



Sürdürülebilir Enerji Yönetimi için V2G ve Hidrojen Entegrasyonlu Akıllı Mikro Şebeke Modeli

Hazal Deniz Es 0009-0000-7281-8096

Nazlıcan Karaağaç 0009-0000-7002-2545

Zeynep Sertdemir 0009-0006-6363-9161

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

Özet

Bu çalışmada Gebze Teknik Üniversitesi yerleşkesi referans alınarak yerleşkenin enerji ihtiyacını yenilenebilir enerji ile karşılayabilecek V2G(Vehicle-to-Grid), yeşil hidrojen üretimi, ısı yönetimi entegre bir hibrit mikro şebeke yapısı tasarlanmıştır. Bu sistem üç farklı senaryo üzerinden değerlendirilmiştir ve her senaryoda en optimal sonuçlar değerlendirilmeye alınmıştır. Bu sistemlerin tamamı şebeke bağlantılı olacak şekilde değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamı içinde; fotovoltaik paneller, rüzgar türbinleri, hidrojen tankı gibi temiz enerji üretimi üzerinde durulmuştur. Senaryo bir 'de geleneksel fosil yakıt kullanımı göz önünde bulundurulmuştur. Senaryo iki 'de PV paneller ve rüzgar türbinleri, üçüncü senaryo da ise ikinci senaryoya ek olarak V2G, hidrojenden elde edilen enerji kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda; şebekeye bağlı olarak çalışmanın sistemi daha kararlı hale getirdiği, V2G kullanımının sabit batarya maliyetini azalttığı, hidrojen entegrasyonunun da uzun süreli kullanımda enerji güvenliğini güçlendirildiği görülmüştür. Elde edilen bulgular sonucunda, üniversite kampüsleri ve teknokentler gibi yüksek enerji talebine sahip bölgeler için sürdürülebilir, ekonomik ve güvenilir bir enerji yönetim yaklaşımı sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Hibrit Mikro şebeke, Yeşil Hidrojen, Yenilenebilir Enerji Yönetimi, Vehicle-to-Grid (V2G)

Abstract

In this study, an integrated hybrid microgrid architecture featuring Vehicle-to-Grid (V2G), green hydrogen production, and thermal management was designed to meet the energy requirements of the Gebze Technical University campus using renewable energy sources. The system was evaluated across three distinct scenarios, with the most

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.

optimal results analyzed for each. All proposed configurations were assessed as grid-connected systems. Within the scope of the study, the focus remained on clean energy production components, including photovoltaic (PV) panels, wind turbines, and hydrogen storage tanks.

The scenarios were structured as follows: Scenario 1 considers traditional fossil fuel usage; Scenario 2 incorporates PV panels and wind turbines; and Scenario 3 builds upon the second scenario by integrating V2G and hydrogen-derived energy. Simulation results demonstrate that grid-tied operation enhances system stability, the implementation of V2G reduces stationary battery costs, and hydrogen integration strengthens long-term energy security. Consequently, the findings offer a sustainable, economical, and reliable energy management approach for high-demand areas such as university campuses and technology parks..

Keywords: Hybrid Microgrid, Green Hydrogen, Renewable Energy Management, Vehicle-to-Grid (V2G)

1. Giriş

Günümüzdeki sanayileşme, şehirleşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte artan enerji talebi, enerji sağlama güvenliğini ve sürdürülebilir enerji yönetimini önemli bir problem haline gelmektedir. Dünya genelinde elektrik üretimin büyük kısmı halen fosil yakıtlara dayalı olarak sağlanmakta olup bu durum; yakıt maliyetlerinin artması, rezervlerin sınırlı olması ve sera gazı emisyonlarının yükselmesi gibi ciddi ekonomik ve çevresel sorunlara yol açmaktadır [1] [2]. Bu nedenle, enerji sektöründe fosil yakıt merkezli üretim çalışmaları yerine sürdürülebilir, çevre dostu ve verimli yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaşması günümüzün bir gerekliliği haline gelmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri hibrit yapıda sistemler oluşturabilmesidir. Literatürde güneş ve rüzgar gibi kaynakların birlikte kullanıldığı hibrit yapıların, tekli kaynaklara göre daha kararlı enerji üretimi sağladığı, enerji sağlama güvenliğini arttırdığı ve maliyetleri optimize ettiği gösterilmiştir [1] [3]. HOMER yazılımı yardımıyla simülasyon ve optimizasyon çalışmalarıyla hibrit sistemlerin teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilirliği birçok bölgesel ve kampüs ölçekli uygulama üzerinden kanıtlanmıştır, şebekeye bağlı hibrit mikro şebeke yapılarının; birim enerji maliyetini düşürme karbon emisyonlarını azaltma ve sistem güvenilirliğini arttırmada alışılmış olan yapılara göre daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir [1] [3] [4] [5].

Sadece elektrik üretiminin optimizasyonu değil, aynı zamanda enerji üretiminin de geliştirilmesi sürdürülebilir enerji çözümlerinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Literatürde farklı yerleşkeler sanayi bölgeleri şehirler ve kampüsler için gerçekleştirilen hibrit enerji tabanlı; enerjinin dengelenmesi, ekonomik optimizasyonun sağlanması ve yenilenebilir enerji kullanım oranının artması önemli katkılar sunmaktadır [3] [5]. Ayrıca, son yıllarda hidrojen teknolojilerinin enerji sistemlerine entegre edilmesiyle birlikte hem uzun süreli enerji depolama hem de ulaşım sektörünün karbon kullanımının azaltılması yönünde önemli bir fırsat ortaya çıkmıştır [6]. Hidrojenin sifıra yakın emisyon avantajı ve farklı alanlarda kullanılabilirliği, hibrit mikro şebeke sistemlerinde yeni nesil çözümler geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan sistem, klasik hibrit yapılardan farklı olarak mikro şebeke yerel olarak kurulan şebekeye bağlı ya da bağımsız çalışabilen üretim, depolama, yüklerin bir araya getirdiği sistemdir; Vehicle-to-Grid (V2G) , kampüs çalışanlarının elektrikli araçlarının yalnızca tüketici değil aynı zamanda enerji sağlayıcı “mobil depolama birimleri” olarak değerlendirilmesine imkan sağlayan yaklaşımdır; Yeşil hidrojen entegrasyonu, sistemde oluşan fazla yenilenebilir enerjinin yalnızca depolanması değil aynı zamanda uzun dönemli enerji taşıyıcısına dönüştürülmesini sağlamaktadır; Dump load (atık yük) stratejisi ise sistemde oluşan fazla yenilenebilir enerjinin boşa gitmesi yerine kampüs sıcak su üretimi gibi termal ihtiyaçların karşılanmasında değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Bunlar yenilikçi alt sistemi birlikte barındıran kapsamlı bir enerji yönetim yaklaşımı sunmaktadır.

2. Sistem Tanıtımı ve Model Yapısı

2.1 Sistem Lokasyonu ve Amaç

Bu çalışmada ele alınan hibrit mikro şebeke yapısı, Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ) yerleşkesini temsil eden bir akıllı kampüs senaryosu temel alınarak modellenmiştir. Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli ili sınırları içerisinde yer almakta olup, sanayi bölgelerine ve teknoloji geliştirme alanlarına yakın konumu nedeniyle yüksek ve süreklilik gerektiren bir enerji talebine sahiptir. Üniversite kampüsleri karmaşık yük profilleri nedeniyle enerji yönetimi açısından kritik örnek alanlar olarak değerlendirilmektedir [1], [3].

GTÜ kampüs tipi yük profili incelendiğinde, hafta içi mesai saatlerinde belirgin şekilde artan elektrik talebi, akşam ve gece saatlerinde ise taban seviyeye düşen ancak tamamen ortadan kalkmayan bir tüketim karakteristiği gözlemlenmektedir. Literatürde kampüs ve sanayi yerleşkeleri için yapılan çalışmalarda benzer yük profilleri tanımlanmış ve bu tür alanların hibrit enerji sistemleri için uygun uygulama sahaları olduğu vurgulanmıştır [1], [4].

Bu çalışmada tasarlanan sistemin şebekeye bağlı (grid-connected) olarak ele alınmasının temel sebebi ; enerji sağlama güvenliğinin artırılması, yenilenebilir enerji üretimindeki dalgalanmaların şebeke desteğiyle dengelenmesi ve ekonomik açıdan daha uygulanabilir bir yapı elde edilmesidir. Şebekeye bağlı sistemler, hem fazla enerjinin şebekeye satılabilmesine hem de yetersiz üretim anlarında şebekeden enerji alınmasına olanak tanıyarak sistem kullanılabilirliğini artırmaktadır. Literatürde yapılan çok sayıda çalışmada, şebekeye bağlı hibrit yapıların birim enerji maliyeti, net bugünkü maliyet ve emisyon azaltımı açısından şebekeden bağımsız sistemlere göre daha avantajlı sonuçlar sunduğu gösterilmiştir [3], [5].

