştir.

Hava sıcaklığı °C -

| | Oca | Şub | Mar | Nis | May | Haz | Tem | Ağu | Eyl | Eki | Kas | Ara |
|----------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|-----|------|
| 0 - 1 | -3.0 | -2.4 | 0.1 | 3.4 | 7.8 | 12.3 | 15.9 | 15.6 | 11.1 | 6.0 | 1.6 | -1.3 |
| 1 - 2 | -3.2 | -2.8 | -0.6 | 2.6 | 6.9 | 11.3 | 14.8 | 14.6 | 10.1 | 5.4 | 1.2 | -1.5 |
| 2 - 3 | -3.2 | -2.9 | -0.8 | 2.5 | 6.8 | 11.1 | 14.6 | 14.5 | 10.1 | 5.4 | 1.2 | -1.5 |
| 3 - 4 | -3.2 | -3.0 | -0.9 | 2.4 | 6.7 | 11.0 | 14.6 | 14.5 | 10.1 | 5.5 | 1.2 | -1.4 |
| 4 - 5 | -3.4 | -3.2 | -1.2 | 2.1 | 6.4 | 10.7 | 14.2 | 14.2 | 9.8 | 5.2 | 1.0 | -1.6 |
| 5 - 6 | -3.7 | -3.5 | -1.6 | 1.7 | 6.0 | 10.3 | 13.8 | 13.7 | 9.4 | 4.8 | 0.6 | -1.9 |
| 6 - 7 | -3.7 | -3.6 | -1.6 | 1.8 | 6.3 | 10.7 | 14.1 | 14.0 | 9.5 | 4.9 | 0.6 | -2.0 |
| 7 - 8 | -3.8 | -3.6 | -1.1 | 3.0 | 8.2 | 12.9 | 16.0 | 15.5 | 10.7 | 5.7 | 0.9 | -2.0 |
| 8 - 9 | -3.6 | -3.2 | 0.3 | 5.3 | 11.1 | 16.0 | 19.1 | 18.4 | 13.5 | 7.5 | 1.7 | -1.7 |
| 9 - 10 | -2.9 | -2.2 | 1.7 | 6.4 | 11.7 | 16.6 | 19.9 | 19.5 | 15.0 | 9.1 | 3.1 | -0.9 |
| 10 - 11 | -1.3 | -0.3 | 3.4 | 7.4 | 12.5 | 17.3 | 20.7 | 20.4 | 16.3 | 11.0 | 5.5 | 0.8 |
| 11 - 12 | 0.8 | 1.6 | 5.1 | 8.9 | 14.0 | 18.7 | 22.1 | 22.1 | 18.2 | 12.9 | 7.7 | 2.9 |
| 12 - 13 | 1.5 | 2.2 | 5.5 | 9.2 | 14.3 | 19.1 | 22.7 | 22.6 | 18.6 | 13.3 | 8.1 | 3.5 |
| 13 - 14 | 2.2 | 3.1 | 6.2 | 9.9 | 14.9 | 19.9 | 23.7 | 23.7 | 19.6 | 14.2 | 8.9 | 4.1 |
| 14 - 15 | 2.0 | 3.0 | 6.2 | 9.9 | 14.8 | 19.9 | 23.9 | 23.8 | 19.7 | 14.1 | 8.7 | 3.9 |
| 15 - 16 | 1.8 | 2.9 | 6.1 | 9.9 | 14.8 | 19.9 | 23.9 | 23.8 | 19.7 | 14.0 | 8.4 | 3.6 |
| 16 - 17 | 1.4 | 2.6 | 5.9 | 9.8 | 14.6 | 19.8 | 23.8 | 23.6 | 19.4 | 13.4 | 7.8 | 3.1 |
| 17 - 18 | 0.7 | 2.1 | 5.4 | 9.4 | 14.3 | 19.6 | 23.5 | 23.2 | 18.8 | 12.4 | 6.6 | 2.1 |
| 18 - 19 | 0.3 | 1.9 | 5.1 | 9.1 | 14.1 | 19.4 | 23.3 | 22.9 | 18.4 | 12.1 | 6.1 | 1.7 |
| 19 - 20 | -0.4 | 1.1 | 4.2 | 8.1 | 13.1 | 18.2 | 21.9 | 21.6 | 17.2 | 11.0 | 5.2 | 1.0 |
| 20 - 21 | -1.5 | -0.1 | 2.8 | 6.7 | 11.5 | 16.3 | 20.0 | 19.7 | 15.2 | 9.1 | 3.7 | 0.0 |
| 21 - 22 | -1.8 | -0.6 | 2.4 | 6.2 | 11.1 | 16.0 | 19.7 | 19.1 | 14.6 | 8.5 | 3.3 | -0.3 |
| 22 - 23 | -2.2 | -1.2 | 1.6 | 5.3 | 10.0 | 14.9 | 18.5 | 18.0 | 13.4 | 7.7 | 2.7 | -0.7 |
| 23 - 24 | -2.8 | -2.0 | 0.6 | 4.0 | 8.6 | 13.3 | 16.9 | 16.5 | 11.9 | 6.6 | 2.0 | -1.1 |
| Ortalama | -1.4 | -0.6 | 2.3 | 6.0 | 10.9 | 15.6 | 19.2 | 19.0 | 14.6 | 9.2 | 4.1 | 0.4 |

Şekil 4.6. Söğüt Cuması Yaylası yıllık sıcaklık eğrisi (Solargis)

Çizelge 4.7. Temmuz-Ağustos aylarında baz istasyonu toplam enerji tüketimi

| Temmuz Ağustos Ayları Anlık Enerji Tüketimi Toplamı (W) | | | | | |
|---|--------------------|---------------------|-------------------|-------------|--------------|
| Saat | RRU Toplam Tüketim | Transmisyon Ünitesi | Temel Bant Birimi | Klima | Toplam |
| 00.00 - 01.00 | 1400 | 200 | 350 | - | 1950 |
| 01.00 - 02.00 | 1400 | 200 | 350 | - | 1950 |
| 02.00 - 03.00 | 1080 | 200 | 300 | - | 1580 |
| 03.00 - 04.00 | 1080 | 200 | 300 | - | 1580 |
| 04.00 - 05.00 | 1080 | 200 | 300 | - | 1580 |
| 05.00 - 06.00 | 1080 | 200 | 300 | - | 1580 |
| 06.00 - 07.00 | 1080 | 200 | 300 | - | 1580 |
| 07.00 - 08.00 | 1400 | 200 | 350 | - | 1950 |
| 08.00 - 09.00 | 2280 | 200 | 400 | - | 2880 |
| 09.00 - 10.00 | 2280 | 200 | 400 | - | 2880 |
| 10.00 - 11.00 | 2280 | 200 | 400 | 131 | 3011 |
| 11.00 - 12.00 | 2280 | 200 | 400 | 131 | 3011 |
| 12.00 - 13.00 | 2280 | 200 | 400 | 131 | 3011 |
| 13.00 - 14.00 | 2280 | 200 | 400 | 131 | 3011 |
| 14.00 - 15.00 | 2280 | 200 | 400 | 131 | 3011 |
| 15.00 - 16.00 | 2280 | 200 | 400 | 131 | 3011 |
| 16.00 - 17.00 | 2280 | 200 | 400 | 131 | 3011 |
| 17.00 - 18.00 | 2280 | 200 | 400 | 131 | 3011 |
| 18.00 - 19.00 | 2280 | 200 | 400 | 131 | 3011 |
| 19.00 - 20.00 | 2280 | 200 | 400 | 131 | 3011 |
| 20.00 - 21.00 | 2280 | 200 | 400 | - | 2880 |
| 21.00 - 22.00 | 2280 | 200 | 400 | - | 2880 |
| 22.00 - 23.00 | 2280 | 200 | 400 | - | 2880 |
| 23.00 - 24.00 | 2280 | 200 | 400 | - | 2880 |
| Toplam Tüketim | 46080 | 4800 | 8950 | 1310 | 61140 |

Serbest soğutma sistemleri, fanlar yardımıyla, kabin içinde bulunan sıcak hava ile dış ortamda bulunan soğuk havanın yer değiştirmesini sağlar. Serbest soğutma sistemleri kullanılarak, kabin sıcaklığının en sıcak havada bile 23,9°C olarak sabitlenmesi sağlanabilir. Bölge sıcaklık değerlerinin 20°C üzerine çıktığı durumlarda serbest soğutma ünitesi devreye alınarak sistem sıcaklığının en sıcak günlerde dahi 20°C - 30°C kalması sağlanacaktır. Maksimum debisi 1600 m³/saat olan bir serbest soğutma sistemi kullanılarak sistemin iklimlendirmesi yapılacak olup, normal koşullarda bu sistemin tükettiği güç 131W olacaktır. Serbest soğutma sistemi yalnızca temmuz ve ağustos aylarında ve 10.00 - 20.00 saatleri arasında çalıştırılacaktır.

Baz istasyonunun aylık ve saatlik olarak tükettiği enerji profilleri oluşturulmuş, fotovoltaiik sistem ile baz istasyonunun yılın tüm saatlerinde enerjisinin karşılanmasına yönelik hesaplama ve planlamalar yapılmıştır. Çizelge 4.8.'de görülebileceği gibi baz istasyonunun hangi ayda hangi saatte ortalama ne kadar enerji tükettiği belirlenmiştir.

Çizelge 4.8. Baz istasyonu yıllık enerji tüketim profili

| Enerji Tüketimi (Wh) | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Saat | Ocak | Şubat | Mart | Nisan | Mayıs | Haziran | Temmuz | Ağustos | Eylül | Ekim | Kasım | Aralık |
| 00.00 - 01.00 | 1590 | 1590 | 1580 | 1580 | 1950 | 1950 | 1950 | 1950 | 1950 | 1580 | 1580 | 1590 |
| 01.00 - 02.00 | 1590 | 1590 | 1580 | 1580 | 1950 | 1950 | 1950 | 1950 | 1950 | 1580 | 1580 | 1590 |
| 02.00 - 03.00 | 1590 | 1590 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1590 |
| 03.00 - 04.00 | 1590 | 1590 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1590 |
| 04.00 - 05.00 | 1590 | 1590 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1590 |
| 05.00 - 06.00 | 1590 | 1590 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1590 |
| 06.00 - 07.00 | 1590 | 1590 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1580 | 1590 |
| 07.00 - 08.00 | 1590 | 1590 | 1580 | 1580 | 1950 | 1950 | 1950 | 1950 | 1950 | 1580 | 1580 | 1590 |
| 08.00 - 09.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 2880 | 2880 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 09.00 - 10.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 2880 | 2880 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 10.00 - 11.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 3011 | 3011 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 11.00 - 12.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 3011 | 3011 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 12.00 - 13.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 3011 | 3011 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 13.00 - 14.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 3011 | 3011 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 14.00 - 15.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 3011 | 3011 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 15.00 - 16.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 3011 | 3011 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 16.00 - 17.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 3011 | 3011 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 17.00 - 18.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 3011 | 3011 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 18.00 - 19.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 3011 | 3011 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 19.00 - 20.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 3011 | 3011 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 20.00 - 21.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 2880 | 2880 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 21.00 - 22.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 2880 | 2880 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 22.00 - 23.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 2880 | 2880 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| 23.00 - 24.00 | 1590 | 1590 | 2280 | 2280 | 2880 | 2880 | 2880 | 2880 | 2880 | 2280 | 2280 | 1590 |
| Toplam Tüketim | 38160 | 38160 | 49120 | 49120 | 59830 | 59830 | 61140 | 61140 | 2880 | 49120 | 49120 | 38160 |

4.3. Fotovoltaik Sistem Analizi

Tasarlanacak olan hibrit ve şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemlerin ikisinin de baz istasyonunun ihtiyaç duyduğu enerjiyi tamamen karşılaması planlandığından iki sistemin üretmesi gereken enerji miktarı aynıdır. Bu yüzden iki fotovoltaik sistem için de montaj açısının belirlenmesi, panel sayısının belirlenmesi süreçleri aynı olacaktır. İki sistemin tasarımı için gerek duyulan bu analiz çalışmaları, iki sistem için birlikte yürütülmüştür.

4.3.1. Üretilmesi gereken enerjinin belirlenmesi

Baz istasyonunun ihtiyaç duyacağı elektrik enerjisi yılın her saati için belirlenmiştir. Bunun ardından enerji üretim aşamasını ifade eden fotovoltaik sistem tasarımına geçilmiştir. Fotovoltaik sistemin üreteceği güç (W_{panel}); sistem ekipmanlarına (eviriciler, dönüştürücüler, aküler, şarj kontrol cihazları) aktarılırken ve tozlanma sebebiyle kayba uğrayacaktır. Baz

istasyonun ihtiyaç duyduğu elektriksel güç (W_{baz}), bilindiğinden ticari koşullara göre ortalama kayıplar tespit edilerek, panellerin üretmesi gereken güç değeri belirlenecektir. Fotovoltaik sistemin üreteceği elektriksel güç;

1. Tozlanma ve kar yağışlarının yol açtığı kayıplar,
2. DC kablo kayıpları,
3. Akü şarj verimliliği,
4. Dönüştürücü verimliliği değerlendirilerek hesaplanacaktır;

Akü verimi ($\eta_{akü}$) = %90 ,

Dönüştürücü verimi ($\eta_{dön}$) = %95 ,

Şarj kontrol cihazı verimi ($\eta_{şk}$) = %0,95,

kablo verimi (η_{kbl}) = %0,97 ,

tozlanma verimi (η_{toz}) = %0,97 şeklinde kabul edilmiştir. Bu kayıplara göre fotovoltaik sistemin verimi hesaplanmak istendiğinde fotovoltaik sistem verimi (η_{pvsys});

$$\eta_{pvsys} = \eta_{toz} \times \eta_{kablo} \times \eta_{çevirici} \times \eta_{akü} \quad (\text{şebeke bağlantısız sistem}) \quad (4.1)$$

$$\eta_{pvsys} = \eta_{toz} \times \eta_{kablo} \times \eta_{şk} \times \eta_{akü} \quad (\text{şebeke bağlantılı sistem}) \quad (4.2)$$

$$\eta_{akü} = 90 , \eta_{çevirici} = 95 , \eta_{şk} = 0,95 , \eta_{kablo} = 0,97 , \eta_{toz} = 0,97 ,$$

şeklinde formüle edilerek hesaplanacaktır.

