

This manuscript represents a preprint version. A revised and peer-reviewed version may be submitted to and published in a scientific journal at a later stage.



Zorlu Coğrafi Koşullardaki Bir İleri Harekât Üssü (İHA Yer Kontrol İstasyonu) İçin Şebekeden Bağımsız Hibrit Enerji Sistemi Tasarımı: Kuzey Irak Örneği ve Lojistik Maliyet Analizi

Bahar Akben ORCID: 0009-0005-7686-5005,

Ali Erbaş ORCID:0009-0007-9596-6535

*Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yalova/Merkez
Yalova University Engineering Faculty Electrical and Electronics Engineering, Yalova/Merkez*

Özet

Bu çalışmamızda enerji güvenliğinin kritik önem taşıdığı sınır ötesi operasyon bölgelerinde (Kuzey Irak) konuşlu, şebekeden bağımsız(off-grid) bir İHA Yer Kontrol İstasyonunun (YKI) enerji ihtiyacını karşılamak üzere hibrit enerji tekno-ekonomik analizi yapılmıştır. Çalışmada, rüzgar enerjisi potansiyeli olmasına rağmen, askeri operasyonel gizlilik (düşük akustik ve radar izi) ve lojistik kurulum zorlukları nedeniyle rüzgâr türbinleri kapsam dışı bırakılmış; sistem PV ve batarya teknolojileri üzerine kurgulanmıştır. Askeri üstlerde enerji sürekliliği hayati önem taşımaktadır. Yakıt ihmalinin karayoluyla güvenli olmadığı durumlarda kullanılan helikopter lojistiği, birim enerji maliyetlerini aşırı artırmaktadır. Çalışmada ortalama 320 kWh/gün elektrik yüküne sahip bir askeri üs için HOMER Pro yazılımı kullanılarak Dizel Jeneratör, Lityum-İyon Batarya tabanlı ve Güneş (PV) hibrit sistemi modelleri kullanılmıştır. Hassasiyet analizi kapsamında dizel yakıt fiyatı; standart lojistik (1.2 \$/L) ve helikopter lojistiği (6.0 \$/L) durumlarında incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, yakıtın helikopterlerle taşındığı senaryoda, önerilen PV/Batarya destekli hibrit sistem, sadece jeneratör kullanılan sisteme göre %81 oranında maliyet tasarrufu sağlanmış ve sistemin geri ödeme süresi 1,4 yıla kadar düşmüştür. Bu sistem, operasyonel maliyetleri düşürmenin yanı sıra termal ve akustik izi azaltarak üs güvenliğine katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Hibrit Enerji Sistemleri, HOMER Pro, Lojistik Maliyet Analizi, Askeri Mikro Şebeke, İHA Yer Kontrol İstasyonu.

Abstract

This study presents a techno-economic analysis of a hybrid energy system designed to ensure energy security for an off-grid Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Ground Control Station (GCS) located in cross-border operational regions (Northern Iraq). Ensuring energy resilience is of paramount importance for military installations. In scenarios where terrestrial fuel supply routes are compromised, the reliance on helicopter logistics exponentially escalates unit energy costs. Using HOMER Pro software, this research models a hybrid configuration integrating Diesel Generators, Lithium-Ion Batteries, and Solar Photovoltaics (PV) for a military base with an average daily demand of 320 kWh. Wind energy was excluded due to operational stealth requirements (acoustic/radar signature) and logistical constraints, focusing the design on PV/Battery architectures. A sensitivity analysis was performed by comparing standard logistics fuel pricing (\$1.2/L) against helicopter-delivered fuel pricing (\$6.0/L). Simulation outcomes indicate that in helicopter-dependent scenarios, the proposed PV/Battery hybrid architecture yields an 81% reduction in total costs compared to standalone diesel systems, with a payback period optimized to 1.4 years. Furthermore, the proposed system significantly enhances operational security by mitigating thermal and acoustic signatures.

Keywords: Hybrid Energy Systems, HOMER Pro, Logistics Cost Analysis, Military Microgrid, UAV Ground Control Station.