Bunların sonucunda Gebze Teknik Üniversitesi ölçeğinde bir akıllı kampüs için mikro şebeke mimarisi üzerine entegre edilmiş V2G, yeşil hidrojen ve dump load destekli hibrit bir enerji sistemi tasarlamak ve tasarlanan yapı ile yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli düzeyde kullanılması, enerji israfının azaltılması, kampüs içi ulaşım ve termal ihtiyaçların sistemle bütünleştirilmesi ve şebeke etkileşimi altında sürdürülebilir bir enerji yönetim yaklaşımı geliştirilmesi amaçlanmıştır [2], [5].

2.2 Mikro Şebeke Mimarisi

Bu çalışmada önerilen mikro Şebeke mimarisi, Gebze Teknik niversitesi leğinde bir akıllı kampüsün enerji ihtiyacını karşılayabilecek Şekilde tasarlanmış olup enerji yönetimi ve Şebekeye bağlı kullanımı üzerine kurgulanmıŐtır. Mikro Şebeke yapısı; fotovoltaik (PV) paneller, rüzgâr türbinleri, lityum-iyon batarya depolama sistemi, Vehicle-to-Grid (V2G) altyapısı ve yeşil hidrojen üretim depolama birimlerinden oluŐmaktadır. Sistem, Şebekeye bağlı çalışma koŐulları altında üç farklı senaryo ile değerlendirilmiştir.

Tasarlanan mikro Şebekede PV paneller, kampüs çatıları ve otopark alanları gibi mevcut yüzeyler kullanılarak gündüz saatlerinde minimum yükün karşılanmasında temel üretim kaynağı olarak ele alınmıştır. Literatürde kampüs ve sanayi yerleŐkelerinde PV sistemlerin hibrit mikro Şebekelerde etkin birincil kaynak olarak kullanıldığı ve ekonomik avantaj sağladığı belirtilmektedir [3], [4].

Rüzgâr türbinleri, güneş enerjisinin yetersiz olduğu gece saatleri ve kıŐ dönemlerinde üretimi desteklemek amacıyla mikro Şebeke sistemine dahil edilmiştir. Rüzgâr ve güneş kaynaklarının mevsimsel ve zamansal olarak birbirini tamamlayan karakteristikleri, hibrit sistemlerde üretim sürekliliğini artırmaktadır. Bu yaklaşım, literatürde yaygın olarak tercih edilen ve enerji sağlama güvenliğini güçlendiren bir tasarım stratejisi olarak öne çıkmaktadır [1], [5].

Batarya enerji depolama sistemi, mikro Şebekede kısa süreli enerji dengeleme, ani yük deėiŐimlerinin karşılanması ve yenilenebilir üretimdeki dalgalanmaların sönümlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Bataryalar, fazla üretilen enerjinin depolanmasını ve ihtiyaç anında tekrar sisteme verilmesini sağlayarak mikro Şebekenin kararlılığını artırmaktadır. Şebekeye bağlı hibrit sistemlerde bataryanın sisteme dahil edilmesinin birim enerji maliyetini düşürdüğü ve emisyonları azalttığı literatürde açıkça gösterilmiştir [3].

Çalışmada Vehicle-to-Grid (V2G) senaryo 3 sistemine dahil edilmiştir. Bu yapı sayesinde kampüs kullanıcılarına ait elektrikli araçlar, park halinde oldukları süre boyunca sisteme ihtiyaç halinde enerji sağlayabilen bir batarya gibi kullanılmıştır. Bu yaklaşım, son yıllarda akıllı kampüs ve Şehir uygulamalarında giderek daha fazla önem kazanmaktadır [4], [5].

Mikro Şebeke mimarisinin bir diğer önemli bileŐeni olan yeşil hidrojen sistemi, uzun süreli ve mevsimsel enerji depolama ihtiyacını karşılamak amacıyla tasarlanmıştır. Fazla yenilenebilir enerji, elektrolizörler aracılığıyla hidrojene dönüŐtürülmekte ve depolanmaktadır. Üretilen hidrojen, kampüs içi ulaŐımda yakıt olarak kullanılabildeği gibi, gerekli durumlarda tekrar elektrik üretiminde de değerlendirilebilmektedir. Hidrojen entegrasyonu, özellikle yüksek yenilenebilir oranına sahip mikro Şebekelerde enerji sürekliliğini güçlendiren bir zm olarak literatürde ne çıkmaktadır [2].

Bu alıŐma kapsamında geliŐtirilen üç farklı senaryoda; mikroşebeke mimarisi kademeli olarak geniŐletilmiŐ, her bir bileşenin sistem performansı üzerindeki etkisi teknik ve ekonomik açıdan karŐılaŐtırmalı olarak analiz edilmiştir.

3. Yük Profili

3.1 Elektriksel Yük

Bu çalışmada ele alınan mikro şebeke sisteminin elektriksel yük profili, Gebze Teknik Üniversitesi ölçeğinde bir akıllı kampüs yerleşkesini temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. Kampüs yükü; eğitim binaları, araştırma laboratuvarları, vb. tüketicilerden kaynaklanan elektrik tüketimlerini kapsamaktadır. Üniversite kampüsleri, gün içi ve mevsimsel olarak değişken ancak tamamen sıfıra düşmeyen bir elektrik talebine sahip olmaları nedeniyle hibrit mikro şebeke uygulamaları için uygun örnek alanlar olarak değerlendirilmektedir [1], [3].

Elektriksel yük profili, 12 aylık dönem için 1 saatlik zaman dilimleri esas alınarak tanımlanmıştır. Her ay için 24 saatlik bir tipik gün profili oluşturulmuş ve bu profil, ilgili ayın tüm günlerine uygulanmıştır. Böylece sistemde hem gün içi hem de mevsimsel yük değişimleri modele dahil edilmiştir. Yük değerleri, kampüslerde yaygın olarak gözlemlenen mesai saatlerinde artan talep ve gece saatlerinde minimum yüke düşen tüketim karakteristiğini yansıtacak şekilde belirlenmiştir.

Saatlik elektrik yükü $P_{m,h}$, ilgili ay m ve saat h için aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$P_{m,h} [\text{kW}]$$

Burada

- $m = 1, 2, \dots, 12$ ay indeksini,
- $h = 1, 2, \dots, 24$ saat indeksini ifade etmektedir.

Günlük Elektrik Enerjisi Hesabı

Her bir ay için tipik bir günün toplam elektrik enerjisi tüketimi, saatlik yüklerin toplamı alınarak hesaplanmıştır:

$$E_{gün,m} = \sum_{h=1}^{24} P_{m,h} \cdot \Delta t$$

Burada

- $E_{gün,m}$: m . ay için günlük elektrik enerjisi tüketimi (kWh),
- Δt : zaman adımı (1 saat) olarak alınmıştır.

Aylık Elektrik Enerjisi Hesabı

Aylık toplam elektrik enerjisi tüketimi, ilgili ayın gün sayısı N_m ile günlük enerji tüketiminin çarpılmasıyla elde edilmiştir:

$$E_{ay,m} = E_{gün,m} \cdot N_m$$

Burada

- $E_{ay,m}$: m . ayın toplam elektrik enerjisi tüketimi (kWh),
- N_m : ilgili ayın gün sayısını ifade etmektedir.

Yıllık Elektrik Enerjisi Hesabı

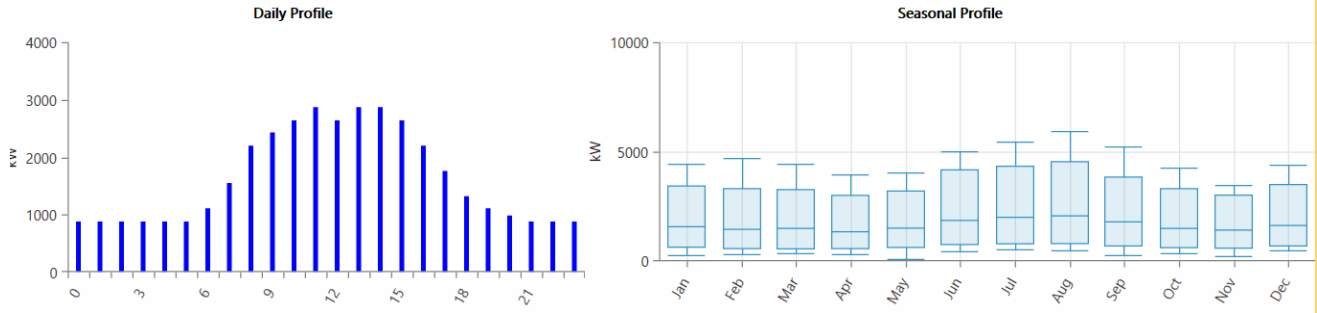
Sistemin yıllık toplam elektrik enerjisi ihtiyacı ise tüm ayların enerji tüketimlerinin toplanmasıyla hesaplanmıştır:

$$E_{yıl} = \sum_{m=1}^{12} E_{ay,m}$$

Bu yaklaşım sayesinde, mikro şebeke tasarımında kullanılacak PV, rüzgâr, batarya, V2G ve hidrojen sistemlerinin boyutlandırılması için gerekli olan yıllık ve saatlik yük bilgileri tutarlı bir şekilde elde edilmiştir. Oluşturulan yük profili, HOMER Pro yazılımında doğrudan birincil AC yük olarak tanımlanmış ve senaryo analizlerinde referans yük profili olarak kullanılmıştır [4], [5].

