



Süleyman Demirel Üniversitesi
YEKARUM e-DERGI
(Journal of YEKARUM)



Cilt 10, Sayı 2, 182-209, 2025
E - ISSN:1309-9388

Gürültü Bariyerlerinde Fotovoltaik Güneş Panellerinin Kullanımı ile Kentsel Yenilenebilir Enerji Üretimi

Veli Gökhan DEMİR*

* Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 10145, Balıkesir, Türkiye,
(ORCID: 0000-0002-5667-1909), veligokhandemir@balikesir.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 26/02/2025 ve Kabul Tarihi 29/07/2025)

(DOI: 10,71208/yeekarum.1647295)

ÖZET:

Fotovoltaik (PV) paneller, kentsel yerleşim bölgelerinde yenilenebilir enerji üretimi için büyük bir potansiyele sahiptir. Artan güç ihtiyacı ve 2050 net sıfır hedefleri için bu potansiyelin en verimli şekilde kullanılması, özellikle Türkiye gibi enerjide dışa bağımlı ülkelerde elzemdir. Otoyol ve demiryolu gibi ulaşım kaynaklı gürültülerin önlenmesi amacıyla inşa edilen gürültü bariyerleri, kentsel bölgelerde PV panellerin kurulması için kullanılmaya başlayan alanlardan olmaya başlamıştır. PV güç sistemleri ve gürültü bariyerlerini birleştiren fotovoltaik gürültü bariyerleri (PVGB), trafik kaynaklı gürültüleri önlerken, PV panel kurulumları için gerekli arazi sorununun çözümünde umut verici bir kaynak olarak düşünülmektedir. Bu çalışmada, PVGB'lerin enerji üretim ve dağıtımında sağladığı avantajları, tasarım örnekleri ve çalışma mekanizmaları, uygulama alanları ve potansiyel güç üretim hesapları hakkında yapılan araştırmalar derlenmiştir. Bunun yanında, PVGB'lerin gürültü azaltımı ile kent içi yaşam konforunun artırılmasında ve kentsel yenilenebilir enerji üretimindeki katkısı sunularak, sürdürülebilir bir gelecek için modern kent planlamalarında uygulama gerekliliği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, Gürültü Bariyerleri, Kentsel Yenilenebilir Enerji

Urban Renewable Energy Production with The Use of Photovoltaic Solar Panels in Noise Barriers

ABSTRACT

Photovoltaic (PV) panels have great potential for renewable energy production in urban settlements. It is essential to use this potential in the most efficient way because of the increasing power demand and 2050 net zero targets especially in the countries which are dependent on foreign energy such as Türkiye. Noise barriers used to prevent noise from transportation sources such as highways and railways have started to be used in urban areas for the installation of PV panels. Photovoltaic noise barriers (PVNBs), which combine PV power systems and noise barriers, are considered to be a promising source for preventing traffic-related noise and solving the problem of land required for PV panel installations. In this study, the researches about the advantages of PVNBs in energy production and distribution, design examples and working mechanisms, application areas and potential power generation calculations are compiled. In addition, the necessity of PVNB applications in modern urban planning

* Sorumlu yazar E-mail: veligokhandemir@balikesir.edu.tr

for a sustainable future is emphasized by presenting the contributions of PVGBs in improving quality of urban life by noise reduction, and urban renewable energy production.

Keywords: *Photovoltaic, Noise Barriers, Urban Renewable Energy*

1. GİRİŞ

İnsan popülasyonunun hızlı artışı ve teknolojik gelişmeler, enerji ihtiyacında üstel bir büyümeye yol açmaktadır. Yenilenemez enerji kaynağı olan fosil yakıtlar, sürdürülebilir olmamalarına ve çevresel ve sağlık sorunlarına neden olmalarına rağmen, enerji sektöründe halen yoğun olarak kullanılmaktadır [1], [2]. Küresel ısınma ve iklim değişikliği, fosil yakıt kullanımının neden olduğu en büyük çevresel sorundur. Küresel ısınma kaynaklı iklim krizinin aşırı hava olayları, kuraklık, yangın gibi yıkıcı etkileri, insan yaşamı ve ekosistemler üzerinde çok büyük olumsuz sonuçlara neden olmaktadır [3]. Aynı zamanda, fosil yakıt kaynaklarının sınırlı bir rezerve sahip olması, artan enerji ihtiyacı da göz önüne alındığında sürdürülebilir değildir [4]. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), oldukça uzun bir gelecekte tükenmeden kalacak ya da kısa periyotlarda kendini yenileyebilen, çevre dostu ve temiz enerji kaynakları olan yenilenebilir enerji kaynaklarını; ayrıca bu kaynakları kullanan verimli teknolojileri, sürdürülebilir gelecek için iki önemli anahtar olarak göstermektedir [5]. Yenilenebilir enerjinin çevre kirliliği üzerindeki etkisini tahmin eden çalışmalarda, yenilenebilir enerjinin CO₂, NO_x ve SO₂ gibi sera gazı ve hava kirleticilerinin emisyonlarını azaltırken, ekonomik büyümeyi de teşvik ettiğini ortaya koymaktadır [6], [7]. Dünya genelinde güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji sistemlerinin ve elektrikli araçlar gibi konvansiyonel teknolojilere alternatif temiz enerji teknolojilerinin kullanım oranının artması, karbon emisyonu artışında yapısal bir yavaşlamaya katkıda bulunmuştur. Gelişmiş ekonomiler, 2023 yılı emisyon salınımlarında ortalama %4.5'lik önemli bir düşüş yaşamış ve elli yıl önceki emisyon seviyelerine geri dönmüştür, bu da yenilenebilir ve temiz enerji uygulamalarının etkisini açıkça göstermektedir [8]. Türkiye özelinde de ekonomik ve stratejik çıkarları güvence altına almak, yükselen enerji ihtiyacını karşılamak, enerji arzında dışa bağımlılığın ve fosil yakıtlı karbon emisyonlarının azaltılması için hidrolik, rüzgâr, jeotermal, güneş, biyokütle ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir [9]. Bu kapsamda, 2022 yılında T.C. Enerji ve Kaynaklar Bakanlığınca ülkemizin 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi esas alınarak hazırlanan “Türkiye Ulusal Enerji Planı” raporunda, 2035 yılına kadarki dönemde elektrik üretiminde ve elektrik kurulu gücünde yenilenebilir enerji kaynaklarının payının sırasıyla %54.7 ve %64.7 düzeyine yükseltilmesi planlanmıştır [10].

Yaşam için de temel bir enerji kaynağı olan güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında görece sınırsız ve güvenilir olmasıyla diğer yenilenebilir enerjilere kıyasla artan enerji ihtiyacı için uygulanabilir bir çözümdür [8]. Enerji tahminleri, güneş enerjisi sistemlerinin 2050 yılına kadar giderek yaygınlaşacağını ve dünya enerjisinin %25'i gibi önemli bir oranının güneş enerjisi tarafından sağlanacağını öngörmektedir [11]. Güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren Fotovoltaik (PV) hücreler ve bu hücrelerden oluşturulan fotovoltaik santrallerin yönetimi ve planlaması için fotovoltaik tiplerinin ve mekânsal (lokasyon) bilgilerin etkin bir şekilde belirlenmesi hayati önem taşımaktadır [12]. Örneğin, yüksek elektrik üretim kapasitesine sahip güneş enerjisi santralleri (GES), geniş arazilerin kullanılmasını gerektirmekte, bu durum ise sınırlı tarım alanları için olumsuz bir durum ortaya çıkarmaktadır [13]. Son yıllarda, yenilenebilir enerji üretim kapasitelerinin artırılması için kent içi (kentsel) PV sistemleri ile elektrik üretimi çokça araştırılan ve pratik örneklerinin de yaygınlaştığı uygulamalardır. Bunlar genellikle bina çatı üzeri GES uygulamaları olarak dikkat çekmektedir [14], [15], [16], [17]. Ancak, kentsel yenilenebilir enerji üretim kapasitesinin daha da artırılması için yeni GES kurulum alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaca yönelik olarak, özellikle şehir içlerinde trafik kaynaklı gürültüyü azaltan gürültü bariyerleri ve PV panellerini birleştiren fotovoltaik gürültü bariyerleri (PVGB) umut verici PV sistemler olarak gösterilebilir. Bu çalışmada, PVGB sistemleri yapısal olarak incelenmiş, uygulama örnekleri gösterilmiş ve kentsel elektrik üretimde sağladığı avantajlar ile tasarım parametreleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. FOTOVOLTAİK GÜRÜLTÜ BARIYERLERİNİN (PVGB) YAPISI ve İŞLEVİ

