



Hepsi Bir Arada Elektrikli Araç İstasyonu, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Ve Esnek Yükleri İçeren Bir Mikro Şebekenin Enerji Yönetimi İçin İki Seviyeli Stokastik Tabanlı Optimizasyon Modelinin Geliştirilmesi

Program Kodu:1002

Proje No:122E605

**Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. ALPER ÇIÇEK**

Araştırmacı(lar)

Dr. Öğr. Üyesi AYŞE KÜBRA ERENOĞLU
Doç. Dr. AKIN TAŞCIKARAOĞLU

Danışman(lar)

Prof. Dr. OZAN ERDİNÇ

Bursiyer(ler)

EDANUR İŞCAN
BUSE TAŞKIN
ASLI ZAIMOĞLU
MERVE CÖMERT
GÜNER TATAR
BURAK ŞAFAK

ALİGÜL SELİM TÜRKÖĞLÜ
İLGİN İLASLAN

EKİM 2023
ANKARA

TÜBİTAK



1. GİRİŞ

Yerleşim alanlarının enerji tüketimi, küresel toplam enerji tüketiminin %27'sini oluşturmaktadır (Rafique vd., 2021). Ayrıca günümüzde enerji talebinin büyük bir bölümünün fosil kaynaklardan karşılandığı ve bu durumun karbon emisyonları nedeniyle iklim değişikliği endişelerine yol açtığı bilinmektedir (Sezgin vd., 2022). Unutulmamalıdır ki Avrupa Birliği'nin ("Avrupa Komisyonu - 2050 uzun vadeli stratejisi", 2022) uzun vadeli hedefinde 2050 yılına kadar sıfır karbon emisyonu da yer almaktadır. Bu bağlamda fotovoltaik ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) dünyada başarıyla ve artan bir şekilde kullanılmaya devam etmektedir (Al-Ghussain vd., 2022). Tüm bunlar göz önüne alındığında, son dönemde enerji talebinin yerinde, YEK'lerden ve küçük ölçekli bir bölgede, yani bir mikroşebeke yapısı içerisinde karşılanması yönünde bir düşünce söz konusudur. Bir mikroşebeke bir konut bölgesi, üniversite kampüsü ya da hastane kompleksi gibi nispeten ufak çaplı bir bölgeyi kapsayan ve kendi kendine yeterli bir enerji sistemi olarak bahsedilebilir. Mikroşebekelerin içerisinde YEK'ler ve esnek yüklerin yanında elektrikli araç (EA) şarj istasyonları gibi çeşitli akıllı şebeke bileşenleri yer alabilir. Ayrıca mikroşebekelerde akıllı şebeke uygulamalarından talep cevabı uygulaması kullanılarak toplam işletme maliyeti azaltılabileceği gibi işletimsel esneklik de sağlanabilir. Çünkü arz-talep dengesizliği durumunda enerji üretimindeki bir artış/azalış ile enerji tüketimindeki bir azalma/artma birbirine eşdeğer olarak ifade edilebilir. Bu açıdan mikroşebeke operatörünün kontrolünde esnek yüklerin yönetilmesi ile mikroşebekelerde önemli kazançlar elde edilebilir. Ayrıca mikroşebekelerin bir dağıtım sisteminde yer alacağı düşünüldüğünde mikroşebekenin ve dağıtım sisteminin işletiminin birlikte ele alınması gereken konulardan birisi olduğu belirtilmelidir. Dağıtım sistemi operatörü sistem işletiminde kayıpları minimize etmek isterken, mikroşebeke enerji operatörü de işletim maliyetini düşürmek ya da kazancını arttırmak isteyecektir. Bu açıdan enerji yönetimi gerçekleştirilirken dağıtım sistemi ve mikroşebeke işletiminin iki seviyeli bir problem olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Yerleşim bölgeleri haricinde taşımacılık sektörü de dünyada yüksek miktarda enerji tüketmektedir ve ayrıca önemli miktarda sera gazı emisyonu sebeptir ki bu oranın ABD'de %28'in üzerinde bir paya sahip olduğu belirtilmelidir (You vd., 2020). Bu açıdan çevre kirliliğine neden olan karbon salınımını ve yakıt bağımlılığını azaltmak için yolun taşımacılık sektörünün elektrifikasyonundan geçtiği düşünülmektedir. Bu bağlamda EA teknolojilerinde hızlı gelişmeler yaşanmaktadır (Shao vd., 2021). Üreticiler tarafından farklı tipteki EA'lar kullanıcıların tercihine sunulmaktadır. Sunulan EA türleri arasında bataryalı EA'lar ve yakıt hücreli EA'lar (YHEA'lar) olmak üzere önde gelen iki EA teknolojisi mevcuttur (Liu vd., 2022). Potansiyel EA müşterileri, sunulan EA türleri

arasından kendi ihtiyaçlarını, zevkini ve yakındaki şarj istasyonu mevcudiyetini göz önünde bulundurarak mevcut seçeneklerinden birini seçmektedir. Genel olarak her bir EA türünün diğer türe göre avantaj ve dezavantajlarının olduğu ifade edilebilir.

Safi bataryalı EA'ların (SBEA'ların) sayısındaki hızlı artış, yüksek batarya maliyetleri, sınırlı sayıdaki şarj ünitesi ve uzun şarj süreleri gibi sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, potansiyel müşteriler bir SBEA satın almaktan çekinebilirler. Bu nedenle diğer EA türlerine yönelen müşteriler de söz konusudur (Ko vd., 2020). SBEA'larla ilgili yukarıda bahsedilen sorunlar için olası bir çözüm, bataryası değiştirilebilir EA'lardır (BDEA). Batarya değiştirme istasyonu, EA sahiplerinin deşarj olmuş bataryalarını tam şarjlı bir batarya ile değiştirdiği bir hizmet sağlayıcısıdır (Gao vd., 2020). Değiştirilebilir EA bataryaları, kullanıcının tam şarjlı bir sürüşe hazır olması için bekleme süresini önemli ölçüde azaltmaktadır (C. Li vd., 2022). Konuya YHEA'lar açısından bakıldığında, bu araçların yakıt ikmali için geçen süre, SBEA'lara kıyasla çok az zaman almaktadır ancak bu araçlar için de hidrojen ve yakıt hücresi maliyetinin oldukça yüksek olduğu belirtilmelidir (Tao vd., 2020). Bu yüksek maliyet, bu araçlar için en büyük zorluk olarak ifade edilebilir. Ayrıca, bataryalı EA'ların aksine, YHEA'lar bir elektrolizöre ihtiyaç duymaktadır (Xu vd., 2020). Son olarak, bahsedilen EA türleri arasında yalnızca SBEA'lar evde şarj edilebilme fırsatına sahiptir.

Fosil yakıtlı araçlardan bataryalı EA'lara ve YHEA'lara geçiş, EA şarj ünitesi, batarya değiştirme ve hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının yaygın olarak bulunmasına bağlıdır (Xu vd., 2020). Çünkü EA'ların yaygınlaşmasındaki en önemli engellerden biri EA sahibinin EA istasyonuna erişememesidir. Bu bilgiler ışığında, tüm EA çeşitlerini kabul edebilen hepsi bir arada EA istasyonu (HBAEAİ) konsepti, EA'ların dünya çapında yaygınlaşmasını destekleyebilir. Ayrıca EA'lar YEK ile entegre edilmedikçe bu araçlar için bahsedilen faydalar elde edilemez, hatta çevre ve güç sisteminin çalışması açısından daha da kötü durumlar ortaya çıkabilir (Zeng vd., 2020). Bu bağlamda, EA şarj/yakıt ikmal/batarya değiştirme istasyonlarının bir YEK ile donatılması tavsiye edilmektedir.

Nispeten yüksek güç tüketimine ve enerji kapasitesine sahip birçok EA'nın aynı anda güç tüketimi göz önüne alındığında, koordine edilmeden şarj edilmesi güç sistemi üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Transformatörlerin ve hatların aşırı yüklenmesi, büyük çaplı elektrik kesintileri gibi güç sistemi sorunları EA istasyonlarının optimum şekilde çalışması ile ortadan kaldırılabilir. Ayrıca HBAEAİ konsepti, esneklik aracı olarak ve bir depolama ünitesi olarak da düşünülebilen bir hidrojen tankı ve enerji depolama sistemi olarak da düşünülebilen değiştirilebilir bataryaları da içerdiğinden stokastik yapıdaki YEK'lerin daha verimli kullanılmasına yardımcı olabilir ve mikroşebekenin ekonomik çalışması açısından

fayda sağlayabilir. Böylece güvenilir bir güç sistemi elde edilebilir ve önemli bir mali yüke neden olabilecek güç sistemi yatırımları geciktirilebilir.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde EA fişli şarj, hidrojen yakıt ikmal ve batarya değişim istasyonu ve bunların kombinasyonunu içeren çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bunlardan bazıları sadece SBEA'ları içermektedir. Fallah-Mehrjardi vd. (2020) EA sahiplerinin park istasyonuna vardıklarında enerji talep ve ayrılma zamanlarını bildirdiklerini düşünerek bir kamu EA şarj istasyonunun toplam işletme maliyetini minimize etmek için bir enerji yönetim modeli tanımlamışlardır. Marzoghi vd. (2019) elektrik fiyatlarının belirsizliği altında ve talep cevabı programını düşünerek FEA'lar için hidrojen enerji sistemine sahip bir akıllı park istasyonu için bir optimum enerji yönetim modeli sunmuşlardır. Gholinejad vd. (2020) bir mahallede yer alan çoklu ev bölgeleri için iki seviyeli enerji yönetim modeli sunmuşlardır. Çalışmada her bir evin bir SBEA'ya sahip olduğunu kabul etmişlerdir. Yazarlar çalışmada amacı toplam kârı maksimize etmek ve şebekeden çekilen gücü azaltmak olarak belirlemişlerdir. Fakat bu çalışmada diğer EA tipleri ve otopark yapısı ele alınmamıştır. Ganjeh Ganjehlou vd. (2020) SBEA'lar da dahil olmak üzere bir mikroşebekenin maliyetini en aza indirmek için koalisyon sistemine katılımı teşvik eden, gerilim stabilitesini ve güç sistem güvenilirliğini artıran yeni bir tekno-ekonomik çok seviyeli optimizasyon yöntemi ve zamana göre değişen modern bir fiyat modeli tanıtmışlardır. Diaz-Londono vd. (2020) bir YEK ve elektrik şebekesinden enerji sağlanan bir SBEA şarj istasyonunun optimum şekilde çalıştırılması açısından gün öncesi ve gerçek zamanlı bir işletim strateji sunmuşlardır. Bernal vd. (2020) bir SBEA istasyonu için optimum teklif ve yönetim stratejisi gerçekleştirilmesi açısından SBEA şarj istasyonunun elektrik piyasası ve EA sahipleri ile etkileşimde olduğu bir yapı önermişlerdir. Sengor vd. (2021) doğrusal programlama yöntemini kullanarak SBEA park istasyonu için gerçek zamanlı bir enerji yönetim modelini ele almışlardır. Ancak çalışmanın amacını yük faktörünü maksimize etmek olarak belirlemişlerdir. Wu vd. (2019) elektrik fiyatları ve EA şarj taleplerini dikkate alarak şarj zamanlamasının gerçekleştirildiği çoklu şarj özelliklerine sahip bir SBEA şarj istasyonu modeli açıklamışlardır. Al Wahedi ve Bicer (2022) Katar'da bir PV sistem, rüzgâr türbini, dönüştürücü, elektrolizör, yedek bio jeneratör ve yakıt hücrelerini içeren bir hızlı EA şarj istasyonu için tekno-ekonomik bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Long vd. (2021) rüzgâr türbinleri, güneş panelleri ve hidrojen enerjisi depolama sistemine sahip bir kamuya ait EA şarj istasyonu için gerçek zamanlı bir işletim modeli sunmuşlardır. Kandpal vd. (2022) araçtan şebekeye güç aktarımını dikkate alarak EA'ların tek fazlı şarj talebini kontrol ettiği ve dengesizliği azaltmayı amaçladığı bir gün öncesi yönetim stratejisi önermişlerdir. Fakat, burada ele alınan çalışmalarda sadece SBEA'ları dikkate aldığı için altı çizmeliştir.

Diğer taraftan bazı çalışmalar sadece batarya değişim istasyonlarını incelemiştir. Sepetanc ve Pandzic (2020) batarya değişim istasyonu grubunun fiyat yapıcı konumda

gün öncesi elektrik piyasası ve rezerv piyasasına katılımı için bir yapı açıklamışlardır. Erdinç (2021) bir PV destekli batarya değişim istasyonu için karışık tamsayılı doğrusal programlama yöntemini kullanarak bataryadan çeşitli enerji desteği çeşitlerinin de yer aldığı esnek bir işletim sağlanması açısından bir model sunmuştur. C. Li vd. (2022) bir batarya değişim istasyonu için batarya planlama stratejisi sunmuşlardır. Çalışmada optimizasyon sürecini yürütmek için genetik algoritmayı kullanmışlardır. Zeng vd. (2022) dağıtım sisteminde kazancı ve güvenilirliği arttırmak için elektrik şebekesine enerji satışı durumunu da dikkate alarak batarya değişim istasyonlarının değerlendirildiği bir model önermişlerdir. Sui vd. (2022) batarya değişim istasyonlarını içeren bir mikroşebekede dayanıklılığı arttırmak için bir model sunmuşlardır. Ko vd. (2020) EA'ların istasyona varış durumlarını ve elektrik fiyatlarını dikkate alan optimum bir şarj algoritması geliştirmişlerdir. Ayrıca çalışmada amacı batarya değişim istasyonunun kârını maksimize etmek olarak belirlemişlerdir. Liang vd. (2021) enerji tasarrufunu arttırmak, karbon emisyonlarını azaltmak ve ekonomik fizibiliteyi iyileştirmek için Pekin'de yer alan bir batarya değişim istasyonu için konfigürasyon ve işletim modeli sunmuşlardır. Yazarlar batarya değişim istasyonlarının net gelirini etkileyen en önemli bileşenlerin batarya maliyeti ve batarya değişim işleminin fiyatı olduğunu açıklamışlardır. Gao vd. (2020) batarya değişim istasyonunun işletme maliyetini en aza indirmek için batarya yığınının en iyi şekilde yönetildiği, derin takviyeli öğrenmeye dayalı bir yönetim modeli önermişlerdir. Y. Li vd. (2022) bir batarya değişim istasyonunun toplam işletme maliyetini en aza indiren ve güç şebekesindeki yük dalgalanmalarını azaltan çok amaçlı bir optimum işletim metodolojisi geliştirmişlerdir. Feng vd. (2020) PV tabanlı bir batarya değişim istasyonu için ekonomik bir değerlendirme modeli sunmuşlardır. Yazarlar çalışmada ayrıca hava ve trafik akışı tahminini ve değişken şarj yöntemini de dikkate almışlardır. Infante vd. (2020) batarya değişim istasyonlarının planlanması ve işletilmesi için optimum bir strateji önermişlerdir. Sunulan yapıda planlama aşamasında batarya sayısı belirlenirken, işletme aşamasında değiştirme, şarj etme ve deşarj etme kararları en uygun şekilde yönetilmiştir. Wang vd. (2021) rüzgâr ve PV sistem ile desteklenen batarya değişim istasyonlarındaki bataryaların optimum şarj yönetimi problemini ele almışlardır. Çalışmanın sonuçlarında etkili şarj yönetiminin yanı sıra, pik yükün azaltılabildiğini ve fazla rüzgâr ve PV gücünün kullanıldığını belirtmişlerdir. Ancak burada ele alınan çalışmalarda sadece batarya değişim istasyonu düşünülürken, SBEA şarj istasyonları ve hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının dikkate alınmadığının altı çizilmelidir.