Saat	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
00:00	882	838	794	750	838	1015	1103	1103	971	838	794	882
01:00	882	838	794	750	838	1015	1103	1103	971	838	794	882
02:00	882	838	794	750	838	1015	1103	1103	971	838	794	882
03:00	882	838	794	750	838	1015	1103	1103	971	838	794	882
04:00	882	838	794	750	838	1015	1103	1103	971	838	794	882
05:00	882	838	794	750	838	1015	1103	1103	971	838	794	882
06:00	1103	1048	993	938	1048	1268	1379	1379	1213	1048	993	1103
07:00	1544	1467	1390	1312	1467	1776	1930	1930	1699	1467	1390	1544
08:00	2206	2096	1985	1875	2096	2537	2757	2757	2426	2096	1985	2206
09:00	2426	2305	2184	2062	2305	2790	3033	3033	2669	2305	2184	2426
10:00	2647	2515	2382	2250	2515	3044	3309	3309	2912	2515	2382	2647
11:00	2868	2724	2581	2437	2724	3298	3584	3584	3154	2724	2581	2868
12:00	2647	2515	2382	2250	2515	3044	3309	3309	2912	2515	2382	2647
13:00	2868	2724	2581	2437	2724	3298	3584	3584	3154	2724	2581	2868
14:00	2868	2724	2581	2437	2724	3298	3584	3584	3154	2724	2581	2868
15:00	2647	2515	2382	2250	2515	3044	3309	3309	2912	2515	2382	2647
16:00	2206	2096	1985	1875	2096	2537	2757	2757	2426	2096	1985	2206
17:00	1765	1676	1588	1500	1676	2029	2206	2206	1941	1676	1588	1765
18:00	1324	1257	1191	1125	1257	1522	1654	1654	1456	1257	1191	1324

19:00	1103	1048	993	938	1048	1268	1379	1379	1213	1048	993	1103
--------------	------	------	-----	-----	------	------	------	------	------	------	-----	------



20:00	993	943	893	844	943	1142	1241	1241	1092	943	893	993
21:00	882	838	794	750	838	1015	1103	1103	971	838	794	882
22:00	882	838	794	750	838	1015	1103	1103	971	838	794	882
23:00	882	838	794	750	838	1015	1103	1103	971	838	794	882

Tablo 1

Şekil 1

3.2 Termal Yük Profili

Bu çalışmada mikro şebeke tasarımına termal yük eklenmesinin temel nedeni, yenilenebilir enerji üretiminin yüksek olduğu dönemlerde ortaya çıkan fazla elektriğin boşa gitmesini azaltmaktır. Şebekeye bağlı bir mikro şebekede fazla enerji teorik olarak şebekeye verilebilse de, pratikte şebeke kısıtları, ekonomik tarifeler veya sistem işletme stratejileri nedeniyle tüm fazla enerjinin verimli biçimde değerlendirilmesi her zaman istenildiği gibi olmayabilmektedir. Bu nedenle, sistemde dump load yaklaşımı kullanılarak fazla elektrik enerjisinin elektrikli kazan üzerinden kampüsün sıcak su veya ısıtma ihtiyacına yönlendirilmesi hedeflenmiştir. Böylece hem yenilenebilir üretimden daha fazla fayda sağlanmakta hem de üniversitenin termal ihtiyacı karşılanarak sistemin toplam verimliliği artırılmaktadır.

Termal yük, üniversite minimalinde belirli binaların sıcak kullanım suyu ihtiyacını temsil edecek şekilde modellenmiştir. Bu kapsamda termal yük profili günlük veya saatlik olarak tanımlanabilir. Eğer elde detaylı saatlik sıcak su tüketim verisi yoksa, tipik bir yaklaşımla termal yük gün içine yayılmış bir profil olarak kabul edilip, sabah-akşam kullanım saatlerinde daha yüksek olacak şekilde şekillendirilebilir [11].

3.2.1 Termal Enerji İhtiyacının Hesaplanması (Sıcak Su Üzerinden)

Termal yük hesabında temel fiziksel ifade, suyun sıcaklığını artırmak için gereken ısı enerjisidir. Günlük sıcak su ihtiyacı m (kg/gün) ve suyun sıcaklık artışı ΔT (°C) bilindiğinde günlük termal enerji ihtiyacı:

$$Q_{gün} = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Burada:

- $Q_{gün}$: Günlük ısı enerjisi (kJ/gün)
- m : Günlük ısıtılan su kütlesi (kg/gün)
- c_p : Suyun özgül ısısı $\approx 4.186 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$
- $\Delta T = T_{cıkış} - T_{giris}$: Sıcaklık farkı (°C)

Bu değeri elektrik enerjisi cinsine çevirmek için:

$$E_{th,gün} = \frac{Q_{gün}}{3600} \text{ (kWh/gün)}$$

3.2.2 Elektrikli Isıtıcı/Kazan Gücü ve Verimi

Sistemde termal yük, elektrik gücüyle çalışan bir kazan üzerinden karşılandığı için, elektrik enerjisinin ısıya dönüşüm verimi dikkate alınır. Elektrikli ısıtıcılar için verim genellikle yüksektir ve pratikte:

$$Q_{out} = \eta_{heater} \cdot E_{in}$$

Burada:

- Q_{out} : Üretilen ısı enerjisi (kWh_{th})
- E_{in} : Tüketilen elektrik enerjisi (kWh_{el})
- η_{heater} : Isıtıcı verimi (tipik 0.95 – 1.00)

Dolayısıyla, günlük termal ihtiyacı karşılamak için gerekli elektrik enerjisi:

$$E_{el,gün} = \frac{E_{th,gün}}{\eta_{heater}}$$

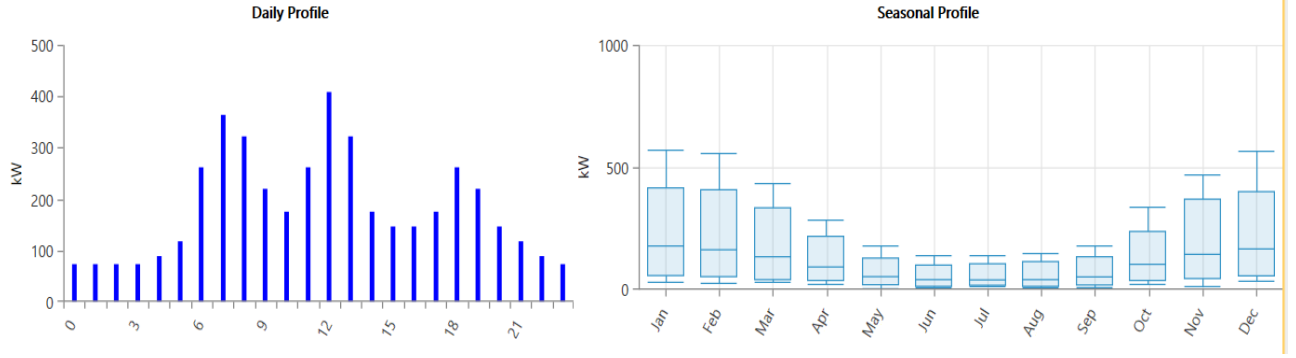
Elektrikli kazan gücü P_{heater} seçimi ise, yükün hangi saatlerde karşılanacağına bağlıdır. Eğer termal yük belirli bir zaman aralığına yoğunlaşıyorsa, yaklaşık güç ihtiyacı:

$$P_{heater} \approx \frac{E_{el,gün}}{t_{kullanim}}$$

Burada $t_{kullanim}$ saat cinsindedir.