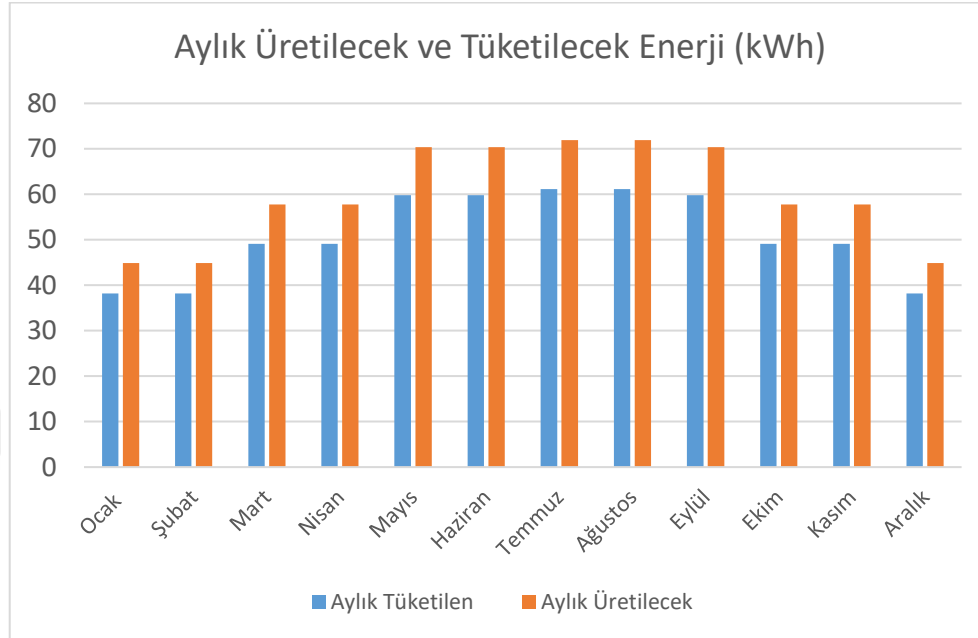
$$\eta_{pvsys} = 0,95 \times 0,95 \times 0,97 \times 0,97 = 0,85$$

Fotovoltaik sistemin üreteceği enerji (W_p) ise;

$$W_{baz} = \eta_{pvsys} \times W_{dizi} \quad (4.3)$$

şeklinde hesaplanacaktır. Bu değer aylık bazda hesaplanarak Şekil 4.7.'deki değerler elde edilmiştir. Tüketilen enerjinin yılın her saatinde ilişkin profilinden yola çıkarak üretilmesi

gereken enerjinin yılın her saatinde yayılan profili tespit edilir. Şekil 4.7.'de panellerin üretmesi gereken aylık enerji miktarları saptanmıştır.



Şekil 4.7. Aylık üretilmesi gereken enerji ve tüketilen enerji

4.3.2. Fotovoltaik panelin seçimi

İhtiyaç duyulan enerjinin üretilmesi için tek kristal fotovoltaik hücre seçilmiştir. Bu panelin özellikleri Çizelge 4.9.'da yer almaktadır.

Çizelge 4.9. Fotovoltaik panel elektriksel özellikler


| Tek Kristal Fotovoltaik Panel | |
|-------------------------------|---------|
| Voc | 37,8 V |
| Vmp | 31,8 V |
| Isc | 10,53 A |
| Imp | 10,06 A |
| Fiyat | 1040 ₺ |
| Panel verimi | 22% |

4.3.3. Panel eğim açısının belirlenmesi

Fotovoltaik sistem tasarımında piyasada yaygın olarak bulunan 320 W tek kristal panellerin kullanılması kararlaştırılmıştır. Panellerin ürettikleri enerji; panelin verimine,

bölgenin günlük, aylık, yıllık ışınlam değerlerine, panellerin montajına bağlıdır. Panellerin daha dik açılarda montajının yapılması kış aylarında üretilen enerji miktarını, daha yatay açılarda montajının yapılması yaz aylarında üretilen enerji miktarını arttıracaktır. Her mevsim enerji üreten panellerin, bölgenin enlem açısına eşit eğimle monte edilmesi, sadece yaz aylarında enerji üreten panellerin ise enlem açısından 15° daha az eğimle monte edilmesi, sadece kış aylarında enerji üretecek panellerin de enlem açısından 15° daha fazla eğimle monte edilmesi verimi arttıracaktır. Söğüt Cuması Yaylası 36° enleminde bulunmaktadır. Baz istasyonunun enerji tüketim profili sabit olmadığı için uygun açının belirlenmesi enerji kayıplarının önlenmesi açısından gereklidir. Uygun açı ile daha az panelle sistemin ihtiyacı karşılanabilecektir. (Şekil 4.8.'de Solargis yazılımı ile yapılan analizin ilk adımı gösterilmiştir.) Bu sebeple kullanılacak 320 W panelin 21° , 36° , 51° panel eğim açılarıyla monte edildiğinde, yıl içinde ne kadar enerji ürettiği SolarGis programı aracılığıyla hesaplanmıştır. Fotovoltaik sistemin üretmesi gereken günlük ve aylık enerji miktarı, hesaplanan bu değerlere bölünerek farklı aylarda ne kadar panele ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Şekil 4.9.'da seçilen fotovoltaik panelin 36° eğim açısıyla montajının yapılması halinde yıl içinde ne kadar enerji üreteceğine dair ayrıntılı tablo yer almaktadır.

Sistem tipi



Zeminde sabit kurulum

Düz zemine monte edilmiş büyük ölçekli ticari fotovoltaik sistem. FV modüllerinin azimut ve eğimi homojendir, genellikle ekvatora bakar ve yıllık enerji verimini en üst düzeye çıkarmak için optimum eğime ayarlanmıştır. Modüller, diziler halinde hizalanmış eşik yapılarına sabit olarak monte edilir. Düşük güneş açılan sırasında, öndeki diziler kısmen gölgeleyerek enerji kaybına neden olabilirler. Modüller iyice havalandırılmıştır. Bu tip FV sistemi, bir invertör ve dağıtım transformatörü aracılığıyla orta veya yüksek voltajlı bir şebekeye bağlanır ve ek bir transformatör de kullanılabilir. Elektrik depolaması dikkate alınmaz.

Sistem tipini değiştir Varsayılan seçeneklere sıfırla

Ayarlar

Hepsini genişlet
Hepsini daralt

Sistem boyutu Kurulu kapasite: 0.32kWp ▾ KAYDEDİLMEMİŞ DEĞİŞİKLİKLER ^

Kurulu kapasite

Kurulu FV modüllerin toplam alanı (arazinin değil)

0.32

kWp ▾

2

m²

| | | |
|----------------------------|--|---|
| FV modül tipi | c-Si - kristalin silisyum (mono ya da polikristalin) | ▾ |
| FV modüllerinin geometrisi | Azimut: 180° • Eğim: 36° | ▾ |
| Bağlı dizi aralığı | 2.5 | ▾ |

Şekil 4.8. 36° Eğimde bir panelin üreteceği gücün hesaplanması (Solargis)

Toplam fotovoltaik güç çıkışı Wh

| | Oca | Şub | Mar | Nis | May | Haz | Tem | Ağu | Eyl | Eki | Kas | Ara |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1-2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2-3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3-4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4-5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 5-6 | - | - | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - |
| 6-7 | - | - | 0 | 1 | 7 | 9 | 7 | 2 | 0 | 0 | - | - |
| 7-8 | 0 | 0 | 7 | 26 | 37 | 36 | 32 | 29 | 26 | 12 | 0 | 0 |
| 8-9 | 10 | 33 | 64 | 86 | 98 | 101 | 95 | 96 | 101 | 89 | 48 | 14 |
| 9-10 | 88 | 109 | 132 | 149 | 159 | 166 | 164 | 168 | 174 | 161 | 137 | 91 |
| 10-11 | 150 | 164 | 186 | 197 | 202 | 214 | 216 | 223 | 227 | 210 | 186 | 152 |
| 11-12 | 180 | 196 | 216 | 222 | 220 | 237 | 244 | 251 | 254 | 232 | 213 | 180 |
| 12-13 | 190 | 205 | 224 | 223 | 218 | 238 | 251 | 253 | 253 | 234 | 217 | 185 |
| 13-14 | 181 | 193 | 211 | 210 | 201 | 223 | 237 | 236 | 231 | 216 | 203 | 173 |
| 14-15 | 161 | 173 | 192 | 190 | 185 | 202 | 220 | 213 | 206 | 191 | 177 | 153 |
| 15-16 | 128 | 147 | 165 | 158 | 158 | 174 | 191 | 184 | 170 | 153 | 137 | 120 |
| 16-17 | 84 | 102 | 114 | 113 | 118 | 133 | 149 | 144 | 123 | 98 | 76 | 57 |
| 17-18 | 15 | 47 | 64 | 67 | 70 | 83 | 93 | 89 | 67 | 29 | 5 | 4 |
| 18-19 | 0 | 1 | 13 | 22 | 27 | 32 | 35 | 29 | 10 | 0 | 0 | - |
| 19-20 | - | - | 0 | 1 | 4 | 7 | 6 | 1 | 0 | - | - | - |
| 20-21 | - | - | - | - | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - |
| 21-22 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 22-23 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 23-24 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Toplam | 1187 | 1370 | 1591 | 1665 | 1705 | 1854 | 1939 | 1917 | 1842 | 1626 | 1399 | 1128 |

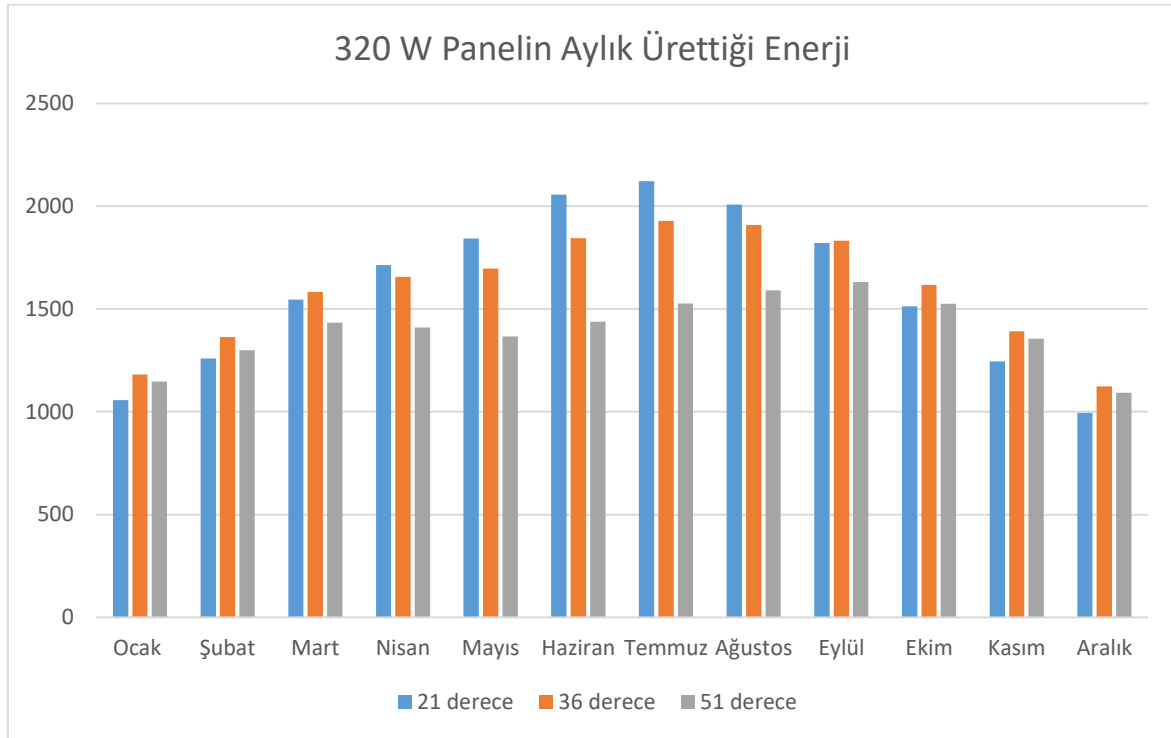
Şekil 4.9. 36 ° Eğimde 320 W panelin üreteceği enerjinin saatlik profili (Solargis)

Solargis programı aracılığıyla 21° ve 51° eğim açılarında panelin saatlik, günlük ve aylık ne kadar enerji üreteceği belirlenmiş olup, aylık ortalama sonuçlar Çizelge 4.10.'da yer almaktadır.