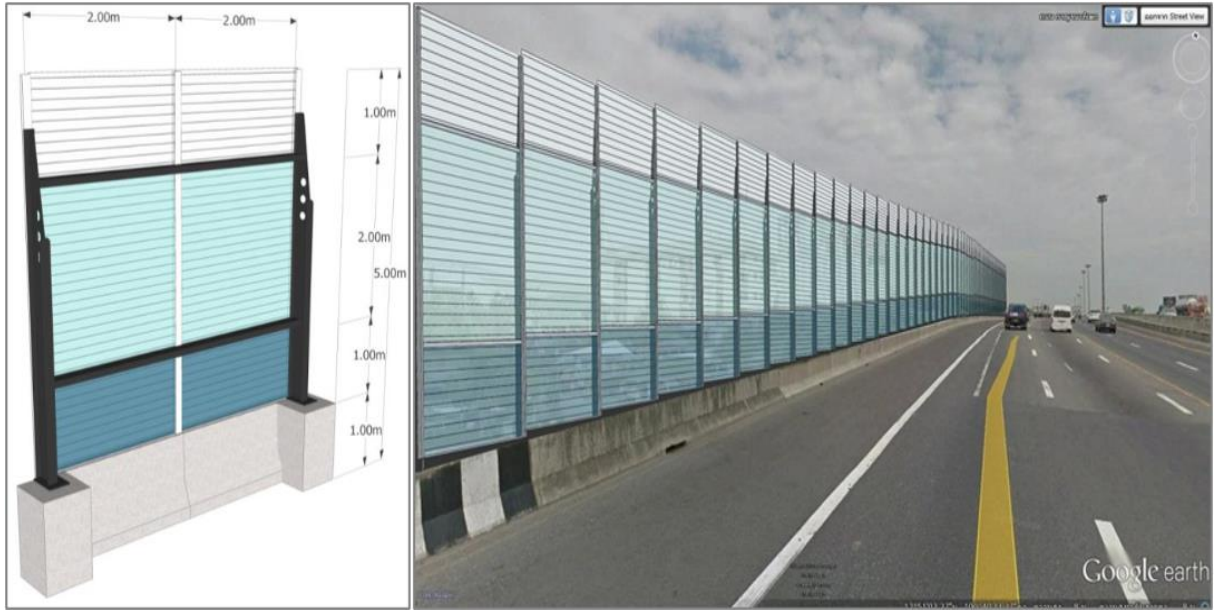
PVGB, ulaşım kaynaklı gürültüyü azaltma ve güneş enerjisinden elektrik üretme gibi iki işlevi olan entegre sistemlerdir. Bu bölümde PVGB'yi oluşturan iki bileşen olan gürültü bariyeri ve PV sistemler tanıtılmış; ayrıca, kentsel enerji üretimi ve bu üretim içinde PVGB'nin yerinin öneminden bahsedilmiştir.

2.1. Gürültü Bariyerleri

Gürültü, insanlarda işitme sağlığını, algılamasını, psikolojik durumunu olumsuz yönde etkileyen bir kirlilik çeşididir. Kentsel gürültü kaynaklarından başlıcası karayolu ulaşımıdır ve maruz kalanların yaşam standardını asgari düzeyde etkilemesi için belirli sınırlar arasında tutulması gereklidir [18]. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yayımladığı

Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliğinde, kara yolundan çevreye yayılan gürültü seviyelerinin sınır değerleri, yol tipi, yolun konumu ve zaman (saat) aralığına göre farklılık içerse de 50 dB(A) ila 72 dB(A) arasında değişmektedir [19].

Karayollarında gürültü bariyerleri (perdeleri), karayolu taşıtları kaynaklı gürültüleri azaltmak için kullanılır. Bu yapılar, özellikle kent içinde trafiğin yoğun olduğu bölgelerde, havaalanı etrafında ve konut-yol sınırı gibi yerlerde tercih edilir. Yapay gürültü bariyerlerinde minimum 25 dB’lik bir sesin soğurularak gürültü şiddetinin azaltılması istenir. OECD kriterlerine göre her bir metre bariyer yüksekliği, gürültü miktarında 1.5 dBA’lik düşüş sağlamalıdır, bunun yanında tesis edilen gürültü bariyerinin boyu, asgari olarak bariyer ile alıcı arasındaki mesafenin 4 katı uzunluğunda olması gerekir [20]. Günümüzde gürültü bariyerleri genellikle sekiz çeşit malzemeden yapılmaktadır, bunlar: 1) Beton Ürünler 2) Metaller 3) Plastikler 4) Geri Dönüştürülmüş Malzemeler 5) Fiberglas Takviyeli Plastik (FRP) 6) Cam 7) Akrilik ve 8) Ahşaptır. Konvansiyonel karayolu gürültü bariyerlerine örnek olarak Şekil 1’de, cam elyaf takviyeli beton (GRC) ve elyaf takviyeli plastik (FRP) kompozit malzemelerinden üretilen ve Bangkok’ta bir otoyol üzerinde inşa edilmiş uygulama gösterilmiştir [21].



Şekil 1. Karayolu gürültü bariyeri uygulama örnekleri [21].

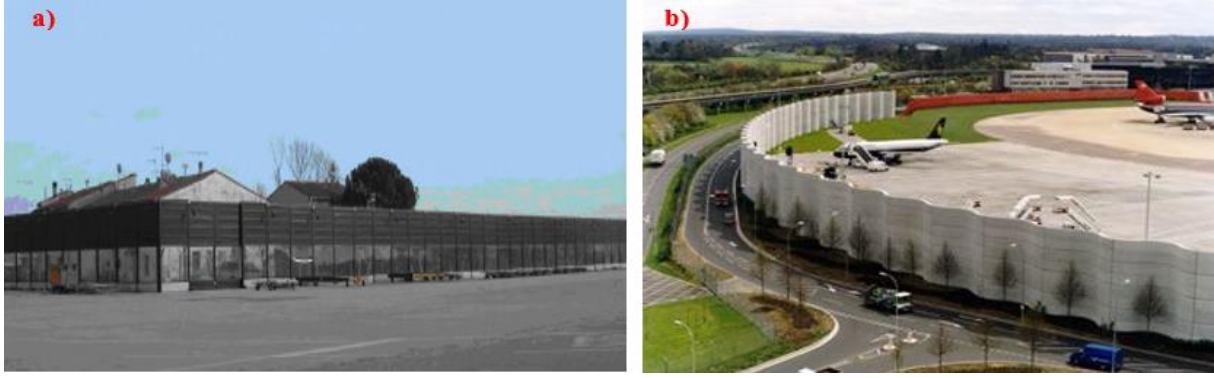
Avrupa Birliği (AB), karayolu trafiği için izin verilen gürültü sınırlarına ilişkin standartlarından sonra trenler ve demiryolu taşımacılığı için gürültü standartlarını oluşturmuştur. Bu sınırlandırmalarda demir yolundan çevreye yayılan gürültü seviyelerinin sınır değerleri, yol konumu ve saat dilimine göre farklılık içerse de 40 dB(A) ila 70 dB(A)

arasındadır [22]. Böylece, özellikle kent içi modern demiryolu hatlarında da ulaşım kaynaklı gürültü azaltımında gürültü bariyer uygulamaları kullanılmaya başlandı [23]. Demiryolu gürültü bariyerlerinde genellikle dikey, yarı örtülü, yarı kapalı ve tamamen kapalı olmak üzere dört tip gürültü bariyeri kullanılmaktadır, uygulama örnekleri Şekil2’de gösterilmiştir [24].



Şekil 2. Demiryolu gürültü bariyer tipleri [24].

Yapılan araştırmalar [1], ulaşım altyapıları arasında uçakların en rahatsız edici gürültü kaynakları olduğundan ve gürültülerinin havaalanlarını çevreleyen alanlarda yaşayan insanlarda ciddi rahatsızlıklara yol açabileceğini göstermiştir. Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin havaalanlarında gürültüyle ilgili işletme kısıtlamalarının getirilmesine ilişkin kurallar ve prosedürlerin oluşturulmasına ilişkin 2002/30/EC sayılı direktifi mevcuttur. Hava yolu kaynaklı çevreye yayılan gürültü seviyelerinin sınır değerleri 40 dB(A) ila 90 dB(A) aralığında değişmektedir [22]. Bir havalimanını çevreleyen alanlardaki gürültüyü esas olarak üç faktör etkilemektedir, bunlar: Uçuş sayısı ve uçak tipi, Pistlerin konfigürasyonu ve çalışma yöntemi ve Kalkış ve iniş prosedürleridir. Havaalanları etrafında yerleşim birimleri var ise gürültü bariyeri uygulamaları gürültü kirliliğini azaltmada en etkin çözüm yöntemlerindedir (Bkz. Şekil 3.a.) [26]. Betondan inşa edilen, 430 m uzunluğunda ve 11 m yüksekliğindeki Gatewick havaalanı akustik bariyeri, havaalanı gürültü bariyerleri içerisinde önemli örneklerden bir tanesidir (Bkz. Şekil 3.b.) [27].



Şekil 3. a) Havaalanı etrafındaki yerleşim birimlerinde [26] ve **b)** Havaalanı duvarlarında [27] kullanılan gürültü bariyeri örnekleri.

2.2. Fotovoltaik (PV) Sistemler

Güneş enerjisini (ışınlarını) yakalayıp doğrudan elektriğe dönüştüren PV sistemler ile elektrik üretimi ilk olarak 1839 yılında gerçekleştirilmiş ancak üretim verimi %1 civarında olduğu için elde edilen elektriğin kullanılması mümkün olmamıştır [28]. Birinci ve ikinci nesil olarak adlandırılan, genellikle tek (mono) kristalli, çok (poli) kristalli, ince film veya şerit şeklinde üretilen PV panelleri, geçmişten günümüze kadarki uzun zaman diliminde geliştirildikleri için performansları büyük ölçüde iyileştirilmiş, daha yüksek verimlilik (>%20) ve çok daha düşük üretim maliyetleri elde edilmiştir. Ticarileşme aşamasında olan üçüncü nesil PV panellerinin verimleri eski nesillere göre daha da yüksektir, bunun yanında hammadde ve üretim maliyetleri gün geçtikçe azalmaktadır. Ayrıca, şeffaf bir yapıda üretilibildiklerinden birinci ve ikinci nesil PV panellerine göre çok daha üstün uygulanabilirlik alanlarına (bina penceresine entegre sistemler vb.) sahiptirler. Bu avantajları üçüncü nesil PV panellerini ticari olarak gittikçe rekabetçi hale getirmektedir [29]. PV sistemleri şebekeye entegreli (on-grid) veya şebekeden bağımsız (off-grid) olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Bir işletmede uygun PV sisteminin seçimi, ilgili işletmenin kurulu gücüne göre elektrik enerjisi gereksiniminin hesaplanması, bu güce bağlı olarak PV sistem ekipmanları ve özelliklerinin incelenmesi, enerji (elektrik, akaryakıt vb.) maliyetlerinin belirlenmesi ve ekonomik analizinin gerçekleştirilmesi ile yapılabilir [30].