Saat	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
00:00	73	68	55	36	23	18	18	18	23	41	59	68
01:00	73	68	55	36	23	18	18	18	23	41	59	68
02:00	73	68	55	36	23	18	18	18	23	41	59	68
03:00	73	68	55	36	23	18	18	18	23	41	59	68
04:00	88	82	66	44	27	22	22	22	27	49	71	82
05:00	117	109	88	58	36	29	29	29	36	66	95	109
06:00	263	246	197	131	82	66	66	66	82	148	213	246
07:00	365	342	274	182	114	91	91	91	114	205	296	342
08:00	321	301	241	161	100	80	80	80	100	181	261	301
09:00	219	205	164	109	68	55	55	55	68	123	178	205
10:00	175	164	131	88	55	44	44	44	55	99	142	164
11:00	263	246	197	131	82	66	66	66	82	148	213	246
12:00	409	383	306	204	128	102	102	102	128	230	332	383
13:00	321	301	241	161	100	80	80	80	100	181	261	301
14:00	175	164	131	88	55	44	44	44	55	99	142	164
15:00	146	137	109	73	46	36	36	36	46	82	119	137
16:00	146	137	109	73	46	36	36	36	46	82	119	137
17:00	175	164	131	88	55	44	44	44	55	99	142	164
18:00	263	246	197	131	82	66	66	66	82	148	213	246
19:00	219	205	164	109	68	55	55	55	68	123	178	205
20:00	146	137	109	73	46	36	36	36	45	82	119	137
21:00	117	109	88	58	36	29	29	29	36	66	95	109
22:00	88	82	66	44	27	22	22	22	27	49	71	82
23:00	73	68	55	36	23	18	18	18	23	41	59	68

Tablo 2



Şekil 2

3.3 V2G (Vehicle-to-Grid) Araç Profili

Bu çalışmada mikro şebeke sistemine entegre edilen V2G yapısının gerçekçi bir şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla, elektrikli araçların günlük kullanım mesafesi ve buna bağlı enerji tüketimi açık ve fiziksel temellere dayalı bir şekilde tanımlanmıştır.

Referans araç olarak, güncel tüketim verilerinin erişilebilir olması ve orta sınıf elektrikli araçları temsil etmesi nedeniyle Tesla Model Y seçilmiştir.

Kampüs kullanıcılarının günlük araç kullanım alışkanlıkları incelendiğinde, ev-kampüs arası ulaşımın yanı sıra gün içi kısa mesafeli hareketlilikler ve dönüş yolculuğu da dikkate alındığında, bir aracın günlük ortalama 100 km yol kat etmesi makul bir kabul olarak değerlendirilmiştir. Bu değer, çalışmada kullanılan V2G senaryolarının hem enerji tüketimi hem de şebekeye potansiyel katkı açısından anlamlı sonuçlar üretmesini sağlamaktadır.

Tesla Model Y için üretici tarafından WLTP standardına göre verilen birleşik enerji tüketimi yaklaşık olarak $e_{EV} = 16.2 \text{ kWh}/100 \text{ km}$ olarak alınmıştır. Bu değer, şehir içi ve şehir dışı sürüş koşullarını birlikte temsil etmesi nedeniyle günlük enerji tüketimi hesabında doğrudan kullanılmıştır. Buna göre, bir aracın günlük elektrik enerjisi tüketimi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$E_{EV.gün} = \frac{16.2}{100} \cdot 100 = 16.2 \text{ kWh/gün}$$

Bu sonuç, Tesla Model Y kullanan bir aracın günde yaklaşık 16.2 kWh elektrik enerjisi tükettiğini göstermektedir. Hesaplama doğrudan günlük kat edilen mesafeye dayandığı için, enerji tüketimi fiziksel olarak anlamlı ve kolay yorumlanabilir bir biçimde elde edilmiştir.

Günlük enerji tüketimi temel alınarak, tek bir aracın yıllık elektrik enerjisi ihtiyacı ise şu şekilde belirlenmiştir:

$$E_{EV.yıl} = 16.2 \cdot 365 \approx 5913 \text{ kWh/yıl}$$

Bu değer, çalışmada oluşturulan yıllık yük tablosu ile uyumlu olacak şekilde saatlik zaman dilimlerine dağıtılmış ve V2G modellemesinde toplam araç enerji talebini temsil edecek biçimde kullanılmıştır. Böylece araçların bir yıl boyunca tüketeceği toplam

Saat	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
00:00	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109	0.109
01:00	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095
02:00	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095
03:00	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095
04:00	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327
05:00	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
06:00	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550
07:00	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
08:00	0.420	0.420	0.420	0.420	0.420	0.420	0.420	0.420	0.420	0.420	0.420	0.420
09:00	0.430	0.430	0.430	0.430	0.430	0.430	0.430	0.430	0.430	0.430	0.430	0.430
10:00	0.495	0.495	0.495	0.495	0.495	0.495	0.495	0.495	0.495	0.495	0.495	0.495
11:00	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533

enerji korunurken, gün içi kullanım yoğunluğu ve kampüsle etkileşim saatleri modele gerçekçi bir şekilde yansıtılmıştır.

Sonuç olarak, günlük 100 km kullanım varsayımına dayalı bu yaklaşım; elektrikli araçların enerji tüketimini sade, anlaşılır ve mühendislik açısından tutarlı bir biçimde tanımlamakta, aynı zamanda V2G entegrasyonunun mikroşebeke performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

12:00	0.691	0.691	0.691	0.691	0.691	0.691	0.691	0.691	0.691	0.691	0.691	0.691
13:00	0.519	0.519	0.519	0.519	0.519	0.519	0.519	0.519	0.519	0.519	0.519	0.519
14:00	0.418	0.418	0.418	0.418	0.418	0.418	0.418	0.418	0.418	0.418	0.418	0.418
15:00	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397	0.397
16:00	0.409	0.409	0.409	0.409	0.409	0.409	0.409	0.409	0.409	0.409	0.409	0.409
17:00	0.658	0.658	0.658	0.658	0.658	0.658	0.658	0.658	0.658	0.658	0.658	0.658
18:00	1.231	1.231	1.231	1.231	1.231	1.231	1.231	1.231	1.231	1.231	1.231	1.231
19:00	1.003	1.003	1.003	1.003	1.003	1.003	1.003	1.003	1.003	1.003	1.003	1.003
20:00	0.676	0.676	0.676	0.676	0.676	0.676	0.676	0.676	0.676	0.676	0.676	0.676
21:00	0.480	0.480	0.480	0.480	0.480	0.480	0.480	0.480	0.480	0.480	0.480	0.480
22:00	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300
23:00	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204

Tablo 3

3.4 Hidrojen Verileri

Bu çalışmada hidrojen yükü, kampüs içi ring servisleri ve hizmet araçlarının hafta içi kullanımına bağlı olarak tanımlanmıştır. Hafta içi günler, kampüs içi hareketliliğin en yoğun olduğu dönemler olduğundan, hidrojen talebi yalnızca bu günler için modellenmiş ve sistemin enerji yönetimi bu varsayım üzerinden değerlendirilmiştir.

Hidrojenli araç filosu için günlük toplam hidrojen ihtiyacı, araç sayısı ve araç başına günlük tüketim esas alınarak belirlenmiştir. Buna göre hafta içi bir gün için toplam hidrojen talebi:

$$m_{H_2, gün} = N_{araç} \cdot m_{H_2, araç}$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu çalışmada günlük hidrojen talebi 60 kg/gün olarak kabul edilmiştir.

Paylaşılan yıllık yük veri tablosunda yer alan saatlik değerler, hidrojen talebinin gün içerisindeki görece dağılımını temsil etmektedir. Bu katsayılar, hidrojen tüketiminin sabah ve öğle saatlerinde arttığını, gece saatlerinde ise daha düşük seviyelerde seyrettiğini göstermektedir. Günlük hidrojen miktarı bu katsayılarla orantılı şekilde dağıtılarak, her saat için hidrojen talebi hesaplanmıştır:

$$m_{H_2, h} = m_{H_2, gün} \cdot \frac{k_h}{\sum_{h=1}^{24} k_h}$$

Bu yaklaşım sayesinde, gün sonunda toplam hidrojen talebi korunurken, talebin gün içi değişimi gerçekçi bir biçimde modele yansıtılmıştır.