Çizelge 4.10. Farklı eğimli panelin üreteceği gücün saatlik profili (Solargis)

| Günlük Enerji Üretimi (kWh) | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------|-------|------|-------|-------|---------|--------|---------|-------|------|-------|--------|
| Açı (°) | Ocak | Şubat | Mart | Nisan | Mayıs | Haziran | Temmuz | Ağustos | Eylül | Ekim | Kasım | Aralık |
| 21 | 1057 | 1260 | 1546 | 1714 | 1843 | 2056 | 2122 | 2008 | 1821 | 1513 | 1245 | 994 |
| 36 | 1181 | 1363 | 1583 | 1657 | 1697 | 1845 | 1929 | 1908 | 1833 | 1617 | 1392 | 1123 |
| 51 | 1147 | 1299 | 1434 | 1411 | 1367 | 1439 | 1527 | 1591 | 1631 | 1525 | 1356 | 1092 |

Bu panelin farklı eğim açılarında aylık ürettiği enerjinin değişim grafiği Şekil 4.10.'da yer almaktadır.



Şekil 4.10. Farklı eğim açılarında panelin ürettiği aylık enerji (kWh)

Bir panelin ürettiği enerjinin aylık, günlük ve saatlik profili tespit edilmiştir. Çizelge 4.11.'de görülebileceği üzere baz istasyonunun ihtiyaç duyduğu toplam enerji ile fotovoltaik sistemin üretmesi gereken toplam enerjinin de profilleri belirlenmiştir.

Çizelge 4.11. Günlük enerji arzı ve talebinin aylık dağılımı (kWh)

| Günlük enerji arzı ve talebinin aylık dağılımı (kWh) | | | | | | | | | | | | |
|--|------|-------|------|-------|-------|---------|--------|---------|-------|------|-------|--------|
| Aylar | Ocak | Şubat | Mart | Nisan | Mayıs | Haziran | Temmuz | Ağustos | Eylül | Ekim | Kasım | Aralık |
| Günlük Tüketilecek | 38 | 38 | 49 | 49 | 60 | 60 | 61 | 61 | 60 | 49 | 49 | 38 |
| Günlük Üretilen | 45 | 45 | 58 | 58 | 70 | 70 | 72 | 72 | 70 | 58 | 58 | 45 |

Fotovoltaik panellerin üretmesi gereken enerji, tek bir panelin ürettiği enerjiye bölünerek, saat saat, gün gün, ay ay ihtiyaç duyulan panel sayısı belirlenmiştir. İhtiyaç duyulan panel sayılarının belirlenmesinde Çizelge 4.12.'de görüleceği üzere Microsoft Excel programından faydalanılmıştır.

Çizelge 4.12. İhtiyaç duyulan minimum panel sayısı

| Günlük Enerji Üretimi (kWh) | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------|-------|------|-------|-------|---------|--------|---------|-------|------|-------|--------|
| Eğim(°) | Ocak | Şubat | Mart | Nisan | Mayıs | Haziran | Temmuz | Ağustos | Eylül | Ekim | Kasım | Aralık |
| 21 | 42,5 | 35,6 | 37,4 | 33,7 | 38,2 | 34,2 | 33,9 | 35,8 | 38,7 | 38,2 | 46,4 | 45,2 |
| 36 | 38,0 | 32,9 | 36,5 | 34,9 | 41,5 | 38,2 | 37,3 | 37,7 | 38,4 | 35,7 | 41,5 | 40,0 |
| 51 | 39,1 | 34,6 | 40,3 | 41,0 | 51,5 | 48,9 | 47,1 | 45,2 | 43,2 | 37,9 | 42,6 | 41,1 |

Panellerin eğim açısı;

1. 21° olduğunda, en çok panele kasım ayında ihtiyaç duyulur ve bu değer 47'dir,
2. 36° olduğunda, en çok panele kasım ve mayıs ayında ihtiyaç duyulur ve bu değer 42'dir,
3. 51° olduğunda, en çok panele mayıs ayında ihtiyaç duyulur ve bu değer 52'dir.

Paneller 21° eğimle monte edildiğinde baz istasyonunun tüm yıl enerji ihtiyacının karşılanması için en az 47 panel gerekmektedir. Paneller 36° eğimle monte edildiğinde en az 42 panel, 51° eğimle monte edildiğinde ise 52 panel gerekmektedir. Yapılan hesaplamalar neticesinde 36° eğim açısının diğer açılara göre daha uygun olduğu belirlenmiştir. 36° eğim açısı incelendiğinde, bu montaj açısında Mayıs ve Kasım aylarında en çok panele ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Panelin açısını arttırarak yakınsama yaptığımızda mayıs ayının panel gereksinimi, panel açısını azaltarak yakınsama yaptığımızda ise kasım ayının panel gereksinimi artacaktır. Bu sebeple yakınsama işlemleri sonlandırılmış 36° eğim açısının optimum eğim açısı olduğu tespit edilmiştir. Tüm yıl boyunca, baz istasyonunun enerji ihtiyacının fotovoltaik paneller vasıtasıyla karşılanması için 36° eğimde 42 tek kristal panel ile sistem kurulumunun gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

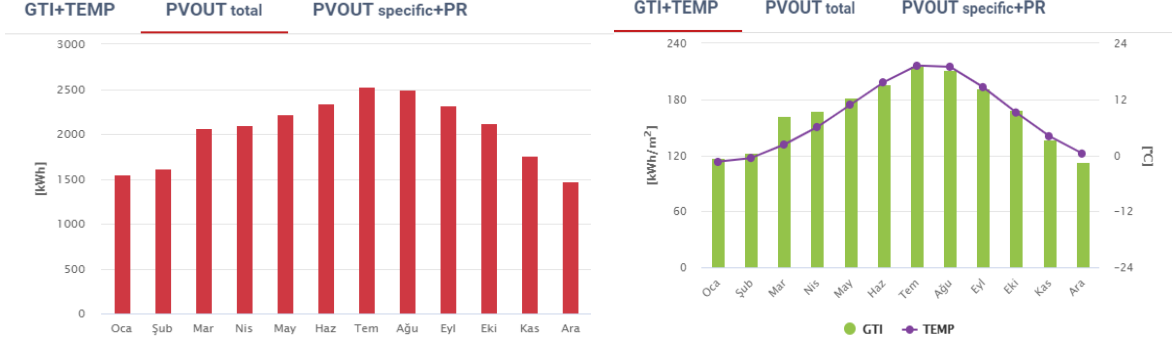
4.3.4. Sistem kapasitesinin incelenmesi

Tasarlanan fotovoltaik sistemin kurulu gücünü denklem 3.6.'ya göre hesaplamak istediğimizde,

$$W_{dizi} = W_{mp} * n_{panel} = 42 \times 320 W = 13,44 kWp$$

tasarlanan fotovoltaik sistemin kurulu gücü 13,44 kWp olarak hesaplanacaktır. Solargis yazılımı aracılığıyla 36° eğimle montajı yapılan 13,44 kWp kapasiteli fotovoltaik sistemin

yıllık ürettiği elektrik enerjisi değerleri hesaplanmıştır. Üretilen enerjinin aylık profili Şekil 4.11.'de, saatlik profili ise 4.12.'de yer almaktadır.



Şekil 4.11. Üretilen enerji aylık dağılımı (Solargis)

Şekil 4.11.'de görülen bu sonuçlara göre;

1. Bölgenin ışınım açısından uygun konumda bulunması sebebiyle aralık ayı hariç tüm aylarda 1500 kWh elektrik enerjisi üretileceği saptanmıştır.
2. Yıllık 24572 kWh enerji üretilecektir.
3. Baz istasyonunun ihtiyaç duyduğu günlük enerji, yılın her günü fotovoltaik sistem tarafından karşılanabilecektir.



Şekil 4.12. Üretilen enerji aylık profil (Solargis)

Toplam fotovoltaik güç çıkışı Wh

| | Oca | Şub | Mar | Nis | May | Haz | Tem | Ağu | Eyl | Eki | Kas | Ara |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1-2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2-3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3-4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4-5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 5-6 | - | - | - | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | - | - | - | - |
| 6-7 | - | - | 0 | 43 | 295 | 393 | 287 | 93 | 4 | 0 | - | - |
| 7-8 | 0 | 4 | 303 | 1078 | 1567 | 1521 | 1334 | 1202 | 1082 | 501 | 19 | 0 |
| 8-9 | 408 | 1392 | 2699 | 3615 | 4115 | 4226 | 3987 | 4027 | 4260 | 3738 | 2013 | 570 |
| 9-10 | 3698 | 4584 | 5563 | 6269 | 6667 | 6981 | 6874 | 7052 | 7327 | 6765 | 5752 | 3839 |
| 10-11 | 6291 | 6882 | 7822 | 8269 | 8498 | 8968 | 9072 | 9347 | 9527 | 8806 | 7810 | 6373 |
| 11-12 | 7578 | 8214 | 9058 | 9337 | 9220 | 9959 | 10246 | 10535 | 10671 | 9761 | 8936 | 7552 |
| 12-13 | 7975 | 8605 | 9424 | 9374 | 9156 | 9998 | 10523 | 10621 | 10631 | 9827 | 9102 | 7763 |
| 13-14 | 7598 | 8109 | 8883 | 8807 | 8455 | 9350 | 9953 | 9898 | 9710 | 9056 | 8517 | 7269 |
| 14-15 | 6742 | 7273 | 8063 | 7994 | 7758 | 8477 | 9222 | 8963 | 8636 | 8039 | 7426 | 6440 |
| 15-16 | 5394 | 6192 | 6950 | 6631 | 6640 | 7310 | 8032 | 7738 | 7140 | 6428 | 5766 | 5031 |
| 16-17 | 3530 | 4268 | 4787 | 4757 | 4977 | 5587 | 6241 | 6054 | 5168 | 4120 | 3212 | 2404 |
| 17-18 | 626 | 1980 | 2707 | 2811 | 2954 | 3480 | 3906 | 3727 | 2802 | 1223 | 215 | 150 |
| 18-19 | 0 | 43 | 560 | 931 | 1131 | 1338 | 1489 | 1216 | 422 | 7 | 0 | - |
| 19-20 | - | - | 0 | 26 | 188 | 283 | 263 | 53 | 0 | - | - | - |
| 20-21 | - | - | - | - | 0 | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - |
| 21-22 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 22-23 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 23-24 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Toplam | 49840 | 57547 | 66819 | 69942 | 71620 | 77876 | 81427 | 80527 | 77380 | 68271 | 58768 | 47391 |

Şekil 4.13. Fotovoltaik sistemin ürettiği enerji profili (Solargis)

Şekil 4.13. 'te gösterilen saatlik ve aylık ortalama enerji üretim değerleri, fotovoltaik sistemin verimi ile çarpılarak, fotovoltaik sistemin akü ve baz istasyonuna aktardığı enerji değerleri belirlenmiştir. Bu enerji değerleri Çizelge 4.13.'de yer almaktadır.

Çizelge 4.13. Sisteme ve akülere aktarılan enerji profili

| Baz İstasyonuna Aktarılan Günlük Enerji Profili (Wh) | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Saat | Ocak | Şubat | Mart | Nisan | Mayıs | Haziran | Temmuz | Ağustos | Eylül | Ekim | Kasım | Aralık |
| 00.00 - 06.00 | | | | | | | | | | | | |
| 06.00 - 07.00 | | | | 39 | 269 | 358 | 261 | 85 | 4 | | | |
| 07.00 - 08.00 | | | 276 | 982 | 1427 | 1385 | 1215 | 1095 | 985 | 456 | 17 | |
| 08.00 - 09.00 | 372 | 1268 | 2458 | 3292 | 3748 | 3849 | 3631 | 3667 | 3880 | 3404 | 1833 | 519 |
| 09.00 - 10.00 | 3368 | 4175 | 5066 | 5709 | 6072 | 6358 | 6260 | 6422 | 6673 | 6161 | 5238 | 3496 |
| 10.00 - 11.00 | 5729 | 6268 | 7124 | 7531 | 7739 | 8167 | 8262 | 8512 | 8676 | 8020 | 7113 | 5804 |
| 11.00 - 12.00 | 6901 | 7481 | 8249 | 8503 | 8397 | 9070 | 9331 | 9594 | 9718 | 8889 | 8138 | 6878 |
| 12.00 - 13.00 | 7263 | 7837 | 8583 | 8537 | 8339 | 9105 | 9583 | 9673 | 9682 | 8950 | 8289 | 7070 |
| 13.00 - 14.00 | 6920 | 7385 | 8090 | 8021 | 7700 | 8515 | 9064 | 9014 | 8843 | 8247 | 7757 | 6620 |
| 14.00 - 15.00 | 6140 | 6624 | 7343 | 7280 | 7065 | 7720 | 8399 | 8163 | 7865 | 7321 | 6763 | 5865 |
| 15.00 - 16.00 | 4912 | 5639 | 6329 | 6039 | 6047 | 6657 | 7315 | 7047 | 6503 | 5854 | 5251 | 4582 |
| 16.00 - 17.00 | 3215 | 3887 | 4360 | 4332 | 4533 | 5088 | 5684 | 5513 | 4707 | 3752 | 2925 | 2189 |
| 17.00 - 18.00 | 570 | 1803 | 2465 | 2560 | 2690 | 3169 | 3557 | 3394 | 2552 | 1114 | 196 | 137 |
| 18.00 - 19.00 | | 39 | 510 | 848 | 1030 | 1219 | 1356 | 1107 | 384 | | | |
| 19.00 - 20.00 | | | | 24 | 171 | 258 | 240 | 48 | | | | |
| 20.00 - 24.00 | | | | | | | | | | | | |
| Toplam Tüketim | 45390 | 52408 | 60853 | 63697 | 65226 | 70921 | 74159 | 73336 | 70471 | 62175 | 53521 | 43160 |

4.4. Söğüt Cuması Yaylası Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistem Tasarımı

Bu bölümde sistemde kullanılacak akülerin özellikleri ve sayıları belirlenecek, ardından belirlenen fotovoltaik panel ve akü özellikleri dikkate alınarak sistemde kullanılacak şarj kontrol cihazlarının özellikleri ve sayıları belirlenecektir.