Diğer bazı makaleler yalnızca YHEA'lar üzerinde durulmuştur. Ku vd. (2022) orta ve ağır hizmet görevi gerçekleştiren YHEA'ların hidrojen taleplerini karşılayan yakıt ikmal istasyonlarını ekonomik açıdan analiz etmişlerdir. Šimunović vd. (2022) Hırvatistan'daki YHEA'lara hidrojen sağlamak için rüzgâr çiftliğinden beslenen ve suyun elektroliz yolunun

kullanıldığı bir model önermişlerdir. Yazarlar ayrıca önerilen yapının tekno-ekonomik değerlendirmesini de dikkate almışlardır. Ayodele vd. (2021) yedi Güney Afrika şehrinde rüzgâr enerjisi üretim kaynağı ile desteklenen bir hidrojen yakıt ikmal istasyonunun tekno-ekonomik bir değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada amacı yakıt ikmal istasyonunun optimum şekilde işletilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması olarak belirlemişlerdir. Yazarlar istasyonların her birini 5 kg hidrojen tankı kapasiteli 25 YHEA'ya hizmet verecek şekilde tasarlamışlardır. H. Li vd. (2022) literatürde ilk kez YHEA'dan şebekeye enerji seçeneğini dikkate alan bir modelin ekonomik potansiyelini analiz etmişlerdir. Okonkwo vd. (2022) HOMER yazılımı aracılığıyla Suudi Arabistan, Al-Kharj'da PV ve rüzgâr enerji sistemi ile desteklenen bir hidrojen yakıt ikmal istasyonunun işletimi konusunu ele almışlardır. Pereira ve Llerena-pizarro (2019) Brezilya'nın bir şehrinde YHEA taksi filosuna hizmet veren PV sistem destekli bir hidrojen yakıt ikmal istasyonunun tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Silvestri vd. (2022) PV güç üretim sisteminin yer aldığı hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının ekonomik sürdürülebilirliğini sağlamak için bir teşvik stratejisi sunmuşlardır. Sun ve Harrison (2021) yüksek yenilenebilir üretim durumu altında elektrik şebekesindeki kısıtlamaları yönetmek için yakıt ikmal istasyonunun aktif olarak kontrol edildiği bir yapı önermişlerdir. Yazarlar çalışmada önerilen modelin yenilenebilir enerji entegrasyonunu kolaylaştırdığını ve istasyon maliyetlerini azalttığını belirtmişlerdir. Xiao vd. (2011) hidrojen yakıt ikmal istasyonunun elektrik şebekesinden, sanal rüzgâr çiftliğinden ve yerinde kurulu PV sistemden enerji aldığı ve aynı zamanda elektrik piyasasına katıldığı bir model önermişlerdir. Tang vd. (2022) YEK'leri içeren hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının temel maliyet bileşenlerini belirlemek için bir çerçeve ortaya koymuşlardır ve İsveç'in şehirlerinden elde ettikleri gerçek güneş radyasyonu, rüzgâr hızı ve elektrik fiyatlarını kullanarak bir test çalışması gerçekleştirmişlerdir. Chen vd. (2021) Şanghay'daki yenilenebilir enerji tabanlı bir hidrojen yakıt ikmal istasyonunu analiz etmişlerdir. Toghyani vd. (2021) bir PV sistem, batarya enerji depolama sistemi ve polimer elektrolit membran elektrolizöründen oluşan bir hidrojen yakıt ikmal istasyonunun performansını araştırmışlardır. Zhang vd. (2021) hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının uzun vadeli kârını maksimize etmek amacıyla bir model sunmuşlardır.

Son olarak, bazı çalışmalarda iki farklı EA istasyon türünü içeren hibrit yapılar ele alınmıştır. Yani, batarya değişim, SBEA şarj ve hidrojen yakıt ikmal istasyonlarından ikisi ele alınmıştır. Tao vd. (2022) derin takviyeli öğrenme ve karışık tamsayılı doğrusal programlama aracılığı ile SBEA'lar için hızlı ve yavaş şarj seçeneklerinin yanı sıra BDEA'lar için batarya değişim hizmeti sunan bir istasyon modeli sunmuşlardır. Akbari-Dibavar vd. (2021) hibrit SBEA şarj ve elektrolizör, yakıt hücresi ve hidrojen depolama içeren hidrojen yakıt ikmal istasyonu için optimum bir enerji yönetim modeli önermişlerdir.

Bu istasyon ayrıca bir PV güç sistemi ile de desteklenmiştir. Guo ve Gong, (2022) bir PV güç sistemi, EA şarj ve hidrojen yakıt ikmal istasyonunun birleştirildiği bir yapı için bir optimum enerji yönetimi modeli sunmuşlardır. Mansour-Saatloo vd. (2021) hidrojen yakıt ikmal istasyonları ve SBEA park yerlerini içeren bir mikroşebekenin optimal enerji yönetimi sorununu ele almışlardır. Çalışmada YHEA'lar ve SBEA'lar için şebekeye bağlı PV tabanlı bir yapı önermişlerdir. Ayrıca yazarlar optimum bileşen boyutlarını belirlemek ve bir enerji yönetim stratejisi sunmak için bir çerçeve açıklamışlardır. Sriyakul ve Jermsttiparsert (2021) PV sistem ile desteklenen hibrit hidrojen yakıt ikmal ve SBEA şarj istasyonu için risk odaklı bir tasarım ve planlama modeli önermişlerdir. Ayrıca çalışmada elektrik kesintisi altında bu durumdan etkilenmemek için dizel jeneratörü de dikkate almışlardır. Xu vd. (2020) bir PV sistem ile desteklenen hem şarj hem de hidrojen yakıt ikmal hizmeti verebilen bir istasyon konsepti önermişlerdir. Çalışmanın amacını SBEA'lara elektrik enerjisi satışından ve YHEA'lara molar hidrojen satışından elde edilen kârı maksimize etmek olarak belirlemişlerdir. Yazarlar ayrıca Xu vd. (2022)'de bir hibrit hidrojen yakıt ikmal istasyonu ve rüzgâr enerjisi santrali ile entegre bir batarya değişim istasyonu konseptini de sunmuşlardır.

Proje yürütücüsünün son dönemde yayımlanan (Çiçek (2022)) SBEA'lara, YHEA'lara ve BDEA'lara hizmet edebilen HBAEAİ çalışması literatürde ilk kez yer almıştır. Bu çalışma dışında literatürde 3 farklı EA türünü ele alan bir çalışma bulunmadığı ifade edilmelidir. Fakat bu çalışmada mikroşebeke yapısının ve YHEA'ların belirsizliğinin dikkate alınmadığı sadece istasyon işletimi probleminin çözüldüğünü belirtmekte fayda vardır.

Mikroşebekeler ile ilgili literatür taraması gerçekleştirildiğinde bu alanda birçok çalışmanın yer aldığı görülmektedir. Mikroşebekelerin EA şarj istasyonlarını içeren bazı örnekler şöyledir. Yu vd. (2023) eski yerleşim yerlerinin uygulanması kolay ve uygun maliyetli bir hibrit AA/DA mikroşebeke yapısına dönüştürülmesi için bir yapı sunmuşlardır. Sunulan yapıda hat kayıplarının da minimize edildiği ifade edilmiştir. Maulik (2022) işletme maliyetini en aza indirmek, gerilim profilini iyileştirmek ve mikroşebekenin gerilim stabilitesini sağlamak için bir Volt/VAr ve aktif güç yönetimi stratejisini içeren yeni bir olasılıksal enerji yönetimi stratejisi önermiştir. Hou vd. (2023) kullanılmayan enerji miktarını ve yük kesinti miktarını azaltmak amacıyla birden fazla mikroşebekenin yer aldığı bir yapı için çok aşamalı bir hibrit enerji yönetimi stratejisi önermişlerdir. Zuo vd. (2023) bir DA mikroşebekede enerji kayıplarının en aza indirildiği ve anahtarlama modeli tahmin kontrolüne dayalı bir enerji yönetimi stratejisi önerilmişlerdir. Mohammed vd. (2022) EA hızlı şarj istasyonlarının elektrik şebekesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve ayrıca araçtan şebekeye enerji teknolojisi aracılığıyla sistem işleyişine katkılarını değerlendirmek için kayan mod kontrolü ve bulanık mantık kontrolü olmak üzere iki kontrol yöntemi

geliştirmişlerdir. Çalışmada EA bataryası mikroşebekede gerilim düşüşünü azaltmak amacıyla statik kompensatör olarak düşünülmüştür. Yazarlar problemin çözümü için Matlab Simulink/SimpowerSystems yazılımını kullanmışlardır. Zhou vd. (2022) EA'ların dağıtık enerji depolama sistemi olarak düşünüldüğü rüzgâr türbinleri, PV sistem ve dinamik kablosuz şarj tesisinin yer aldığı yeni bir mikroşebeke yapısı sunmuşlardır. Bu yapıda, EA'ların mikroşebekenin enerji yönetimine katkısı sağlanmıştır. Eskandari vd. (2022) yakıt hücresi kombine ısı ve güç tesisi, YEK'ler, SBEA'lar ve enerji depolama sistemlerini içeren bir mikroşebekenin enerji yönetimi için bir model ileri sürmüşlerdir. FEA davranışları ve yenilenebilir enerji üretimi belirsizlikleri için Monte Carlo simülasyonunu kullanmışlardır. Problemi karışık tamsayılı doğrusal olmayan programlama yöntemi ile modellemişlerdir. Çalışmada amacı elde edilen kârı maksimize etmek olarak belirlemişlerdir. Jiao vd. (2022) PV sistem ve rüzgâr santrallerinin enerji üretimleri ile EA şarj davranışları için belirsizlikleri dikkate alarak bir mikroşebekenin çevrimiçi enerji yönetimi için iki aşamalı bir yapı sunmuşlardır. İlk aşamada toplam işletme maliyetini minimize ederken ikinci aşamada toplam şarj istasyonu gücünün her bir EA'ya tahsisi için işletim problemini çözmüşlerdir. Harsh ve Das (2022) yeniden yapılandırılmış elektrik şebekesine bağlı bir mikroşebekenin optimum enerji yönetimini gerçekleştirmek için yeni bir teşvik tabanlı talep cevabı programını kullanarak bir optimizasyon modeli önermişlerdir. Çalışmada EA ve EA haricindeki yükleri iki farklı toplayıcı altında toplamışlardır. Gupta vd. (2022) hibrit SBEA'lar ve talep cevabı programları düşünülerek kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen güç kaynakları ile batarya enerji depolama ünitelerinden oluşan bir AC mikroşebekenin optimum çalışması için stokastik tabanlı bir model açıklamışlardır. Çalışmada amacı işletme maliyetini minimize etmek olarak belirlemişlerdir. Sahoo vd. (2022) güç kalitesini ve güvenilirliği arttırmak için kombine AC ve DC şebeke tabanlı hibrit bir mikroşebeke yapısı ve EA şarj işletim stratejisi önermişlerdir. Shaaban vd. (2019) uzak topluluklarda akıllı EA şarj istasyonları tahsis etmek için bir planlama algoritması sunmuşlardır. Planlama algoritmasında işletim maliyetini minimize ederken toplam karbon emisyonlarını da azaltmayı hedeflemişlerdir. Dicorato vd. (2019) EA filosunun yönetimi için bir konsept sunmuşlardır. PV sistem, enerji depolama sistemi ve birden fazla EA şarj istasyonunu içeren bir DC mikroşebeke yapısı düşünülmüşlerdir. Lamedica vd. (2019) bir mikroşebekede YEK'ler ve enerji depolama sistemlerinin yanı sıra doğrusal olmayan yükleri de hesaba katarak EA barındırma kapasitesi ve harmonik bozulmalarla ilgili ana konulara genel bir bakış sunmuşlardır. Yazarlar ayrıca EA'ların şarj kontrollerini gerçekleştirebilen, algoritmalara ve yeni kontrol stratejilerine dayalı yeni bir karma deterministik ve olasılıksal yöntem sunmuşlardır. H. Yang vd. (2017) EA'ların yer aldığı lojistik dağıtım sistemini içeren ve elektrik şebekesine bağlı bir mikroşebeke modeli açıklamışlardır. Çalışmada lojistik hizmetlerin kalitesini arttırmak ve yenilenebilir enerji ve

mikroşebekenin yük dalgalanmalarını azaltmak amacıyla çeşitli stratejiler incelemişlerdir. Umoren vd. (2021) bir mikroşebeke içerisinde yer alan EA'ların araçtan şebekeye enerji sağlayabilmesi için akıllı bir araç iletişim sistemi sunmuşlardır. Çalışmada kritik yük talebinin karşılanması açısından uygun EA'ların seçildiği bir kaynak verimliliği stratejisi önermişlerdir. Y. Yang vd. (2018) çok katlı binaların sahip olduğu rüzgâr enerji türbinlerinin şehirdeki tüm EA'ların enerji taleplerini karşılayabilmesi açısından bir yapı ileri sürmüşlerdir. Çalışmada Pekin'den elde ettikleri verilerle bir durum çalışması gerçekleştirmişlerdir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu bölümde önerilen yapıya ait matematiksel modellemeye yer verilmektedir. Projede HBAEAİ'yi de içeren bir mikroşebekenin, dağıtım şebekesi ile üst ve alt seviyeden oluşmak üzere iki seviyeli optimum enerji yönetim modeli karışık tamsayılu kuadratik programlama yöntemi ile oluşturulmuştur. Modelde üst seviye problemde şebekenin toplam aktif güç kaybı minimize edilmeye çalışılırken, alt seviye problemde ise mikroşebekenin kârı maksimize edilmeye çalışılmaktadır. Aşağıda Tablo 3.1'de modelde kullanılan kümeler verilirken, Tablo 3.2'de parametreler ve son olarak Tablo 3.3'te ise optimizasyon problemi içerisinde yer alan karar değişkenleri sunulmaktadır.

Tablo 3.1. Kümeler

| | |
|--------|--|
| b | HBAEAİ'nin batarya değiştirme bölümünde bulunan bataryalar kümesi. |
| d | Batarya değişimi talep eden BDEA'lar kümesi. |
| f | FEA'lar kümesi. |
| h | Hidrojen yakıt ikmali için istasyona gelen YHEA'lar kümesi. |
| i, j | Dağıtım sistemi bara kümesi |
| s | Senaryolar kümesi. |
| t | Zaman periyotları kümesi. |

Tablo 3.2. Parametreler

| | |
|--------------------|---|
| $ED_b^{BDEA-maks}$ | t periyodunda batarya değiştirme kısmında yer alan batarya b 'nin maksimum enerji kapasitesi [kWh]. |
| $ED_d^{BDEA-var}$ | BDEA d 'nin HBAEAİ'ye vardığında bataryasındaki enerji durumu [kWh]. |
| $ED_f^{FEA-başl}$ | FEA f 'nin HBAEAİ'ye vardığı andaki enerji durumu [kWh]. |
| $ED_f^{FEA-ist}$ | FEA f 'nin HBAEAİ'den ayrılırken istediği enerji durumu [kWh]. |
| $ED_f^{FEA-maks}$ | FEA f 'nin bataryasının maksimum enerji seviyesi [kWh]. |
| $D_{t,h}^{H2oEA}$ | t periyodunda YHEA h 'nin molar hidrojen talebi [Nm^3]. |
| $G^{BDEA-maks}$ | Batarya değiştirme kısmında yer alan bataryaların maksimum şarj gücü [kW]. |
| $G^{EL-maks}$ | Elektrolizörün maksimum güç tüketimi [kW]. |
| G^{EL-min} | Elektrolizörün minimum güç tüketimi [kW]. |

| | |
|-------------------------|--|
| G_t^{esnek} | t periyodunda mikroşebekede yer alan esnek yüklerin güç talebi [kW]. |
| $G_t^{esnekolmayan}$ | t periyodunda mikroşebekede yer alan esnek olmayan yüklerin güç talebi [kW]. |
| $G_t^{\dot{}}$ | t periyodunda güneş enerji santralinde üretilen güç [kW]. |
| $G_t^{mikroşebeke}$ | t periyodunda mikroşebekede yer alan esnek ve esnek olmayan yüklerin toplam güç talebi [kW]. |
| G_t^{R} | t periyodunda rüzgâr türbininde üretilen güç [kW]. |
| LHV_{H_2} | Hidrojen için alt ısı değeri [MJ/kmol]. |
| N | Oldukça büyük bir pozitif sayı. |
| $N^{EL-H_2 maks}$ | Elektrolizörün üretebileceği maksimum molar hidrojen miktarı [Nm ³]. |
| $N^{EL-sayı}$ | Elektrolizör ünitesi sayısı. |
| $N^{FEA-ünite}$ | FEA'ları şarj etmek için kullanılan şarj ünitesi sayısı. |
| $O^{TC-esnek}$ | Talep cevabı programı kapsamında esnek yüklerde meydana gelen kesinti oranı [%]. |
| $R_f^{şarj-ünite-maks}$ | Şarj ünitesinin maksimum güç limiti [kW]. |
| $P^{H_2-başl}$ | Hidrojenin tankının ilk periyottaki basınç değeri [bar]. |
| P^{H_2-maks} | Hidrojenin tankı için izin verilen maksimum basınç değeri [bar]. |
| P^{H_2-min} | Hidrojenin tankı için izin verilen minimum basınç değeri [bar]. |
| P^{H_2-son} | Hidrojenin tankının son periyottaki basınç değeri [bar]. |
| R | Gaz sabiti. |
| T_{H_2} | Hidrojen tankının ortalama sıcaklık değeri [°K]. |
| $T_f^{FEA-ayr}$ | FEA f 'nin HBAEAİ'den ayrılma periyodu. |
| $T_f^{FEA-var}$ | FEA f 'nin HBAEAİ'ye varış periyodu. |
| V_{H_2} | Hidrojen tankının hacmi [m ³]. |
| V_{EL} | Elektrolizörün verimi [%]. |
| V_f^{FEA} | FEA f 'nin bataryasının şarj verimi [%]. |
| $\lambda^{değişirme}$ | Batarya değiştirme ücreti için BDEA sahibinden alınan ücret [TL]. |
| $\lambda^{EA, şarj}$ | FEA'ların şarj edilmesi ile FEA sahibinden alınan birim şarj ücreti |

| | |
|----------------------------|---|
| | [TL/kWh]. |
| $\lambda_{t,s}^{elk}$ | Elektrik şebekesinden satın alınan enerjinin maliyeti [TL/kWh]. |
| $\lambda_t^{hidrojen}$ | YHEA'lara hidrojen satışının birim miktarı [$Nm^3/h.TL$]. |
| λ^{kes} | Mikroşebekede yer alan YEK'lerde enerji kesintisi durumunda ortaya çıkan kesinti maliyeti [TL/kWh]. |
| $\lambda_{t,s}^{mşet}$ | Mikroşebeke içerisinde yer alan YEK'lerde üretilen enerjinin HBAEAİ'ye satış fiyatı [TL/kWh]. |
| λ^{TC} | Talep cevabı programı kapsamında esnek yüklerde gerçekleştirilen kesinti için tüketiciye ödenen birim ödeme miktarı [TL/kWh]. |
| Δ_t | Zaman çözünürlüğü. |
| Λ | Lagrange fonksiyonu. |
| $P_{i,t}^{Demand}$ | i barasının t anındaki aktif güç talebi [pu]. |
| $Q_{i,t}^{Load}$ | i barasının t anındaki reaktif yük talebi [pu]. |
| $R_{i,j}$ | i, j hattının rezistansı [pu]. |
| $S_{i,j}^{Max}$ | i, j hattının maksimum yük kapasitesi [pu]. |
| $V_i^{min} \vee V_i^{max}$ | i barasının izin verilen minimum ve maksimum gerilim değeri [pu]. |
| $X_{i,j}$ | i, j hattının reaktansı [pu]. |
| $D^{mş}$ | Mikroşebekenin referans kazancı [TL] |
| $L^{mş,min}$ | Mikroşebekenin izin verilen minimum kazancı [TL] |
| $L^{mş,maks}$ | Mikroşebekenin izin verilen maksimum kazancı [TL] |