PV sistemleri ile elektrik üretiminde en önemli etkenler ışınım şiddeti ve güneşlenme süresidir. T.C. Enerji Bakanlığı ve Tabii Kaynakları Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğünün hazırladığı Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam ışınım değeri 1,527.46 kWh/m², yıllık toplam güneşlenme süresi ise 2,741 saattir (günlük 7.5 saat). Ülkemizde en yüksek ışınım değerleri Mayıs, Haziran ve

Temmuz aylarında; en fazla ortalama güneşlenme süreleri ise Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında görülmektedir [31]. Bu değerler ülkemizin coğrafi konumu nedeniyle önemli bir güneş enerjisi potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. PV sistemleri kurulumunda en verimli şekilde üretim yapabilmek için güneş radyasyon miktarı ve güneşlenme süreleri dışında uygun nem, sıcaklık, rüzgar hızı gibi koşullarının da uygun olması istenir. Diğer önemli bir faktör ise güneş ışığının geliş açısıdır; istenen, ışınların PV panellerine dik gelmesidir [32]. Son zamanlarda sabit açılı güneş enerji sistemlerine alternatif olarak tek veya çift eksen hareketli güneş enerji sistemleri de kullanılmaya başlamıştır [33], [34]. PV sistem kurulumlarında dikkat edilmesi gereken parametrelerden biri de bölgesel enerji ihtiyaçlarının sağlanabilmesi ve yatırım maliyetlerinin en kısa sürede karşılanması için uygun yer ve alanın belirlenerek planlamanın doğru yapılmasıdır [35]. PV sisteminin kurulumundaki yer seçimi, enerji üretimi ve ekonomik etkenler dışında stratejik olarak da önemlidir. Örneğin PV santralleri için geniş arazi alanlarının kullanılması enerji ve gıda üretimi arasında rekabet oluşturmakta, gıdaya ulaşılabilirliği ve gıda fiyatlarını etkileme riski yaratmaktadır [36].

2.3. Kentsel Yenilenebilir Enerji Üretimi

Dünya Bankası verilerine göre 2022 yılında ülkemizde yaşayan insanların %77'si, Avrupa'da %75'i, dünya genelinde ise yaklaşık yarısı kentsel alanlarda yaşamakta ve 2050 yılında bu oranın üçte ikiye çıkması öngörülmektedir [37], [38]. 2050 yılına kadar 2.5 milyarlık bir kentsel nüfus akışına hazırlıklı olmak için düşük karbonlu, dirençli ve yaşanabilir şehirler tasarlamak kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla, özellikle binalarda ve ulaşım sektöründe enerji tüketiminin azaltılması, daha temiz teknolojilere geçişin sağlanması ve büyüyen kentsel alanların yüksek enerji taleplerini karşılamak için şehre entegre yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaştırılması gün gittikçe daha önemli hale gelmektedir. Ortaya çıkan bu ihtiyaç ve gereklilikler son on yılda küresel güneş PV talebinde %50'lik bir meydana getirmiştir. İnşa edilecek yeni yüksek güç kapasiteli merkezi güneş enerjisi santralleri, PV panellerinin kurulumu için geniş alanlara ihtiyaç duymaktadır. Ancak kentsel bölgeler, yüksek arazi fiyatları nedeniyle bu ihtiyacı karşılayamayan sınırlı alanlara sahiptir [39]. Arazilere alternatif olan bina entegre güneş sistemleri ile genellikle çok sayıda küçük ölçekli güneş PV panellerinin bina çatılarına ya da bina cephelerine kurulması, kentsel yenilenebilir enerji üretiminde üzerinde çokça durulan uygulamalardır [40], [41]. Ancak, nüfusu yoğun şehirlerdeki yüksek katlı binalar, yüksek güneş enerjisi talebini karşılamak için yeterli çatı alanının olmadığı anlamına gelir. Bunun yanında entegre PV sistemleri inşa etmenin hala çözülmemiş birçok sağlık ve

güvenlik sorunu bulunmaktadır [42]. Kentsel yenilenebilir enerji üretiminin bir başka gerekliliği, son yıllarda hızla artan elektrikli araç sayısına bağlı olarak şarj istasyonlarına olan ihtiyaçtır. PV paneller ile enerji üretimini sağlayan şebeke dışı (off-grid) şarj istasyonları, kent içi şebeke yükünü hafifletir, iletim kaynaklı kayıpları azaltır, şarj enerjisinin maliyetini düşürür, ayrıca şebekeden uzak yerlerde de kurulabildiğinden elektrikli araç kullanımını yaygınlaşmasına katkıda bulunur [43], [44]. Güneş ya da hibrit enerjili elektrikli araç şarj istasyonlarında PV paneller için gerekli alanın istasyon çatı ve cepheleri ya da alternatif yapılardan sağlanması kent içi arazi sorununu çözmek için uygun alternatiflerdir [45]. Bu bağlamda PVGB’ler kent içinde kurulacak PV sistemler için hem önemli bir alan potansiyeli oluşturmaktadır. Kurulacak yeni PVGB’ler ya da mevcut gürültü bariyerlerinin PVGB’lerine dönüştürülmesiyle kentsel yenilenebilir enerji üretimine katkı sağlanırken, kent içi sera ve kirletici emisyon gaz salınımlarında azaltım sağlanabilecektir.

3. PVGB UYGULAMALARI

Özellikle son yıllarda, trafik kaynaklı gürültünün azaltılarak uluslararası gürültü standartlarının sağlanmak istenmesi, kentsel yenilenebilir enerji talebindeki artış ve GES’lerin ihtiyaç duyduğu geniş arazilerin teminindeki sınırlandırmalar PVGB sistemlerinin yaygınlaşmasına ve bu sistemler hakkında yapılan araştırmaların yoğunlaşmasına neden olmuştur.

ABD Ulaştırma Bakanlığı Karayolları İdaresi Doğa Çevre Ofisinin yayımladığı raporda [46], mevcut karayolu gürültü bariyerlerine sonradan PV panelleri eklemenin bariyerlerin gürültü azaltma özelliklerini kayda değer bir oranda değiştirmedeğini, yeni kurulacak PVGB’lerin ise ilgili lokasyonun gürültü gereksinimlerine uyacak şekilde tasarlanması gerekliliği vurgulanmıştır. Bu raporda, PVGB’ler güvenlik ve finansal yönünden de ele alınmıştır. Buna göre PVGB’lerin karayolu ulaşımında sürüş güvenliğini önemli ölçüde etkilemediği, yine de PV panellerinde oluşabilecek parlamayı engellemek için PVGB’leri uygun açı ve mesafelerde konumlandırmanın sürücülerin dikkatinin dağılmaması için uygun olacağı ifade edilmiştir. PVGB’lerin finansal uygulanabilirliği ise büyük ölçüde PV panellerinin, elektriğin güncel fiyatlarına ve yenilenebilir enerji için hükümet teşviklerine bağlı olduğu vurgulanmıştır. PVGB projelerinin bir geliştiricinin PVGB’nin inşasını ve bakımını üstlendiği kamu-özel sektör ortaklıkları olarak uygulanabileceğini, böylece kamusal bir ön harcama olmaksızın güneş panellerinin kurulabileceği belirtilmiştir.

Zhong vd. [47] yaptıkları çalışmada, Nanjing’deki mevcut ve planlanan gürültü bariyerlerini içeren Fotovoltaik Gürültü Bariyerleri sistemlerinin (PVGB) güneş PV

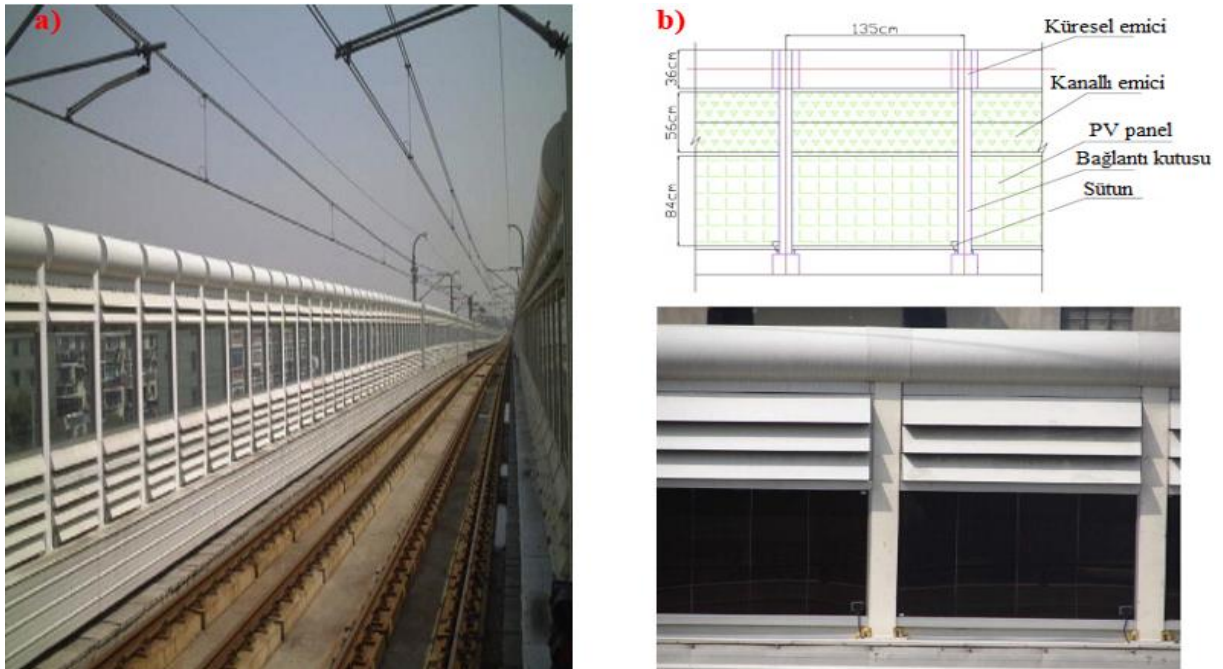
potansiyelini tahmin etmek için bir hesaplama modeli ortaya koymuşlardır. Bunun için öncelikle derin öğrenmeye dayalı bir hedef tespit yöntemi kullanarak Nanjing kenti için çok sayıda sokak görünümü görüntüsünden mevcut kentsel gürültü bariyerlerine sahip konumları belirlemişlerdir. Bu yöntem ile kentsel otoyol ve ana yollardaki mevcut gürültü bariyerlerinde (1x1 m boyutlarında ve 200 W çıkış gücüne sahip) güneş paneli kurulumu için toplam kullanılabilir alanın 71,303 m², planlanan gürültü bariyerlerinde güneş paneli kurulumu için toplam kullanılabilir alanın ise 286,175 m² olduğunu tespit etmişlerdir. Buna göre mevcut kentsel gürültü bariyerleri için PVGB sistemlerinin potansiyel kurulu kapasitesinin 14.26 MW; planlanan kentsel gürültü bariyerleri için ise PVGB sistemlerinin potansiyel kapasitesinin 57.24 MW olduğunu hesaplamışlardır.