1.Giriş

Enerji arz güvenliği, askeri operasyonların devamlılığı açısından en önemli bileşenlerdendir. Özellikle sınır ötesi operasyonlarda ve şebeke hattının bulunmadığı (off-grid) zorlu coğrafi koşullarda askeri üslerin enerji ihtiyacı, geleneksel olarak dizel jeneratörler ile karşılanmaktadır. Fakat fosil yakıtı dayalı bu sistemler, sürekli yakıt ikmali gerektirdiği için hem yüksek maliyetlere yol açmaktadır hem de konvoyların lojistik saldırı riskini açık hale getirmektedir [1]. Bu sebeple, yenilebilir enerji kaynaklarına dayalı hibrit sistemler, yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda “enerji bağımsızlığını” artırarak operasyonel güvenliğe katkı sağlamaktadır. Literatürde hibrit enerji sistemlerinin optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu sistemlerin farklı ölçeklerdeki uygulamalarının maliyet etkinliği kanıtlanmıştır. Örneğin, Türkođan ve ark. [2] tarafından yapılan çalışmada, şebekeden bağımsız 40 hanelik bir topluluğun enerji ihtiyacının hibrit sistemlerde karşılanmasının teknik ve ekonomik analizi yapılmış, uygun batarya teknolojileri ile kesintisiz enerjinin sağlanabileceği görülmüştür. Benzer şekilde tarımsal uygulamalarda da hibrit sistemlerin uygulanabilirliği Türkođan ve ark. [3] tarafından bir çiftlik evi örneği üzerinden incelenmiş ve Lityum-İyon batarya teknolojisinin teknik üstünlüklerine dikkat çekmiştir.

Askeri üstlerde de sivil yapılara benzer şekilde geniş çatı ve arazi alanları mevcuttur. Kamu binalarında çatı üzeri fotovoltaik (PV) performansının belirlenmesi üzerine Arslan ve

Türkdoğan [4] tarafından yapılan çalışma, doğru mimari ve elektriksel tasarımla binaların kendi enerjisini üretebileceğini ortaya koymuştur.

Ancak askeri uygulamalarda sivil uygulamalardan ayıran en temel fark “lojistik maliyetler” dir. Çatışma bölgelerine yakıt taşımının maliyeti (Fully Burdened Cost of Fuel -FBCF), pompa fiyatının çok üzerine çıkabilmektedir. Bu çalışmada, literatürdeki [1-4] çalışmalardan farklı olarak, lojistik kısımların en üst seviyede olduğu Kuzey Irak bölgesindeki bir İHA Yer Kontrol İstasyonu (YKİ) için hibrit bir mikro şebekede tasarlanmıştır. Çalışmanın temel amacı, yakıtın karayoluyla taşınmasının riskli olduğu ve helikopter lojistiğinin kullanıldığı senaryolarda, güneş ve batarya destekli sistemlerin ekonomik avantajları HOMER Pro yazılımı ile analiz etmektedir. Ayrıca Türkdoğan [5] tarafından belirtilen konut ve elektrikli araç yüklerinin optimizasyon yaklaşımı, bu çalışmada askeri yük profillerine uyarlanmıştır.

2.Sistem Tanıtımı

Bu çalışmada tasarlanan mikro şebeke sistemi, Kuzey Irak ‘in dağlık Hakurk bölgesinde (koordinatları 36,95° K, 44,40° D) konuşlandırılması planlanan geçici bir İHA Yer Kontrol İstasyonunu beslemektedir. Bölge karasal iklimin sert geçtiği, kışın ulaşımın zorlaştığı ancak yıllık güneşlenme süresinin yüksek olduğu bir coğrafyadır.



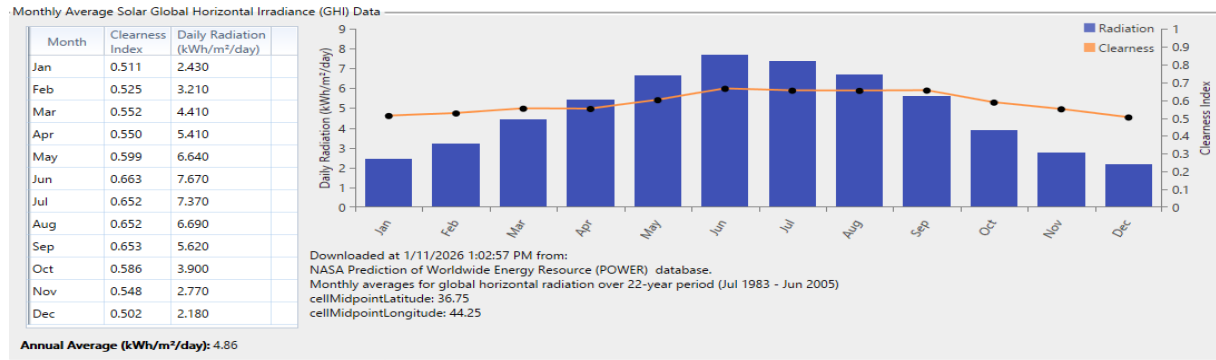
Şekil-1: İHA Yer Kontrol İstasyonu'nun günlük ortalama elektriksel yük profili.