4.4.1. Akü ihtiyacının belirlenmesi ve akü seçimi

Kapasitesi 13,44 kW_p olan fotovoltaik sistemin ürettiği enerjinin saatlik dağılımı bilinmektedir (Şekil 4.13.). Bu enerjinin, fotovoltaik sistemin verimi uyarınca %90'lık kısmı baz istasyonlarına ve akülere aktarılmaktadır. Verimli bir şekilde baz istasyonu ve akü sistemine iletilen bu enerjinin saatlik profili Çizelge 4.13.'te yer almaktadır. Baz istasyonunun ihtiyaç duyduğu enerji de bilinmektedir (Bkz. Çizelge 4.8.). Baz istasyonunun enerji ihtiyacının, hangi saat aralıklarında doğrudan panel aracılığıyla üretilen anlık enerjiden karşılandığı, hangi saat aralıklarında enerji ihtiyacının sadece akülerden karşılandığı, hangi saat aralıklarında ise enerji ihtiyacının hem aküler hem de fotovoltaik sistem tarafından karşılandığı bu bulgular sayesinde tespit edilecektir. Akülerin hangi saatlerde deşarj olmaya başladığı, akülerin şarj derinliği ve sistemin ihtiyaç duyduğu akü sayısı belirlenecektir. Sisteme aktarılan enerjinin saatlik dağılımından, baz istasyonunun tükettiği saatlik enerji değerleri çıkarılarak sistemin hangi zaman aralıklarında aküden besleneceği belirlenecektir.

Çizelge 4.14.'te sarı renkler ile fotovoltaik panellerde üretilen enerjinin sistemin ihtiyacını doğrudan karşılayamadığından sistemin akülerde depo edilen enerjiyi kullanacağı saatler gösterilmiştir. Açık sarı renk ile gösterilen alanlar sistemin ihtiyaç duyduğu enerjinin bir kısmının akülerden, diğer kısmının ise fotovoltaik panellerden karşılanacağı zaman dilimlerini gösterirken, koyu sarı renkli alanlar sistemin enerji ihtiyacının tamamen akülerden karşılanacağı zaman dilimlerini ifade etmektedir. Akülerin baz istasyonuna sağladığı enerji değerleri Çizelge 4.14.'te negatif (-) olarak ifade edilmiştir.

Çizelge 4.14. yardımıyla, ilgili aylardaki tüm eksi değerler toplanarak, ilgili aylardaki bir günde akülerde depolanan enerjinin ne kadarına ihtiyaç duyulacağı hesaplanmıştır. Buna göre akülerden sisteme sağlanan enerjiye en çok Eylül ayında ihtiyaç duyulmaktadır. Eylül

ayında bir günde akülerden baz istasyonuna aktarılacak enerji 30,24 kWh'dır. Bu değer, normal şartlarda, yıl boyunca bir günde akülerden baz istasyonuna aktarılacak maksimum enerji değeridir. Akülerden bir günde baz istasyonuna aktarılacak olan enerji değerleri, aylık olarak, Çizelge 4.15.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. Enerji üretim ve tüketim değerlerinin karşılaştırılması

| Saatlik ve Günlük Net Enerji (Wh) | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|---------|-------|-------|-------|--------|
| Saat / Ay | Ocak | Şubat | Mart | Nisan | Mayıs | Haziran | Temmuz | Ağustos | Eylül | Ekim | Kasım | Aralık |
| 00.00 - 01.00 | -1590 | -1590 | -1580 | -1580 | -1950 | -1950 | -1950 | -1950 | -1950 | -1580 | -1580 | -1590 |
| 01.00 - 02.00 | -1590 | -1590 | -1580 | -1580 | -1950 | -1950 | -1950 | -1950 | -1950 | -1580 | -1580 | -1590 |
| 02.00 - 03.00 | -1590 | -1590 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1590 |
| 03.00 - 04.00 | -1590 | -1590 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1590 |
| 04.00 - 05.00 | -1590 | -1590 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1590 |
| 05.00 - 06.00 | -1590 | -1590 | -1580 | -1580 | -1580 | -1577 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1580 | -1590 |
| 06.00 - 07.00 | -1590 | -1590 | -1580 | -1537 | -1285 | -1187 | -1293 | -1487 | -1576 | -1580 | -1580 | -1590 |
| 07.00 - 08.00 | -1590 | -1586 | -1277 | -502 | -383 | -429 | -616 | -748 | -868 | -1079 | -1561 | -1590 |
| 08.00 - 09.00 | -1182 | -198 | 419 | 1335 | 1235 | 1346 | 1107 | 1147 | 1380 | 1458 | -267 | -1020 |
| 09.00 - 10.00 | 2108 | 2994 | 3283 | 3989 | 3787 | 4101 | 3994 | 4172 | 4447 | 4485 | 3472 | 2249 |
| 10.00 - 11.00 | 4701 | 5292 | 5542 | 5989 | 5618 | 6088 | 6061 | 6336 | 6647 | 6526 | 5530 | 4783 |
| 11.00 - 12.00 | 5988 | 6624 | 6778 | 7057 | 6340 | 7079 | 7235 | 7524 | 7791 | 7481 | 6656 | 5962 |
| 12.00 - 13.00 | 6385 | 7015 | 7144 | 7094 | 6276 | 7118 | 7512 | 7610 | 7751 | 7547 | 6822 | 6173 |
| 13.00 - 14.00 | 6008 | 6519 | 6603 | 6527 | 5575 | 6470 | 6942 | 6887 | 6830 | 6776 | 6237 | 5679 |
| 14.00 - 15.00 | 5152 | 5683 | 5783 | 5714 | 4878 | 5597 | 6211 | 5952 | 5756 | 5759 | 5146 | 4850 |
| 15.00 - 16.00 | 3804 | 4602 | 4670 | 4351 | 3760 | 4430 | 5021 | 4727 | 4260 | 4148 | 3486 | 3441 |
| 16.00 - 17.00 | 1940 | 2678 | 2507 | 2477 | 2097 | 2707 | 3230 | 3043 | 2288 | 1840 | 932 | 814 |
| 17.00 - 18.00 | -964 | 390 | 427 | 531 | 74 | 600 | 895 | 716 | -78 | -1057 | -2065 | -1440 |
| 18.00 - 19.00 | -1590 | -1547 | -1720 | -1349 | -1749 | -1542 | -1522 | -1795 | -2458 | -2273 | -2280 | -1590 |
| 19.00 - 20.00 | -1590 | -1590 | -2280 | -2254 | -2692 | -2597 | -2748 | -2958 | -2880 | -2280 | -2280 | -1590 |
| 20.00 - 21.00 | -1590 | -1590 | -2280 | -2280 | -2880 | -2880 | -2880 | -2880 | -2880 | -2280 | -2280 | -1590 |
| 21.00 - 22.00 | -1590 | -1590 | -2280 | -2280 | -2880 | -2880 | -2880 | -2880 | -2880 | -2280 | -2280 | -1590 |
| 22.00 - 23.00 | -1590 | -1590 | -2280 | -2280 | -2880 | -2880 | -2880 | -2880 | -2880 | -2280 | -2280 | -1590 |
| 23.00 - 24.00 | -1590 | -1590 | -2280 | -2280 | -2880 | -2880 | -2880 | -2880 | -2880 | -2280 | -2280 | -1590 |
| Üretilen Faız Enerji | 11680 | 14248 | 11733 | 14577 | 5396 | 11091 | 13019 | 12196 | 10641 | 13055 | 4401 | 5000 |

Çizelge 4.15. Akü enerji kapasitesi kullanımı aylık profil

| Ay | Ocak | Şubat | Mart | Nisan | Mayıs | Haziran | Temmuz | Ağustos | Eylül | Ekim | Kasım | Aralık |
|--------------|------|-------|------|-------|-------|---------|--------|---------|-------|------|-------|--------|
| Enerji (kWh) | 25 | 23 | 26 | 25 | 29 | 28 | 28 | 29 | 30 | 27 | 29 | 25 |

İletişim hizmetinin sürekliliğinin sağlanması açısından baz istasyonlarının enerji yedekliliği büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda elektrik şebekesiyle beslenen sistemlerde dahi aküler kullanılmaktadır. Elektrik şebekesiyle beslenen baz istasyonlarında jeneratör ile birlikte sistemi 2 saat besleyecek aküler ya da 20 saat boyunca sistemi tek başına besleyecek aküler ile enerji yedekliliği sağlanır. Elektrik şebekesine bağlı olmayan,

jeneratörle beslenen istasyonlarda dahi sistem yedekliliği için 20 saat sistemin enerji ihtiyacını karşılayacak akü setleri bulundurulur. Kırsal alanlarda elektrik şebekesiyle beslenen baz istasyonlarında, jeneratörün ihtiyaç duyduğu bakım ve yakıt ikmali sebebiyle de 20 saat enerji sağlayacak akü grupları baz istasyonlarında bulundurulur. İletişim hizmeti gereğince ihtiyaç duyulan bu akü sayısı $n_{akügsm}$ olarak adlandırılmıştır. (Fotovoltaik sistemin ihtiyaç duyduğu akü sayısı ise $n_{aküfv}$ olarak adlandırılmıştır.) Bu enerji yedekliliği meydana gelecek beklenmedik, planlanmayan durumlar için öngörülmüş olup, normal şartlarda, enerji ihtiyacının tamamının güç kaynağının kendisi tarafından karşılanması beklenir. Bu sebeple baz istasyonunun enerji yedekliliğine ek olarak, eylül ayında fotovoltaik sistemin ihtiyaç duyduğu 30,24 kWh enerji depolama kapasitesine sahip akü grubu ile fotovoltaik sistemin enerji yedekliliği de sağlanmalıdır. İhtiyaç duyulan bu iki enerji kapasitesi toplanarak sistemin toplam akü kapasitesi hesaplanmıştır. Toplam akü kapasitesinin yüksek olması sebebiyle 12V gerilim değerine sahip 200 Ah kapasiteli akülerin kullanılması tercih edilmiş ve ihtiyaç duyulan akü sayısı belirlenmiştir. Baz istasyonun tükettiği en yüksek elektriksel gücün Çizelge 4.8.'e 3011 W olduğu tespit edildiğinden (Bkz. Çizelge 4.8.) yedeklilik kapasitesi hesaplanmak istediğinde ;

Akü yedeklilik kapasitesi $E_{(akügsm)}$;

yedeklilik süresi (h_y) ve tüketilen maksimum güç (W_{max})'ün çarpımına eşit olacaktır.

$$(E_{akügsm}) = (h_y) \times (W_{max}) = 60,22 \text{ kWh} \quad (4.4.)$$

60,22 kW kapasiteye sahip akü grupları ile baz istasyonunun fotovoltaik sistemden bağımsız olarak 20 saat süresince enerji yedekliliği sağlanacaktır. Toplam akü kapasitesi ($E_{toplamlam}$); bu akü kapasitesi ile fotovoltaik sistem için gerekli olan akü kapasite ($E_{aküpv}$)'nin toplanmasıyla elde edilir.

$$(E_{toplamlam}) = (E_{akügsm}) + (E_{aküpv}) \quad (4.5.)$$

Bu değer $60,22 \text{ kW} + 30,24 \text{ kW} = 90,46 \text{ kW}$ 'dır.

Yüksek enerji kapasitesine duyulan ihtiyaç gereği 12V, 200Ah aküler kullanılacaktır.

Bu akülerin her birinin depoladığı enerji ($E_{akü}$);

$$E_{akü} = \text{Akü Kapasitesi (Ah)} \times \text{Akü Gerilimi (V)} \quad (4.6.)$$

ile formüle edilir. Bu değeri hesaplamak istediğimizde 2,4 kWh değerine ulaşırız.

$$E_{akü} = 20 \text{ Ah} \times 12 \text{ V} = 2400 \text{ Wh} = 2,4 \text{ kWh}$$

Kaç adet aküye ihtiyaç duyulduğu ise ($n_{akü}$);

$$n_{akü} = \frac{E_{toplam}}{E_{akü}} \quad (4.7.)$$

denklemleri aracılığıyla hesaplanarak toplam akü sayısı bulunacaktır.

$$n_{akü} = \frac{E_{toplam}}{E_{akü}} = \frac{90,46}{12 \text{ V} \times 200} = 37,7 \approx 38$$

Tüm sistemin enerji yedekliliğinin 38 adet akü ile sağlanabileceği hesaplanmasına rağmen, baz istasyonu ekipmanlarının tümünün 48 V DC akım ile çalışmalarından dolayı 4 akünün seri bağlanması (4x12V) ile sistemin enerji ihtiyacı karşılanacaktır. Toplam akü sayısının 4'ün katları olması gerektiğinde 40 akü ile sistemin enerji ihtiyacı ve yedekliliği sağlanacaktır. Bu akülerin depolayacağı toplam enerji bulunmak istediğinde;

Toplam akü kapasitesi (E_{toplam});

$$E_{toplam} = n_{akü} * E_{akü} = 40 \times 2,4 \text{ kW} = 96 \text{ kW} \quad (4.8.)$$

formülüne göre hesaplanmış, 96 kW değeri elde edilmiştir.