Tablo 3.3. Karar değişkenleri

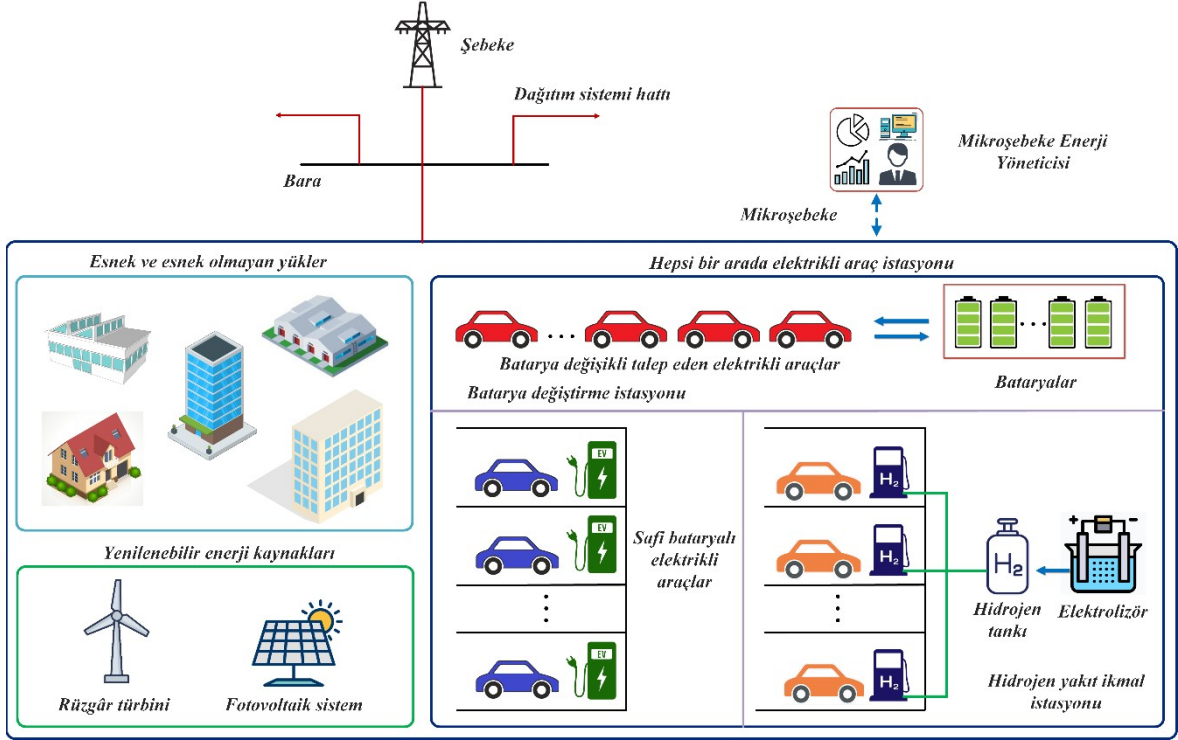
| | |
|------------------------------|--|
| $ED_{b,t}^{BDEA}$ | t periyodunda batarya değiştirme kısmında yer alan batarya b 'nin enerji durumu [kWh]. |
| $ED_{b,t}^{değiş-bat}$ | t periyodunda bir BDEA'nın batarya değişim isteği gerçekleşirse batarya b 'nin yeni enerji durumu [kWh]. |
| $ED_{f,t}^{FEA}$ | t periyodunda FEA f 'nin enerji durumu [kWh]. |
| $ED_{b,t}^{yapay-değiş-bat}$ | Eğer bir batarya değiştirme isteği gerçekleşirse zaman periyodu t sırasında batarya b 'nin enerji değerinin değişimi için tanımlanan değişken [kWh]. |
| $P_{b,t}^{B2B-çıkış}$ | t periyodunda batarya değiştirme kısmında yer alan batarya b 'den diğer bataryalar için deşarj edilen güç [kW]. |

| | |
|-------------------------|---|
| $G_{b,t}^{B2B-giris}$ | t periyodunda batarya değiştirme kısmında yer alan batarya b için diğer bataryaların değarj edilmesi ile elde edilen şarj g¼c¼ [kW]. |
| G_t^{BDEA} | t periyodunda batarya değiştirme kısmında t¼ketilen toplam g¼c¼ [kW]. |
| $G_{b,t}^{BDEA-bat}$ | t periyodunda batarya değiştirme kısmında yer alan batarya b 'nin şarj g¼c¼ [kW]. |
| $G_{b,t}^{değarj-BDEA}$ | t periyodunda batarya değiştirme kısmında yer alan batarya b 'nin değarj g¼c¼ [kW]. |
| G_t^{EL} | t periyodunda elektroliz¼r¼n g¼c¼ t¼ketimi [kW]. |
| $G_{t,s}^{FEA}$ | t periyodunda FEA'lar için t¼ketilen toplam g¼c¼ [kW]. |
| $G_{f,t}^{FEA-şarj}$ | t periyodunda FEA f 'nin şarj g¼c¼ [kW]. |
| G_t^{i-BDEA} | t periyodunda g¼neř enerji santralinden ¼retilen g¼c¼n batarya değiştirme b¼l¼m¼nde yer alan bataryaları şarj etmek için kullanılan kısmı [kW]. |
| G_t^{i-FEA} | t periyodunda g¼neř enerji santralinden ¼retilen g¼c¼n FEA'ları şarj etmek için kullanılan kısmı [kW]. |
| $G_t^{i-HBAEAİ}$ | t periyodunda g¼neř enerji santralinden ¼retilen g¼c¼n HBAEAİ'de kullanılan kısmı [kW]. |
| $G_t^{i-Mş}$ | t periyodunda g¼neř enerji santralinden ¼retilen g¼c¼n mikroşebekede kullanılan kısmı [kW]. |
| G_t^{i-YHEA} | t periyodunda g¼neř enerji santralinden ¼retilen g¼c¼n YHEA'lara hidrojen desteği sağlamak amacıyla elektroliz¼r¼de kullanılan kısmı [kW]. |
| $G_t^{SR-BDEA}$ | t periyodunda r¼zg¼r t¼rbininden ¼retilen g¼c¼n batarya değiştirme b¼l¼m¼nde yer alan bataryaları şarj etmek için kullanılan kısmı [kW]. |
| G_t^{SR-FEA} | t periyodunda r¼zg¼r t¼rbininden ¼retilen g¼c¼n FEA'ları şarj etmek için kullanılan kısmı [kW]. |
| $G_t^{SR-HBAEAİ}$ | t periyodunda r¼zg¼r t¼rbininden ¼retilen g¼c¼n HBAEAİ'de kullanılan kısmı [kW]. |
| $G_t^{SR-YHEA}$ | t periyodunda r¼zg¼r t¼rbininden ¼retilen g¼c¼n YHEA'lara hidrojen desteği sağlamak amacıyla elektroliz¼r¼de kullanılan kısmı [kW]. |
| $G_t^{SR-Mş}$ | t periyodunda r¼zg¼r t¼rbininden ¼retilen g¼c¼n mikroşebekede kullanılan kısmı [kW]. |
| $G_t^{HBAEAİ}$ | t periyodunda HBAEAİ'nin g¼c¼ t¼ketimi [kW]. |

| | |
|--------------------------|--|
| $G_{b,t}^{şarj-BDEA}$ | t periyodunda batarya değişim kısmında yer alan batarya b 'nin şarj gücü [kW]. |
| $G_t^{TC-kesinti}$ | t periyodunda esnek yüklerde talep cevabı programı kapsamında gerçekleştirilen kesinti miktarı [kW]. |
| $G_t^{YEK-kesinti}$ | t periyodunda yenilenebilir enerji kaynaklarında meydana gelen kesinti [kW]. |
| G_t^{YHEA} | t periyodunda elektrik şebekesinden YHEA'ların hidrojen ihtiyacının karşılanması için elektrolizörde kullanılmak üzere satın alınan elektrik [kW]. |
| $G_t^{şebeke}$ | t periyodunda elektrik şebekesinden satın alınan elektrik [kW]. |
| $G_t^{şebeke-BDEA}$ | t periyodunda elektrik şebekesinden batarya değiştirme kısmında yer alan bataryaları şarj etmek amacıyla satın alınan elektrik [kW]. |
| $G_t^{şebeke-FEA}$ | t periyodunda elektrik şebekesinden FEA'ları şarj etmek amacıyla satın alınan elektrik [kW]. |
| $G_t^{şebeke-HBAEAİ}$ | t periyodunda elektrik şebekesinden HBAEAİ'de kullanılmak üzere satın alınan elektrik [kW]. |
| $G_t^{şebeke-MŞ}$ | t periyodunda mikroşebekenin esnek ve esnek olmayan yüklerinde kullanılmak üzere satın alınan elektrik [kW]. |
| $G_t^{şebeke-YHEA}$ | t periyodunda elektrik şebekesinden YHEA'ların hidrojen ihtiyacını karşılamak amacıyla elektrolizörde kullanılmak üzere satılan alınan elektrik [kW]. |
| N_t^{EL-H2} | t periyodunda elektrolizörün ürettiği hidrojen molar miktarı [Nm ³]. |
| P_t^{H2} | t periyodunda HBAEAİ'nin hidrojen yakıt ikmal bölümünde yer alan hidrojen tankının basınç değeri [bar]. |
| $u_{f,t}^{FEA-ünite}$ | FEA'ların ünite seçimleri için kullanılan ikili karar değişkeni. 1 ise FEA belirtilen ünite bağlıdır, 0 ise bağlı değildir [0,1]. |
| $u_{b,t}1$ | HBAEAİ'nin batarya değiştirme bölümünde bataryaların aynı anda şarj ve deşarj olmaması için kullanılan ikili karar değişkeni [0,1]. |
| $u_{d,b,t}$ | t periyodunda batarya değiştirme kısmındaki batarya b ile HBAEAİ'ye değişim talebi için gelen BDEA d arasındaki batarya değişim işlemi için ikili karar değişkeni. Eğer değişim isteği onaylanırsa 1, aksi takdirde 0'dır. |
| $u_{1-2-3-4}^{yardımcı}$ | Büyük M formülasyonunda kullanılan yardımcı ikili karar değişkeni [0,1]. |
| $V_b^{BDEA-şarj}$ | Batarya değiştirme kısmında yer alan batarya b 'nin şarj verimi [%]. |

| | |
|--|--|
| $V_b^{BDEA-deşarj}$ | Batarya değiştirme kısmında yer alan batarya b 'nin deşarj verimi [%]. |
| $Y_{d,t}$ | t periyodunda BDEA d 'nin batarya değişim talebi için ikili parametre. Eğer BDEA d bir değişim işlemi talep ederse 1, aksi takdirde 0. |
| $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ | Karush-kuhn-tucker optimallik koşullarında kullanılan lagrange çarpanı. |
| $f_{i,j,t}^{active}$ | i, j hattından t anında akan aktif güç [pu]. |
| $f_{i,j,t}^{reactive}$ | i, j hattından t anında akan reaktif güç [pu]. |
| $P_{i,j,t}^{Loss}$ | i, j hattının t anındaki aktif kaybı [pu]. |
| $P_{i,t}^{gen}$ | i barasının t anındaki aktif güç üretimi [pu]. |
| $P_{i,t}^{Load}$ | i barasının t anındaki aktif yük talebi [pu]. |
| $Q_{i,j,t}^{Loss}$ | i, j hattının t anındaki reaktif kaybı [pu]. |
| $Q_{i,t}^{gen}$ | i barasının t anındaki [pu]. |
| $V_{i,t}^{Bus}$ | i barasının t anındaki gerilim değeri [pu]. |
| $I^{mş}$ | Referans değere göre mikroşebekenin kârı [TL] |
| $K^{mş}$ | Referans değere göre mikroşebekenin kaybı [TL] |

Önerilen modele ait genel bir yapı Şekil 3.1'de sunulmaktadır. Burada 3 farklı türdeki elektrikli EA'ya hizmet eden, yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip ve esnek yükleri de içeren bir mikroşebeke bir dağıtım sistemi içerisinde yer almaktadır. Esnek yüklerin talep cevabı programına kayıtlı olduğu düşünülmektedir ve bu yüklerde belirli bir miktarda kesinti gerçekleştirilebilmektedir. Enerji yönetimi aşamasında dağıtım sistemindeki hat kayıpları minimize edilirken, mikroşebekenin ekonomik kazancı maksimize edilmeye çalışılmaktadır.



Şekil 3.1 Önerilen yapıya ait genel bir görünüm.