Şekil 1'te görüldüğü üzere, askeri üssün enerji tüketimi gün boyunca süreklilik arz etmekte olup, özellikle mesai saatleri ve gece operasyonları sırasında belirli bir baz yükün altına düşmemektedir. Ortalama günlük tüketim 320 kWh seviyesinde olup, radar ve haberleşme sistemlerinin devreye girmesiyle anlık tepe yük (Peak Load) 46 kW değerine ulaşmaktadır. Bu dalgalı yük profili, sistemin dinamik tepki verebilen batarya grubu ile desteklenmesini zorunlu kılmıştır.

2.1 Meteorolojik Veriler ve Yük Profili

Sistemin tasarımında kullanılan güneş radyasyonu ve sıcaklık verileri, NASA Surface Meteorology and Solar Energy veri tabanından, proje sahası olan Kuzey Irak Hakurk bölgesi

için çekilmiştir [6]. Bölgenin yıllık ortalama güneş radyasyon değeri 5.24 kWh/ m²/ gün olup, proje sahasına ait radyasyon verileri Şekil-2'de sunulmuştur.



Şekil-2: Proje sahasına (Hakurk, Kuzey Irak) ait aylık ortalama güneş radyasyon verileri ve açıklık indeksi [6].

Şekil-2 incelendiğinde, özellikle soğutma yüklerinin arttığı yaz aylarında ışınım şiddetinin 7.5 kWh/ m²/ gün seviyelerine ulaştığı görülmektedir. Bu yüksek potansiyel, fotovoltaik sistemlerin verimliliği açısından büyük avantaj sağlamaktadır.

Mikro şebekenin boyutlandırılmasında en kritik parametre olan elektriksel yük profili; İHA komuta kontrol bilgisayarları, radar sistemleri, uydu haberleşme üniteleri ve personel yaşam alanlarının iklimlendirme yükleri dikkate alınarak oluşturulmuştur.

Askeri üssün 7/24 kesintisiz operasyon yürüttüğü göz önüne alınarak, yük profili "Ticari" karakteristikte modellenmiştir. Sistemin günlük ortalama enerji tüketimi 320,40 kWh ve anlık tepe yükü (peak load) 46 kW olarak belirlenmiştir

Yük profili oluşturulurken; iklimlendirme (soğutma) üniteleri için Booth ve ark. (NREL) tarafından yayınlanan askeri barınak enerji tüketim analiz raporu [9] referans alınmış, aviyonik ve haberleşme sistemleri için ise üretici katalog verileri baz alınarak Tablo-1'deki güç dağılımı hesaplanmıştır.

Elektrikli Yük Bileşenleri (Cihazlar)	Adet	Nominal Güç (W)	Günlük Çalışma Süresi (Saat)	Günlük Enerji Tüketimi (kWh)
Operasyonel Yükler				
İHA Pilot Komuta Konsolu (Çift Ekranlı)	4	800	24	76,80
Veri Bağı (Data Link) ve Telemetri Anteni	1	3.500	24	84,00
Taktik Sunucu ve Veri Depolama (Rack)	2	1.200	24	57,60
SATCOM (Uydu Haberleşme) Ünitesi	1	1.000	24	24,00
Destek ve İklimlendirme Yükleri				
Askeri Tipi Klima (ECU-Soğutma) *	2	4.000	14	112,00
Çevre Güvenlik Aydınlatması (LED Projektör)	10	100	12	12,00
Telsiz ve Ekipman Şarj İstasyonu	1	1.500	4	6,00
Radar ve Sensör Sistemleri	1	2.000	24	48,00
Toplam				320,40 kWh

Tablo-1: İHA Yer Kontrol İstasyonu (YKİ) tahmini yük profili ve cihaz bazlı enerji tüketim dağılımı.

Tablo 1'de görüldüğü üzere, enerji tüketiminin büyük bir kısmını (%35) iklimlendirme (soğutma) yükleri oluşturmaktadır. Bunun temel nedeni, Kuzey Irak bölgesindeki yüksek ortam sıcaklığı ve sunucu odalarının (Server Room) 7/24 soğutulma zorunluluğudur. Ayrıca, İHA operasyonunun kesintisiz sürmesi nedeniyle komuta ve haberleşme sistemleri 24 saatlik baz yük (Base Load) olarak kabul edilmiştir.