Enerji ihtiyacının karşılanmasını engelleyen, öngörülemez olumsuz durumlar meydana geldiğinde, bu aküler ile yaz aylarında 37 saat, bahar aylarında 46 saat, kış aylarında ise 60 saat baz istasyonunun enerji ihtiyacı karşılanacaktır. (Bu değerler

Çizelge 4.8.'deki değerlere göre hesaplanmıştır.) Aküler için incelenmesi gereken en önemli unsurlardan bir diğeri de şarj derinliğidir. Yıl içinde akülerden baz istasyonuna sağlanan günlük enerji miktarının, toplam akü kapasitesine bölünmesi ile akü grubunun şarj derinliği hesaplanır. Akülerden baz istasyonuna maksimum enerjinin Eylül ayı içerisinde sağlandığı bilindiğinden, maksimum şarj derinliği Eylül ayında aküler tarafından sisteme sağlanan günlük enerji (30,24 kW) değerine göre hesaplanacaktır.

Şarj Derinliği (DoD);

$$(DoD) = \frac{E_{aküpv}}{E_{toplam}} \quad (4.9.)$$

formülüne göre hesaplanacaktır. Bu formül uyarınca maksimum şarj derinliği hesaplandığında %31,5 sonucu elde edilecektir. Bu değer akü grubunun normal şarjlar altındaki maksimum şarj derinliğidir.

$$(DoD) = \frac{30,24 \text{ kW}}{96 \text{ kW}} = \%31,5$$

Fotovoltaik sistem sebebiyle aküler depoladıkları enerjinin maksimum %31,5'lük kısmını sisteme sağlamaktadır. Akülerin %50 şarj derinliğinin altında şarj ve deşarj olması akülerin performansının ve kapasitesinin düşmesini engellemekte ve ömrünü uzatmaktadır.

Çizelge 4.16. Seçilen akünün elektriksel özellikleri

| Lityum Akü | |
|-----------------------|---------------|
| Maksimum şarj akımı | 50 A |
| Maksimum deşarj akımı | 60 A |
| Şarj voltajı | 13,6 - 13,8 V |
| Fiyat | 6295 ₺ |

Gerek diğeri akülere göre oldukça uzun olan ömrü, gerekse tamamen tükendiğinde diğeri akülere göre daha az zarar görmesi sebebiyle akü grubu 40 adet lityum aküden oluşacaktır. Bu akülerin 27'sine baz istasyonu enerji yedekliliği için, 13'üne fotovoltaik

sistemi günlük olarak beslemek için ihtiyaç duyulmaktadır. Hiç kullanılmayan, şarj ve deşarj edilmeyen akülerin bile belli bir ömrü olduğundan dolayı yedeklilik için tahsis edilen akü sistemlerinin bir arada kullanılması akülerin ömürlerinde azalmaya sebep olmayacak, akülerin verimlerinin artmasını sağlayacaktır. Seçilen akülerin özellikleri Çizelge 4.16.'da yer almaktadır.

4.4.2. Şarj kontrol cihazı seçimi

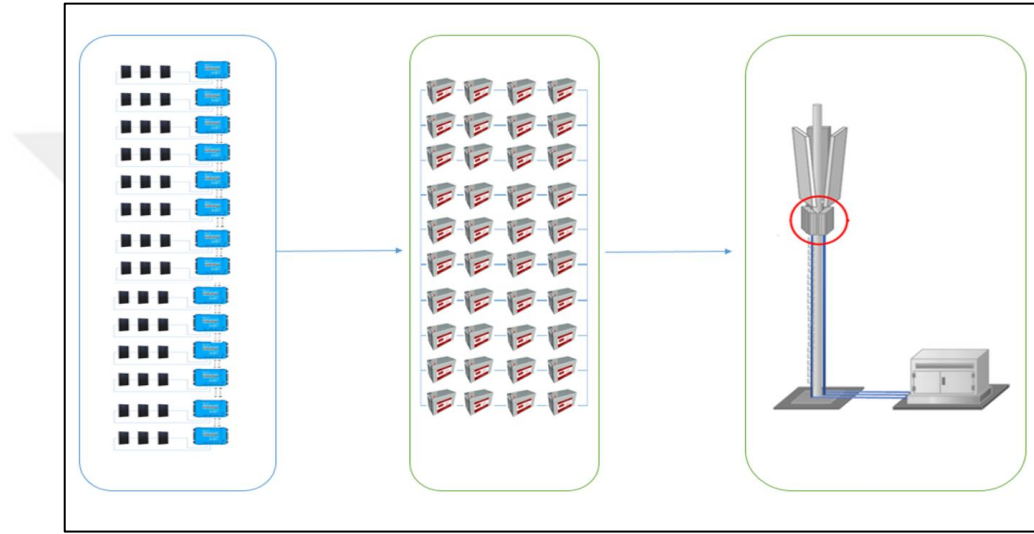
Fotovoltaik panellerin ürettiği enerji, panellerin şarj kontrol ünitelerine bağlanması ile bu ünitelere aktarılacak, bu ünitelerden akülere, akülerden de yüklerle iletilecektir. Yüksek verimleri sebebiyle, MPPT şarj kontrol cihazlarının, kurulumu yapılacak fotovoltaik sistemde kullanılması planlanmıştır. Fotovoltaik sistemin kurulu gücü 13,44 kW olup bu panellerin tümünün bağlanacağı tek bir MPPT şarj kontrol ünitesi bulunmamaktadır. Şarj kontrol cihazlarının çalışabileceği voltaj aralığı, maksimum güç, maksimum akım değerleri belirlidir. Fotovoltaik sistemin sağladığı akım ve gerilim değerlerinde çalışabilecek şarj kontrol cihazlarının seçilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra şarj kontrol cihazının çıkış geriliminin akü setinin eşdeğer gerilimine uygun olması ve sağladığı akımın akü seti için uygun değerlerde bulunması da gerekmektedir. Akü grubu ve şarj kontrol cihazları için uygun akım ve gerilim değerlerinin sağlanabilmesi için fotovoltaik paneller paralel ve seri bağlanarak fotovoltaik diziler oluşturulmaktadır.

Çizelge 4.17. Seçilen şarj kontrol cihazı teknik özellikleri

| Şarj Kontrol Cihazı | |
|------------------------|--------|
| Şarj akımı | 60 A |
| Maksimum panel voltajı | 190 V |
| Maksimum panel gücü | 2800 W |
| Fiyat | 582 ₺ |

Akülerin gerilim değerleri 48 V olduğundan, MPPT şarj kontrol cihazının akü şarj geriliminin 48 V'den büyük olması gerekmektedir. Şarj kontrol cihazı seçimi bu husus gözetilerek yapılmış olup, Çizelge 4.17.'de seçilen şarj kontrol cihazının özellikleri yer almaktadır. Ardından seçilen cihazın desteklediği giriş akımı, açık devre gerilimi ve panel kapasitesi gözetilerek panellerin bağlantısı yapılmıştır. Buna göre 3 panel seri olarak

bağlanacak, bu panel grubu da 1 şarj kontrol cihazına bağlanacaktır. Panellerin açık devre gerilimi 37,8 V 'dir. 3 panelin seri bağlanması sebebiyle bu fotovoltaik dizinin açık devre gerilimi Denklem 3.10.'a göre 113,4 V olarak hesaplanmıştır. Bu değer şarj kontrol cihazının desteklediği gerilim değerinden düşük olması sebebiyle uygundur. Şarj kontrol cihazının şarj akımı 60 A'dır. Şarj kontrol cihazından gelen 60 A akım paralel bağlı akülere dağıtılacak, her bir aküye 15 A akım ulaşacaktır. 15 A akım akülerin şarj edilmesi için uygun bir değerdir. Şekil 4.14.'te şebeke bağlantısı olmayan fotovoltaik sistemin mimarisi yer almaktadır.



Şekil 4.14. Şebeke bağlantısı olmayan fotovoltaik sistemin mimarisi

4.5. Söğüt Cuması Yaylası Hibrit Fotovoltaik Sistem

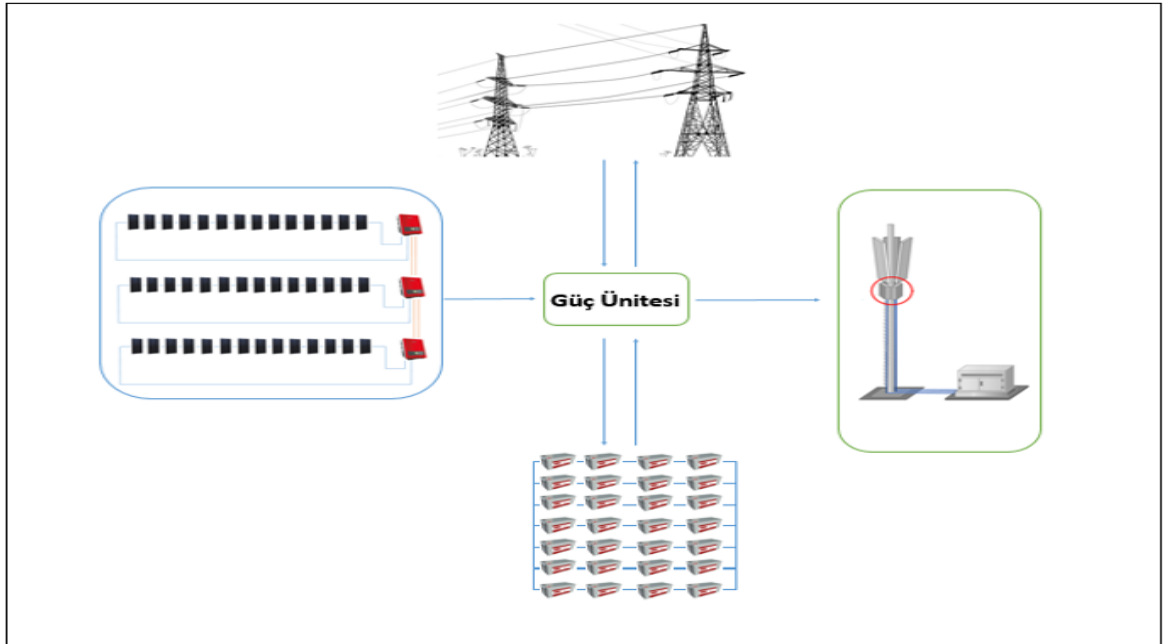
Söğüt Cuması Yaylası'nda, baz istasyonunun enerji ihtiyacının düzensiz elektrik şebekesi ve hibrit fotovoltaik sistem ile karşılanmasına yönelik incelemeler yapılmıştır. Hibrit fotovoltaik sistemin normal koşullarda baz istasyonunun enerji ihtiyacının tümünü karşılaması planlandığından, şebeke bağlantısız fotovoltaik sistem ile aynı sayıda fotovoltaik panele ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemin en önemli unsuru, baz istasyonunun enerji ihtiyacının sürekli karşılanmasını sağlayan hibrit dönüştürücülerdir. Hibrit sistemlerin akü ihtiyacı şebekeden bağımsız sistemlere göre oldukça azdır. Güç ihtiyacı, birincil olarak fotovoltaik sistemden karşılanacak hibrit sistemde düzensiz elektrik şebekesi ikincil enerji kaynağı olarak sistemin enerji yedekliliğini sağlayacaktır. Enerji yedekliliğinin düzensiz elektrik şebekesiyle sağlanması sebebiyle mobil operatörlerin akü gruplarıyla sağladığı 20 saat enerji yedekliliğine hibrit sistemde ihtiyaç duyulmayacaktır. Çok sayıda akü grubuna

ihtiyaç duyulmaması sebebiyle, MPPT hibrit dönüştürücüler ve fotovoltaik paneller ile hibrit sistem kolaylıkla tasarlanabilecektir.

Fotovoltaik panelin güç kapasitesi gözetilerek, hibrit dönüştürücüler incelendiğinde, 6 kW panel gücünü destekleyen, Çizelge 4.18.'de elektriksel özellikleri bulunan 3 hibrit dönüştürücü ile sistemin tasarlanmasına karar verilmiştir. 14 seri bağlı 3 panel dizisi paralel bağlanarak fotovoltaik dizi oluşturulacaktır. Bu diziye 3 hibrit dönüştürücünün paralel bağlandığı dönüştürücü dizisi seri olarak bağlanacaktır. Bu durumda her bir dönüştürücüye ulaşan akım değeri 11 A'dan, gerilim değeri 530 V'den az olacak, dönüştürücüler verimli bir şekilde çalışacaktır. Şekil 4.15.'te ise hibrit fotovoltaik sistem mimarisi yer almaktadır.