3.1 Üst Seviye Problemin Formülasyonu

Üst seviye optimizasyon probleminde amaç dağıtım şebekesinin toplam aktif güç kaybını minimize etmek olarak belirlenmiştir. Projede üst seviye problem için amaç fonksiyonu (1) ile verilmektedir. Modelde ayrıca mikroşebeke yöneticisi şebekeden HBAEAİ için enerji ticareti gerçekleştirmektedir ki bu enerjiyi HBAEAİ'ye sattığı için bir kazanç elde etmektedir. Bunların dışında mikroşebeke içerisinde yer alan YEK'lerden üretilen enerji HBAEAİ'ye de satılabilmektedir. Mikroşebekede esnek yüklerin talep cevabı programı kapsamında kayıtlı olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple kesinti gerçekleştirilen tüketicilere bir ödeme de gerçekleştirilmektedir.

$$\min \sum_i \sum_j \sum_t P_{i,j,t}^{loss} \quad (1)$$

3.1.1 Dağıtım şebekesi kısıtları

Güç sistemi denklemleri (2)-(5) arasında belirtilmiştir. Denklem (2) ve (3), baralar arasındaki sırasıyla aktif ve reaktif güç akış dengesini göstermektedir. İlgili denklemlere göre baradan üretilen güç ($P \vee Q_{i,t}^{gen}$) ile, o baraya gelen ($f_{i,j,t}^{R \vee active}$) ve giden ($f_{i,j,t}^{R \vee active}$) güçlerin toplamı, hat kaybına ($P \vee Q_{i,j,t}^{loss}$) ve talebe ($P \vee Q_{i,t}^{load}$) eşittir. Modelde baralarda aktif ve reaktif güç üretimi sadece salınım barasında iken mikroşebekede sadece aktif güç üretimi dikkate alınmıştır. Aynı şekilde tüm baralarda evsel yük hem aktif hem de reaktif

olarak ele alınırken mikroşebeke barasında evsel aktif yüke ek olarak ilgili barada kırılabilen esnek yükler, HBAEAİ yükleri bulunmaktadır. Aktif ve reaktif güç kayıp denklemleri (4) ve (5)'de açıklanmıştır. Eşitliklere göre hattın aktif veya reaktif güç kaybı, ilgili empedans değeri ($R \vee X_{i,j}$) ile hattın akan hem aktif hem gücün salınım barası gerilimi (V_0) ile bileşkesine eşittir.

$$P_{i,t}^{gen} + \sum_{j \in \Omega_i'} f_{i,j,t}^{active} - \sum_{j \in \Omega_i} f_{i,j,t}^{active} = P_{i,j,t}^{loss} + P_{i,t}^{load} \quad (2)$$

$$Q_{i,t}^{gen} + \sum_{j \in \Omega_i'} f_{i,j,t}^{reactive} - \sum_{j \in \Omega_i} f_{i,j,t}^{reactive} = Q_{i,j,t}^{loss} + Q_{i,t}^{load} \quad (3)$$

$$P_{i,j,t}^{loss} = \frac{R_{i,j} * (f_{i,j,t}^{active})^2 + (f_{i,j,t}^{reactive})^2}{V_0^2} \quad (4)$$

$$Q_{i,j,t}^{loss} = \frac{X_{i,j} * (f_{i,j,t}^{active})^2 + (f_{i,j,t}^{reactive})^2}{V_0^2} \quad (5)$$

Bir baradan akabilecek aktif ve reaktif gücün sınırları (6)-(9)'da belirtilmiştir. Denklem (8) ve (9) da hattın akabilecek güç, hem aktif hem de reaktif gücün bileşkesi cinsinden belirtilerek modeldeki doğruluğun artması sağlanmıştır. Baralar arasındaki gerilim düşümü (10)'da kareli ifade olarak belirtilmektedir. Aynı zamanda herhangi bir baranın alabileceği en az ve en yüksek gerilim seviyesi (11)'de gösterilmektedir.

$$-S_{i,j}^{max} \leq f_{i,j,t}^{active} \leq S_{i,j}^{max} \quad (6)$$

$$-S_{i,j}^{max} \leq f_{i,j,t}^{reactive} \leq S_{i,j}^{max} \quad (7)$$

$$-\sqrt{2} \cdot \dot{i} S_{i,j}^{max} \leq f_{i,j,t}^{active} + f_{i,j,t}^{reactive} \leq \sqrt{2} \cdot \dot{i} S_{i,j}^{max} \quad (8)$$

$$-\sqrt{2} \cdot \dot{i} S_{i,j}^{max} \leq f_{i,j,t}^{active} - f_{i,j,t}^{reactive} \leq \sqrt{2} \cdot \dot{i} S_{i,j}^{max} \quad (9)$$

$$V_{j,t}^{bus} = V_{i,t}^{bus} - \frac{R_{i,j} * f_{i,j,t}^{active} + X_{i,j} * f_{i,j,t}^{reactive}}{V_0} + \frac{(R \cdot \dot{i} \cdot i, j^2 + X_{i,j}^2) * (f_{i,j,t}^{active})^2 + (f_{i,j,t}^{reactive})^2}{2V_0^3} \cdot \dot{i} \quad (10)$$

$$V_i^{min} \leq V_{i,t}^{bus} \leq V_i^{max} \quad (11)$$

3.1.2 Mikroşebeke güç dengesi

Mikroşebekede yer alan elemanların enerji üretim ve tüketimine ait güç denklemleri bu bölümde verilmektedir. (12)'de mikroşebekenin tüm elemanlarına ait güç dengesi ifade edilmektedir. Burada şebekeden satın alınan güç ve YEK'lerden elde edilen güç mikroşebeke yükleri ve HBAEAİ'de kullanılmaktadır. Mikroşebekede yer alan yükler esnek ve esnek olmayan şekilde ikiye ayrılmaktadır. Ayrıca esnek yüklerde talep cevabı programı da uygulanarak bir kesintiye gidilebilmektedir. Bu durum (13) numaralı denklemde açıklanmaktadır. HBAEAİ, 3 farklı bölümden oluşmaktadır. HBAEAİ'nin

FEA'lar, BDEA'lar ve YHEA'lar olmak üzere 3 farklı bölüm için enerji satın aldığı (14)'te ifade edilmektedir. (15)'te elektrik şebekesinden sağlanan gücün mikroşebeke yüklerinde ve HBAEAİ'de harcanabileceği belirtilmektedir. Mikroşebekenin sahip olduğu güneş enerji santrali ve rüzgâr enerji santralinde üretilen gücün de mikroşebekenin yüklerinde veya HBAEAİ'de değerlendirilebileceği sırasıyla (16) ve (17) eşitliklerinde belirtilmektedir. Burada YEK'lerde istenmeyen enerji kesintisi meydana da gelebileceği için büyük eşittir ifade kullanılmaktadır. Rüzgâr ve güneş enerji santralinde üretilen ve HBAEAİ için tahsis edilen gücün FEA'lar, BDEA'lar ve YHEA'larda değerlendirilebileceği sırasıyla (18) ve (19) denklemlerinde ifade edilmektedir. Şebekeden HBAEAİ için satın alınan enerjinin HBAEAİ'nin 3 bölümünde kullanılabilirliği (20)'da belirtilmektedir. Mikroşebekeye elektrik şebekesinden ve YEK'lerden güç sağlanabileceği (21)'de açıklanırken benzer şekilde HBAEAİ'ye de şebeke ve YEK'lerden enerji temin edilebileceği (22)'de ifade edilmektedir. Ayrıca HBAEAİ'nun her bir bölümü için arz ve talep edilen güç dengeleri (23)-(25)'te verilmektedir.

$$G_t^{\text{şebeke}} + G_t^{\dot{i}} + G_t^{\text{R}} - G_t^{\text{YEK-kesinti}} = G_t^{\text{mikroşebeke}} + G_t^{\text{HBAEAİ}}, \forall t \quad (12)$$

$$G_t^{\text{mikroşebeke}} = G_t^{\text{esnek}} - G_t^{\text{TC-kesinti}} + G_t^{\text{esnekolmayan}}, \forall t \quad (13)$$

$$G_t^{\text{HBAEAİ}} = G_t^{\text{FEA}} + G_t^{\text{BDEA}} + G_t^{\text{YHEA}}, \forall t \quad (14)$$

$$G_t^{\text{şebeke}} = G_t^{\text{şebeke-MŞ}} + G_t^{\text{şebeke-HBAEAİ}}, \forall t \quad (15)$$

$$G_t^{\dot{i}} \geq G_t^{\dot{i}-\text{MŞ}} + G_t^{\dot{i}-\text{HBAEAİ}}, \forall t \quad (16)$$

$$G_t^{\text{R}} \geq G_t^{\text{R-MŞ}} + G_t^{\text{R-HBAEAİ}}, \forall t \quad (17)$$

$$G_t^{\text{R-HBAEAİ}} = G_t^{\text{R-BDEA}} + G_t^{\text{R-FEA}} + G_t^{\text{R-YHEA}}, \forall t \quad (18)$$

$$G_t^{\dot{i}-\text{HBAEAİ}} = G_t^{\dot{i}-\text{BDEA}} + G_t^{\dot{i}-\text{FEA}} + G_t^{\dot{i}-\text{YHEA}}, \forall t \quad (19)$$

$$G_t^{\text{şebeke-HBAEAİ}} = G_t^{\text{şebeke-BDEA}} + G_t^{\text{şebeke-FEA}} + G_t^{\text{şebeke-YHEA}}, \forall t \quad (20)$$

$$G_t^{\text{mikroşebeke}} = G_t^{\text{şebeke-MŞ}} + G_t^{\dot{i}-\text{MŞ}} + G_t^{\text{R-MŞ}}, \forall t \quad (21)$$

$$G_t^{\text{HBAEAİ}} = G_t^{\text{şebeke-HBAEAİ}} + G_t^{\dot{i}-\text{HBAEAİ}} + G_t^{\text{R-HBAEAİ}}, \forall t \quad (22)$$

$$G_t^{\text{FEA}} = G_t^{\text{şebeke-FEA}} + G_t^{\text{R-FEA}} + G_t^{\dot{i}-\text{FEA}}, \forall t \quad (23)$$

$$G_t^{\text{BDEA}} = G_t^{\text{şebeke-BDEA}} + G_t^{\text{R-BDEA}} + G_t^{\dot{i}-\text{BDEA}}, \forall t \quad (24)$$

$$G_t^{\text{YHEA}} = G_t^{\text{şebeke-YHEA}} + G_t^{\text{R-YHEA}} + G_t^{\dot{i}-\text{YHEA}}, \forall t \quad (25)$$

3.1.3 Talep cevabı

Mikroşebeke içerisinde esnek ve esnek olmayan yüklerin yer aldığı düşünülmektedir. Esnek olmayan yükler tüketicilerin enerji kesintisi istemeyeceği yükler iken esnek yükler ise acil önceliği olmayan ve kesinti gerçekleştirilebilir yükler olarak kabul edilmektedir.

Ayrıca mikroşebeke içerisinde tüm esnek yüklerin talep cevabı programına katıldığı varsayılmaktadır. Burada esnek yüklerde önceden belirlenen $O^{TC-esnek}$ oranında kesinti gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum (26) denklemi ile açıklanmaktadır. Önerilen optimizasyon modeli bir günlük işletimi kapsadığı için yük kesintisinin sınırlandırılması ve/veya engellenmesi durumu burada dikkate alınmamaktadır. Ayrıca kesinti gerçekleşmesi durumunda tüketiciye bir ödemenin gerçekleştirildiği de hatırlatılmalıdır.

$$G_t^{TC-kesinti} \leq G_t^{esnek} \cdot (1 - O^{TC-esnek}), \forall t \quad (26)$$

3.1.4 Hepsi bir arada elektrikli araç istasyonu

HBAEAİ 3 farklı türdeki EA'ya enerji hizmeti sunabilmektedir. HBAEAİ sahibi mikroşebeke yöneticisi üzerinden elektrik şebekesinden veya mikroşebekede yer alan YEK'lerden enerji satın alabilmektedir. Bu alt bölümde mikroşebeke içerisinde 3 ayrı türdeki EA tipine hizmet edebilen HBAEAİ'nin matematiksel modeli sunulmaktadır. Bu araçlar FEA'lar, BDE'lar ve YHEA'lardır.

Bataryası Değiştirilebilir Elektrikli Araçlar: Denklem (27)'de HBAEAİ'nin batarya değiştirme kısmındaki bataryaların şarj işlemine ait güç eşitliği verilmektedir. Burada yer alan bir batarya şebekeden satın alınan güç, YEK'lerden gelen güç ya da diğer bataryaların deşarj edilmesi vasıtasıyla elde edilen güç ile şarj olabilmektedir. Diğer bataryalardan güç deşarjı bataryadan bataryaya enerji transferi modunun olduğunu ifade etmektedir. (28)'de bir bataryanın güç çıkışının bu bataryanın deşarj gücüne eşit olduğu belirtilmektedir. (29) ve (30) denklemleri ile sırasıyla şarj ve deşarj gücü için üst limitler belirlenmektedir. Ayrıca $u_{1,b,t}$ ikili karar değişkeni yardımı ile şarj ve deşarj olayının aynı anda gerçekleşmemesi garanti edilmektedir. Batarya değiştirme bölümünde yer alan bataryalar arasındaki güç transferini için toplam şarj ve deşarj gücü dengesi ise (31) ile ifade edilmektedir. Her bir t zaman periyodu için batarya değiştirme kısmındaki tüm bataryalar için tüketilen toplam güç (32) ile hesaplanmaktadır.

$$G_{b,t}^{şarj-BDEA} = G_{b,t}^{BDEA-bat} + G_{b,t}^{B2B-giriş}, \forall b, t \quad (27)$$

$$G_{b,t}^{deşarj-BDEA} = P_{b,t}^{B2B-çıkış}, \forall b, t \quad (28)$$

$$G_{b,t}^{şarj-BDEA} \leq G^{BDEA-maks} \cdot u_{1,b,t}, \forall b, t \quad (29)$$

$$G_{b,t}^{deşarj-BDEA} \leq G^{BDEA-maks} \cdot (1 - u_{1,b,t}), \forall b, t \quad (30)$$

$$\sum_b G_{b,t}^{B2B-giriş} = \sum_b P_{b,t}^{B2B-çıkış}, \forall t \quad (31)$$

$$G_t^{BDEA} = \sum_b G_{b,t}^{BDEA-bat}, \forall t \quad (32)$$

Denklem (33) her bir t zaman periyodunda batarya değiştirme kısmındaki bataryaların

enerji seviyesini ifade etmektedir. Burada şarj gücü, deşarj gücü ve bunların verimliliği, bataryadaki ($t-1$) anındaki enerji durumu ve olası bir takas işlemi durumunda enerji seviyesinin durumu dikkate alınmaktadır. $ED_{b,s,t}^{yapay-değiş-bat}$, bir değişim işlemi için yardımcı bir değişken olarak kabul edilmektedir ve değişim anında $ED_{b,s,t}^{BDEA} - ED_{b,s,t}^{yapay-değiş-bat}$ değerini 0 yapmaktadır. Bataryaların maksimum enerji durumu ise (34) ile sınırlandırılmaktadır. Batarya değişiminin yapılabilmesi için bataryanın enerji durumunun önceden tanımlanmış değerinin üzerinde olması gerekmektedir, bu DEĞER (35) ile sağlanmaktadır. Bataryaların ilk periyottaki enerji durumu (36)'da tanımlanmıştır. Ayrıca batarya değiştirme işlemi gerçekleştirildiğinde, bataryaya yeni enerji değeri (37) ile atanmaktadır. Bu atama işleminin tek bir bataryaya gerçekleştirilmesi koşulu ise (38) ile sağlanmaktadır. Tüm bataryalar için $u_{d,s,b,t}$ değişkenine sıfır atanarak batarya değiştirme talebinin reddedilebileceği belirtilmelidir. Son olarak, (39)-(41) denklemleri $ED_{b,s,t}^{yapay-değiş-bat} - ED_{b,s,t}^{değiş-bat}$ değerinin sıfır olmasını garanti etmektedir. Başka bir deyişle, “eğer-öyleyse” koşulunun doğrusallaştırılmasını ifade etmektedir.

$$ED_{b,s,t}^{BDEA} = ED_{b,s,(t-1)}^{BDEA} - ED_{b,s,t}^{yapay-değiş-bat} + ED_{b,s,t}^{değiş-bat} + G_{b,s,t}^{şarj-BDEA} \cdot V_b^{BDEA-şarj} \cdot \Delta_t - \frac{G_{b,s,t}^{deş}}{V} \quad (33)$$

$$ED_{b,t}^{BDEA} \leq ED_b^{BDEA-maks}, \forall b, t \quad (34)$$

$$ED_{b,t}^{BDEA} \cdot u_{d,b,t} \leq ED_{b,s,t-1}^{BDEA}, \forall b, t > 1 \quad (35)$$

$$ED_{b,t}^{BDEA} = ED_b^{BDEA-başl}, \forall b, t = 1 \quad (36)$$

$$ED_{b,t}^{değiş-bat} = \sum_d (ED_d^{BDEA-var} \cdot u_{d,b,t}), \forall b, t \quad (37)$$

$$\sum_b u_{d,b,t} \leq y_{d,t}, \forall d, t \quad (38)$$

$$ED_{b,t}^{yapay-değiş-bat} \leq N \cdot \sum_d u_{d,b,t}, \forall b, t \quad (39)$$

$$ED_{b,t}^{yapay-değiş-bat} \leq ED_{b,t-1}^{BDEA}, \forall b, t > 1 \quad (40)$$

$$ED_{b,t}^{yapay-değiş-bat} - ED_{b,t-1}^{BDEA} - \sum_d (u_{d,b,t} \cdot N) \geq -N, \forall b, t > 1 \quad (41)$$

Fişli Elektrikli Araçlar: FEA'lar için bataryaların her bir t zaman periyodundaki enerji durumu (42) ile hesaplanmaktadır. FEA bataryalarının başlangıçtaki enerji durumu (43)'te tanımlanırken, (44) denklemi FEA sahiplerinin istasyondan ayrılırken istediği enerji seviyesini ifade etmektedir. Ayrıca, her FEA bataryasının maksimum enerji kapasitesi (45) ile sınırlandırılmıştır. FEA'ların hangi EA şarj ünitesine bağlanacağı (46)'da yer alan ikili karar değişkeni $u_{f,t}^{FEA-ünite}$ tarafından belirlenmektedir. Burada ayrıca FEA'lar için maksimum şarj gücü, EA şarj ünitesinin gücüyle sınırlandırılmıştır. Aynı anda şarj edilebilecek FEA sayısının ise ancak EA şarj cihazı sayısı kadar olabileceğine dair mantıksal koşul (47) ile sağlanmaktadır. (48) denklemi t periyodu boyunca FEA'ların şarj edilmesi için elektrik şebekesinden veya mikroşebeke içerisinde yer alan YEK'lerden güç temin edilebileceğini ifade etmektedir.