Wadhawana ve Pearce [36], ABD Kaliforniya eyaleti karayollarında bulunan gürültü bariyerleri üzerine konumlandırılacak ince film PV panellerinden elde edilecek elektrik üretimini hesaplayıp, bu hesabı tüm ABD için genelleştirmişlerdir. Bunun için öncelikle gürültü bariyeri konumlarını Google Earth'te işaretlemişler, ardından DNR Garmin yazılımı kullanılarak elde edilen verileri bir şekil dosyasına dönüştürmüşler, ücretsiz ve açık erişim QGIS yazılımı ile de gürültü bariyerleri üzerine kurulacak (farklı yön ve açılardaki) PV panellerin üretim performanslarını çıkarmışlardır. Çalışma bulgularından elde edilen sonuçlara göre tek bir eyaletteki gürültü bariyerleri üzerine kurulacak büyük ölçekli PVGB gücünün, ABD'deki en büyük güneş çiftliklerinin kurulu güç kapasitelerine benzer olacağı görülmüştür. ABD'de bulunan mevcut gürültü bariyerlerinden toplamında ise ortalama 50,000 hanenin elektrik ihtiyacına eşdeğer 7 ila 9 GW arasında güç sağlanabileceğini, böylece elektrik üretiminde yıllık ortalama 66 milyon dolardan fazla tasarruf sağlanabileceğini göstermiştir. Araştırmacılar, ABD'nin gürültü azaltma zorunluluklarında Dünya Sağlık Örgütü'nün önerilerinin çok gerisinde kaldığına dikkat çekerek, kurulacak PVGB sistemleri ile hem gürültü azaltımında eksikliğin giderileceğini hem de geleneksel güneş PV çiftliklerine göre daha iyi arazi kullanımı sağlayarak çok yüksek kapasitede yenilenebilir enerji üretimi gerçekleştirilebileceğini ifade etmişlerdir.

Yapılan diğer bir araştırmada, yol gürültü sorununun azaltılması ve yerel yenilenebilir enerji üretim kapasitesinin artırılması amacıyla örnek şehir olarak seçilen Çin'in Kunming şehri için modelleme çalışması yapılmıştır. Kunming'in günlük ortalama güneş radyasyonu verileri kullanılarak yapılan hesaplamalarda, amorf silikon güneş panellerine sahip PVGB'ler ile yılda 16 milyon kWh'den fazla elektrik üretilebileceği, böylece sokak lambalarının güç ihtiyacının yaklaşık yarısının karşılayabileceği görülmüştür. Projenin hayata geçirilmesiyle karayolu

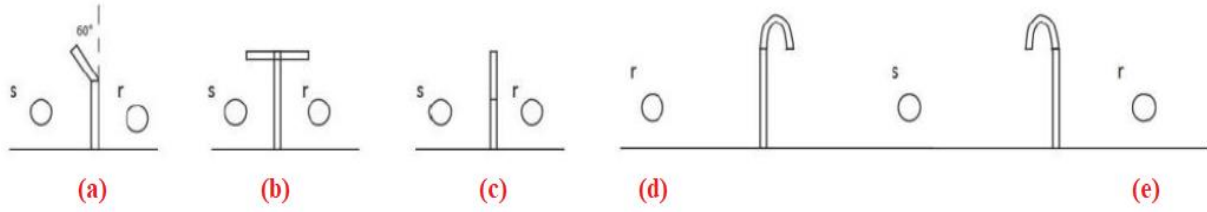
kaynaklı gürültünün etkili bir şekilde engelleyerek kent sakinlerin yaşam kalitesinin iyileştirebileceği, ayrıca yol yönetim departmanlarının ekonomik yükünün azaltılacağı öngörülmüştür [48].

Gu vd. [49], yerel elektrik yükünü beslemek veya Çin Devleti tarafından verilen PV teşvik desteğinden yararlanmak üzere kullanılabilir bir PVGB tasarımı üzerine çalışmışlardır. Geliştirdikleri tasarımları ekonomik ve çevresel analizler yaparak incelemişlerdir. Elde ettikleri optimum tasarımın kurulumunu Çin'deki bir metro hattına uygulamışlardır. Hat üzerine kurulan PVGB sisteminde toplam a-Si PV dizi uzunluğu 360 m, üretim gücü ise 8 kW'tır . Bu pilot uygulama ile yıllık 5000 KWh/yıl elektrik üretilirken, lokal olarak çevresel kirlilik yükünün azaltılacağı vurgulanmıştır. Yıllık azalması beklenen emisyonlar gazları ve miktarları SO₂ için 1,696~1,706 kg, NO_x için 576~589 kg, CO₂ için ise 130,396~144,044 kg olarak tahmin edilmiştir. Araştırmacılar, yaptıkları ekonomik analiz sonucunda kurulan PVGB sisteminin enerji geri ödeme süresinin 5.4 yıl olduğunu ifade etmişlerdir. Bunun yanında PVGB sistemlerinin, geleneksel PV güç üretim sistem maliyetlerine göre en az %10 kadar az olacağını ve hiçbir arazi kaynağı gerektirmeyeceklerini de belirtmişlerdir.



Şekil 4. PVGB'nin; a) Kurulduğu metro hattı, b) Şematik gösterimi [49].

Vallati vd. [50], PVGB sistemlerinde maksimum enerji ve akustik verimlerinin elde edilmesi için bariyerlerin ideal yapısal formunu belirlemeye çalışmışlardır. Bariyerin akustik özelliklerinin değerlendirilmesi için SoundPLAN, enerji üretim değerlerinin belirlenmesi için ise Homer Energy yazılımlarını kullanmışlardır. Aynı sınır koşullarda (aynı gürültü kaynağı, emilim/yansımaya değerlerine sahip sabit PV panelleri ve arazi morfolojisi vb.) enerji üretimi ve gürültü azaltımında en verimli PVGB sistemlerinin T şeklindeki (b) ve yakın değerleri veren 60° eğimli yarı örtük (a) konfigürasyonlarındaki olduğu görülmüştür (Bkz Şekil 5).



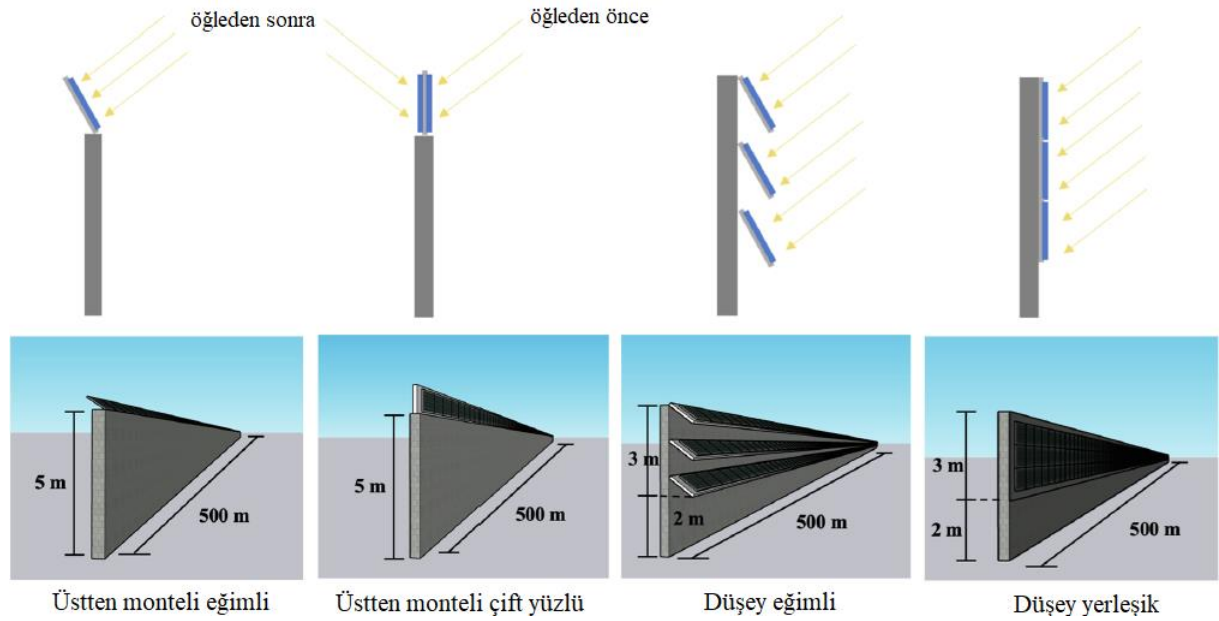
Şekil 5. Farklı yapısal konfigürasyonlardaki PVGB sistemleri [50].