2.2 Sistem Bileşenleri

Şebekeden bağımsız sistem; Fotovoltaik (PV) panelleri, Dizel Jeneratör, Batarya grubu ve eviriciden oluşmaktadır. Sistemde kullanılan PV panellerin sermaye maliyeti güncel piyasa koşullarında 1.200 \$/kW olarak alınmıştır. Enerji depolama ünitesi olarak, askeri lojistik açısından hafiflik ve yüksek enerji yoğunluğu sağlayan Lityum-İyon (Li-Ion) bataryalar tercih

edilmiştir. Bu bataryaların birim enerji maliyeti 350 \$/kWh ve işletme ömrü yaklaşık 15 yıldır [7]. Yedek güç kaynağı olan dizel jeneratörün kurulum maliyeti ise 500 \$/kW olarak belirlenmiş olup, sistemin güvenilirliğini artırmak amacıyla tasarıma dahil edilmiştir

Rüzgâr Enerjisinin Kapsam Dışı Bırakılma Gerekçesi

Proje sahası olan Hakurk bölgesi yüksek rakımlı olması nedeniyle teorik olarak rüzgâr enerjisi potansiyeli taşısa da bu çalışmada rüzgâr türbinleri sisteme dahil edilmemiştir. Bu tercihin temelinde iki kritik askeri ve lojistik neden yatmaktadır. Operasyon Gizliliği, askeri üssün güvenliği için akustik ve görsel gizlilik esastır. Rüzgâr türbinlerinin çalışırken ürettiği mekanik/aerodinamik gürültü ve dönen kanatların oluşturduğu radar kesit alanı (Radar Cross Section- RCS), gizli kalması gereken bir İHA üssünün yerinin düşman unsurları tarafından tespit edilmesini kolaylaştırabilir. Lojistik Kısıtlar, çalışmanın temel varsayımı olan "Helikopter Lojistiği" senaryosunda; rüzgâr türbini kanatlarının ve kule parçalarının helikopterle (sling load yöntemiyle) taşınması, modüler yapıdaki güneş panelleri ve batarya hücrelerinin taşınmasına göre çok daha riskli ve maliyetlidir. Bu nedenlerle, sistem tasarımı "Düşük Görünürlük (Low Observable)" prensibine uygun olan Fotovoltaik (PV) paneller ve sessiz güç kaynakları üzerine kurgulanmıştır.

3. Analiz ve Yöntem

Bu çalışmada, Kuzey Irak'taki İHA Yer Kontrol İstasyonunun enerji ihtiyacını karşılamak üzere tasarlanan hibrit mikro şebeke sisteminin tekno-ekonomik analizi, HOMER Pro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Benzer metodoloji Türkođan ve ark. [2,3] tarafından yapılan çalışmalar da kullanılmış olup şebekeden bağımsız sistemlerin optimizasyonunda yazılımın Güvenirliđi doğrulanmıştır. Simülasyon, her bir zaman adımı için enerji dengesini sağlayarak, yükü karşılayan en düşük maliyetli sistem konfigürasyonunu belirlemektedir.

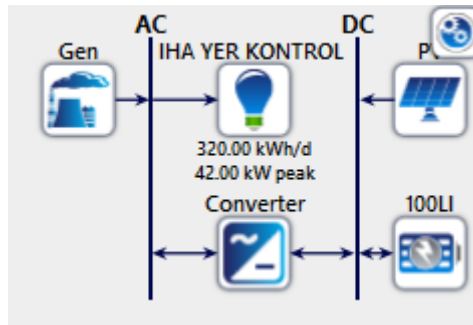
3.1 Sistem Bileşenlerinin Teknik Özellikleri

Tasarlanan sistemde kullanılan fotovoltaik paneller, batarya depolama üniteleri ve dizel jeneratörünün malzeme ve teknik karakteristikleri, sistemin verimliliğini ve güvenirliğini Doğrudan etkilemektedir. Simülasyonda kullanılan bileşenleri teknik özellikleri ve çalışma parametreleri **Tablo 2**'de sunulmuştur. Güneş radyasyonu verileri NASA veri tabanından [6] alınmış olup, PV panellerin verimlilik hesabı bu veriler ışığında yapılmıştır.