Çizelge 4.18. Seçilen dönüştürücünün teknik özellikleri

| Hibrit Dönüştürücü | |
|----------------------------------|---------------|
| Maksimum fotovoltaik sistem gücü | 6000 W |
| Maksimum fotovoltaik gerilim | 580 V |
| Maksimum fotovoltaik akım | 11 A |
| MPPT gerilim aralığı | 125 V - 550 V |
| Maksimum DC akım | 0 ̸ |
| Fiyat | 17529 ̸ |



Şekil 4.15. Hibrit fotovoltaik sistem mimarisi

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Maliyet Analizi

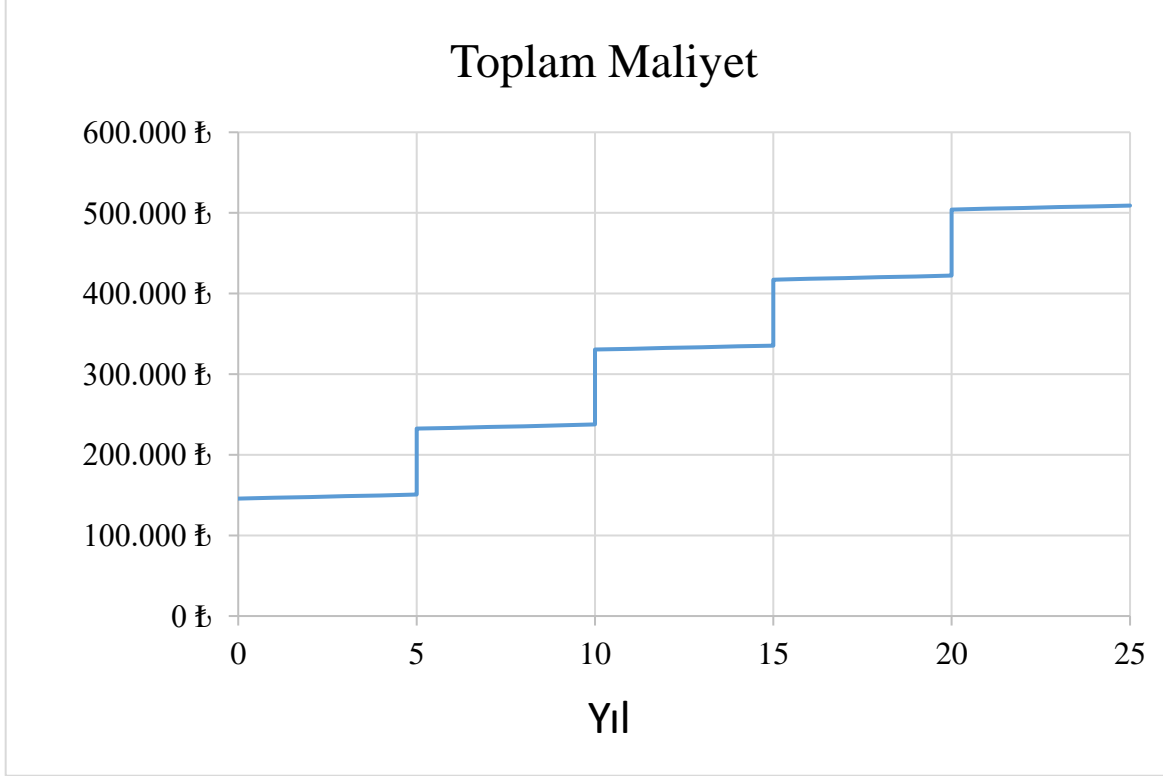
5.1.1. Şebekeden bağımsız sistemin maliyet analizi

Seçilen ekipmanlar ile kurulacak sistemin maliyeti Çizelge 5.1.'de yer almaktadır. Çizelge 5.1.'de görüleceği sistemin kurulum maliyeti 145643 Türk Lirası'dır. Devlet arazisinde baz istasyonu için kiralanılan bölgede ödemeler, kullanılan telekomünikasyon ekipmanları dikkate alınarak fiyatlandırıldığından, fotovoltaik sistemin kapladığı alan için ek bir kira ödemesi olmadığından maliyet analizine kira bedeli yansımamıştır.

Çizelge 5.1. Şebekeden bağımsız sistem kurulum maliyeti

| Malzeme | Miktar | Birim | Birim Maliyeti (Türk Lirası) | Maliyet (Türk Lirası) |
|--------------------------------|--------|-------|---------------------------------|--------------------------|
| 320 W Monokristal Güneş Paneli | 42 | adet | 1040 ₺ | 43680 ₺ |
| Lityum Akü (200Ah) | 13 | adet | 6295 ₺ | 81835 ₺ |
| Şarj Kontrol Cihazı | 14 | adet | 582 ₺ | 8148 ₺ |
| Mc 4 Konnektör Çifti | 42 | adet | 10 ₺ | 420 ₺ |
| 6 mm Solar Kablo (200m) | 200 | metre | 7,8 ₺ | 1560 ₺ |
| Beton + Kontrüksiyon | 1 | adet | 10000 ₺ | 10000 ₺ |
| Toplam Maliyet | | | | 145643 ₺ |

Fotovoltaik panellerin verimleri 10 yılın sonunda %90'a, 25 yılın sonunda ise % 80'e düşmektedir. Bu sebeple sisteme 10. yılın sonunda 9 panel ve 3 şarj kontrol ünitesi eklenerek, sistemin ihtiyacının 25 yıl boyunca karşılanması planlanmıştır. Aküler, düşük şarj derinliğinde şarj ve deşarj döngülerini gerçekleştirirler dahi ömürleri 5 yıldır. Bu sebeple her beş yılda akülerin değiştirilmesi gerekmektedir. Sistemin 10. yılda 11106 TL tutarında ek panel ve ek şarj kontrol cihazı maliyeti, her 5 yılda ise 81835 TL tutarında ek akü maliyeti bulunmaktadır. Fotovoltaik sistemlerin bakım ihtiyaçları az olmasına rağmen 42 panel için yıllık 1000 TL bakım maliyeti bulunduğu da değerlendirilmiştir. Kurulum, bakım ve ek maliyetler hesaba katılarak sistemin toplam maliyeti tespit edilmiştir.

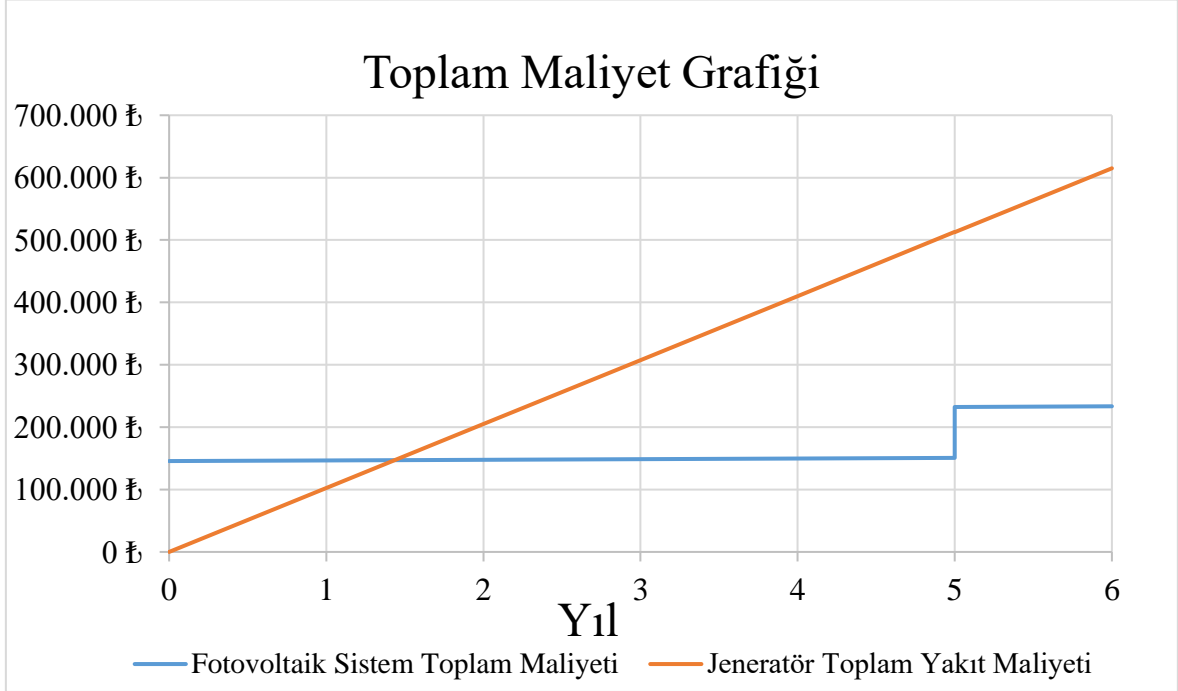


Şekil 5.1. Şebekeden bağımsız sistem toplam maliyet

Fotovoltaik sistemin 25 yıllık toplam maliyetine ilişkin bilgiler Şekil 5.1.'de yer almaktadır. Bu maliyetin yaklaşık %70'i akülerden kaynaklanmaktadır. Düzenli elektrik şebekesi bulunmayan bir alanda şebeke bağlantısı olmayan fotovoltaik sistem kurulduğundan, bu sistem jeneratörle enerji ihtiyacı karşılanan baz istasyonuyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sayesinde elektrik şebekesi bulunmayan alanlarda, hangi güç kaynağının daha avantajlı olacağına yönelik değerlendirme imkanı elde edilmiştir.

Dizel jeneratör ile beslenecek sistemin kurulumu oldukça basittir. Söğüt Cuması Yaylası'nda maksimum ihtiyaç duyulan gücün tüketilmesi için 5 kW gücünde jeneratör ve AC – DC doğrultucudan oluşan güç kaynağı sistemi yeterli olacaktır. Bu güçteki jeneratör saatte ortalama 1,8 litre, bir günde ise 43,2 litre dizel yakıt tüketmektedir. Yüksek hacme sahip yakıt tankının bulundurulmasının da gerekli olduğu bu sistemde jeneratörlerin, devamlı çalışmaları sebebiyle bakım ihtiyaçları fazla ve ömürleri kısa olacaktır. Jeneratör ile beslenen sistemin toplam yakıt ihtiyacı yıllık 15768 litredir. 2020 yılında Antalya ilinde 1 litre dizel yakıt 6,5 Türk Lirası'dır ve yakıt fiyatları yıldan yıla sürekli artmaktadır. Bu sistemlerin sadece yıllık dizel yakıt maliyeti 100492 Türk Lirası'dır. Şekil 5.2.'de görüleceği gibi dizel jeneratörün yakıt maliyeti ikinci yılın ortalarında fotovoltaik sistemin toplam

maliyetini aşmakta olup, 6 yılın sonunda dizel jeneratörün toplam yakıt maliyeti, fotovoltaik sistemin toplam maliyetinin 3 katına yakın değerlere ulaşmaktadır.



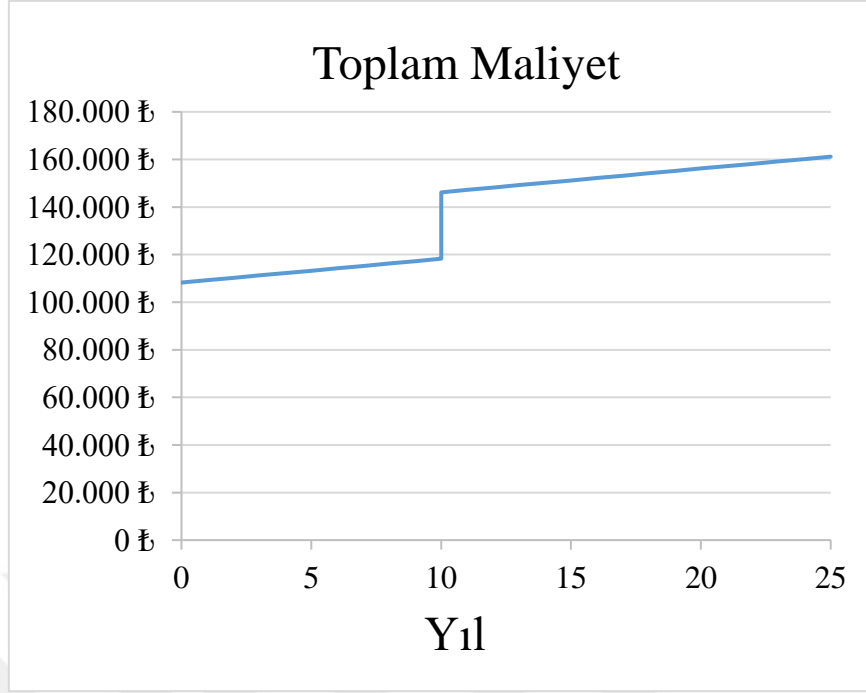
Şekil 5.2. Toplam maliyet grafiği

5.1.2. Söğüt Cuması Yaylası şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem

Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemin tüm maliyeti 108247 Türk Lirası olup detaylı liste Çizelge 5.2.'de yer almaktadır. Bu sisteme panel verimlerinin azalması sebebiyle 10. yılın sonunda 10 panel ve 1 hibrit dönüştürücü ilave edilecektir. Bakım maliyetleri ve ek kurulumlar da eklendiğinde Şekil 5.3.'te görülebileceği gibi hibrit fotovoltaik sistemin 25 yılın sonundaki toplam maliyeti 161176 Türk Lirası olmaktadır.