Geleneksel PVGB sistemlerinde PV panellerinin yönü, doğası gereği yolun yönüne göre belirlenir ve eğimi genellikle neredeyse dikeydir. Optimum olmayan yönelim ve eğim, geleneksel PV panellerinin yıllık verimini olumsuz şekilde etkiler. Bu tür uygulamalar için ön ve arka taraflarına düşen ışığı elektrige dönüştürebilen, şeffaf arka yüzeye sahip olan çift yüzlü (bifacial) PV panelleri daha verimlidir ve gürültü bariyerlerine entegrasyonda oldukça umut verici görünmektedirler [51].

Jong vd. [52], araştırmalarında, kendi kendine gölgelemenin hem doğuya hem de batıya bakan çift yüzlü PVGB'lerin enerji üretimi üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, özellikle öğle saatlerinde kuzey-güney hizalı yollardaki gürültü bariyeri destek yapıları gölgelerinin PV panellerinin üzerine düşmesi nedeniyle kendi kendine gölgeleme sorunu meydana geldiğini göstermektedir. Güneşli günlerde enerji kaybının %5'e kadar çıktığı, yıllık kaybın ise ortalama %3 olduğu bulunmuştur. Araştırmacılar çalışma sonunda, gölgelenme kaynaklı kayıpların en aza indirilmesi için PVGB tasarım ve konumlandırmasının en iyi şekilde planlanmasını, böylece daha yüksek enerji verimlerinin elde edileceğini ticari kazanç sağlanacağına vurgu yapmışlardır.

Soraes ve Wang [53], gürültü bariyerlerine üstten monteli eğimli, üstten monteli çift yüzlü, düşey eğimli ve düşey yerleşik olarak inşa edilmiş PVGB'lerin enerji, ekonomik ve çevresel etkileri açısından çok kriterli ve karşılaştırmalı analizlerini gerçekleştirmiştir. Oluşturulan modeller Şekil 6'da gösterilmiştir. Simülasyon çalışmalarındaki veriler ABD'nin

dört farklı yerleşim biriminde (Phoenix, Seattle, Tampa ve Denver) farklı güneş ışınımları ve yönelimleri için gerçekleştirilmiştir. Yönlenme açısından en iyi sonuçları beklenildiği üzere genel olarak güney cepheli PVGB’ler vermiştir, çünkü güneş panelleri gün boyu güneş ışığı alır. Güney cepheliye kıyasla doğu cephesinde daha yüksek enerji çıkışı üreten tek konfigürasyon, doğu cephesinde sabah güneşinden ve batı cephesinde öğleden sonra güneşinden faydalanan üstten monteli çift yüzeyli PVGB olmuştur. Çok kriterli analizde, düşey eğimli PVGB'nin genel olarak en iyi sonuçları vermiştir. Düşey eğimli PVGB, en yüksek ilk yatırıma sahip yapıdır ancak bu tasarım en yüksek enerji çıkışına sahip olduğundan 25 yıllık ömrü boyunca kümülatif olarak en çok elektrik üretimi gerçekleştirecek konfigürasyondur. Bunun yanında, eğer PVGB’den istenen enerji, ekonomik ve çevresel etkiler açısından daha hızlı geri ödeme süresi ise hedefleyen projelerde üstten monteli eğimli ve üstten monteli çift yüzeyli panellere sahip PVGB'lerin tercih edilmesinin daha avantajlı olduğu görülmüştür.

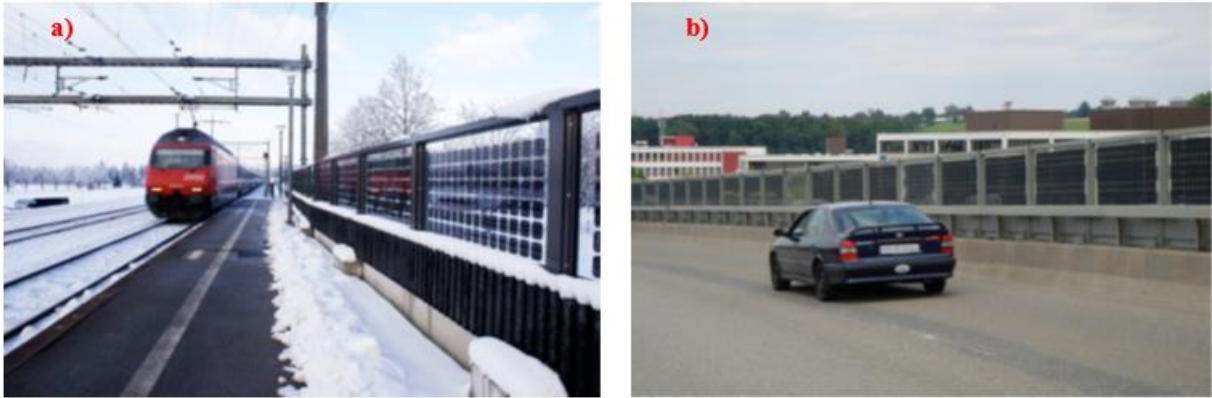


Şekil 6. Gürültü bariyerlerine PV panel takılarak oluşturulan PVGB konfigürasyonları [53].

Faturrochman vd. [54], çift yüzeyli fotovoltaik panellere sahip PVGB sistemlerini incelemişlerdir. Bunun için tam ölçekli bir çift yüzeyli PVGB inşa etmişler ve yaptıkları ölçümler ile bariyerin güç çıkışını ölçmüşler, bunun yanında, verilen hava koşulları için güç çıkışını ve yıllık enerji verimini tahmin edebilen sayısal model geliştirmişlerdir. Yaptıkları doğrulamalar ile ölçülen güç çıkışı ve model tahmini arasında mükemmel bir uyum bulunduğunu tespit etmişlerdir. Geliştirdikleri bu model ile çift yüzeyli PVGB için yıllık enerji

verimi üzerinde yönelim, eğim, konum, hücre konumu ve baypas diyot yapılandırmasının etkilerini incelemiştir. Modelden elde ettikleri sonuçlara göre ekvatora yakın bir bölgede bulunan Jakarta’da en yüksek yıllık verim, sabahın erken saatlerinde ve öğleden sonra geç saatlerde hem önden hem de arkadan doğrudan ışınım alabilecek şekilde doğu veya batıya yönlendirilmiş bariyer için elde edildiği görülmüştür. Daha kuzeyde (Dubai ve Amsterdam için) ise doğu veya batı yönelimleri hala iyi performans gösterse de en yüksek performans PVGB’nin ön tarafı güneye baktığında elde edilmiştir. Ayrıca, yapılan simülasyonlarda PVGB’lerde çıkıntılı çerçeve kullanımının PV hücrelerin arka tarafına bir gölge düşürdüğü için yıllık verimi %13.3 oranında azalttığını, bu kaybı L şeklindeki konfigürasyon ve dört baypas diyotu kullanılarak %10.7’ye düşürülebileceğini söylemişlerdir.

İsviçre’deki karayolları ve bir demir yolu hattı boyunca üç farklı çift yüzü PVGB pilot sistem kurulumu gerçekleştirilmiştir. Projede, sabit bir yönde ilerlemeyen yollar boyunca yerleştirilen PV panellerin neredeyse tüm olası yönelimlerde enerji üretmesi planlanmıştır. Münsingen kentin içerisindeki demir yolu hattına kurulan sistem 7.25 kWp nominal güce sahip olup dünyanın ilk çift yüzü PVGB tesisidir (Şekil 7.a.). Zürih kenti karayoluna inşa edilen çift yüzeyli PVGB’nin nominal gücü ise 5.96 kWp’tır (Şekil 7.b.). Bu tesis sonrasında modernize edilerek ve genişletilerek aynı karayolunda ikinci çift yüzü PVGB tesisi kurulmuştur. Yapılan ölçümlerde doğu-batı yönelimli ve dikey PVGB’lerinin en yüksek verimini sabah ve öğleden sonraki saatlerde elde ettiği görülmüştür. Bu sistemlerin güneye yönlendirilmiş ve maksimum verimini öğlen saatlerinde veren geleneksel PV panel sistemleriyle entegre edildiğinde tüm gün boyunca yüksek verimde enerji üretilebileceği ayrıca gün içerisinde stabil enerji üretimiyle depolama ihtiyacının azalacağı ifade edilmiştir [55].



Şekil 7. A) Demiryolu hattına kurulan çift yüzeyli PVGB b) Karayolu hattına kurulan çift yüzeyli PVGB [55].