Bileşen (Malzeme)	Teknik Özellik (Parametre)	Değer/Açıklama
Fotovoltaik (PV) Paneller	Panel Tipi Verimlilik Sıcaklık Katsayısı İşletme Ömrü	Düzlemsel %17,3 -0.41 %/°C 25 Yıl
Dizel Jeneratör	Yakıt Tipi Yakıt Eğrisi (Eğim) Minimum Yük Oranı İşletme Ömrü	Dizel (Eurodiesel) 0.236 L/hr/kW %25 15.000 Saat
Batarya (Depolama)	Teknoloji Nominal Gerilim Nominal Kapasite Döngüsel Verim (Roundtrip Eff.) Min. Deşarj Seviyesi (Min SOC)	Lityum-İyon 600 V 100 kWh %90 %20
Güç Dönüştürücü (Converter)	Tip Verimlilik Koruma Sınıfı	DC/AC ve AC/DC %95 IP65

Tablo -2: Sistemde Kullanılan Bileşenlerin Teknik ve Malzeme Özellikleri

Tablo-2 'de görüldüğü üzere. Sistemde kullanılan Lityum-İyon batarya teknoloji tercih edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmada yapılan karşılaştırmalı analizde Lityum -İyon döngüsel verimi (%90), geleneksel kuşun-asit akülere (%80) göre daha yüksek olduğu ve minimum deşarj derinliği toleransının daha fazla olduğunu belirtilmiştir [7]. Bu teknik üstünlükler, bakım imkanının kısıtlı olduğu askeri üslerde kritik önem taşımaktadır.



Şekil-3: Tasarlanan hibrit mikro şebeke sisteminin şematik diyagramı. Sistemde PV paneller DC barayı beslerken, jeneratör ve yükler AC bara üzerinden enerji akışını sağlamaktadır.

Şekil 3'te sunulan sistem mimarisi, enerji yönetimini optimize etmek amacıyla DC ve AC Bara (Bus) yapısı üzerine kurulmuştur. Fotovoltaik (PV) paneller ve Lityum-İyon batarya grubu DC barayı beslerken; Dizel Jeneratör ve tesisin elektrik yükü AC bara üzerinden enerjilendirilmektedir. DC ve AC baralar arasındaki çift yönlü güç akışı, sistemin kararlılığını sağlayan evirici (Converter) üzerinden gerçekleştirilmektedir.

3.2 Ekonomik Analiz Yöntemi ve Lojistik Maliyetler

Sistemin ekonomik fizibilitesi, Net Şimdiki Maliyet (NPC) ve Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir. HOMER yazılımı, maliyetlerin zaman içindeki değişimini doğru modellemek için reel faiz oranını (Real Discount Rate) esas alır. Analizlerde kullanılan reel faiz oranı (i); nominal faiz oranı (i') ve yıllık enflasyon oranı (f) kullanılarak Fisher denklemi [10] ile hesaplanmıştır:

$$i = \frac{i' - f}{1 + f}$$

Denklem-1

Bu çalışmada, projenin uluslararası askeri niteliği ve maliyetlerin ABD doları (\$) bazında olması nedeniyle; yıllık nominal faiz oranı %8 ve beklenen enflasyon oranı %2 olarak kabul edilmiştir. Bu değerler ışığında, simülasyonda kullanılan yıllık reel faiz oranı %5,88 olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın en özgün parametresi ise "Yakıt Maliyeti" hesabıdır. Standart pompa fiyatı yerine, askeri lojistik literatüründeki "Yüklenmiş Yakıt Maliyeti" (Fully Burdened Cost of Fuel- FBCF) yöntemi kullanılmıştır.

$$C_{fuel,total} = C_{fuel,pump} + C_{logistics}$$

Denklem-2

Denklem-2'de $C_{logistics}$, yakıtın helikopter ile taşınması durumunda oluşan nakliye ve güvenlik maliyetlerini temsil etmektedir. Kelly ve ark. [8] tarafından yapılan çalışmada, hava yoluyla ikmal edilen ileri hareket üslerinde yakıtın gerçek maliyetinin 400 \$/galon seviyelerine kadar çıkabileceği raporlanmıştır. Bu literatür bilgisine dayanarak, bu çalışmada 6.0 \$/L senaryosu "Helikopter Lojistiği" olarak tanımlanmıştır ve analizlere eklenmiştir.

4.Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde, HOMER Pro yazılımı ile Kuzey Irak'taki İHA Yer Kontrol İstasyonu için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları incelenmiştir. Analizler, çalışmanın odak noktası olan "Helikopter Lojistiği (6.0 \$/L)" senaryosu temel alınarak; ekonomik, teknik ve çevresel boyutlarıyla değerlendirilmiştir.