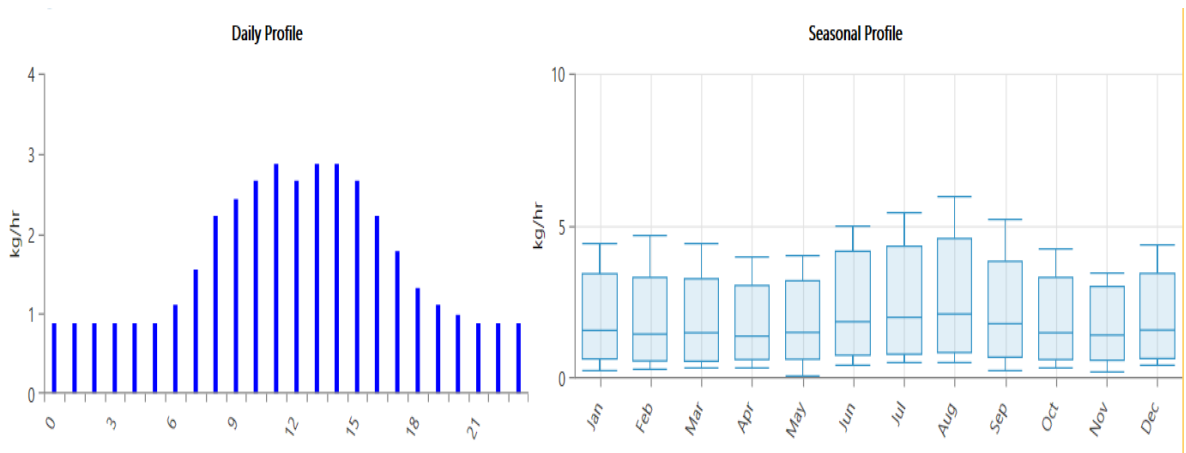
Hafta içi günlük hidrojen talebi kullanılarak yıllık toplam hidrojen tüketimi, yıl içindeki hafta içi gün sayısı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu değer, elektrolizör kapasitesinin belirlenmesi ve hidrojen depolama sisteminin boyutlandırılması için temel girdi olarak kullanılmıştır.

Sonuç olarak, hidrojen yükünün hafta içi odaklı ve saatlik dağılıma sahip olacak şekilde tanımlanması, mikro şebeke sisteminde elektrolizörün ne zaman ve ne kadar

çalışacağını daha doğru biçimde yansıtmakta ve yenilenebilir enerji fazlalarının hidrojene dönüştürülme potansiyelini daha gerçekçi şekilde ortaya koymaktadır [12].

Saat	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
00:00	0.880	0.840	0.790	0.750	0.840	1.020	1.100	1.100	0.970	0.840	0.790	0.880
01:00	0.880	0.840	0.790	0.750	0.840	1.020	1.100	1.100	0.970	0.840	0.790	0.880
02:00	0.880	0.840	0.790	0.750	0.840	1.020	1.100	1.100	0.970	0.840	0.790	0.880
03:00	0.880	0.840	0.790	0.750	0.840	1.020	1.100	1.100	0.970	0.840	0.790	0.880
04:00	0.880	0.840	0.790	0.750	0.840	1.020	1.100	1.100	0.970	0.840	0.790	0.880
05:00	0.880	0.840	0.790	0.750	0.840	1.020	1.100	1.100	0.970	0.840	0.790	0.880
06:00	1.100	1.050	0.990	0.940	1.050	1.270	1.380	1.380	1.210	1.050	0.990	1.100
07:00	1.540	1.470	1.390	1.310	1.470	1.780	1.930	1.930	1.700	1.470	1.390	1.540
08:00	2.210	2.100	1.990	1.880	2.100	2.540	2.760	2.760	2.430	2.100	1.990	2.210
09:00	2.430	2.310	2.180	2.060	2.310	2.790	3.030	3.030	2.670	2.310	2.180	2.430
10:00	2.650	2.520	2.380	2.250	2.520	3.040	3.310	3.310	2.910	2.520	2.380	2.650
11:00	2.870	2.720	2.580	2.440	2.720	3.300	3.580	3.580	3.150	2.720	2.580	2.870
12:00	2.650	2.520	2.380	2.250	2.520	3.040	3.310	3.310	2.910	2.520	2.380	2.650
13:00	2.870	2.720	2.580	2.440	2.720	3.300	3.580	3.580	3.150	2.720	2.580	2.870
14:00	2.870	2.720	2.580	2.440	2.720	3.300	3.580	3.580	3.150	2.720	2.580	2.870
15:00	2.650	2.520	2.380	2.250	2.520	3.040	3.310	3.310	2.910	2.520	2.380	2.650
16:00	2.210	2.100	1.990	1.880	2.100	2.540	2.760	2.760	2.430	2.100	1.990	2.210
17:00	1.770	1.680	1.590	1.500	1.680	2.030	2.210	2.210	1.940	1.680	1.590	1.770
18:00	1.320	1.260	1.190	1.130	1.260	1.520	1.650	1.650	1.460	1.260	1.190	1.320
19:00	1.100	1.050	0.990	0.940	1.050	1.270	1.380	1.380	1.210	1.050	0.990	1.100
20:00	0.990	0.940	0.890	0.840	0.940	1.140	1.240	1.240	1.090	0.940	0.890	0.990
21:00	0.880	0.840	0.790	0.750	0.840	1.020	1.100	1.100	0.970	0.840	0.790	0.880
22:00	0.880	0.840	0.790	0.750	0.840	1.020	1.100	1.100	0.970	0.840	0.790	0.880
23:00	0.880	0.840	0.790	0.750	0.840	1.020	1.100	1.100	0.970	0.840	0.790	0.880

Tablo 4



Şekil 3

4. Senaryo Tanımları

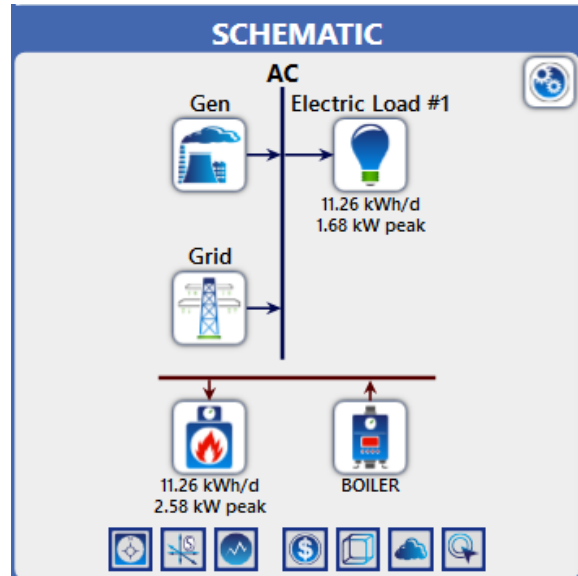
4.1 Senaryo 1 – Şebeke Destekli Temel Elektrik ve Termal Yük Yapısı

Birinci senaryoda, kampüs enerji sistemi şebekeye bağlı ve yapısal olarak basit bir mikro şebeke kurgusu üzerinden değerlendirilmiştir. Bu senaryo, diğer senaryolar için bir referans durum oluşturmak amacıyla tasarlanmıştır. Sistemde temel olarak elektrik şebekesi, bir jeneratör, elektriksel yük ve termal yükü temsil eden bir elektrikli kazan bulunmaktadır.

Elektriksel yük, kampüsün günlük enerji ihtiyacını temsil edecek şekilde tanımlanmış olup, sistemin ana besleme kaynağı şebekedir. Şebeke, yükü doğrudan beslerken; ihtiyaç duyulan durumlarda jeneratör destekleyici bir kaynak olarak devreye girmektedir. Bu yapı, yenilenebilir enerji entegrasyonu bulunmayan geleneksel bir kampüs enerji altyapısını temsil etmektedir.

Termal yük ise elektrikli kazan aracılığıyla karşılanmaktadır. Elektrik enerjisi kullanılarak üretilen ısı, kampüsün sıcak su veya ısıtma ihtiyacını temsil etmektedir. Bu senaryoda termal yük, elektriksel sistemden bağımsız olarak optimize edilmemiş olup, yalnızca ihtiyaç duyulan enerjinin karşılanması hedeflenmiştir. Başka bir ifadeyle, termal yük bir enerji geri kazanım veya verim artırma aracı olarak değil, doğrudan bir tüketim kalemi olarak ele alınmıştır.

Bu senaryonun temel amacı; yenilenebilir enerji, V2G veya hidrojen gibi gelişmiş bileşenler eklenmeden önce, kampüsün şebekeye bağımlı klasik enerji yapısının teknik ve ekonomik performansını ortaya koymaktır. Elde edilen sonuçlar, sonraki senaryolarda uygulanacak yenilikçi sistemlerin sisteme sağladığı katkıların net bir şekilde karşılaştırılabilmesi için referans alınmıştır.