$$ED_{f,t}^{FEA} = ED_{f,t-1}^{FEA} + G_{f,t}^{FEA-şarj} \cdot \Delta_t \cdot V_f^{FEA}, \forall f, t \in [T_f^{FEA-var}, T_f^{FEA-ayr}] \quad (42)$$

$$ED_{f,t}^{FEA} = ED_f^{FEA-başl}, \forall f, t = T_f^{FEA-var} \quad (43)$$

$$ED_{f,t}^{FEA} = ED_f^{FEA-ist}, \forall f, t = T_f^{FEA-ayr} \quad (44)$$

$$ED_{f,t}^{FEA} \leq ED_f^{FEA-maks}, \forall f, t \in [T_f^{FEA-var}, T_f^{FEA-ayr}] \quad (45)$$

$$G_{f,t}^{FEA-şarj} \leq u_{f,t}^{FEA-ünite} \cdot R_f^{şarj-ünite-maks}, \forall f, t \quad (46)$$

$$\sum_f u_{f,t}^{FEA-ünite} \leq N^{FEA-ünite}, \forall t \quad (47)$$

$$G_t^{FEA} + G_t^{i-FEA} + G_t^{R-FEA} = \sum_f G_{f,t}^{FEA-şarj}, \forall t \quad (48)$$

Hidrojen Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar: Hidrojen yakıt hücreli araçların yakıt ikmaline ait matematiksel denklemler bu alt bölümde ele alınmaktadır. Hidrojen yakıt ikmal bölümü hidrojen molar üretmek için elektrolizör ve üretilen hidrojenin depo edilebilmesi için bir hidrojen tankına sahiptir. Elektrolizörde molar hidrojen üretmek için tüketilen gücün üst ve alt limitleri (39) ile sınırlandırılmaktadır. Ayrıca elektrolizörden üretilebilecek maksimum molar hidrojen miktarı ise (40) ile sınırlıdır. (41) denklemleri elektrolizör tarafından tüketilen gücün ve üretilen molar hidrojen miktarına ait fonksiyonu temsil etmektedir. Hidrojen tankının zaman periyodunun başlangıcındaki ve sonundaki basınç değeri sırasıyla (42) ve (43) ile belirlenirken, tank basıncı için maksimum ve minimum limitler (44)'te verilmektedir. Ayrıca hidrojen tankının dinamik basınç modeli (45) ile sunulmaktadır. Burada elektrolizörün ürettiği molar hidrojen tankta depolanırsa tank basıncı artarken, YHEA'ların hidrojen talebinin karşılanması için tanktan hidrojen molar tüketimi durumunda ise tank basıncı azalmaktadır. Son olarak, elektrolizörün molar hidrojen üretmesi için kullanılan gücün, mikroşebekede yer alan YEK'lerden ve elektrik şebekesinden satın alınan enerjiden karşılandığı (46)'da açıklanmaktadır.

$$G^{EL-min} \cdot N^{EL-sayı} \leq G_t^{EL} \leq G^{EL-maks} \cdot N^{EL-sayı}, \forall t \quad (49)$$

$$N_t^{EL-H2} \leq N^{EL-H2maks} \cdot N^{EL-sayı} \cdot \Delta_t, \forall t \quad (50)$$

$$N_t^{EL-H2} = \frac{V_{EL} \cdot G_t^{EL}}{LHV_{H2}} \cdot \Delta_t, \forall t \quad (51)$$

$$P_t^{H2} = P^{H2-başl}, t = 1 \quad (52)$$

$$P_t^{H2} = P^{H2-son}, t = \text{serinin son elemanı} \quad (53)$$

$$P^{H2-min} \leq P_t^{H2} \leq P^{H2-maks}, \forall t \quad (54)$$

$$P_t^{H2} = P_{t-1}^{H2} + \frac{R \cdot T_{H2}}{V_{H2}} \cdot \left[N_t^{EL-H2} - \sum_h D_{t,h}^{H2oEA} \right], \forall t \quad (55)$$

$$G_t^{EL} = G_t^{şebeke-YHEA} + G_t^{SR-YHEA} + G_t^{i-YHEA}, \forall t \quad (56)$$

3.2 Alt Seviye Problemin Formülasyonu

Alt seviye optimizasyon probleminde amaç mikroşebekenin işletme kârını maksimize etmek olarak belirlenmiştir. HBAEAI, FEA sahiplerinden şarj için kWh başına sabit bir ücret alırken, batarya değişim işlemi için de işlem başına bir ücret talep etmektedir. Ayrıca YHEA'lar için satılan molar hidrojen miktarına bir gelir elde etmektedir. HBAEAI ise mikroşebeke enerji yöneticisi vasıtasıyla elektrik şebekesi ve mikroşebekede yer alan YEK'lerden enerji satın alabilmektedir. Alt seviye probleme ait denklemler (57-77)'de verilmektedir. (57)'de verilmiş olan alt seviye problemin amaç fonksiyonunda hedef

mikroşebekenin kârını maksimize etmektir.

$$I^{mş} = \left(G_t^i + G_t^{şR} - G_t^{HBAEAI} - G_t^{mş} \right) \cdot \lambda_t^{elk} \cdot \Delta_t + G_{b,t}^{şarj-BDEA} \cdot \lambda^{EA,şarj} \cdot \Delta_t + G_t^{EL} \cdot \lambda_t^{hidrojen} \cdot \Delta_t + ED_{b,t}^{yapı} \quad (57)$$

Bu optimizasyon problemi (58)-(61)'de açıklandığı gibi mikroşebeke için masraf ve sınırlarını içermektedir. (58) mikroşebeke için belirlenen referans değer, gelir ve kayıptan oluşan sınırlara ait eşitsizliklerden oluşmaktadır. Mikroşebeke için gelirin alt sınırı (60) ile belirlenirken, üst sınır (61) ile belirlenmektedir. (59) kayıplar için negatif olmayan sınırları tanımlamaktadır.

$$D^{mş} - I^{mş} - K^{mş} \leq 0 \quad \forall : \lambda_1 \quad (58)$$

$$-K^{mş} \leq 0 \quad \forall : \lambda_2 \quad (59)$$

$$L^{mş,min} - I^{mş} \leq 0 \quad \forall : \lambda_3 \quad (60)$$

$$I^{mş} - L^{mş,maks} \leq 0, \quad \forall : \lambda_4 \quad (61)$$

Tek amaçlı bir optimizasyon probleminde iki amaç fonksiyonu yer alamayacaktır. Bu açıdan çalışmada alt seviye problemin üst seviye problemin içerisinde yer alabilmesi için alt seviye problem, hem gerekli ve hem de yeterli olan Karush-Kuhn-Tucker (KKT) optimallik koşulları ile değiştirilmiştir. Bu amaçla ilk olarak KKT koşullarını oluşturmak için (62) 'de verilen optimizasyon probleminin Lagrange fonksiyonu oluşturulmuştur. KKT koşullarının durağanlık koşulu, tamamlayıcı gevşeklik koşulu, ikili fizibilite ve birincil fizibilite koşulundan oluştuğu söylenmelidir. Optimizasyon probleminin durağanlık koşulları (63)-(64)'de verilmiştir. Ayrıca tamamlayıcı gevşeklik koşulları (65)-(68)'da belirtilmiştir.

$$K^{mş} + \lambda_1(-I^{mş} + D^{mş} - K^{mş}) + \lambda_2 \cdot K^{mş} + \lambda_3 \cdot (-I^{mş} + L^{mş,min}) + \lambda_4 \cdot (I^{mş} - L^{mş,maks}) \quad (62)$$

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial I^{mş}} = 0 \rightarrow -\lambda_1 - \lambda_3 + \lambda_4 = 0 \quad (63)$$

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial K^{mş}} = 0 \rightarrow 1 - \lambda_1 - \lambda_2 = 0 \quad (64)$$

$$\lambda_1 \cdot (D^{mş} - I^{mş} - K^{mş}) = 0 \quad (65)$$

$$\lambda_2 \cdot (K^{mş}) = 0 \quad (66)$$

$$\lambda_3 \cdot (L^{mş,min} - I^{mş}) = 0 \quad (67)$$

$$\lambda_4 \cdot (I^{mş} - L^{mş,maks}) = 0 \quad (68)$$

Bunları doğrusallaştırmanın tek yolu, büyük-M formülasyonu kullanmaktır. (70)-(77)'de ilgili ifadelerin M formülasyonu ile doğrusallaştırma işlemleri verilmiştir. Ayrıca ikili fizibilite koşulunu sağlamak için Lagrange çarpanlarının negatif olmaması durumu (69) ile sağlanmaktadır.

$$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 \geq 0 \quad (69)$$

$$\lambda_1 \leq u_1^{yard} \cdot N \quad (70)$$

$$I^{m\$,} - D^{m\$,} + K^{m\$,} \leq (1 - u_1^{yard}) \cdot N \quad (71)$$

$$\lambda_2 \leq u_2^{yard} \cdot N \quad (72)$$

$$K^{m\$,} \leq (1 - u_2^{yard}) \cdot N \quad (73)$$

$$\lambda_3 \leq u_3^{yard} \cdot N \quad (74)$$

$$I^{m\$,} - L^{m\$,min} \leq (1 - u_3^{yard}) \cdot N \quad (75)$$

$$\lambda_4 \leq u_4^{yard} \cdot N \quad (76)$$

$$-I^{m\$,} + L^{m\$,maks} \leq (1 - u_4^{yard}) \cdot N \quad (77)$$



4. BULGULAR

İki seviyeli optimizasyon modelini incelemek için öncelikle dört farklı durum için alt seviyeye ait farklı referans değerlerine göre elde edilen sonuçlar irdelenmiş. Daha sonra sonuçlara göre belirlenen referans gelir değerine göre farklı senaryolar üzerinden sistem incelenmiştir. Belirlenen referans gelir değerlerine göre, optimum aktif güç kaybı ile mikroşebeke kârı arasındaki dirsek noktası ele alınarak senaryolarda uygulanmak üzere referans değeri, tek seviyeli aktif güç kaybı modelindeki mikroşebeke gelirinin %15 fazlasına göre belirlenmiştir. Bahsedilen durum ve senaryolar aşağıda incelenebilir. Önerilen yapının etkinliğini göstermek için IEEE 33 baralı test sisteminin (Dolatıbadı vd. (2021)) kullanıldığı ifade edilmelidir. Dağıtım sisteminde tek bir mikroşebekenin yer aldığı ve 25 numaralı baraya bağlı olduğu ifade edilmelidir. Mikroşebeke ile ilgili verilerin Çiçek vd. (2023) referansından ve HBAEAİ ile ilgili verilerin ise Çiçek (2022) referansından elde edildiği belirtilmelidir.

Durum Çalışmaları:

Durum 1: Dağıtık üretim yok

Durum 2: Sadece güneş enerji sistemi (GES) mevcut

Durum 3: Sadece rüzgâr enerji sistemi (RES) mevcut

Durum 4: Her iki türdeki dağıtık üretim sistemi (GES ve RES) de mevcut

Senaryolar:

Senaryo 1: Dağıtık üretim yok, aktif güç kaybı minimizasyonu

Senaryo 2: Dağıtık üretim yok, mikroşebeke kar maksimizasyonu

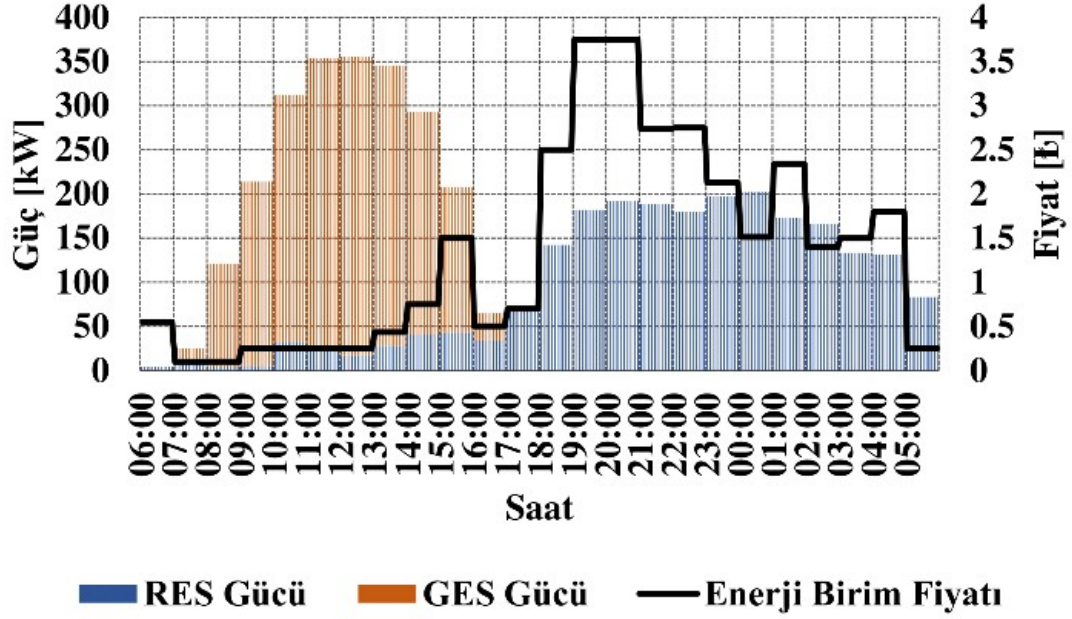
Senaryo 3: Dağıtık üretim yok, iki seviyeli amaç fonksiyonu

Senaryo 4: Dağıtık üretim var (GES ve RES), aktif güç kaybı minimizasyonu

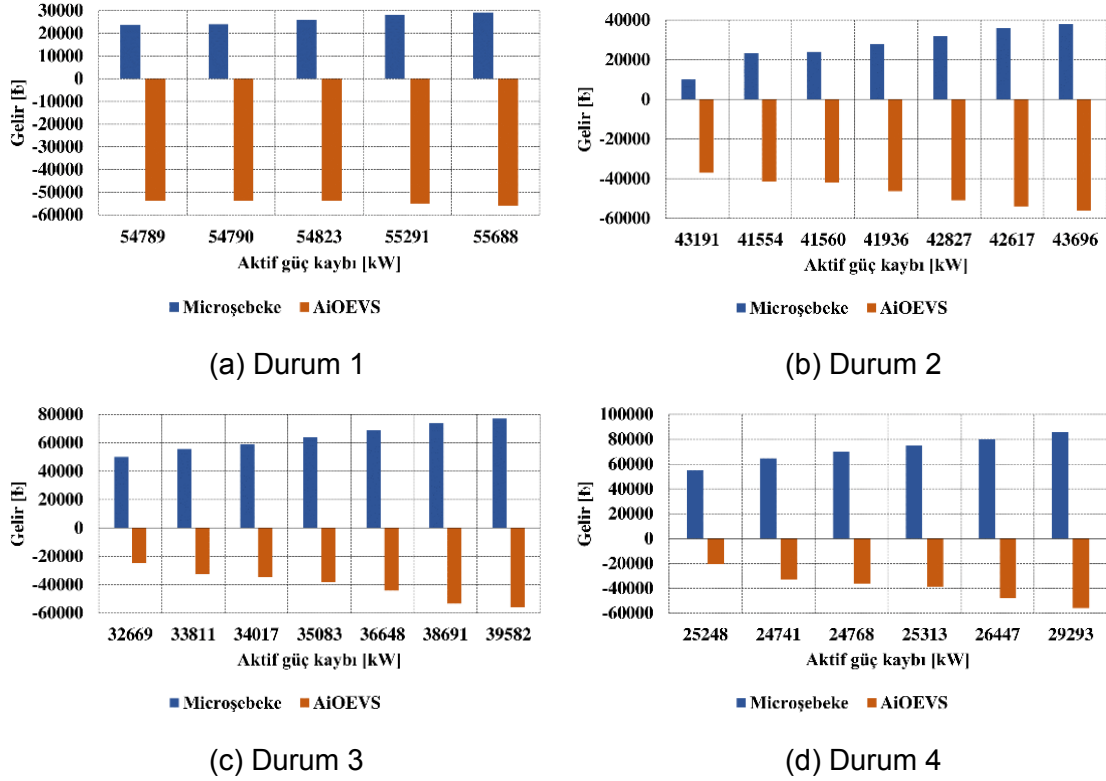
Senaryo 5: Dağıtık üretim var (GES ve RES), mikroşebeke kar maksimizasyonu

Senaryo 6: Dağıtık üretim var (GES ve RES), iki seviyeli amaç fonksiyonu

Saatlere göre günlük rüzgâr ve güneş enerjisi üretimi ile şebeke elektrik fiyatı grafiği Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Sabah saatlerinde elektrik fiyatının düşük olup GES üretiminin yüksek olması sebebiyle mikroşebeke, kâr maksimizasyonu için elindeki fazla üretimi araçları şarj etmek amaçlı kullanma trendine sahipken akşam vakitlerinde tam tersi durum izlemeye meyillidir.