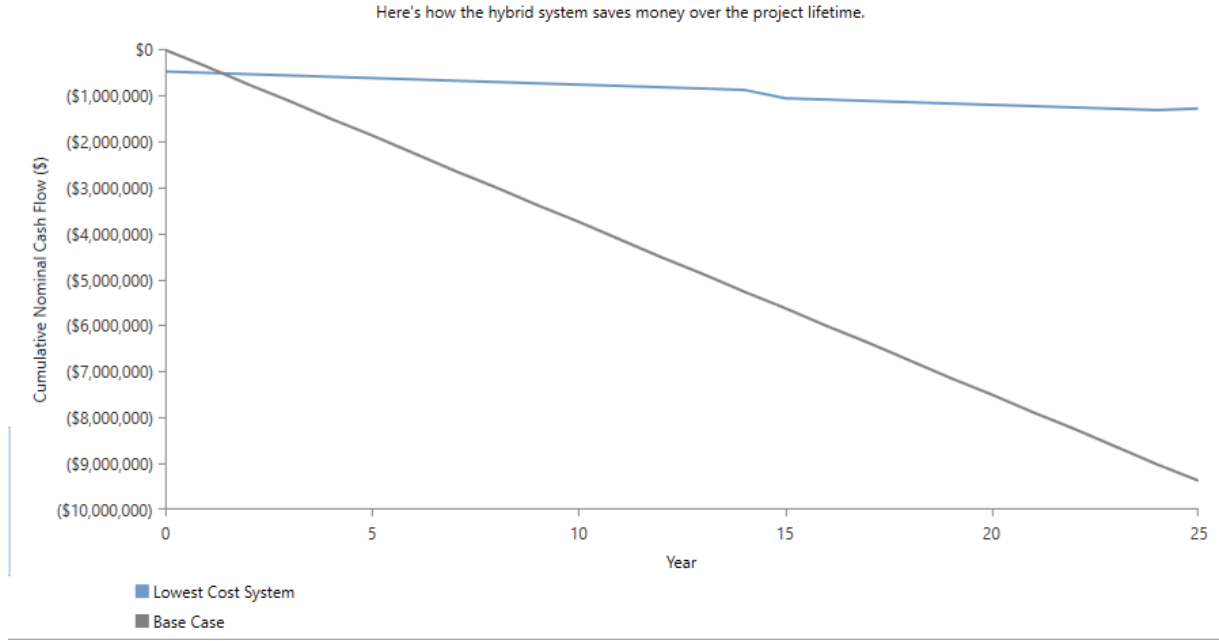
4.1 Ekonomik Analiz ve Karşılaştırma

Yapılan optimizasyon sonucunda, en düşük Net Şimdiki Maliyete (NPC) sahip sistemin; PV(Güneş), Lityum-İyon Batarya ve Dizel Jeneratörden oluşan hibrit yapı olduğunu belirlemiştir. Bu hibrit sistem, sadece jeneratörden oluşan baz senaryo (Base Case) ile karşılaştırıldığında maliyetlerde çarpıcı bir düşüş sağlamıştır. İki sistemin ekonomik verileri **Tablo-3** 'de verilmiştir.

Ekonomik Parametre	Sadece Jeneratör (Base Case)	Önerilen Hibrit Sistem (PV+Batarya+Gen)	Değişim / Tasarruf
Toplam Net Maliyet (NPC)	\$4.860.000	\$909.517	%81 Azalma
Birim Enerji Maliyeti (LCOE)	3.22 \$/kWh	0.602 \$/kWh	%81 Azalma
İlk Yatırım Maliyeti	\$23.500	\$491.752	Artış
Yıllık İşletme Maliyeti	\$374.309/yıl	\$32.316/yıl	%91 Azalma
Geri Ödeme Süresi (Payback)	-	1,4 yıl	-

Tablo-3: Baz senaryo (sadece jeneratör) ile önerilen hibrit sistemin ekonomik karşılaştırması (Yakıt Fiyatı: 6.0 \$/L).

Tablo-3'de görüldüğü üzere, hibrit sistemin ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da Türkdogan ve ark. [2] tarafından da vurgulandığı gibi, işletme maliyetlerindeki (OPEX) devasa düşüş sayesinde sistem kendini 1,4 yıl gibi çok kısa sürede amorti etmektedir. Sistemin uzun vadeli ekonomik avantajı, proje ömrü boyunca gerçekleşen Nakit Akış Grafiğinde (Şekil-3) açıkça görülmektedir.



Şekil-4 Proje ömrü boyunca (25 yıl) kümülatif nakit akış diyagramı, yakıtın pahalı olduğu bu senaryoda, hibrit sistemin toplam maliyeti 1,4 yıl sonra sadece jeneratörlü sistemin altına inmekte ve 25 yılın sonunda yaklaşık 4 milyon dolar kamu tasarrufu sağlanmaktadır.