Şekil 4

4.2 Senaryo 2 -Şebeke Bağlantılı Yenilenebilir Destekli Mikro şebeke Yapısı

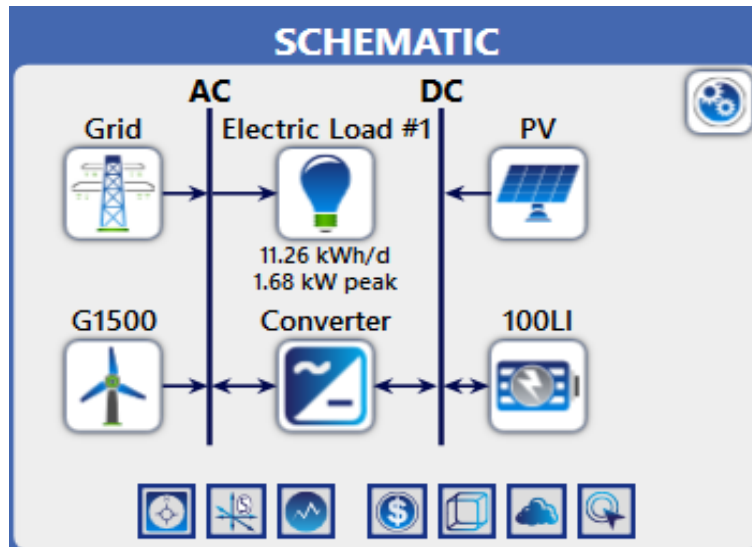
İkinci senaryoda, birinci senaryoda tanımlanan şebeke ağırlıklı enerji yapısı, yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemi ile genişletilmiştir. Bu senaryonun temel amacı, kampüsün elektrik enerjisi ihtiyacının bir kısmının yerinde üretim yoluyla karşılanması ve şebekeye olan bağımlılığın azaltılmasıdır.

Bu kapsamda sisteme bir fotovoltaik (PV) üretim birimi, bir rüzgâr türbini ve batarya enerji depolama sistemi entegre edilmiştir. PV paneller ve rüzgâr türbini, doğal kaynaklara bağlı olarak değişken üretim karakteristiğine sahip olup, kampüsün gündüz saatlerindeki ve mevsimsel enerji talebini destekleyecek şekilde modellenmiştir.

Üretilen elektrik enerjisi, sistemdeki DC baradan batarya grubuna veya AC yüke yönlendirilmekte, gerekli durumlarda ise dönüştürücü aracılığıyla AC şebeke ile etkileşime girmektedir.

Batarya sistemi, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin doğrudan tüketilemediği saatlerde devreye girerek, fazla enerjinin depolanmasını ve talep artışı yaşanan dönemlerde yeniden kullanılmasını sağlamaktadır. Bu yapı, sistemin kısa süreli yük dalgalanmalarına karşı daha esnek çalışmasına olanak tanımaktadır. Şebeke bağlantısı bu senaryoda korunmuş olup, sistemin enerji ihtiyacının yenilenebilir üretim ve batarya tarafından karşılanamadığı durumlarda şebeke destekleyici bir kaynak olarak kullanılmaktadır. Böylece enerji arz güvenliği sağlanırken, yenilenebilir enerji kullanım oranı artırılmaktadır.

Sonuç olarak Senaryo 2, klasik şebeke beslemeli yapıya kıyasla daha sürdürülebilir bir enerji altyapısını temsil etmekte ve yenilenebilir enerji ile depolama sistemlerinin kampüs ölçeğinde nasıl entegre edilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu senaryodan elde edilen teknik ve ekonomik sonuçlar, birinci senaryo ile karşılaştırılarak yenilenebilir enerji entegrasyonunun sisteme sağladığı katkılar değerlendirilmiştir.



Şekil 5

4.3 Senaryo 3 – V2G ve Yeşil Hidrojen Entegreli Gelişmiş Şebeke Bağlantılı Mikro şebeke Yapısı

Üçüncü senaryoda, ikinci senaryoda tanımlanan şebeke bağlantılı ve yenilenebilir enerji destekli mikro şebeke yapısı daha ileri bir seviyeye taşınmış ve sisteme elektrikli araçlar (V2G) ile yeşil hidrojen üretim ve depolama altyapısı entegre edilmiştir. Bu senaryo, kampüs ölçeğinde sürdürülebilirlik, enerji esnekliği ve kaynak çeşitliliğini birlikte ele alan gelişmiş bir mikro şebeke mimarisini temsil etmektedir.

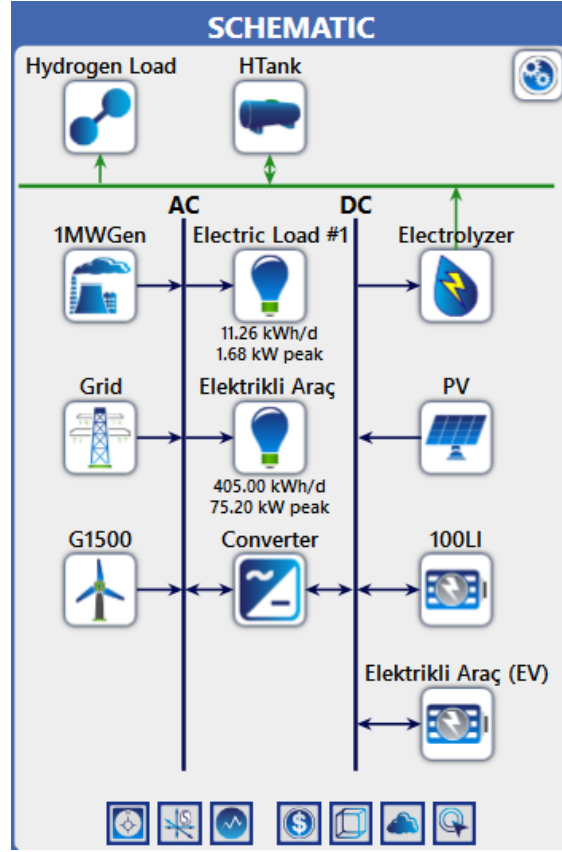
Bu kapsamda fotovoltaik paneller ve rüzgâr türbini tarafından üretilen elektrik enerjisi, öncelikli olarak kampüsün elektrikli yükü ile elektrikli araçların şarj ihtiyacını karşılamak üzere kullanılmıştır. Yenilenebilir enerji üretiminin anlık talebi aşması durumunda ortaya çıkan fazla elektrik enerjisi, DC bara üzerinden elektrolizöre yönlendirilerek hidrojen üretiminde değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin kesintili doğasından kaynaklanan kayıpların azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Elektrolizör aracılığıyla üretilen hidrojen, sistemde yer alan hidrojen tankında depolanmış ve kampüs içi hidrojenli araçların yakıt ihtiyacını karşılayacak şekilde modele dahil edilmiştir. Böylece elektrik enerjisi, yalnızca kısa süreli depolama sistemleriyle değil, aynı zamanda kimyasal enerji formunda daha uzun süreli olarak saklanabilir hale gelmiştir.

Elektrikli araçlar bu senaryoda yalnızca birer elektrikli yük olarak değil, V2G yaklaşımı kapsamında çift yönlü çalışan enerji depolama birimleri olarak ele alınmıştır. Araç bataryaları, yenilenebilir üretimin yüksek olduğu saatlerde şarj edilmekte; üretimin yetersiz kaldığı veya kampüs yükünün arttığı zaman dilimlerinde ise mikro şebekeye enerji sağlayarak sistem dengesinin korunmasına katkıda bulunmaktadır. Bu yapı, sabit batarya sistemlerine ek olarak mobil ve esnek bir enerji kaynağı sunmaktadır.

Sistemin şebeke bağlantısı bu senaryoda da korunmuştur. Yenilenebilir enerji, V2G ve hidrojen altyapısının kampüs yükünü karşılamada yetersiz kaldığı durumlarda, şebeke ve jeneratör destekleyici kaynaklar olarak devreye girmektedir. Bu sayede enerji arz güvenliği sağlanırken, şebekeden çekilen enerji miktarının doğrulanabilir şekilde azaltılması hedeflenmiştir.

Sonuç olarak Senaryo 3, yenilenebilir enerji üretimi, elektrikli araç entegrasyonu ve yeşil hidrojen teknolojilerinin birlikte kullanıldığı akıllı kampüs mikro şebekesi yaklaşımını temsil etmektedir. Bu senaryo, teknik performans, enerji esnekliği ve sürdürülebilirlik açısından çalışmada ele alınan en kapsamlı yapı olup, önceki senaryolarla yapılan karşılaştırmalar sayesinde gelişmiş enerji yönetim bileşenlerinin sisteme sağladığı katkılar ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir.