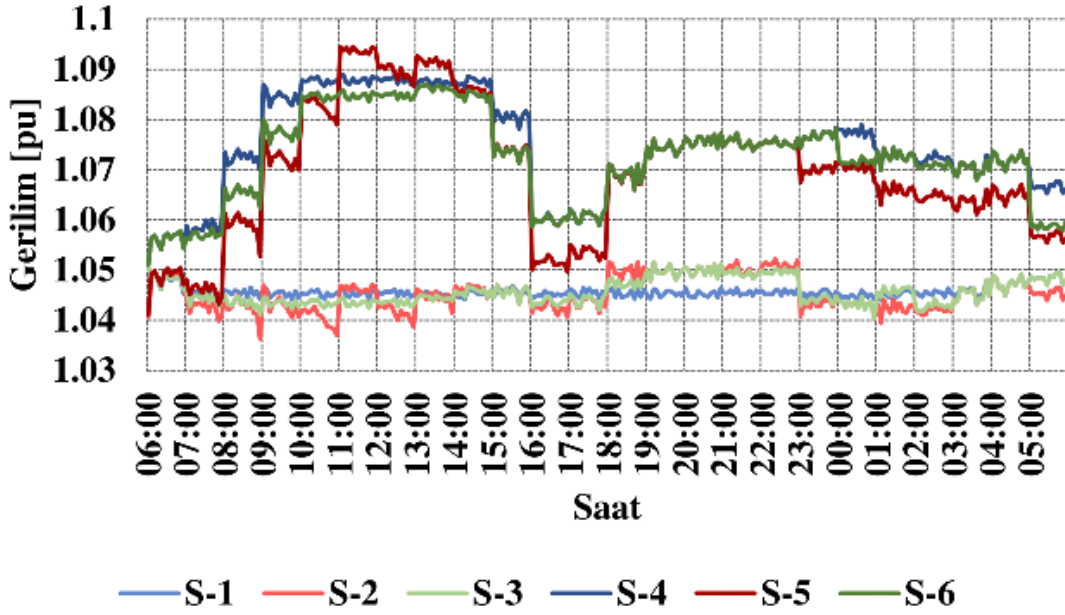
Şekil 4.1 Günlük yenilenebilir enerji üretimi ve elektrik fiyatı



Şekil 4.2 İki seviyeli modelin farklı durumlara göre aktif güç kaybı/kar değişim grafiği

İki seviyeli modelin dağıtık üretim olmayan (Durum 1), sadece GES olan (Durum 2), sadece RES olan (Durum 3) ve iki tür dağıtık üretim olan (Durum 4) senaryolara göre ve farklı referans gelir değerlerine göre kâr değişim grafikleri Şekil 4.2 a-d arasında

gösterilmiştir. İlk durumda dağıtık üretim olmadığı için mikroşebeke ve HBAEAİ kârı en azken dağıtık üretim entegrasyonu arttıkça kârın arttığı açıkça gözlemlenebilmektedir. İki seviyeli yapıda alt seviyenin amaç fonksiyonu mikroşebeke kârını artırmak olduğu için dağıtık üretimin olmadığı zamanlarda bu amacı gerçekleştirmeye yönelik sadece şebekeden ucuza enerji alıp HBAEAİ'ye satma imkânı varken dağıtık üretim arttıkça HBAEAİ giderlerinin gittikçe azaldığı görülmektedir. Tüm durumlar incelenecek olursa mikroşebeke kârı arttıkça şebekenin toplam aktif güç kaybını artırdığı sonucuna varılabilmektedir.

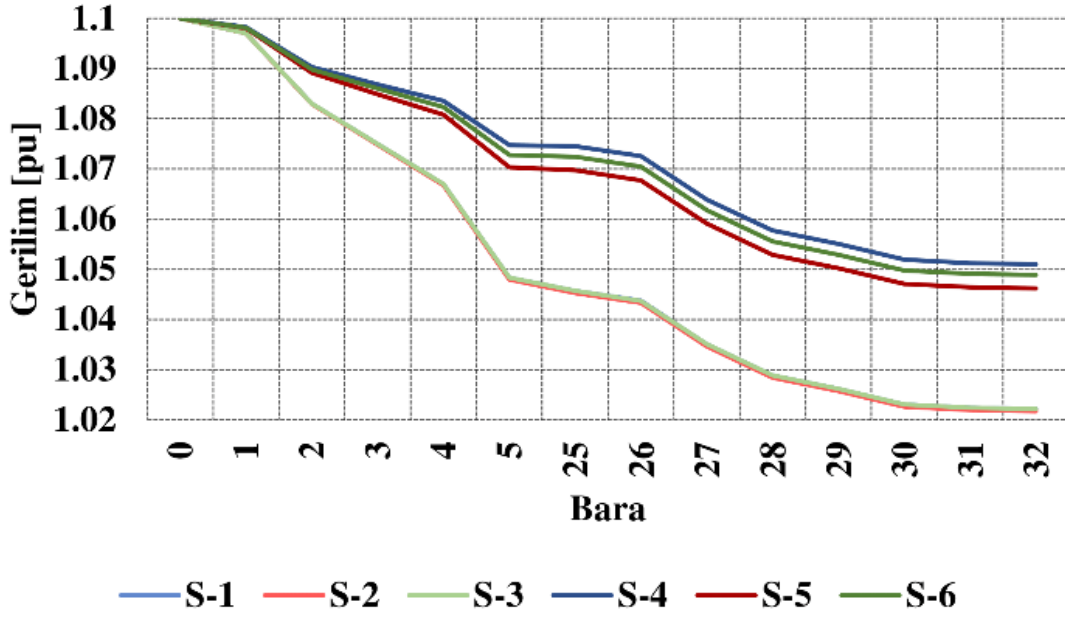


Şekil 4.3 Mikroşebeke barasının (25) zamana bağlı gerilim değişimi

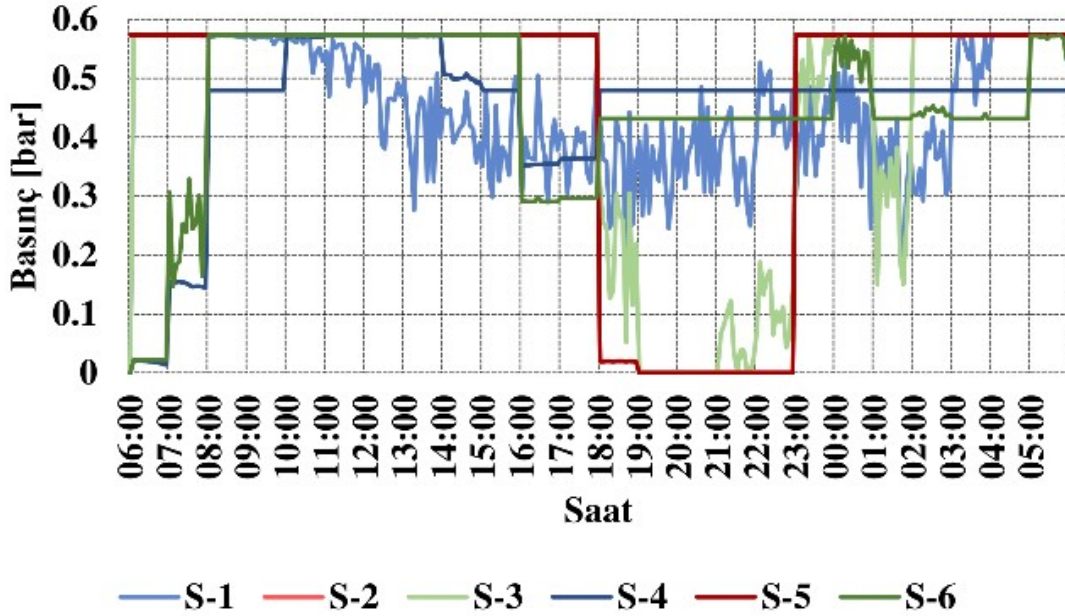
25 numaralı mikroşebeke barasının gün içerisindeki gerilim değişimi Şekil 4.3'te belirtilmiştir. Senaryo 2 ve Senaryo 5, mikroşebeke kârını gözetmediği için diğer senaryolara göre belirgin derecede daha dalgalı bir gerilim profiline sahiptir. Bu sebeple şebekenin genelini değil de sadece alt seviyenin kârını düşünen bir modelin şebekeye kötü yönde etki edeceği çıkarımı rahatlıkla yapılabilir. İlk 3 senaryoda dağıtık üretim mevcut olmadığı için gerilim seviyesinin son 3 senaryoya göre daha düşük olduğu görülebilmektedir. İki seviyeli modelin gerçekleştirildiği Senaryo 3 ve Senaryo 6'da gerilim seviyesi Senaryo 1 ve Senaryo 4'e göre daha kötü olsa da, çoğunlukla aynı gerilim profilini incelemeye çalışıldığı gözlemlenebilmektedir.

0-5, 25-32 numaralı baraların gün içindeki ortalama gerilim profili Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Dağıtık üretimin olmadığı ilk 3 senaryoda gerilim profilleri aynı olsa da dağıtık üretimli son 3 senaryo incelendiğinde en iyi gerilim profiline aktif güç minimizasyonu modelinin sahip

olduğu, bunu iki seviyeli modelin takip ettiği görülmektedir. Fakat mikroşebekenin boyutu göz önüne alındığında gerilim profilinde çok büyük değişiklik yapacak kadar etkiye sahip olmadığı unutulmamalıdır.



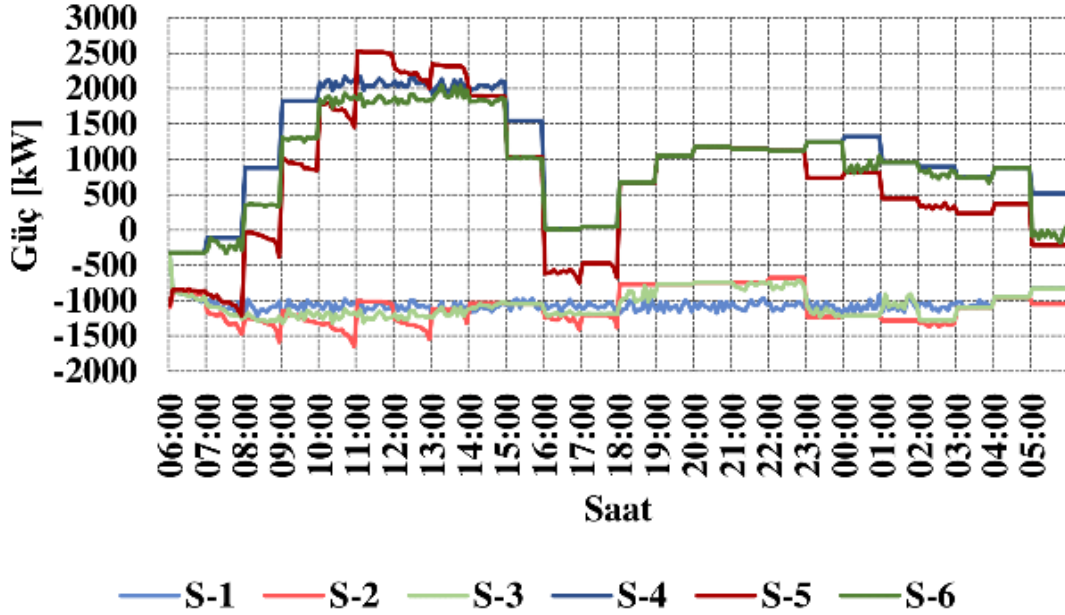
Şekil 4.4 25 numaralı baranın bağlı olduğu tek hat düzeninin saat ortalama gerilim profili



Şekil 4.5 Hidrojen tankının senaryolara göre basınç değişimi

Senaryolara göre hidrojen tankının basınç değişim grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde, iki seviyeli modellerin (S-3, S-6) tek seviyeli aktif güç kaybı minimizasyonu modellerinde yakın sonuç verdiği görülebilir. Ancak akşam saatlerinde alt seviyenin de

ihtiyaçları göz önünde bulundurularak basınç seviyesi tek seviyeli mikroşebeke kar maksimizasyonu modellerine yakınsamıştır. Bu noktada Senaryo 2 ve Senaryo 6'nın daha düz basınç profili izlerken kalan senaryoların şebekeye ayak uydurmak için çok dalgalı bir basınç profili izlediği sonucuna varılabilir.

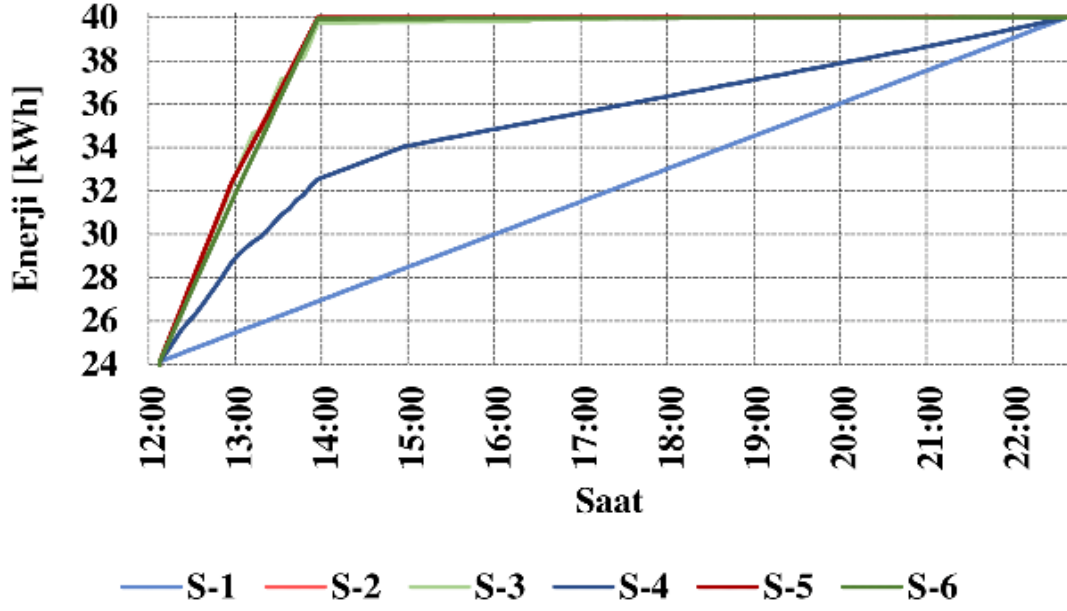


Şekil 4.6 Mikroşebekenin senaryolara göre saatlik net güç dengesi

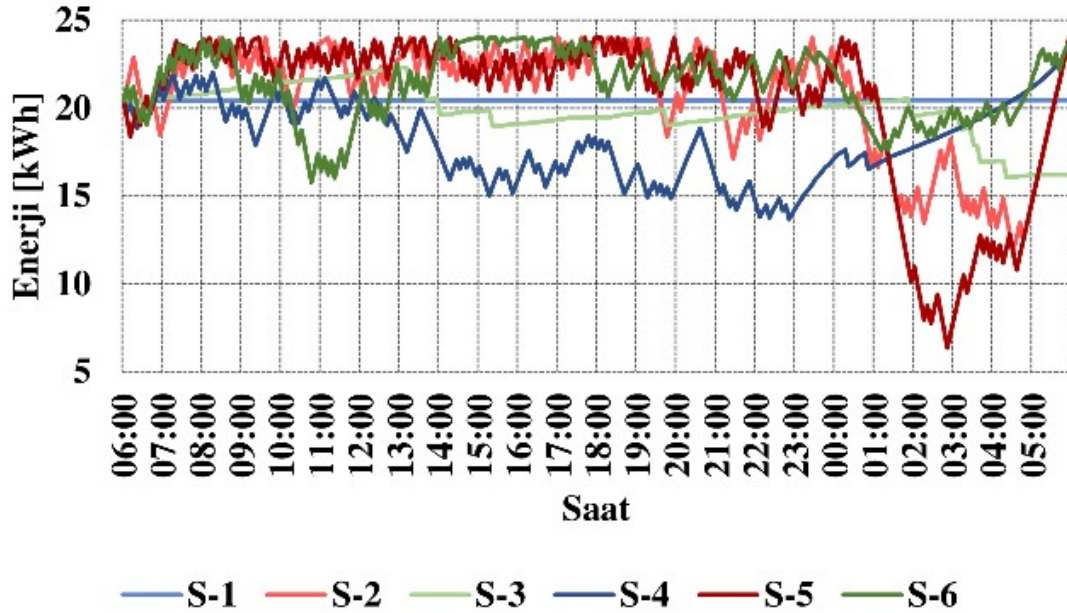
Senaryolara göre mikroşebekenin günlük net güç dengesi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Mikroşebekenin net güç dengesi, ürettiği anlık dağıtık üretimden sahip olduğu yüklerin ve HBAEAİ kaynaklı yüklerin çıkarılmasıyla elde edilmektedir. İlgili figürün, mikroşebeke gerilim profili grafiğine benzediği rahatlıkla görülebilir. Bu noktada dağıtık üretim olmayan senaryolarda net güç negatif olduğu için, şebekede ek kayba sebep olmaktadır. Ancak dağıtık üretimin olduğu senaryolarda tam tersi sonuç izlenmektedir. Senaryo 5'de amaç mikroşebeke kar maksimizasyonu olduğu için gün içinde negatif net güç görülebilmekle birlikte Senaryo 4 ve Senaryo 6'da bahsedilen durum istisnalar dışında yaşanmayıp birbirlerine yakın profiller çizmektedir. Bilhassa iki seviyeli modelin olduğu Senaryo 3 ve Senaryo 6, gün boyunca sadece aktif güç kaybı minimizasyonunu hedef alan Senaryo 1 ve Senaryo 4'e yakın sonuçlar vermektedir.