4.2. Teknik Değerlendirme ve Operasyonel Üstünlükler

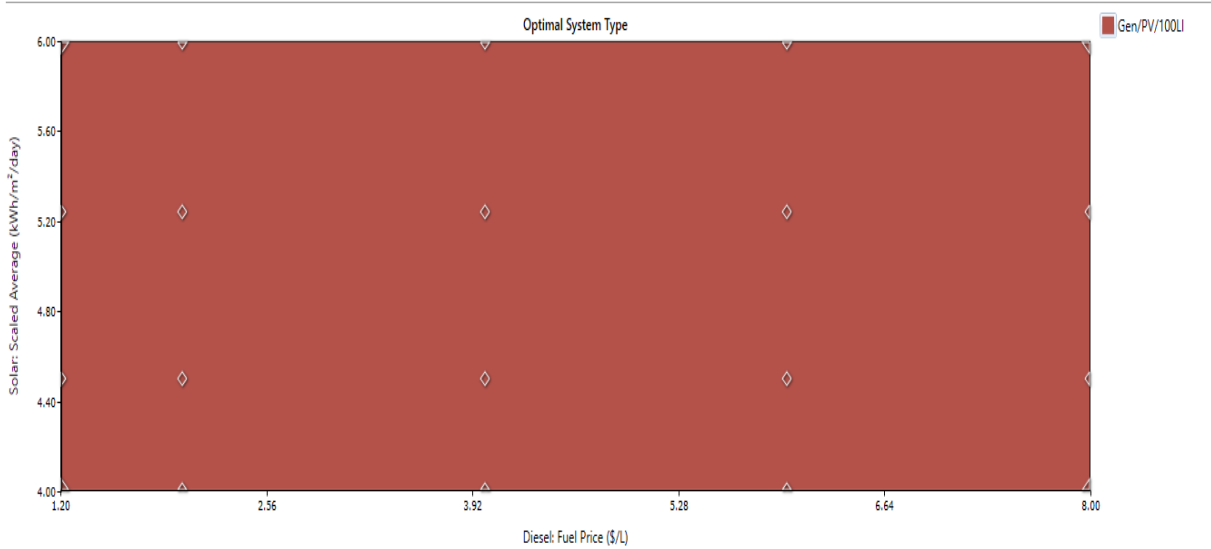
Simülasyon sonuçlarına göre, önerilen hibrit sistemde 77.4 kW kurulu gücünde fotovoltaik (PV) panel ve 200 kWh (2 adet 100er kWh) kapasiteli Lityum-İyon batarya grubu kullanılması teknik açıdan en verimli çözüm olarak belirlenmiştir. Sistemin yıllık elektrik üretim verileri incelendiğinde; toplam enerjinin %82,6'sının (123,562 kWh/yıl) güneş panellerinden, sadece %17,4'ünün (26,107 kWh/yıl) dizel jeneratörden karşılandığı görülmektedir. Bu durum, sisteme %77,6 oranında Yenilenebilir Enerji Katkısı (Renewable Fraction) sağlamıştır.

Sadece jeneratör kullanılan baz senaryoya (Base Case) göre yakıt tüketimi ve jeneratör çalışma saatlerinde %85'in üzerinde bir azalma sağlanmıştır. Bu teknik başarı, askeri lojistik açısından kritik kazanımları beraberinde getirmiştir. Lojistik Risk Azalımı, yakıt tüketiminin minimize edilmesi, üsse yapılması gereken ve helikopterlerle gerçekleştirilen riskli yakıt ikmali seferlerinin 5 kattan fazla azaltmıştır. Sessiz Operasyon, jeneratörün çalışma süresinin düşürülmesi, üssün termal ve akustik izini düşürerek, düşman unsurlarına karşı tespit edilme riskini azaltmıştır. Enerji Güvenliği, gündüz saatlerinde güneşten, gece saatlerinde ise bataryadan sağlanan enerji, yakıt tedarik zincirinde olsa dahi üssün hareket kabiliyetini sürdürmesini garanti altına almıştır.

4.3. Hassasiyet Analizi ve Sisteme Dayanıklılığı

Sistemin ekonomik dayanıklılığını ve farklı lojistik senaryolardaki performansını test etmek amacıyla; Dizel Yakıt Fiyatı (1.2 \$/L ile 8.0 \$/L arası) ve Güneş Radyasyonu (4.0 ile 6.0 kWh/m²/gün arası) parametreleri değiştirilerek geniş kapsamlı bir hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5'te elde edilen Optimal Sistem Tipi (OST) grafiği sunulmuştur.



Şekil-5: Farklı yakıt maliyetleri ve güneş radyasyon oranlarında optimal sistem mimarisinin değişimi (Kırmızı Alan: Gen/PV/Batarya Hibrit Sistemi).