Çizelge 5.2. Hibrit sistem kurulum maliyeti

| Hibrit Fotovoltaik Sistem | Miktar | Birim | Birim Maliyeti (Türk Lirası) | Maliyet (Türk Lirası) |
|--------------------------------|--------|-------|------------------------------|-----------------------|
| 320 W Monokristal Güneş Paneli | 42 | adet | 1040 ₺ | 43680 ₺ |
| 6 kW Hibrit İnverter | 3 | adet | 17529 ₺ | 52587 ₺ |
| Mc 4 Konnektör Çifti | 42 | adet | 10 ₺ | 420 ₺ |
| 6 mm Solar Kablo (200m) | 200 | metre | 8 ₺ | 1560 ₺ |
| Beton + Kontrüksiyon | 1 | adet | 10000 ₺ | 10000 ₺ |
| Toplam Kurulum Maliyeti | | | | 108247 ₺ |



Şekil 5.3. Hibrit sistem toplam maliyet

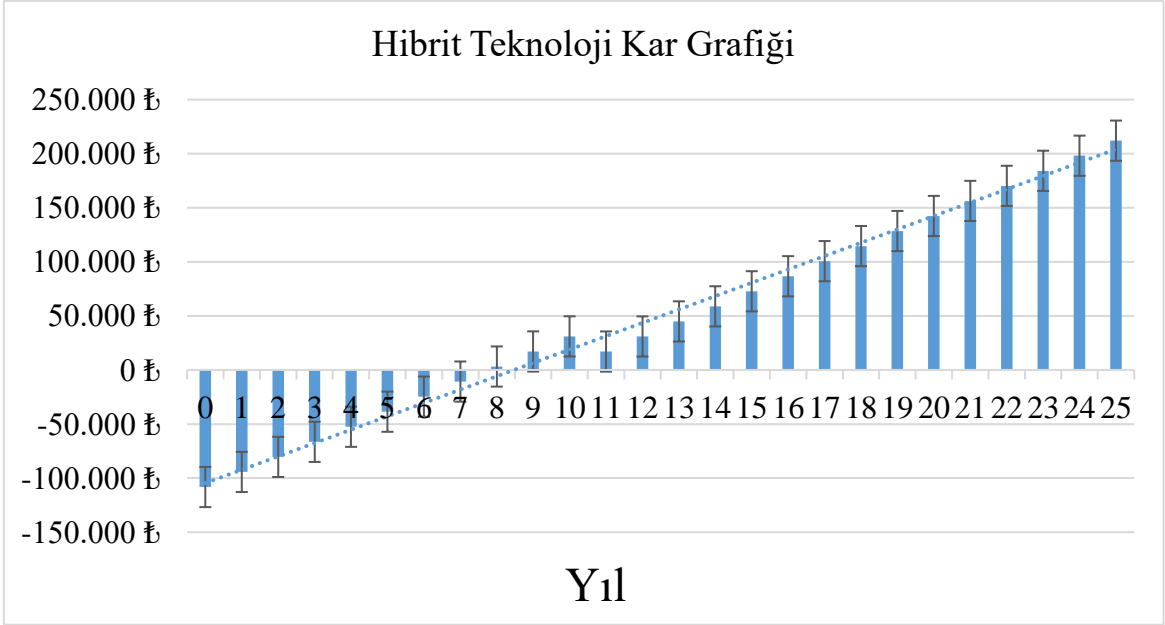
Baz istasyonunun yıllık tükettiği enerji miktarı 18662 kWh'dır. Bu elektrik ihtiyacının şebekeden karşılanması halinde, AC – DC enerji dönüşümü gerçekleştirilecek olduğundan elektrik şebekesinden 19642 kWh enerji satın alınacaktır. (Doğrultucunun %95 verim ile elektrik enerjisini baz istasyonlarına aktardığı varsayılmıştır.) Sanayide tüketilen elektriğin fiyatı 2020 yılı itibariyle 0,8 TL/kWh'dır. Tüketilen elektrik enerjisinin değeri aşağıdaki formüle göre hesaplanacaktır. Bu değer aynı zamanda baz istasyonunun enerji ihtiyacının elektrik şebekesinden karşılanması halinde yıllık ödenecek elektrik faturası bedelini ifade etmektedir.

Yıllık fatura tutarı hesaplanmak istediğinde;

$$Yıllık Fatura Bedeli = Elektrik birim fiyatı * Şebeke Elektriği \quad (5.1)$$

denklemlerle formüle edilir. Bu değer 15713 Türk Lirası'dır.

$$Yıllık Fatura Bedeli = 0,8 \frac{TL}{kWh} * 19642 kWh = 15713 TL$$



Şekil 5.4. Hibrit teknoloji kar analizi

Elektrik şebekesine erişimi bulunan bu bölgede baz istasyonunun enerji ihtiyacının fotovoltaik panellerle sağlanması durumunda yıllık 15713 TL tasarruf sağlanacaktır. Bununla birlikte fotovoltaik panellerde üretilen fazla elektrik de elektrik şebekesine satılabilecektir. Söğüt Cuması Yaylası'nda kurulan fotovoltaik sistemin ürettiği fazla enerji, fotovoltaik sistemin barındırdığı riskler değerlendirilerek maliyet analizinde ihmal edilmiştir. Çizelge 5.4.'te görüldüğü üzere 8. yıl içinde şebeke bağlantılı sistem daha karlı hale gelecektir. Bunun yanında mobil operatörlerin baz istasyonlarında sağlamış olduğu 20 saat akü yedekliliğine, fotovoltaik sistem ve elektrik şebekesi tarafından beslenen bu sistem için ihtiyaç yoktur. Sistemin yedeklilik süresi gece vakitleri gözetilerek yarıya indirilecek, 27 aküden 13'üne ihtiyaç duyulmayacaktır. Her beş senede ömrünü tamamlayan bu akülere ihtiyaç duyulmaması sebebiyle hibrit fotovoltaik sistem aracılığıyla akü maliyetleri azalacak, servis sürekliliği ve yedekliliği güçlendirilirken beş yılda bir 81835 TL tutarında ek tasarruf sağlanacaktır.

Fotovoltaik teknolojilerin en önemli sorunu enerjinin depolanmasının pahalı bir işlem olmasıdır. Bu pahalı işlem fotovoltaik teknolojinin gelişmesindeki en önemli engellerden birisidir. Bu durum, şebekeden bağımsız sistemler ile hibrit sistemler arasındaki kurulum ve işletim maliyetlerine yansımaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Fotovoltaik teknoloji, insanlık için oldukça önemli imkanlara sahiptir. Fotovoltaik teknoloji sayesinde zorlu coğrafi bölgelere dek elektrik enerjisi sağlanarak enerji yoksunluğu sebebiyle yaşanan olumsuzluklar ortadan kaldırılacak, doğaya salınımı gerçekleştirilen zararlı gazların ve çevre dostu olmayan, savaşlara neden olan enerji kaynaklarının kullanımının azalması sağlanacaktır.

Oldukça basit bir tasarımı olduğu düşünölen fotovoltaik sistemlerin tasarımında hassas ve dikkat edilmesi gereken unsurlar bulunmaktadır. Bu detayların en önemlilerinden birisi eğim açısıdır. Yanlış eğim açısıyla sistem montajının yapılması, enerji elde etmek için kurulacak sistemin ihtiyaç duyduğu fotovoltaik panel sayısının %20 düzeyinde artmasına sebep olacaktır. Panel sayısının %20 artması, daha fazla panel kapasitesi anlamına gelecek, daha çok sayıda şarj kontrol cihazı, dönüştürücü kullanılmasına neden olarak panel sayısı ile sınırlı olmayan bir maliyet artışına yol açacaktır. Fotovoltaik sistem tasarlanırken en çok kullanılan yöntem, panellerin en az enerji ürettiği kış aylarında dahi yeterli enerji üretilmediğini kontrol ederek ihtiyaç duyulan ekipmanları belirlemektir. Bu yaklaşımda, kışın dahi yüklerle enerji sağlayan sistemin tüm mevsim enerji sağlayacağı varsayılarak hareket edilmektedir. Bu yaklaşım yazın üretilen enerjinin verimsiz kullanımına neden olurken, gereğinden fazla panel kullanımına da neden olarak kurulum maliyetini arttırmaktadır. Kurulum maliyetinin artması ise fotovoltaik enerjiye yönelik talebi azaltmaktadır. Diğer bir yaklaşım ise yüklerin en çok güç tükettiği dönemde dahi panellerin yeterli enerji üretilmediğinden yola çıkan yaklaşımdır. Yük tüketiminin sabit olmadığı durumlarda bu yöntem, az enerji talebi olan bir günde sistemin yeterli enerji üretmemesine yol açarak sistemin sürekliliğini olumsuz etkilemektedir.

Gelişmiş bilgisayar yazılımları sayesinde dünyanın her bölgesine düşen ışınım miktarı saatlik, günlük ve aylık olarak kolayca belirlenebilmektedir. Bu durum fotovoltaik sistem tasarımı yaparken çok daha detaylı inceleme yapmamızı sağlayan bir durumdur. Değişen ışınım değerleri sebebiyle değişken bir enerji üretim profiline sahip olan bu sistemlerin anlık potansiyellerin gözlenmesi sayesinde yıl içinde her an enerji ihtiyacının

karşılanmasını sağlayacak sistemlerin inşası mümkün olmaktadır. Bu kapsamda tüketilen enerjinin de fotovoltaik sistem gibi saatlik, günlük, aylık değerlerinin tespit edilerek, bu değerlerin eşleşip eşleşmediği sorgulanmalıdır. Bu sayede enerji ihtiyacı 4 mevsim karşılanacak enerji sistemleri çok daha az panelle sağlanabilir, akülerde depolanan enerjinin en çok ne kadarının kullanıldığı tespit edilerek uygun akü sayısı ve cinsi belirlenebilir. Şebeke bağlantısı bulunmayan sistemin en önemli unsurlarından birisi olan akülerin maliyeti, bazı durumlarda panel maliyetinden dahi fazla olabilmektedir. Ayrıca bu tasarım sayesinde sürekli bozunan ve periyodik olarak yenilenmesi gereken akülerin sayısı doğru tespit edilerek, sistemin işletim maliyeti önemli düzeyde düşürülebilmektedir.

Geniş bir veri iletimi ve kontrol mekanizmasına sahip olan mobil operatörler, bu mekanizmaları sayesinde işlettikleri tüm baz istasyonlarını servis sürekliliği gereği kontrol etmektedirler. Bu kontrol mekanizması dahilinde sistemlerin sıcaklıkları sabit tutulmakta, enerji ihtiyaçları sürekli karşılanabilmekte, olumsuz şartlar hızlı bir şekilde önlenmektedir. Bu kontrol sistemleriyle baz istasyonlarından alınan hizmetin yoğun olmadığı durumlarda enerji tasarrufu sağlanarak baz istasyonunun enerji ihtiyacı düşürülebilmektedir. Geniş bir kontrol ağına sahip bu zincirde, uzaktan gerçekleştirilebilen enerji yönetimi sayesinde, anlık alarmlar ve raporlamalar eşliğinde, enerji tüketimi, fotovoltaik sistemin üretebildiği enerji seviyesine çekilebilmektedir. Sistemin ihtiyaçlarının güneş enerjisi tarafından karşılandığı tasarımların dışında, güneş enerjisinin profili analiz edilerek, buna uygun enerji tüketim stratejileri gerçekleştirilmelidir. Bu sayede fotovoltaik enerji çok daha verimli bir şekilde kullanılırken, enerji sürekliliği de sağlanabilecektir.

Fotovoltaik sistemin önündeki en önemli engel depolama sorunudur. Enerji depolama sorunu, günün her saati yüksek enerji tüketen baz istasyonları açısından çok daha önemlidir. Olumsuz şartlar gözetilmeden, sadece normal şartlarda sisteme akü tarafından sağlanan enerji miktarı gözetilerek tasarlanan bir sistemde bile akü maliyeti, neredeyse enerji üretimini sağlayan panel maliyetine eşittir. Akülerin paneller gibi uzun ömürlü olmamasından dolayı daha da artan bu maliyet, şebeke bağlantısı olmayan fotovoltaik sistemler için en önemli dezavantajdır. Sürekli akü ihtiyacı olan güneş enerjisi sistemleri ile sürekli akü gereksinimi duyan baz istasyonlarının birlikte tasarımı akü maliyetini önemli düzeyde düşürmektedir.

Hibrit dönüştürücülerin maliyeti normal dönüştürücülere oranla daha yüksek olsa da akülerin çok daha az kullanıldığı bu sistemlerin akü maliyeti çok daha az, yıl içinde derin deşarj yüzdelerinin düşük olması sebebiyle ömürleri çok daha yüksektir. Servis sürekliliğinin önemi gereği sürekli akü gereksinimi duyan baz istasyonlarının, hibrit fotovoltaik sistem ile birlikte tasarımı hem toplam akü maliyetini düşürecek hem de sistemin sürekliliğini sağlayacaktır. Hibrit sistemler, enerji ihtiyacını karşılayarak enerji maliyetini düşürürken, mobil operatörlerin baz istasyonlarında kullandığı akü miktarını da azaltarak bu alanda da oldukça önemli bir katkı sunacaktır. Bu yüzden hibrit sistemlere uyumlu dönüştürücünün maliyeti yüksek olsa da hibrit teknoloji; enerji tüketimi, enerji sürekliliği ve akü kullanımı konusunda önemli avantajlara sahiptir.