Örnek bir safi elektrikli aracın istasyonda bulunduğu zaman aralıklarındaki enerji değişimi Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Senaryo 1 ve Senaryo 4'te daha dengeli şebeke güç profili için elektrikli araç yükü istasyonda olduğu süreye yayılırken kalan senaryolarda öğle saatlerinde elektrik fiyatının ucuzluğundan kaynaklı olarak doğrudan şarj edilmiştir. Tüm senaryolarda araç istenilen enerji seviyesine ulaşırken, iki seviyeli senaryolarda şarj profili

Senaryo 2 ve Senaryo 5'e benzemesine karşın bunun sadece tek bir araca ait olduğu, üst seviye amacının diğer araçlarla veya dağıtık üretimle gerçekleştirildiği göz ardı edilmemelidir.

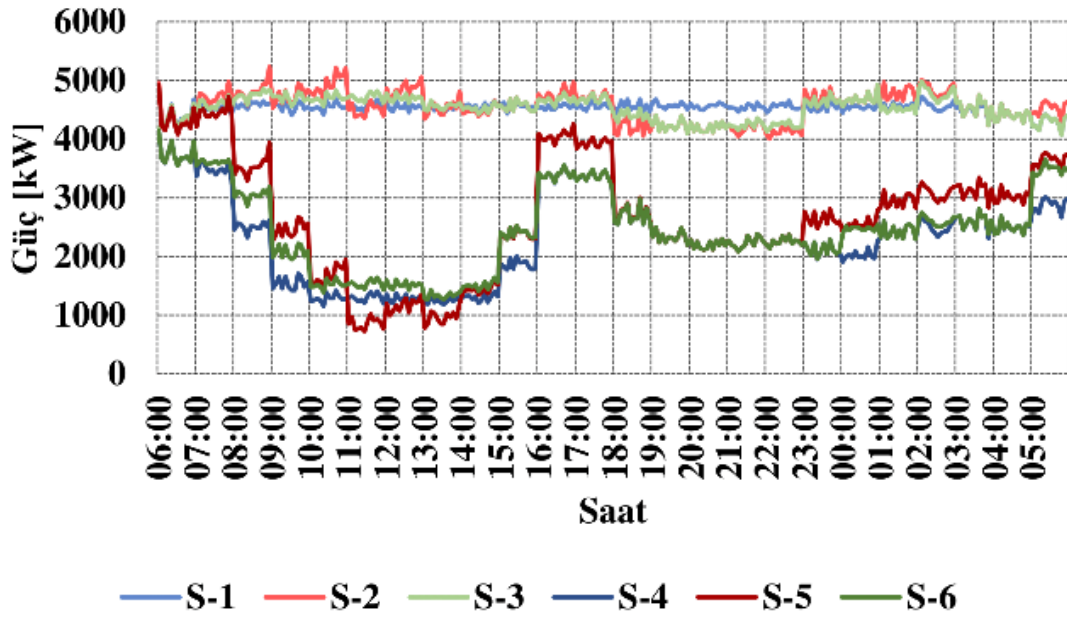


Şekil 4.7 Örnek safi elektrikli aracın senaryolara göre enerji değişimi.



Şekil 4.8 Örnek değişim batarya soketinin senaryolara göre gün içindeki enerji profili

Değişim istasyonundaki örnek bir batarya socketinin gün içindeki enerji değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir. Burada batarya socketi, gün içinde içindeki bataryaya şarj ve deşarj işlemi gerçekleştirebilmekte, aynı zamanda gelen aracın talebi üzerine değişim yapabilmektedir. Dağıtık üretimin olmadığı ilk senaryolarda enerji profilleri çok değişmezken mikroşebeke kar maksimizasyonu yapılan senaryolarda birbirine yakın ve dalgalı profiller görülmektedir. İki seviyeli modele sahip Senaryo 6'da günün ilk ve son çeyreklerinde Senaryo 4'e yakın profil gözlemlenirken günün kalanında Senaryo 5'e yakın profil görülmektedir.

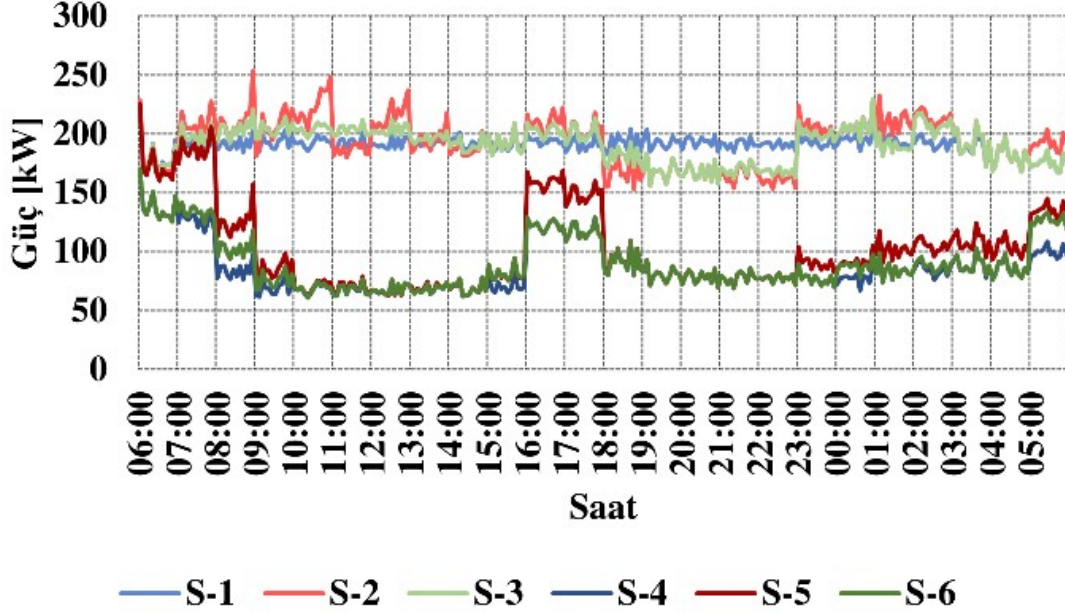


Şekil 4.9 Senaryolara göre salınım barasının günlük üretimi.

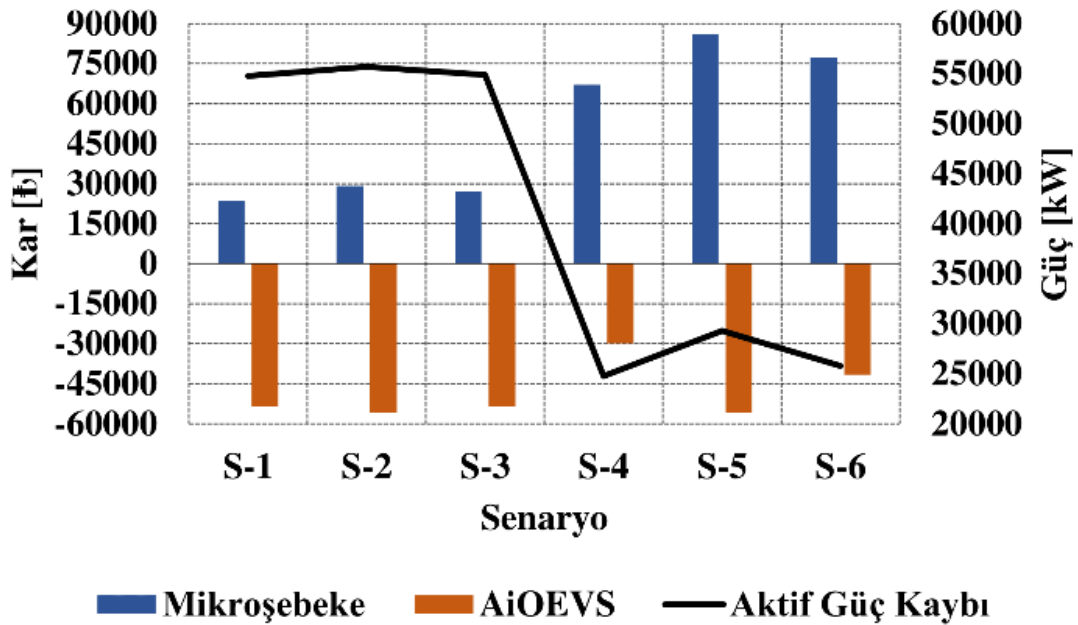
Salınım barasının senaryolara göre saatlik üretimi Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu noktada, iki seviyeli model olan Senaryo 5'deki üretim, aktif güç kaybı minimizasyonunu hedefleyen tek seviyeli Senaryo 4 ile benzer bir profile sahiptir. En aykırı üretim profillerine ise Senaryo 2 ve 5 sahiptir. Fakat dağıtık üretim olmayan ilk 3 senaryo, her koşulda son 3 senaryoya göre daha fazla üretime sahiptir ve bu da şebekedeki güç kaybının artmasına yol açmaktadır.

Şebekenin senaryolara göre saatlik toplam aktif güç kaybı Şekil 4.10'da verilmiştir. Dağıtık üretim olmayan her senaryo, dağıtık üretimin mevcut olduğu senaryoya göre daha yüksek güç kaybına sahiptir. Hatta güç içerisinde ilk 3 senaryo, son 3 senaryoya göre yer yer 3 kata varan daha fazla kayba sebep olmuştur. Bu da dağıtık üretimin şebekedeki hat kayıplarına, dolayısıyla güç kalitesine etkisini açıklamaktadır. Şekilden de görülebileceği üzere, Senaryo 5, Senaryo 4 ile oldukça benzer bir kayıp profiline sahiptir. Bu da iki

seviyeli modelin amacını yerine getirmedeki başarısını göstermektedir. Sadece saat 8 ve saat 5'te kayıp dengeleri biraz farklılaşmaktadır. Senaryo 3 ise Senaryo 1 ile benzer profile sahip olmasına karşın, sadece akşam saatlerinde Senaryo 2'ye benzer profil sergilemiştir.



Şekil 4.10 Senaryolara göre saatlik toplam aktif güç kayıpları



Şekil 4.11. Senaryolara göre mikroşebeke/HBAEAİ kârı ve toplam aktif güç kaybı

Senaryolara göre mikroşebeke, HBAEAİ kârı ve toplam aktif güç kayıpları Şekil 4.11'de gösterilmektedir. İlk 3 senaryo incelendiğinde kar anlamında yakın sonuçlar incelenmesine karşın, Senaryo 3, Senaryo 1'den fazla Senaryo 2'den az mikroşebeke kârına sahiptir. Aynı durum HBAEAİ işletim maliyetinde de görülmektedir. Bu durumun aktif güç kaybına etkisi şekilde çizgi grafikte incelenebilir. Son 3 senaryoda dağıtık üretimler sisteme eklendiği için hem aktif güç kaybı 3 kata yakın azalmış, hem de mikroşebeke kârı artarken HBAEAİ işletim maliyeti gözle görülür şekilde azalmıştır. İki seviyeli yapının sebep olduğu aktif güç kaybı ile mikroşebeke kârı arasındaki ikilem, şekilde açıkça incelenebilir.



5. TARTIŞMA

Bu çalışmanın temel hedefi, mikroşebeke yapıları içerisinde YEK, HBAEAİ, ve esnek yüklerin şebeke ile olan etkileşimini optimize etmek ve enerji verimliliğini artırmaktır. Projede iki seviyeli bir model geliştirilerek, mikroşebeke içindeki YEK, HBAEAİ, ve esnek yüklerin etkili bir şekilde yönetilip işletilmesi mümkün kılınmıştır. Bu model, dağıtık üretim, enerji depolama ve elektrikli araçların etkileşimini yönetmek için kapsamlı bir çözüm sunmaktadır ve bu bileşenlerin verimli bir şekilde birlikte çalışmasını sağlamaktadır. İki seviyeli model, üst seviyede aktif güç kaybını minimize ederek güç kalitesi ve enerji verimliliğini artırarak, ayrıca enerji kaynaklarını etkili bir şekilde kullanarak, alt seviyede ise mikroşebeke kârını artırarak mikroşebekelerin daha sürdürülebilir bir şekilde işletilmesine katkı sağlamıştır.

Bu çalışma, farklı senaryolarda mikroşebekelerin ekonomik işletimini incelemiş ve iki seviyeli modelin, özellikle dağıtık üretimli senaryolarda ekonomik işletimi optimize etmeye yardımcı olduğu sonucuna varmıştır. Enerji fiyatlarının değişken olduğu ve rüzgâr hızı, güneş radyasyonu gibi faktörlerin etkilediği senaryolarda bile, iki seviyeli model, mikroşebekelerin enerji yönetimini etkili bir şekilde gerçekleştirmeye yardımcı olmuştur. İki seviyeli model, mikroşebekelerin daha güvenilir ve verimli bir şekilde işletilmesine katkıda bulunurken, aynı zamanda sürdürülebilir enerji kullanımına yönelik çözümler sunmaktadır. Bu, geleceğin enerji sistemlerinin geliştirilmesine ve çevresel sürdürülebilirliğin artırılmasına önemli bir katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte enerji yönetimi ve mikroşebekelerin karmaşıklığına daha derin bir anlayış sunarak, enerji sektörünün geleceğine önemli bir katkı sağlayacaktır. Mikroşebekelerin verimli bir şekilde işletilmesi, sürdürülebilir enerji kullanımına ve enerji sistemlerinin daha etkili bir şekilde yönetilmesine katkıda bulunacaktır. Ayrıca model içerisinde yer alan HBAEAİ farklı türdeki elektrikli araçlara hizmet edebildiği için dünyada elektrikli araç sayısının artırılması konusunda faydalı olacaktır.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, HBAEAİ ve YEK'larını dikkate alarak DR uygulamasını içeren bir mikroşebeke için dağıtım sistemiyle uyumlu iki seviyeli optimum enerji yönetim yapısı karışık tamsayılu kuadratik programlama (Mixed integer quadratically constrained program - MIQCP) aracılığıyla modellenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, önerilen yapı, mikroşebeke yüklerini ve HBAEAİ'na gelen EA enerji taleplerini ekonomik bir şekilde karşılarken dağıtım şebekesinin aktif güç kaybını da minimize etmektedir. Önerilen yapı dağıtım sistemi operatörü ve mikroşebeke enerji yöneticisinin amaç fonksiyonlarını aynı anda gerçekleştirebilmektedir ve bu durum dağıtım sistemi içerisinde mikroşebeke kurulumunu destekleyebilmektedir. Bunun yanı sıra, HBAEAİ yapısının tüm EA türlerine hizmet edebilme yeteneği, dünyadaki EA adaptasyonunu artırmak için önemlidir. Ayrıca, bu çalışmanın HBAEAİ'yi de içeren bir mikroşebekenin dağıtım sisteminde yer aldığı ilk literatür örneği olduğu belirtilmelidir. Sunulan yapı HBAEAİ'yi içeren ve işletimde mikroşebeke ile dağıtım sistemi operatörlerinin amaç fonksiyonlarını dikkate alacak olan araştırmacılara ve sistem tasarımcılarına iyi bir referans sağlayabilir.