Hollanda'da Ulusal Yol İdaresi, AB fon destekli projeleri ile Uden şehri A50 karayolu üzerine 450 metre uzunluğunda çift yözlü PVGB sistemi inşa etmiştir. Kurulan bariyerlerin 4 metrelik üst kısım çift yözlü panel ile kaplanmıştır. 2020 yılında yayınlanan raporda, PVGB sisteminin ölçülen yıllık güç üretiminin 203 MWh olduğu, bu gücün şehir şebeke sistemine aktarılarak 63 ila 72 tipik Hollanda hanesinin elektrik ihtiyacının karşılandığı ifade edilmiştir. Yapılan tahminlere göre sistemin 30 yıllık ömür boyunca toplam üreteceği elektrik miktarının 5.3 ila 6.0 GWh arasında; önlenecek CO₂ emisyonu miktarının ise 2,520 ila 2,850 ton arasında olması beklenmektedir. Kurulan PVGB sistemine ait görseller Şekil 8’te verilmiştir [56].

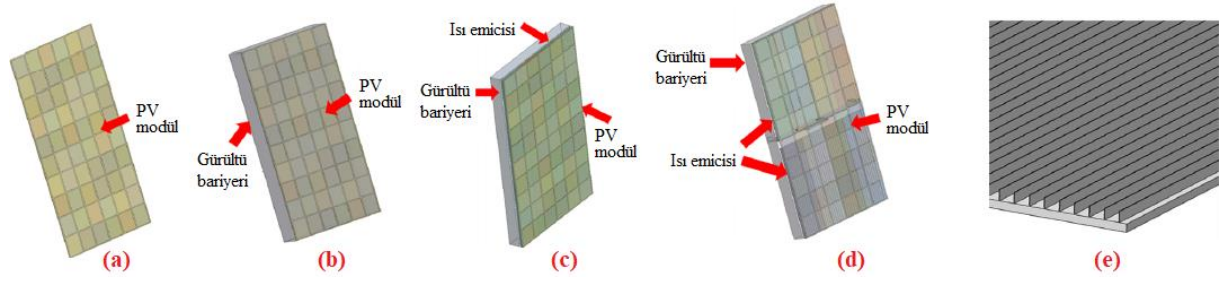


Şekil 8. PVGB sistemi ve invertör kabinleri (B istasyonu) [56].

Hasmaden vd. [57], konvansiyonel PV panelli sabit PVGB sistemler yerine güneş izleme sistemleriyle entegre dinamik PVGB sistemleri kullanımının güç eldesini ve gürültü kontrol verimliliğini nasıl değiştirdiğini belirlemek için PVsyst ve SoundPlan programlarında modelleme çalışması yapmışlardır. Çalışmada farklı güneş özelliklerine sahip İstanbul, Ankara ve Antalya illeri için yıllık optimum sabit eğimli S1 modeli ve altı aylık, mevsimsel ve aylık periyotlarına göre değişken eğim açılarının sırasıyla kullanıldığı S2, S3 ve S4 senaryo modelleri oluşturulmuştur. Analizlere göre aylık açı değişimlerine sahip S4 modeli en yüksek enerji ve gürültü kontrol performansına sahip model olduğu anlaşılmıştır. Dinamik PVGB sistemlerinde sabit PVGB’ye göre en yüksek güç üretim artışı Ankara ili gerçekleşmiş olup; S4 modelinde bu artış oranı %4.46, S3 için %3.86, S2 için %3.64’tür. Maksimum gürültü kontrol performansı Ankara için maruz kalan alıcı noktalarının oranı S1’e kıyasla S4 senaryosunda %88’den %70.1’e düşmüştür. Bu sonuçlar PVGB sistemlerinde güneş izleme sistemlerinin sabit sistemlere göre hem enerji üretimi hem de gürültü azaltımı bakımından avantajlı olduklarını göstermiştir.

Bina gölgelendirmelerinin güç üretimindeki etkisini, 2.5 boyutlu bina modelleri ve saatlik radyasyon verileri kullanılarak dikkate alan bir çalışmada, Çin'in 52 büyük şehrinde PVGB'lerin potansiyel güç üretimi belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için öncelikle gün doğumundan gün batımına kadar olan dönemi kapsayan saatlik bina gölgeleri tahmin edilerek gün içerisinde gölgelenen yol gürültü bariyer alanları belirlenmiştir. Ardından, gerçek hava radyasyonunu simüle etmek için saatlik açık gökyüzü radyasyon verileri toplanmış ve bir radyasyon düzeltme modeli kullanılarak düzeltilmiştir. Son olarak ise eğimli yüzey radyasyon tahmin modeli kullanılarak, bina gölgelerinden etkilenen yol gürültü bariyerlerinin toplam PV potansiyeli tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre mevcut bina gölgelerinin genellikle gürültü bariyerlerinin güneş gören alanlarında ortalama %30'luk bir radyasyon kaybına neden olduğu görülmüştür. İncelenen şehirlerde gölgelendirmeler de hesaba katıldığında PVGB'lerin toplam nominal ve yıllık güç üretimi değerlerinin sırasıyla 2.04 GW ve 690.74 GWh olacağı; bu değerlerden yola çıkılarak ise özellikle daha uzun gürültü bariyerlerine sahip büyük şehirlerde PVGB uygulamalarının yaygınlaşması ile kent içi PV güç tüketiminin önemli ölçüde artırılacağı, PV güç aktarım masraflarının düşürülebileceği ve PV güç israfının önlenilebileceği aktarılmıştır [58].

Hwang vd. [59], PVGB'lerinin PV panel sıcaklığının elektriksel performansı üzerindeki etkisinin önemli olduğunu vurgulayarak PVGB sistemlerinde sıcaklık-performans etkisini sayısal analiz yaparak incelemişler ve PVGB'lerin pasif soğutulmasının verim artışı sağladığını göstermişlerdir. Bunun için dört farklı model oluşturulmuştur, bunlar: yalnızca PV paneli, ısı emicisi olmayan PVGB modeli, konvansiyonel ısı emicili PVGB modeli ve araştırmacıların tasarladığı (alüminyum kanatçıklı) yeni tip ısı emicili PVGB modelidir. Tasarımlar Şekil 9'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ısı emicisi olmayan PVGB modelindeki ortalama hücre sıcaklığı, gürültü emici malzemenin düşük termal iletkenliği nedeniyle yalnızca PV panelinden oluşan sisteme kıyasla %42.2 oranında artarak 86.98 °C'den 123.66 °C'ye yükselmiştir. Tasarlanan ısı emici konfigürasyonu kullanıldığında ise en iyi performans değerleri elde edilerek ısı emicisi olmayan PVGB modeline kıyasla ortalama hücre sıcaklığı %42.7 oranında azalarak 123.66 °C'den 70.90 °C'ye inmiştir. Test edilen PVGB'lerdeki PV'lerin elektriksel performansı analizlerine göre ise tasarlanan ısı emici konfigürasyonuna sahip PVGB'deki maksimum çıkış gücünün ve voltajın, ısı emicisi olmayan PVGB modeline kıyasla sırasıyla %26.6 ve %19.0 oranında arttığını gözlemlenmiştir.



Şekil 9. PV Paneli ve farklı PVGB tasarımları: **a)** PV panel **b)** PVGB **c)** Konvansiyonel ısı emicili PVGB **d)** Tasarlanan ısı emicili PVGB **e)** Tasarlanan ısı emicisi [59].

Zhank vd. [60], PVGB tarafından üretilen gücün kentsel enerji ağlarına verimli bir şekilde entegrasyonu için depolanan enerjinin elektrikli araç şarj istasyonlarında kullanılabilirliğini farklı senaryolar oluşturarak incelemiştir. Çin'in Guangzhou kenti vaka çalışmasında, PVGB'lerin araştırma süresi boyunca elektrikli araç şarj istasyonları toplam güç talebinin %5'ine kadarını destekleyebildiği görülmüştür. PVGB-Enerji Depolama-Şarj İstasyonu entegre sistemlerinin gelecekteki kullanım senaryosunda ise 125 eşleşen elektrikli araç şarj istasyonu güç taleplerinin (1,419 MWh) en az %30'unun PVGB'ler tarafından karşılanabileceğini öngörülmüştür. Bu çalışma ile birlikte araştırmacılar, PVGB-Enerji Depolama-Elektrikli Araç Şarj İstasyonu entegre sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarının kentsel enerji ağlarına dahil edilmesi için pratik bir çözüm olduğunu ortaya koymuş ve bu sistemlerin elektrikli araç talebinin yüksek olduğu ve PVGB güç üretim sistemlerine sahip diğer şehirlerde de uygulanmasını önermişlerdir.

Benzer bir çalışmada Li vd. [61], PV-Enerji Depolama-Şarj İstasyonu sistemleri sayesinde PV tarafından üretilen enerjide yaşanan kaybın (özellikle transfer aşamasında) asgari seviyeye indirgeneceği, ayrıca bu sistemlerin elektrikli araç sayısının artışıyla kurulacak yeni şarj istasyonlarının ana şebeke üzerindeki baskısını azaltacağını belirtmişlerdir.

Bu bölümde incelenen çalışmaların temel verileri ve öne çıkan yönleri Tablo 1'de özetlenerek sunulmuştur. İncelenen çalışmalar, gürültü kirliliğini azaltan PVGB sistemlerinin hem sürdürülebilir enerji üretiminde hem de bu enerjinin son kullanıcıya yüksek verimde ulaştırılabilirliğinde oldukça büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Gün geçtikçe gelişen PV teknolojisi ile bu potansiyelin daha da artacağı öngörülmektedir. Bunun yanında PVGB uygulamalarında kullanılan PV teknolojisinin yalnızca enerji dönüşüm verim ve kapasitelerine göre değil, farklı saha ve iklim koşullarında uygulanabilirliklerine, mevcut sistemlere entegre edilebilirliklerine, yatırım maliyetlerine, bakım gerekliliklerine vb. parametrelere göre tercih edilmesinin önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 1. PVGB sistemlerinin uygulama alanları ve literatürde incelenen çalışmalar.