Şekil 5 incelendiğinde, grafiğin tamamının "Kırmızı" (Gen/PV/100LI) alanda olduğu görülmektedir. Bu sonuç, çalışmanın en çarpıcı bulgularını ortaya koymaktadır. Ekonomik üstünlüğü, dizel yakıtın en ucuz olduğu standart lojistik koşullarda ((4.0 kWh/m²/gün)) önerilen PV ve Batarya destekli hibrit sistem, sadece jeneratör seçeneğine göre daha ekonomiktir. Sistem kararlılığı, güneş radyasyonunun düştüğü (4.0 kWh/m²/gün) en kötü kış senaryolarında veya yakıt fiyatının helikopter lojistiği nedeniyle aşırı yükseldiği durumlarda bile (6.0-8.0 \$/L), sistem mimarisi değişmemektedir. Hibrit yapı en optimal çözümü (Lowest NPC) olarak kalmaktadır. Sonuç olarak bu analiz tasarlanan sistemin dış değişkenlerden bağımsız olarak, askeri üs için her koşulda en güvenilir ve en düşük maliyetli çözüm olduğunu kanıtlamaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, enerji güvenliğinin hayati önem taşıdığı ve karayolu ulaşımının riskli olduğu Kuzey Irak (Hakurk) bölgesindeki bir İHA Yer Kontrol İstasyonu için şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemi tasarlanmıştır. Çalışmanın en özgün yanı, yakıt maliyetlerinin "Yüklenilmiş Yakıt Maliyeti (FBCF)" yöntemiyle hesaplanarak, helikopter lojistiği senaryosunun (6.0 \$/L) analiz edilmesidir. Elde edilen HOMER Pro simülasyon sonuçları, PV/Batarya/Dizel hibrit mimarisinin, geleneksel dizel jeneratör sistemlerine göre tartışmasız bir üstünlük sağladığını ortaya koymuştur. Yakıtın helikopterle taşındığı senaryoda, önerilen sistem toplam maliyetlerde %81 oranında tasarruf sağlamış ve birim enerji maliyetini (LCOE) 3.22 \$/kWh seviyesinden 0.60 \$/kWh seviyesine düşürmüştür. Sistemin 1,4 yıl gibi rekor bir sürede yatırım maliyetini geri ödemesi, askeri bütçe verimliliği açısından büyük bir başarıdır. Sonuç olarak; zorlu coğrafi koşullardaki askeri üslerde hibrit sistemlere geçiş, sadece "çevreci" bir tercih değil, aynı zamanda lojistik zayıflık riskini azaltan ve operasyonel sürdürülebilirliği artıran stratejik bir zorunluluktur.

Kaynakça

- [1] Putri, Dianing Novita Nurmala, et al. "Military microgrid in Indonesia." *2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*. IEEE, 2021.
- [2] Türkdoğan, Sunay, Muhammet Talha Mercan, and Tuğçe Çatal. "Şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemleri kullanılarak 40 hanelik bir topluluğun elektrik ve termal yük ihtiyacının karşılanması: Teknik ve ekonomik analizleri." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 18 (2020): 476-485.
- [3] Türkdoğan, Sunay, Serkan Dilber, and Barış Çam. "Hibrit Enerji Sistemlerinin Şebekeden Bağımsız Bir Çiftlik Evinde Uygulanabilirliğinin Ekonomik ve Teknik Açından İncelenmesi." *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 3.2 (2018): 52-65.
- [4] Arslan, Furkan, and Sunay Türkdoğan. "Kamu binalarında çatı üzeri fotovoltaik panel kurulum potansiyelinin belirlenmesi ve enerji üretim artışı için mimari tasarımın ele alınması: Yalova ili örneği." *Journal of Innovative Engineering and Natural Science* 2.2 (2022): 76-94.
- [5] Turkdogan, Sunay. "Design and optimization of a solely renewable based hybrid energy system for residential electrical load and fuel cell electric vehicle." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 24.2 (2021): 397-404.
- [6] NASA Langley Research Center. (2025). *Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) Project*. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/> [Accessed: Jan. 13, 2026].
- [7] Olatomiwa, Lanre, et al. "Economic evaluation of hybrid energy systems for rural electrification in six geo-political zones of Nigeria." *Renewable energy* 83 (2015): 435-446.
- [8] Kelly, Ryan L., Giovanna Oriti, and Alexander L. Julian. "Reducing fuel consumption in a forward operating base using an energy management system." *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. IEEE, 2013.
- [9] Booth, Samuel, et al. *Net zero energy military installations: A guide to assessment and planning*. No. NREL/TP-7A2-48876. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2010.
- [10] Fisher, Irving. "The Theory of." *Interest (New York, 1930)* (1930).