Ayrıca gerçekleştirilen proje kapsamında IEEE PES, PELS, IES ve IAS tarafından desteklenen 6. International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST 2023) konferansında "Energy Management Strategy for a Microgrid Including All-in-One Electric Vehicle Station, Renewable Energy and Demand Response" başlıklı bir bildirimiz kabul edilmiştir ve sözlü sunumu gerçekleştirilmiştir. Bildirimizin genişletilmiş versiyonunun Sustainable Energy, Grids and Networks dergisine tekrar incelenmek üzere seçildiği de ifade edilmelidir. Ayrıca IEEE Transactions on Smart Grid dergisinin "Sustainable Technologies for Decarbonising the Energy Sector" isimli özel sayısına özet makale gönderilmiştir ve tam makale gönderimi için kabul almıştır. Bununla birlikte proje kapsamında IEEE PES General Meeting'e bir bildiri gönderimi gerçekleştirilecektir. İlgili yayınların çalışmaları devam etmektedir.

KAYNAKLAR

- Akbari-Dibavar, A., Sohrabi Tabar, V., Ghassem Zadeh, S., Nourollahi, R. 2021. "Two-stage robust energy management of a hybrid charging station integrated with the photovoltaic system". *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(24), 12701–12714.
- Al-Ghussain, L., Ahmad, A. D., Abubaker, A. M., Hassan, M. A. 2022. "Exploring the feasibility of green hydrogen production using excess energy from a country-scale 100% solar-wind renewable energy system". *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(51), 21613–21633.
- Al Wahedi, A., Bicer, Y. 2022. "Techno-economic optimization of novel stand-alone renewables-based electric vehicle charging stations in Qatar". *Energy*, 243.
- Ayodele, T. R., Moseitlhe, T. C., Yusuff, A. A., Ntombela, M. 2021. "Optimal design of wind-powered hydrogen refuelling station for some selected cities of South Africa". *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(49), 24919–24930.
- Bernal, R., Olivares, D., Negrete-Pincetic, M., Lorca, Á. 2020. "Management of EV charging stations under advance reservations schemes in electricity markets". *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 24.
- Chen, Q., Gu, Y., Tang, Z., Wang, D., Wu, Q. 2021. "Optimal design and techno-economic assessment of low-carbon hydrogen supply pathways for a refueling station located in Shanghai". *Energy*, 237.
- Çiçek, A. 2022. "Optimal operation of an all-in-one EV station with photovoltaic system including charging, battery swapping and hydrogen refueling". *International Journal of Hydrogen Energy*, In Press.
- Çiçek, A., Erenoğlu, A. K., Taşçıkaraoğlu, A., Erdinç, O. "Energy Management Strategy for a Microgrid Including All-in-One Electric Vehicle Station, Renewable Energy and Demand Response," 2023 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Mugla, Türkiye, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/SEST57387.2023.10257539.
- Cicek, A., Erdinc, O. 2021. "Optimal Bidding Strategy Considering Bilevel Approach and Multistage Process for a Renewable Energy Portfolio Manager Managing RESs With ESS". *IEEE Systems Journal*.
- Diaz-Londono, C., Ruiz, F., Mazza, A., Chicco, G. 2020. "Optimal operation strategy for electric vehicles charging stations with renewable energy integration". *IFAC-PapersOnLine*, 53, 12739–12744.
- Dicorato, M., Forte, G., Trovato, M., Munoz, C. B., Coppola, G. 2019. "An Integrated DC Microgrid Solution for Electric Vehicle Fleet Management". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), 7347–7355.
- Dolatabadi, S. H., Ghorbanian, M., Siano, P., Hatziargyriou, N. D. "An Enhanced IEEE 33 Bus Benchmark Test System for Distribution System Studies," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 3, pp. 2565-2572, May 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3038030.
- Erdinç, O. 2021. "Considering the combinatorial effects of on-site distributed generation and battery-to-X option availability in electric vehicle battery swap station operation". *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 26.
- Eskandari, H., Kiani, M., Zadehbagheri, M., Niknam, T. 2022. "Optimal scheduling of storage device, renewable resources and hydrogen storage in combined heat and power microgrids in the presence plug-in hybrid electric vehicles and their charging demand". *Journal of Energy Storage*, 50.
- European Commission - 2050 long-term strategy. y.y. Tarihinde 16 Haziran 2022, adresinden erişildi https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en

- Fallah-Mehrjardi, O., Yaghmaee, M. H., Leon-Garcia, A. 2020. "Charge Scheduling of Electric Vehicles in Smart Parking-Lot under Future Demands Uncertainty". *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(6), 4949–4959.
- Feng, J., Hou, S., Yu, L., Dimov, N., Zheng, P., Wang, C. 2020. "Optimization of photovoltaic battery swapping station based on weather/traffic forecasts and speed variable charging". *Applied Energy*, 264.
- Ganjeh Ganjehlou, H., Niaei, H., Jafari, A., Aroko, D. O., Marzband, M., Fernando, T. 2020. "A novel techno-economic multi-level optimization in home-microgrids with coalition formation capability". *Sustainable Cities and Society*, 60(January).
- Gao, Y., Yang, J., Yang, M., Li, Z. 2020. "Deep Reinforcement Learning Based Optimal Schedule for a Battery Swapping Station Considering Uncertainties". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(5), 5775–5784.
- Gholinejad, H. R., Loni, A., Adabi, J., Marzband, M. 2020. "A hierarchical energy management system for multiple home energy hubs in neighborhood grids". *Journal of Building Engineering*, 28(October 2019), 101028.
- Guo, G., Gong, Y. 2022. "Energy management of intelligent solar parking lot with EV charging and FCEV refueling based on deep reinforcement learning". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 140, 108061.
- Gupta, S., Maulik, A., Das, D., Singh, A. 2022. "Coordinated stochastic optimal energy management of grid-connected microgrids considering demand response, plug-in hybrid electric vehicles, and smart transformers". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155.
- Harsh, P., Das, D. 2022. "Optimal coordination strategy of demand response and electric vehicle aggregators for the energy management of reconfigured grid-connected microgrid". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160.
- Hou, H., Wang, Z., Chen, Y., Wang, Q., Zhao, B., Zhang, Q., & Xie, C. (2023). Multi-stage hybrid energy management strategy for reducing energy abandonment and load losses among multiple microgrids. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108773>.
- Infante, W., Ma, J., Han, X., Liebman, A. 2020. "Optimal Recourse Strategy for Battery Swapping Stations Considering Electric Vehicle Uncertainty". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(4), 1369–1379.
- Jiao, F., Zou, Y., Zhang, X., Zhang, B. 2022. "Online optimal dispatch based on combined robust and stochastic model predictive control for a microgrid including EV charging station". *Energy*, 247.
- Kandpal, B., Pareek, P., Verma, A. 2022. "A robust day-ahead scheduling strategy for EV charging stations in unbalanced distribution grid". *Energy*, 123737.
- Ko, H., Pack, S., Leung, V. C. M. 2020. "An Optimal Battery Charging Algorithm in Electric Vehicle-Assisted Battery Swapping Environments". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- Ku, A. Y., Reddi, K., Elgowainy, A., Mcrobie, J., Li, J. 2022. "Liquid pump-enabled hydrogen refueling system for medium and heavy duty fuel cell vehicles: Station design and techno-economic assessment", (xxxx).
- Lamedica, R., Geri, A., Gatta, F. M., Sangiovanni, S., Maccioni, M., Ruvio, A. 2019. "Integrating Electric Vehicles in Microgrids: Overview on Hosting Capacity and New Controls". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), 7338–7346.
- Li, C., Wang, N., Li, W., Yi, Q., Qi, D. 2022. "A battery centralized scheduling strategy for battery swapping of electric vehicles". *Journal of Energy Storage*, 51, 104327.
- Li, H., Sun, B., Hao, J., Zhao, J., Li, J., Khakichi, A. 2022. "Economical planning of fuel cell vehicle-to-grid integrated green buildings with a new hybrid optimization algorithm". *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(13), 8514–8531.

- Li, Y., Cai, Y., Zhao, T., Liu, Y., Wang, J., Wu, L., Zhao, Y. 2022. "Multi-objective Optimal Operation of Centralized Battery Swap Charging System with Photovoltaic". *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 10(1), 149–162.
- Liang, Y., Cai, H., Zou, G. 2021. "Configuration and system operation for battery swapping stations in Beijing". *Energy*, 214.
- Liu, W., Placke, T., Chau, K. T. 2022. "Overview of batteries and battery management for electric vehicles". *Energy Reports*, 8, 4058–4084.
- Long, T., Jia, Q. S., Wang, G., Yang, Y. 2021. "Efficient Real-Time EV Charging Scheduling via Ordinal Optimization". *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(5), 4029–4038.
- Mansour-Saatloo, A., Ebadi, R., Mirzaei, M. A., Zare, K., Mohammadi-Ivatloo, B., Marzband, M., Anvari-Moghaddam, A. 2021. "Multi-objective IGDT-based scheduling of low-carbon multi-energy microgrids integrated with hydrogen refueling stations and electric vehicle parking lots". *Sustainable Cities and Society*, 74.
- Marzoghi, A. F., Bahramara, S., Adabi, F., Nojavan, S. 2019. "Optimal scheduling of intelligent parking lot using interval optimization method in the presence of the electrolyser and fuel cell as hydrogen storage system". *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(45), 24997–25009.
- Maulik, A. (2022). Probabilistic power management of a grid-connected microgrid considering electric vehicles, demand response, smart transformers, and soft open points. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100636>.
- Mohammed, A. M., Alalwan, S. N. H., Taşçıkaraoğlu, A., Catalão, J. P. S. 2022. "Sliding mode-based control of an electric vehicle fast charging station in a DC microgrid". *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 100820.
- Okonkwo, P. C., Mansir, I. B., Barhoumi, E. M., Emori, W., Radwan, A. B., Shakoor, R. A., ... Pugalenth, M. R. 2022. "Utilization of renewable hybrid energy for refueling station in Al-Kharj, Saudi Arabia". *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(53), 22273–22284.
- Pereira, R., Llerena-pizarro, O. R. 2019. "Solar-powered Hydrogen Refueling Stations : A techno-economic analysis", 5.
- Rafique, S., Hossain, M. J., Nizami, M. S. H., Irshad, U. Bin, Mukhopadhyay, S. C. 2021. "Energy Management Systems for Residential Buildings with Electric Vehicles and Distributed Energy Resources". *IEEE Access*, 9, 46997–47007.
- Sahoo, B., Routray, S. K., Rout, P. K., Alhaider, M. M. 2022. "Power quality and stability assessment of hybrid microgrid and electric vehicle through a novel transformation technique". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51.
- Sengor, I., Guner, S., Erdinc, O. 2021. "Real-Time Algorithm Based Intelligent EV Parking Lot Charging Management Strategy Providing PLL Type Demand Response Program". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(2), 1256–1264.
- Sepetanc, K., Pandzic, H. 2020. "A Cluster-Based Operation Model of Aggregated Battery Swapping Stations". *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(1), 249–260.
- Sezgin, B., Devrim, Y., Ozturk, T., Eroglu, I. 2022. "Hydrogen energy systems for underwater applications". *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(45), 19780–19796.
- Shaaban, M. F., Mohamed, S., Ismail, M., Qaraqe, K. A., Serpedin, E. 2019. "Joint planning of smart EV charging stations and dgs in eco-friendly remote hybrid microgrids". *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(9), 5819–5830.
- Shao, C., Qian, T., Wang, Y., Wang, X. 2021. "Coordinated Planning of Extreme Fast Charging Stations and Power Distribution Networks Considering On-Site Storage". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(1), 493–504.

- Silvestri, L., Di Micco, S., Forcina, A., Minutillo, M., Perna, A. 2022. "Power-to-hydrogen pathway in the transport sector: How to assure the economic sustainability of solar powered refueling stations". *Energy Conversion and Management*, 252.
- Šimunović, J., Pivac, I., Barbir, F. 2022. "Techno-economic assessment of hydrogen refueling station: A case study in Croatia". *International Journal of Hydrogen Energy*, (xxxx).
- Sriyakul, T., Jermsittiparsert, K. 2021. "Risk-constrained design of autonomous hybrid refueling station for hydrogen and electric vehicles using information gap decision theory". *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(2), 1682–1693.
- Sui, Q., Li, F., Wu, C., Feng, Z., Lin, X., Wei, F., Li, Z. 2022. "Optimal scheduling of battery charging–swapping systems for distribution network resilience enhancement". *Energy Reports*, 8, 6161–6170.
- Sun, W., Harrison, G. P. 2021. "Active Load Management of Hydrogen Refuelling Stations for Increasing the Grid Integration of Renewable Generation". *IEEE Access*, 9, 101681–101694.
- Tang, O., Rehme, J., Cerin, P. 2022. "Levelized cost of hydrogen for refueling stations with solar PV and wind in Sweden: On-grid or off-grid?". *Energy*, 241.
- Tao, Y., Qiu, J., Lai, S., Sun, X., Zhao, J., Zhou, B., Cheng, L. 2022. "Data-driven on-demand energy supplement planning for electric vehicles considering multi-charging/swapping services". *Applied Energy*, 311(January).
- Tao, Y., Qiu, J., Lai, S., Zhang, X., Wang, G. 2020. "Collaborative Planning for Electricity Distribution Network and Transportation System Considering Hydrogen Fuel Cell Vehicles". *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 6(3), 1211–1225.
- Toghyani, S., Baniasadi, E., Afshari, E. 2021. "Performance assessment of an electrochemical hydrogen production and storage system for solar hydrogen refueling station". *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(47), 24271–24285.
- Umoren, I. A., Shakir, M. Z., Tabassum, H. 2021. "Resource Efficient Vehicle-to-Grid (V2G) Communication Systems for Electric Vehicle Enabled Microgrids". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(7), 4171–4180.
- Wang, H., Ma, H., Liu, C., Wang, W. 2021. "Optimal scheduling of electric vehicles charging in battery swapping station considering wind- photovoltaic accommodation". *Electric Power Systems Research*, 199.
- Wu, Y., Ravey, A., Chrenko, D., Miraoui, A. 2019. "Demand side energy management of EV charging stations by approximate dynamic programming". *Energy Conversion and Management*, 196, 878–890.
- Xiao, W., Cheng, Y., Lee, W. J., Chen, V., Charoensri, S. 2011. "Hydrogen filling station design for fuel cell vehicles". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(1), 245–251.
- Xu, X., Hu, W., Cao, D., Huang, Q., Liu, W., Jacobson, M. Z., Chen, Z. 2020. "Optimal operational strategy for an offgrid hybrid hydrogen/electricity refueling station powered by solar photovoltaics". *Journal of Power Sources*, 451.
- Xu, X., Hu, W., Liu, W., Du, Y., Huang, Q., Chen, Z. 2022. "Robust energy management for an on-grid hybrid hydrogen refueling and battery swapping station based on renewable energy". *Journal of Cleaner Production*, 331.
- Yang, H., Pan, H., Luo, F., Qiu, J., Deng, Y., Lai, M., Dong, Z. Y. 2017. "Operational Planning of Electric Vehicles for Balancing Wind Power and Load Fluctuations in a Microgrid". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(2), 592–604.
- Yang, Y., Jia, Q. S., Deconinck, G., Guan, X., Qiu, Z., Hu, Z. 2018. "Distributed coordination of EV charging with renewable energy in a microgrid of buildings". *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 6253–6264.
- You, P., Pang, J. Z. F., Low, S. H. 2020. "Online Station Assignment for Electric Vehicle Battery Swapping". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.

- Yu, H., Lei, X., Niu, S., Shao, Z., & Jian, L. (2023). Enhancing electric vehicle penetration and grid operation performance in old residential communities through hybrid AC/DC microgrid reconstruction. *Applied Energy*, 347. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121459>.
- Zeng, B., Dong, H., Xu, F., Zeng, M. 2020. "Bilevel Programming Approach for Optimal Planning Design of EV Charging Station". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(3), 2314–2323.
- Zeng, B., Luo, Y., Liu, Y. 2022. "Quantifying the contribution of EV battery swapping stations to the economic and reliability performance of future distribution system". *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 136(April 2021).
- Zhang, J., Li, C., Chen, G., Dong, Z. Y. 2021. "Planning of Hydrogen Refueling Stations in Urban Setting While Considering Hydrogen Redistribution". *IEEE Transactions on Industry Applications*.
- Zhou, Z., Liu, Z., Su, H., Zhang, L. 2022. "Bi-level framework for microgrid capacity planning under dynamic wireless charging of electric vehicles". *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 141.
- Zuo, Z., Shao, Y., Zhang, Z., & Wang, Y. (2023). A switching MPC-based power management strategy for DC microgrids with SOC consistency and energy loss. *Electric Power Systems Research*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109696>.