Uygulanan Alan	PV teknolojisi	Güç Üretim Değeri	Vurgulanan Sonuç	Referans
Karayolu (Çin-Nanjing)	Konvansiyonel, 1x1m ebatlarında, 200 W nominal güç çıkışı	Mevcut 14.26 MW Potansiyel 57.24 MW	Mevcut karayolu gürültü bariyerlerinin PVGB’ler için büyük bir potansiyel alan olduğu; yeni gürültü bariyeri inşasında ise PVGB sistemleri dikkate alınarak planlama yapılması gerekliliği belirtilmiştir.	[47]
Karayolu (ABD-Kaliforniya)	İnce Film	7-9 GW (≈50000 hanenin elektrik ihtiyacı)	Mevcut eyaletteki gürültü bariyerleri üzerine kurulacak PVGB sistemlerinin gücünün, büyük güneş çiftliklerinin kurulu güç kapasitelerine benzer olduğu ve PVGB sistemlerinin, GES saha/arazi ihtiyacını minimize ettiği vurgulanmıştır.	[36]
Karayolu (Çin-Kunming)	Amorf silikon	Yıllık asgari 16 milyon kWh	Kurulacak PVGB’lerin, kent içi karayolu kaynaklı gürültü konforsuzluğunu iyileştireceği, bunun yanında üretilen elektrik ile yol yönetim departmanlarının ekonomik yükünün azaltılabileceğine dikkat çekilmiştir.	[48]
Metro hattı (Çin)	Amorf silikon	Yıllık 5000 kWh	PVGB sistem maliyetlerinin geleneksel PV güç üretim sistem maliyetlerine kıyasla en az %10 kadar daha az olduğu; sistemin geri ödeme süresinin ise ortalama 5.4 yıl olacağı öngörülmüştür.	[49]
-	-	-	Aynı ortam koşulları ve PV teknolojisi kullanımında en verimli PVGB sistem konfigürasyonlarının T şeklindeki ve 60° eğimli yarı örtük tasarım olduğu belirtilmiştir.	[50]
-	Çift yüzlü (bifacial) PV panel	-	Karayolu yön ve doğrultusunun değişken olmasından dolayı optimum PV panel yönü ve eğim açısının belirlenmesinin çok zor olduğu; en iyi çözümün PVGB sistemlerinde çift yüzlü PV panel konulması olduğu ifade edilmiştir.	[51]
-	Çift yüzlü PV panel	-	Kuzey-güney hizalı yollardaki gürültü bariyeri destek yapıları gölgelerinin PV panel verimini düşürdüğü tespit edilmiş, PVGB tasarımında taşıyıcı aksam/destek yapılarının yolun konumuna göre en iyi şekilde planlanması gerektiği vurgulanmıştır.	[52]
Kent içi gürültü bariyerleri (Phoenix, Seattle, Tampa ve Denver, ABD)	-	-	Simülasyon çalışmalarında dört farklı PVGB konfigürasyonu içerisinde enerji, ekonomik ve çevresel etkileri açısından optimum tasarımın düşey eğimli PVGB olduğu bulunmuştur.	[53]
Jakarta, Dubai ve Amsterdam	Çift yüzlü PV panel	-	Ekvatora yakın bölgelerde doğu veya batıya yönlendirilmiş, daha kuzey bölgelerde ise ön tarafı güneye bakan PVGB’lerden daha yüksek verim elde edilebileceği tespit edilmiştir.	[54]
Karayolu ve demiryolu (İsviçre)	Çift yüzlü PV panel	Karayolu 5.96 kW Demiryolu 7.25 kW	Çift yüzlü panellerin mevcut ve geleneksel yapıdaki PVGB sistemlerine uygulanmasıyla, geleneksel panellerde sabah ve öğleden sonra ulaşılabilen yüksek panel veriminin neredeyse tüm gün boyunca elde edilebileceği, ayrıca gün içerisinde stabil enerji üretimiyle depolama ihtiyacının azalacağı ifade edilmiştir.	[55]
Karayolu (Uden, Hollanda)	Çift yüzlü PV panel	Yıllık 203 MWh	PVGB sistemlerinin 30 yıllık ömürleri boyunca üreteceği elektrik miktarının 5.3 ila 6.0 GWh arasında; önleyecekleri CO ₂ emisyonu miktarının ise 2,520 ila 2,850 ton arasında olacağı öngörülmüştür.	[56]
Karayolu (İstanbul, Ankara ve Antalya, Türkiye)	Güneş Takip Sistemli PV panel	-	PVGB sistemlerinde güneş izleme sistemlerinin sabit sistemlere göre hem enerji üretimi hem de gürültü azaltımı bakımından avantajlı oldukları ifade edilmiştir.	[57]

Tablo 1. (devamı)

Karayolu (Çin)	-	-	Bina gölgelerinin kent içi PVGB’lerde ortalama %30’luk bir radyasyon kaybına neden olduğu, bu nedenle tasarım planlama aşamasında gölgelendirme faktörünün de göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır.	[58]
-	Isı emicili PV paneller	-	Tasarlanan ısı emicili PVGB’lerdeki maksimum çıkış gücünün ve voltajın, ısı emicisi olmayan PVGB modeline kıyasla sırasıyla %26.6 ve %19.0 oranında arttığını gözlemlenmiştir.	[59]
Karayolu (Guangzhou, Çin)	PVGB-Enerji Depolama-Şarj İstasyonu entegre sistemleri	Minimum 425 MWh	PVGB-Enerji Depolama-Elektrikli Araç Şarj İstasyonu entegre sistemlerinin, yenilenebilir enerji kaynaklarının kentsel enerji ağlarına dahil edilmesi için pratik bir çözüm olduğu belirtilmiş. Bu sistemlerin özellikle elektrikli araç talebinin yüksek olduğu ve PVGB sistemlerine sahip şehirlerde yaygınlaşması gerektiği ifade edilmiştir.	[60]
-	PVGB-Enerji Depolama-Şarj İstasyonu entegre sistemleri	-	Bu entegre sistemler ile PV paneller ile üretilen enerjinin özellikle transfer kayıplarının azalacağı ve PVGB sistemine bağlı yeni kurulacak yeni şarj istasyonlarının ana şebeke üzerindeki baskısının hafifletileceği belirtmiştir.	[61]
Karayolu (ABD)	-	-	PVGB sistemlerinin finansal uygulanabilirliğinin büyük ölçüde PV panellerinin ve elektriğin güncel fiyatlarına, bunun yanında yenilenebilir enerji için hükümet teşviklerine bağlı olduğunun altı çizilmiştir.	[46]

4. PVGB SİSTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde PVGB sistemlerinin teknolojik, ekonomik ve çevresel olarak sağladığı avantajlardan ve bu sistemlerin tasarlanırken dikkat edilmesi gereken hususlardan bahsedilmiştir.

4.1. PVGB Kullanımının Sağladığı Avantajlar

PVGB kullanımının sağladığı avantajlar, aşağıda sıralanan maddeler halinde özetlenebilir:

- PVGB’lerin üreteceği yeşil enerji sayesinde kent içi sera ve kirletici emisyon salınımında azaltım sağlanabilir, kentsel ısı adası etkisi hafifletilebilir.
- PVGB’lerde arazi kaynaklı maliyet bulunmadığından, ayrıca inşası ve bakımı daha kolay olduğundan konvansiyonel GES’lere göre ilk kurulum ve gider maliyetleri düşürülebilir.
- PVGB’ler ek araziye ihtiyaç duymadığı için gıda üretiminde herhangi bir olumsuz etki yaratmaz, sürdürülebilir arazi yönetimine katkıda bulunabilir.
- PVGB’ler dağıtılmış PV sistemleri olarak kalabalık metropol alanlarında kullanılabilir, böylece kent içi şebeke yükü hafifleterek şebeke altyapı maliyeti ve elektrik iletimi kaynaklı güç kaybı düşürülebilir.
- PVGB’lerin ürettiği elektrikten elde edilen finansman kaynağı yeni PVGB’lerin kurulmasında teşvik sağlayabilir, bu sayede trafik kaynaklı gürültü miktarı azaltılarak yaşam kalitesi iyileştirilebilir.
- Kentsel alanların yeniden donatılması veya yenilenmesi düşünüldüğünde PVGB’ler estetiği iyileştirir ve restorasyonda önemli ekonomik faydalar sağlayabilir.
- PVGB’ler elektrikli araç şarj istasyonlarının toplam güç talebini ve altyapı giderlerini azaltarak elektrik üretim maliyetini düşürülebilir.
- PVGB’ler özellikle şebekeden uzak özellikle uzun yol boylarına kurulduğunda kent merkezi dışındaki şebekeden bağımsız şarj istasyonlarının güç ihtiyacını karşılayabilir, böylece dolaylı olarak elektrikli araç kullanımının yaygınlaşmasına katkıda bulunabilir.