Şekil 6

4.4 Senaryoların Karşılaştırılması

Kriter	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Şebeke Bağımlılığı	Yüksek	Orta	Düşük
Yenilenebilir Enerji Kullanımı	Yok	PV + Rüzgâr	PV + Rüzgâr
Enerji Depolama	Yok	Batarya	Batarya + V2G
Hidrojen Altyapısı	Yok	Yok	Elektrolizör + H ₂ Tankı
Enerji Esnekliği	Düşük	Orta	Yüksek
Fazla Enerji Değerlendirme	Yok	Sınırlı	Hidrojen üretimi
Sürdürülebilirlik Seviyesi	Düşük	Orta	Yüksek
Sistem Karmaşıklığı	Düşük	Orta	Yüksek

Tablo 5

5.Sonuçlar ve Karşılaştırılmalı Analiz

5.1 Senaryo 1 – Referans Sistem Performansı

Birinci senaryo, yenilenebilir enerji entegrasyonu bulunmayan ve ağırlıklı olarak şebekeye bağımlı çalışan referans bir kampüs enerji sistemini temsil etmektedir. Bu senaryoda elektrik enerjisi büyük ölçüde şebekeden karşılanmış, jeneratör ise sınırlı ölçüde destekleyici bir rol üstlenmiştir. Yenilenebilir enerji katkısı bulunmadığından sistemin yenilenebilir enerji oranı sıfır olarak hesaplanmıştır.

Enerji performansı açısından bakıldığında, sistemde şebekeden yıllık 4.109 kWh enerji satın alındığı ve herhangi bir enerji satışının gerçekleşmediği görülmektedir. Bu durum, sistemin enerji açısından tamamen tüketici konumunda olduğunu göstermektedir.

Ekonomik açıdan Senaryo 1, düşük başlangıç yatırımı ile öne çıkmaktadır. CAPEX değeri 950 \$, NPC değeri 11.228 \$ olarak hesaplanmış, ancak buna karşılık LCOE değeri 0,164 \$/kWh gibi görece yüksek bir seviyede kalmıştır. Yıllık işletme maliyetinin (795 \$/yıl) pozitif olması, sistemin gelir üretmeyen ve tamamen dışa bağımlı bir yapıda olduğunu göstermektedir. Bu senaryo, sonraki senaryolar için karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla bir “baz durum” olarak değerlendirilmiştir.

5.2 Senaryo 2 – Yenilenebilir Enerji ve Batarya Entegrasyonunun Etkisi

İkinci senaryoda sisteme fotovoltaik paneller, rüzgâr türbini ve batarya enerji depolama sistemi entegre edilmiştir. Bu sayede kampüsün elektrik enerjisi ihtiyacının önemli bir kısmı yerinde üretim yoluyla karşılanmış ve şebekeye olan bağımlılık belirgin şekilde azaltılmıştır.

HOMER optimizasyon sonuçları, bu senaryoda farklı yatırım seviyelerine karşılık farklı optimum çözümler üretildiğini göstermektedir. Yenilenebilir enerji oranının düşük tutulduğu çözümlerde yatırım maliyeti azalmakta, ancak sistemin yenilenebilir katkısı sınırlı kalmaktadır. Buna karşılık, yenilenebilir enerji oranının %100’e yaklaştığı konfigürasyonlarda CAPEX değeri milyon dolar seviyelerine çıkmakta, ancak bu durum LCOE’nin ciddi şekilde düşmesine ve yıllık işletme maliyetinin negatif değerlere inmesine yol açmaktadır.

Negatif işletme maliyeti, sistemin şebekeye enerji satışı yoluyla gelir elde ettiğini ve bu gelirin yıllık işletme giderlerini aştığını göstermektedir. Batarya sistemi, yenilenebilir üretimin tüketimle örtüşmediği zaman dilimlerinde devreye girerek, hem şebekeden enerji çekişini azaltmış hem de yenilenebilir enerjinin öz-tüketim oranını artırmıştır.

Bu senaryo, yenilenebilir enerji entegrasyonunun teknik olarak mümkün ve ekonomik olarak da belirli koşullar altında avantajlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Ancak yüksek başlangıç yatırımı, sistemin ekonomik uygulanabilirliğini doğrudan etkileyen temel faktör olarak öne çıkmaktadır.

5.3 Senaryo 3 – V2G ve Hidrojen Entegrasyonunun Sistem Üzerindeki Etkisi

Üçüncü senaryoda, Senaryo 2'ye ek olarak elektrikli araçlar (V2G) ve hidrojen üretim-depolama altyapısı sisteme dahil edilmiştir. Bu yapı, mikro şebekeyi yalnızca elektrik üretim ve tüketimi üzerinden değil, aynı zamanda çok katmanlı bir enerji yönetim sistemi olarak ele almaktadır.

Enerji performansı açısından Senaryo 3, %98–99 seviyesinde yenilenebilir enerji oranı ile çalışmaktadır. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen ve anlık olarak tüketilemeyen elektrik enerjisi, elektrolizör aracılığıyla hidrojene dönüştürülerek depolanmıştır. Bu sayede, önceki senaryolarda ortaya çıkabilecek “excess electricity” miktarı önemli ölçüde azaltılmıştır.

V2G uygulaması sayesinde elektrikli araçlar, yalnızca birer yük olmaktan çıkmış; pik talep anlarında mikro şebekeyi destekleyen mobil enerji depolama birimleri haline gelmiştir. Bu durum, sistemin pik güç gereksinimini düşürmüş ve şebeke ile olan enerji alışverişini daha dengeli hale getirmiştir.

Ekonomik açıdan bakıldığında Senaryo 3'te CAPEX değeri yaklaşık 2,7–2,8 milyon \$ seviyesinde gerçekleşmiş, ancak buna karşılık LCOE değeri 0,017–0,018 \$/kWh gibi oldukça düşük bir seviyeye gerilemiştir. Yıllık işletme maliyetinin negatif olması, sistemin yalnızca kendi ihtiyacını karşılamakla kalmayıp aynı zamanda ekonomik değer ürettiğini göstermektedir. NPC değerinin Senaryo 2'ye kıyasla daha düşük çıkması, hidrojen ve V2G entegrasyonunun yüksek yatırım maliyetine rağmen sistem ekonomisini uzun vadede olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır.

5.4 . Sisteme Entegre Edilen Bileşenlerin Enerji ve Ekonomik Performans Üzerindeki Etkileri

Bu bölümde, çalışmada ele alınan mikro şebeke sistemine kademeli olarak entegre edilen bileşenlerin sistemin enerji performansı, esnekliği ve ekonomik göstergeleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Senaryolar arasındaki farklar, her bir bileşenin mikro şebekeye sağladığı katkıyı net bir biçimde ortaya koyacak şekilde analiz edilmiştir.

5.4.1 Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının (PV ve Rüzgâr) Etkisi

Fotovoltaik paneller ve rüzgâr türbinlerinin sisteme entegrasyonu, mikro şebekenin enerji üretim yapısını temelden değiştirmiştir. Senaryo 2 ve Senaryo 3'te yenilenebilir kaynakların devreye alınmasıyla birlikte, kampüsün elektrik ihtiyacının önemli bir bölümü yerinde üretim yoluyla karşılanmış ve şebekeye olan bağımlılık belirgin şekilde azalmıştır.

Yenilenebilir üretimin artması, enerji performansı açısından yenilenebilir enerji oranının yükselmesine katkı sağlamış; ancak bu durum aynı zamanda üretim–tüketim uyumsuzluklarını da beraberinde getirmiştir. Özellikle talebin düşük olduğu zaman dilimlerinde ortaya çıkan fazla elektrik enerjisi, ek dengeleme mekanizmalarına olan ihtiyacı artırmıştır. Bu durum, sonraki bileşenlerin entegrasyonunu gerekli kılmıştır.

5.4.2 Batarya Enerji Depolama Sisteminin Etkisi

Batarya enerji depolama sistemi, yenilenebilir üretimin kesintili yapısından kaynaklanan kısa vadeli dengesizlikleri gidermek amacıyla sisteme entegre edilmiştir. Batarya, gün içi saatlik ölçekte enerji dengelemesi sağlayarak, yenilenebilir üretimin doğrudan tüketilemediği zamanlarda enerjinin depolanmasına ve talebin arttığı saatlerde tekrar kullanılmasına olanak tanımıştır.

Enerji performansı açısından batarya sistemi, şebekeden çekilen anlık güç değerlerini düşürmüş ve yenilenebilir enerjinin öz-tüketim oranını artırmıştır. Bununla birlikte, batarya depolamasının kapasite ve süre açısından sınırlı olması, uzun vadeli veya mevsimsel enerji fazlalarının değerlendirilmesinde yetersiz kalmasına neden olmuştur.

5.4.3 V2G (Vehicle-to-Grid) Entegrasyonunun Etkisi

Elektrikli araçların V2G yaklaşımı kapsamında mikro şebekeye entegre edilmesi, sistemin enerji esnekliğini önemli ölçüde artırmıştır. V2G sayesinde elektrikli araçlar, yalnızca birer tüketici olmaktan çıkarak çift yönlü çalışan mobil enerji depolama birimleri haline gelmiştir.