Yenilenebilir enerjinin çok daha etkili olabilmesi, enerjinin üç önemli ayağı olan üretim, tüketim ve depolama çalışmalarının bir arada, koordineli bir şekilde yürütülmesine bu alanların yenilenebilir enerjiye uyumlu hale getirilmesine bağlıdır. Yüksek ve kesintisiz enerji tüketimine sahip baz istasyonlarında dahi uygun bölgelerde enerji ihtiyacını karşılayabilen bu sistemler, depolama teknolojisinin gelişmesi, enerji tasarrufu uygulamaları ile tüketimin düzenlenebildiği durumlarda çok daha verimli hale gelecektir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- AH Systems, 2020, The importance of antenna beamwidth in RF testing, <https://www.ahsystems.com/articles/antenna-beamwidth.php>, erişim tarihi: 27.09.2020
- Alsharif, M. H. ,2017. Techno - Economic Evaluation of a Stand - Alone Power System Based on Solar Power / Batteries for Global System for Mobile Communications Base Stations, *Energies*, 10, 3, 392 p., doi:10.3390/en10030392, erişim tarihi: 08.07.2020
- Akyol, Ş.M., Kılıç, M., 2007, Konutların Elektrik Talebinin Güneş Pilleri ile Karşılanması ve Ekonomik Yönden Jeneratörlerle Karşılaştırılması, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildirileri, Makine Mühendisleri Odası, 07, s. 177-188, <https://mmo.org.tr/tesisat-muhendisligi-dergisi/tesisat-muhendisligi-106>, erişim tarihi: 07.06.2020
- Andreolli, F., 2015, Yeni Nesil Fotovoltaikler Üçüncü Nesil Teknolojiye Geçiş İçin Tasarım ve Uygulama Kılavuzu, (Çev. Ç. Özşar ve A. Bodur), TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, s.154-159.
- Anonim, 2020 , Crude Oil Prices - 70 Year Historical Chart, <https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart>, erişim tarihi: 05.06.2020.
- Anonim, 2017, Crystalline vs Thin Film Solar Panels , <https://www.solaris-shop.com/blog/crystalline-vs-thin-film-solar-panels/>, erişim tarihi: 25.04.2020.
- Anonim, 2016, Types of Solar systems, <http://pvinsights.com/Knowledge/Type.php>, erişim tarihi:26.09.2020.
- Anonim, 2015, N - Tipi ve P – Tipi Yarı İletkenler, <https://diyot.net/n-tipi-ve-p-tipi-yari-iletkenler>, erişim tarihi: 17.05.2020
- Anonim, 2006, Forward Biased P – N Junction, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/diod.html>, erişim tarihi: 13.05.2020
- Aselsan, 2020, Ulak Dördüncü Nesil (4,5G/LTE Advanced) Haberleşme Sistemi, <https://ulakhaberlesme.com.tr/index.php/tr/>, erişim tarihi: 06.05.2020
- Aslanbaş, S., Şahin,A., Yakut,A., 2020, GSM Baz İstasyonunun Güç İhtiyacını Karşılacak Fotovoltaik Sistem Tasarımı, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 2020, 12(1), s.20-26,<https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1154296>, erişim tarihi:05.06.2020.
- Ayang, A., Videme, B., Temga, J., 2016, Power Consumption: Base Stations of Telecommunication in Sahel Zone of Cameroon: Typology Based on the Power Consumption—Model and Energy Savings, *Journal of Energy*, 2016, p. 1–15, <https://doi.org/10.1155/2016/3161060> ,erişim tarihi:18.06.2020.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- BTK, 2020, Baz İstasyonları İle İlgili Sıkça Sorulan Sorular, ,
<https://tuketici.btk.gov.tr/uploads/pages/tuketici-rehberi/baz-istasyonu-brosur.pdf>,
erişim tarihi:09.07.2020.
- Boxwell, M., 2014, Solar Electricity Handbook, Greenstream Publishing, p. 41-99.
- Carlos, X. 2019, 10 Best Solar Inverter Brands For Your Solar Panels,
<https://www.itekenergy.com/inverters/10-best-solar-inverter-brands-for-your-solar-panels/>,
erişim tarihi: 03.02.2020.
- Chi,M., 2019, Why China's mobile coverage is superior to that of the US,
<https://www.globaltimes.cn/content/1172513.shtml>, erişim tarihi: 6.09.2020.
- Çilli, K., 2018, PWM ve MPPT şarj kontrol cihaz karşılaştırması,
<http://www.keremcilli.com/pwm-ve-mppt-sarj-kontrol-cihaz-karsilastirmasi/>, erişim tarihi:
05.06.2020.
- Çilli, K., 2020, Güneş enerji elektrik satışı para kazandırır mı,
<http://www.keremcilli.com/gunes-enerji-elektrik-satisi-para-kazandirir-mi/>,erişim
tarihi:05.05.2020.
- Djilali, B., Boualem, H., Yahdou,A., 2017, Modified perturb and observe MPPT control for
avoid deviation in photovoltaic systems, Journal of Electrical Engineering 17,1, p.28-
37,https://www.researchgate.net/publication/317216785_Modified_perturb_and_observe_MPPT_control_for_avoid_deviation_in_photovoltaic_systems/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic, erişim tarihi 09.08.2020.
- Dhuheir, M., Asshad, M., Küçük, K., 2017, Channel Capacity Analysis of Multiple Antenna
Systems for Next Generation Wireless Communication Systems, Düzce University
Journal of Science & Technology, 5, p. 429-440,
<https://avesis.kocaeli.edu.tr/yayin/0fc1be68-9f91-41e9-84b5-d9fe90647a62/channel-capacity-analysis-of-multiple-antenna-systems-for-next-generation-wireless-communications-systems> ,erişim tarihi: 05.06.2020.
- EIA, 2014, Solar photovoltaic output depends on orientation, tilt, and tracking,
<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=18871>, erişim tarihi:05.07.2020.
- Eke, R., Senturk, A., 2012. Performance comparison of a double-axis sun tracking versus
fixed PV system. Solar Energy, 2012, 86, 9, p.2665–2672, erişim tarihi: 13.06.2012.
- EPDK, 2019, Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği,
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/05/20190512-1.htm>, erişim tarihi:
06.05.2020.
- Ericsson, 2010, RBS 6201/6202 & BBS/BBU 6201 Installation,Ran System Description and
RBS 6000 Survey.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ericsson, 2004, Mini-Link TN Etsi, Microwave Transmission From an End-to-End Perspective.
- Eskier,U. 2017, Enlem Nedir Boylam Nedir, <https://www.makaleler.com/enlem-ve-boylam-nedir>, erişim tarihi: 01.04.2020.
- Gadze, J.D., Aboagye, S.B., Agyekum, K.A.P., 2016, Real Time Traffic Base Station Power Consumption Model for Telcos in Ghana, Conference: International Journal of Computer Science and Telecommunications, https://www.researchgate.net/publication/309618577_Real_Time_Traffic_Base_Station_Power_Consumption_Model_for_Telcos_in_Ghana, erişim tarihi: 08.09.2019.
- Görgün, H., Sevil, M., Ercan, M., 2015, Baz istasyonlarının matematiksel olarak güç tüketim fonksiyonunun belirlenmesi ve enerji tüketiminin kestirilmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2015, 31, 1, s.73-81, <https://dergipark.org.tr/pub/erciyesfen/issue/25554/269567>, erişim tarihi: 04.05.2020,
- Guerriero,P., Daliento,S., D'Alessandro,V., Vallone,G., 2013, A simple test-bench to evaluate partial shading effects on the MPPT efficiency of a PV inverter, IEEE 3rd International Conference on Clean Electrical Power, doi: 10.1109/ICCEP.2013.6586959, erişim tarihi: 06.05.2020.
- Gunerhan, H., Hepbasli, A., 2007, Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications, Building and Environment, 42, 2, p. 779-783, https://www.emo.org.tr/ekler/bb3f65bfca95624_ek.pdf, erişim tarihi: 06.08.2020.
- Huawei, 2018, Distributed Base Station DBS3900, <https://e.huawei.com/en/products/wireless/gsm-r/radio-access-network/dbs3900>, erişim tarihi: 06.05.2020.
- Hürriyet, 2020, Gelen dönmek istemiyor... Yaz aylarında nüfusu 10 katına çıkıyor, <https://www.hurriyet.com.tr/seyahat/gelen-donmek-istemiyor-yaz-aylarinda-nufusu-10-katina-cikiyor-41589363>, erişim tarihi: 17.09.2020
- Ismail, M., Zhuang, W., Serpedin, E., Qaraqe, K., 2015, A Survey on Green Mobile Networking: From The Perspectives of Network Operators and Mobile Users, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, July, erişim tarihi: 02.19.2020.
- Kaldellis, J.K., 2010, Optimum Hybrid Photovoltaic-Based Solution For Remote Telecommunication Stations, Renewable Energy, 35 , p. 2307 - 2315, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148110001461>, erişim tarihi: 23.03.2010.
- Lane, C., 2020, What is a solar tracker and is it worth the investment?, <https://www.solarreviews.com/blog/are-solar-axis-trackers-worth-the-additional-investment>, erişim tarihi:11.01.2020.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- MEB, 2012, Yenilenebilir Enerji Teknolojileri - Güneş Pillerinde Üretilen Doğru Akımın Temelleri, Yenilenebilir Enerji Teknolojileri, 8 s., http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/G%C3%BCne%C5%9F%20Pillerinde%20%C3%9Cretilen%20Do%C4%9Fru%20Ak%C4%B1m%C4%B1n%20Temelleri.pdf, erişim tarihi: 05.06.2020.
- MEB,2008,Aküler,http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Ak%C3%BCler.pdf, erişim tarihi: 05.06.2020.
- MEB, 2008, Yenilenebilir Enerji Teknolojileri Kontrol Sisteminin Kurulumu, http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Kontrol%20Sisteminin%20Kurulumu.pdf, erişim tarihi:05.06.2020.
- MGM, 2018, Türkiye Global Güneş Radyasyonu Uzun Yıllar Ortalaması (2004-2018), https://www.mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon_iller.aspx, erişim tarihi: 27.09.2020.
- Milliyet, 2020, Yaylanın nüfusu yazın 10 kat artıyor , <https://www.milliyet.com.tr/tatil/yaylanin-nufusu-yazin-10-kat-artiyor-6284313>, erişim tarihi:09.09.2020.
- Newkirk, M., 2016, How Solar Power Works - On-Grid, Off-Grid And Hybrid Systems, <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2014/5/4/how-solar-works>, erişim tarihi: 09.06.2020.
- NREL, 2020, Best Research – Cell Efficiencies, <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20200925.pdf>, erişim tarihi: 05.06.2020.
- NREL, 2020, High-Concentration III-V Single-Junction and Multijunction Solar Cells, <https://www.nrel.gov/pv/high-efficiency-iii-v-solar-cells.html.pdf>, erişim tarihi: 05.06.2020.
- Öztürk, H. Kaya, D., 2014, Güneş Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji, Umuttepe Yayınları, s. 57 – 317.
- Pang, Q., 2016, Advances in lithium–sulfur batteries based on multifunctional cathodes and electrolytes, *Nature Energy*, 1, 16132, doi: 10.1038/nenergy.2016.132, erişim tarihi: 08.09.2020.
- Pepple, V.B.O., Cookey,C.I., Alaminokuma, G.I., 2009, Effects of Temperature, Solar Flux and Relative Humidity on the Efficient Conversion of Solar Energy to Electricity, *European Journal of Scientific Research*, 35, 2, p.173-180, <https://oi.org/10.1016/j.egypro.2011.09.018>, erişim tarihi: 28.05.2020.
- Ponnusamy, M., 2013, An Overview of Batteries for Photovoltaic (PV) Systems,*International Journal of Computer Applications*,2013, 82,12, p. 28-32, doi: 10.5120/14170-2299, erişim tarihi: 18.06.2020.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Prasad, L., Bjerling, O., 2018, An Energy Efficient Radio Base Station, Faculty Of Lund Engineering, p.2-57.
- Salihoddin, M., Muhtazaruddin, M., Bani, N., Aris, S., Kaidi, H., Jalil, Z., Izhar, M., 2018, Hybrid Power Supply System for Telecommunication Base Station, International Conference on Smart Sensors and Application (ICSSA), 2018, 2., doi: 10.1109/ICSSA.2018.8535790, erişim tarihi: 6.09.2020.
- Shockley, W., Queisser, H., 1961, Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction, Solar Cells, J. Appl. Phys., 32, 510.
- SKIL, 2020. Akü Teknolojileri Arasındaki Ana Farklar, <https://www.skil.gen.tr/alet-kullanimina/aku-teknolojileri-arasindaki-ana-farklar.html>, erişim tarihi: 09.08.2020.
- Solargis, 2016, User Manual, https://solargis2-web-assets.s3.eu-west-1.amazonaws.com/public/doc/5247b2305d/Solargis_pvPlanner-Manual_2016-12-14.pdf.
- TBMM, 2019, Yazılı Soru Önergesi, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, https://www.tbmm.gov.tr/develop/owa/tbmm_internet.anasayfa, erişim tarihi: 17.06.2020.
- Ültanır, M., 1987, Termodinamik, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, s.21.
- Walters, L.O., Kritzinger, P.S., 2000, Cellular Networks Past, Present and Future, <https://faculty.kfupm.edu.sa/ICS/salah/092/ics444/handouts/mobile/mobileO.html>, erişim tarihi: 08.08.2020.
- Yılmaz, S., Karatutlu, A., Kekec, C., 2015, Designing a PLC-Based Real-Time Sun Tracking System, International Journal of Scientific and Technological Research, 2015,1,5.
- Yiğit, A., Atmaca, İ., 2018, Güneş Enerjisi Mühendislik Uygulamaları, Dora Yayınları, s. 188.
- YiğitAkü, 2020, Jel VRLA Derin Deşarj Aküler 12V 100 Ah Jel Akü, <https://www.yigitaku.com/wp-content/uploads/2018/01/12V-100Ah-Jel-TR.pdf>, erişim tarihi: 17.06.2020