Enerji performansı açısından V2G, özellikle pik yük saatlerinde mikro şebekenin dengelenmesine katkı sağlamış; sabit batarya sistemlerinin yükünü azaltmıştır. Elektrikli araç bataryalarının uygun zamanlarda şarj edilip, talebin yükseldiği saatlerde sisteme enerji sağlaması, şebekeden çekilen maksimum gücün düşmesine ve sistem kararlılığının artmasına neden olmuştur.

Ekonomik açıdan bakıldığında, V2G entegrasyonu dolaylı olarak LCOE değerinin düşmesine ve yıllık işletme maliyetlerinin azalmasına katkı sağlamıştır. Bu etki, özellikle Senaryo 3'te görülen düşük LCOE ve negatif işletme maliyeti değerleri ile desteklenmektedir.

5.4.4 Hidrojen Üretim ve Depolama Sisteminin Etkisi

Hidrojen altyapısının sisteme entegrasyonu, mikro şebekenin enerji yönetiminde niteliksel bir dönüşüm sağlamıştır. Elektrolizör aracılığıyla fazla elektrik enerjisinin hidrojene dönüştürülmesi, sistemin yalnızca kısa vadeli değil, uzun vadeli enerji dengeleme kapasitesini de artırmıştır.

Enerji performansı açısından hidrojen sistemi, Senaryo 3'te yenilenebilir enerji kullanım oranının %98–99 seviyelerine ulaşmasında belirleyici rol oynamıştır. Batarya ve dump load gibi çözümlerin yetersiz kaldığı durumlarda, hidrojen sistemi yenilenebilir üretim fazlalarının değerlendirilmesini mümkün kılmıştır.

Ekonomik açıdan hidrojen sistemi, yüksek başlangıç yatırım maliyetine rağmen, uzun vadede LCOE'nin düşmesine ve yıllık işletme maliyetinin negatif değerlere inmesine

katkı sağlamıştır. Bu durum, hidrojenin yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da stratejik bir enerji taşıyıcısı olduğunu göstermektedir.

6. Genel Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Gebze Teknik Üniversitesi kampüsü ölçeğinde şebeke bağlantılı bir hibrit mikroşebeke sistemi tasarlanmış ve sistem performansı üç farklı senaryo altında ayrıntılı olarak incelenmiştir. Senaryolar, enerji sisteminin karmaşıklığı kademeli olarak artırılacak şekilde oluşturulmuş; yenilenebilir enerji kaynakları, enerji depolama sistemleri, Vehicle-to-Grid (V2G) uygulamaları ve yeşil hidrojen teknolojilerinin mikroşebeke üzerindeki etkileri bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, yenilenebilir enerji entegrasyonunun tek başına yüksek enerji performansı sağlamak için yeterli olmadığını açıkça ortaya koymaktadır. Birinci senaryoda temsil edilen, şebekeye yüksek derecede bağımlı geleneksel yapı; düşük başlangıç yatırımı gerektirmesine rağmen, uzun vadede yüksek birim enerji maliyetleri ve düşük sürdürülebilirlik düzeyi ile karakterize edilmektedir. Bu durum, kampüs ölçeğinde enerji dönüşümünün yalnızca maliyet minimizasyonu üzerinden değil, sistemin uzun vadeli işletme performansı üzerinden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

İkinci senaryoda fotovoltaik paneller, rüzgâr türbini ve batarya enerji depolama sisteminin entegrasyonu ile yerinde üretim kapasitesi önemli ölçüde artırılmıştır. Bu yapı, şebekeye olan bağımlılığı azaltmış ve bazı konfigürasyonlarda enerji satış gelirleri sayesinde yıllık işletme maliyetlerinin negatif değerlere ulaşmasına olanak sağlamıştır.

Bununla birlikte, yenilenebilir üretimin artmasıyla ortaya çıkan fazla enerjinin tamamının değerlendirilememesi, batarya sistemlerinin yalnızca kısa vadeli enerji dengeleme kapasitesine sahip olmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bu bulgu, yenilenebilir enerji sistemlerinde uzun vadeli ve çok katmanlı depolama çözümlerine olan ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır.

Üçüncü senaryoda sisteme entegre edilen V2G ve hidrojen üretim–depolama altyapısı, mikro şebeke yapısında niteliksel bir dönüşüm sağlamıştır. Elektrikli araçların mobil enerji depolama birimleri olarak kullanılması, sistemin kısa vadeli esnekliğini artırmış ve özellikle pik yük saatlerinde şebeke etkileşimini daha dengeli hale getirmiştir. Buna ek olarak, hidrojen sistemi sayesinde yenilenebilir enerji fazlaları kimyasal enerji formunda depolanabilmiş ve bu enerji daha uzun zaman ölçeklerinde değerlendirilebilir hale gelmiştir. Bu bütünlük yapı, yenilenebilir enerji kullanım oranının %98–99 seviyelerine ulaşmasını mümkün kılmış ve sistemin enerji performansını belirgin biçimde iyileştirmiştir.

Ekonomik göstergeler açısından değerlendirildiğinde, yüksek başlangıç yatırım maliyetlerine rağmen, V2G ve hidrojen entegrasyonunun uzun vadede birim enerji maliyetini (LCOE) düşürdüğü ve toplam net bugünkü maliyeti (NPC) olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Yıllık işletme maliyetlerinin negatif değerlere ulaşması, mikro şebekenin yalnızca kendi enerji ihtiyacını karşılayan bir yapıdan çıkarak, ekonomik değer üreten aktif bir enerji sistemi haline geldiğini göstermektedir. Bu durum, akıllı kampüs uygulamaları için enerji sistemlerinin pasif tüketici odaklı yaklaşımlar yerine, çok yönlü ve esnek yapılarla ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki öneriler sunulabilir. Kampüs ölçeğinde kurulacak mikro şebekelerde, yenilenebilir enerji üretim kapasitesi planlanırken, bu üretimi destekleyecek kısa ve uzun vadeli enerji depolama çözümleri birlikte değerlendirilmelidir. Elektrikli araçların V2G yaklaşımı kapsamında sisteme entegre edilmesi, hem enerji esnekliği hem de altyapı verimliliği açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ayrıca hidrojen üretim ve depolama sistemleri, yüksek yenilenebilir penetrasyonuna sahip mikro şebekelerde stratejik bir tamamlayıcı teknoloji olarak ele alınmalıdır.

Gelecek çalışmalarda, zaman değişken elektrik tarifeleri, karbon emisyon maliyetleri ve gerçek kampüs kullanım verileri dikkate alınarak daha ayrıntılı ve dinamik analizlerin yapılması önerilmektedir. Bunun yanı sıra, yapay zekâ ve gelişmiş kontrol algoritmalarının mikro şebeke işletimine entegre edilmesi, sistem performansının daha da iyileştirilmesine katkı sağlayabilecek önemli bir araştırma alanı olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma; yenilenebilir enerji, V2G ve yeşil hidrojen teknolojilerinin birlikte kullanıldığı akıllı kampüs mikro şebekelerinin, sürdürülebilirlik ve enerji dönüşümü hedefleri doğrultusunda uygulanabilir, esnek ve uzun vadede ekonomik açıdan avantajlı bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

- [1] Türkdoğan, 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, vol. 24, no. 2, 2021, pp. 397–404.
- [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, no. 18, 2020, pp. 476–485.
- [3] Türkdoğan, Sunay, Serkan Dilber, and Barış Çam. *Hibrit enerji sistemlerinin şebekeden bağımsız bir çiftlik evinde uygulanabilirliğinin ekonomik ve teknik açıdan incelenmesi*. Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 3, no. 2, 2018, pp. 52–65.
- [4] Lopes, João A. Peças, Filipe J. Soares, and Pedro M. R. Almeida. *Integration of electric vehicles in the electric power system*. Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 1, 2011, pp. 168–183.
- [5] Türkdoğan, Sunay. *Örnek bir hibrit yenilenebilir enerji sisteminin HOMER ile modellenmesi, ekonomik ve teknik yönden analizleri*. (Yüksek lisans / akademik makale çalışması), 2019.
- [6] Acar, C., and I. Dincer. *Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability*. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 39, no. 1, 2014, pp. 1–12.
- [7] Lund, Henrik, et al. *The role of hydrogen in the future energy system*. Energy, vol. 34, no. 5, 2009, pp. 524–531.
- [8] Kempton, Willett, and Jasna Tomić. *Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue*. Journal of Power Sources, vol. 144, no. 1, 2005, pp. 268–279.
- [9] HOMER Energy. *HOMER Pro Microgrid Analysis Tool – User Manual*. HOMER Energy LLC, 2023.
- [10] International Energy Agency (IEA). *The Future of Hydrogen*. IEA Publications, Paris, 2019.
- [11] Lund, H. *Renewable energy strategies for sustainable development*. Energy, 2007.
- [12] Gahleitner, G. *Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants*. International Journal of Hydrogen Energy, 2013.