4.2. PVGB Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Parametreler

PVGB kurulumlarında, yer koşullarına (yol güzergahı, eğimi iklim şartları vb.) uygun bir tasarımda ya da mevcut gürültü bariyerinin revizesinde dikkat edilmesi gereken tasarım parametreleri aşağıda maddeler halinde sıralanabilir:

- PVGB’lerde elektrik üretimini artırmak için optimum yönelim ve eğim açılarını sağlayan yapısal konfigürasyonlar belirlenmelidir.
- Farklı eğim ve yönelime sahip yollar boyunca kurulan PVGB’lerde, tek yüzlü (monofacial) panellere göre gün doğumundan gün batımına kadar genellikle daha çok ışın yakalayabilen çift yüzlü (bifacial) PV paneller tercih edilmelidir.
- PVGB fizibilite çalışmalarında ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da verim artışı sağlayan üçüncü nesil PV panel ve güneş takip sistemlerinin kullanımı dikkate alınmalıdır.
- PV sistemlerinin artan sıcaklıklarda verimleri düşmektedir. Verim düşüşünü asgari düzeye indirmek için PV panel ve bariyer bileşenleri arasında ısı emici sistemler kullanılmalıdır.
- Özellikle sıcak ve nemli iklim bölgelerinde inşa edilecek PVGB’lerde konvansiyonel bir PV sistemi kurulacaksa, yaygın kullanılan poli-kristal (p-Si) panellere kıyasla daha uygun sıcaklık katsayısına sahip [36], [62], dolayısıyla sıcaklık ve nemden daha az etkilenen ince film teknolojisi tercih edilmelidir.
- PVGB yer seçiminde bina ve diğer gölgelendirme unsurları göz önüne bulundurulmalıdır, ayrıca bariyer çerçeve tasarımında gölgelenme etkisi de hesaba katılmalıdır.
- PVGB’lerinin kurulumlarında sürüş emniyetini bozmamak için sürücülerin görüş açılarını ve dikkatlerini bozmayacak şekilde uygun yoldan uzaklık mesafesi ve eğim açısı belirlenmelidir.
- Şebeke yükünün hafifletilmesi ve altyapı giderlerinin minimize edilmesi için PVGB’lerde üretilen elektriğin beslediği sistemlerin öncelikli olarak depolama-şarj istasyonu entegre sistemleri gibi şebekeden bağımsız ve yeni kurulacak sistemler olması hedeflenmelidir.

5. SONUÇ

Artan enerji ihtiyacının karşılanması, küresel ısınma ve çevre kirliliği ile mücadelede sera ve kirletici gaz emisyon salınımlarının düşürülmesi, enerjide dışa bağımlılığın ve enerji üretim maliyetlerinin azaltılması, kent içi şebeke yükünün hafifletilmesi ve enerji iletiminde kayıpların en aza indirgenebilmesi için kentsel bölgelerde yenilenebilir enerji üretimi büyük önem arz etmektedir. Son yıllarda, kentsel yenilenebilir enerji üretimi için kurulacak PV sistemlerinin mevcut ve yapılması planlanan gürültü bariyerlerine entegre olarak tasarlanması, dünya genelinde üzerinde oldukça yoğunlaşılan çalışma konularından olmuştur. Oluşturulan PVGB

sistemleri ile ulaşım kaynaklı gürültüde azaltım sağlanıp yaşam konforu artırılırken, yerel enerji ihtiyacına ve üretilen enerjinin verimli kullanımına da katkı sağlanmış olur. Ülkemizde, PVGB sistemlerinin yerel/bölgesel üretim potansiyellerinin belirlenmesi ve ilgili lokasyonlara ait iklim ve coğrafi koşullarına uygun yapısal konfigürasyonların belirlenmesi, eksik kalınan çalışma konularındandır, bu eksikliğin giderilmesi için bilimsel araştırmaların artırılması gerekmektedir. AB karayolu trafiğinde izin verilen gürültü sınırlarına ilişkin standartlara uyum sağlamak ve Türkiye’deki gürültü kirliliğini azaltmak için inşa edilecek gürültü bariyerlerinde PVGB sistemlerinin tercih edilmesi ve bu sistemlerin yaygınlaştırılması, sürdürülebilir ve çevreci kent planlama anlayışının gündemindeki önemli konular arasında bulunmalı ve ilgili teşvik programları hazırlanmalıdır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Çalışma, araştırma ve yayın etiğine uygundur.

KAYNAKLAR

- [1] J. Curtin, C. McInerney, B. Ó Gallachóir, C. Hickey, P. Deane, and P. Deeney, “Quantifying stranding risk for fossil fuel assets and implications for renewable energy investment: A review of the literature,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 116, p. 109402, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2019.109402.
- [2] X. Yang, J. Pang, F. Teng, R. Gong, and C. Springer, “The environmental co-benefit and economic impact of China’s low-carbon pathways: Evidence from linking bottom-up and top-down models,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 136, p. 110438, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2020.110438.
- [3] B. Gümüş and A. Buluş, “Uluslararası çevre sorunları ve William Nordhaus’un çevre ekonomisine katkıları,” *Alanya Akademik Bakış*, vol. 4, no. 3, pp. 1015–1031, Sep. 2020, doi: 10.29023/ALANYAAKADEMİK.686110.
- [4] K. Kaya, M. C. Şenel, and E. Koç, “Dünyada ve Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi,” *NWSA Academic Journals*, vol. 13, no. 3, pp. 219–234, Jul. 2018, doi: 10.12739/nwsa.2018.13.3.2a0152.

- [5] IRENA, “Renewable energy statistics 2023,” Jul. 2023. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Renewable-energy-statistics-2023>
- [6] S. A. Sarkodie, S. Adams, and T. Leirvik, “Foreign direct investment and renewable energy in climate change mitigation: Does governance matter?,” *J Clean Prod*, vol. 263, p. 121262, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.121262.
- [7] H. Dai, X. Xie, Y. Xie, J. Liu, and T. Masui, “Green growth: The economic impacts of large-scale renewable energy development in China,” *Appl Energy*, vol. 162, pp. 435–449, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.APENERGY.2015.10.049.
- [8] K. K. Phani Kumar, S. R. Atchuta, M. Shiva Prasad, H. C. Barshilia, and S. Sakthivel, “Review on selective absorber coatings: A catalyst for enhanced solar energy conversion efficiency,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 277, p. 113080, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2024.113080.
- [9] N. Kan Kaynar, “Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin Amasya ilindeki potansiyeli,” *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, vol. 2020, no. 2, pp. 48–54, 2016.
- [10] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Türkiye Ulusal Enerji Planı 2022,” 2022. Accessed: Sep. 24, 2024. [Online]. Available: https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf
- [11] B. Sun, S. Kolesnikov, A. Goldstein, and G. Chan, “A dynamic approach for identifying technological breakthroughs with an application in solar photovoltaics,” *Technol Forecast Soc Change*, vol. 165, p. 120534, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.TECHFORE.2020.120534.
- [12] D. Chen, Q. Peng, J. Lu, P. Huang, Y. Song, and F. Peng, “Classification and segmentation of five photovoltaic types based on instance segmentation for generating more refined photovoltaic data,” *Appl Energy*, vol. 376, p. 124296, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.APENERGY.2024.124296.

- [13] E. Bıçakçı, C. Balabanlı, and E. Acar, “Tarım ve mera alanlarında rüzgâr ve güneş enerji sistemleri kurulması hakkında değerlendirmeler,” *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 13, no. 1, pp. 700–712, Mar. 2023, doi: 10.21597/jist.1180929.
- [14] L. Cenk Kumruoğlu, and S. B. Ateş, “Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyeli ve İskenderun için örnek üretim projeksiyonu,” *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 37(1), 293-305. 2022, doi: 10.21605/cukurovaumfd.1095104
- [15] S. Uyar, Ö. Ü. A. Najafi, “Çatı üstü termal ve elektrik enerjisi üretiminin ekonomik ve çevresel getirilerinin araştırılarak optimal PV-T tasarımı” *EMO Bilimsel Dergi*, 11(Özel Sayı), 21-30, 2021.
- [16] J. Yuan, Y. Weng, and C. W. Tan, “Determining maximum hosting capacity for PV systems in distribution grids,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 135, p. 107342, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.IJEPES.2021.107342.
- [17] J. An and T. Hong, “Energy harvesting using rooftops in urban areas: Estimating the electricity generation potential of PV and wind turbines considering the surrounding environment,” *Energy Build*, vol. 323, p. 114807, Nov. 2024, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2024.114807.
- [18] P. H. T. Zannin and D. Q. De Sant’Ana, “Noise mapping at different stages of a freeway redevelopment project – A case study in Brazil,” *Applied Acoustics*, vol. 72, no. 8, pp. 479–486, Jul. 2011, doi: 10.1016/J.APACOUST.2010.09.014.
- [19] *Çevresel gürültünün değerlendirilmesi ve yönetimi yönetmeliği*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2010. Accessed: Oct. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/06/20100604-5.htm>
- [20] A. Paşaoğlu, “Eyüp Hasdal-Kemberburgaz yolu Göktürk mevkiinde otoyoldan kaynaklanan çevresel gürültünün değerlendirilmesi, gürültü haritasının hazırlanması ve gürültü perdesi modeli,” Master , Bahçeşehir Üniversitesi , İstanbul, 2013.
- [21] C. Jiradecha and P. Singhatiraj, “The study for installing noise barrier on highway route no.9,” in *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, May 2018. doi: 10.1051/matecconf/201816901012.

- [22] A. Pultznerová and J. Grenčík, “Investigation of the effect of a noise barrier on a railway track in the Kysuce region,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 313, p. 00035, 2020, doi: 10.1051/mateconf/202031300035.
- [23] E. Murphy and E. A. King, *Environmental Noise Pollution*. Elsevier, 2014. doi: 10.1016/C2012-0-13587-0.
- [24] D. Liu, C. Wang, J. Gonzalez-Libreros, Y. Tu, L. Elfgren, and G. Sas, “A review on aerodynamic load and dynamic behavior of railway noise barriers when high-speed trains pass,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 239, p. 105458, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.JWEIA.2023.105458.
- [25] H. M. E. Miedema and H. Vos, “Exposure-response relationships for transportation noise,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104, no. 6, pp. 3432–3445, 1998, doi: 10.1121/1.423927.
- [26] G. Licitra, P. Gagliardi, L. Fredianelli, and D. Simonetti, “Noise mitigation action plan of Pisa civil and military airport and its effects on people exposure,” *Applied Acoustics*, vol. 84, pp. 25–36, Oct. 2014, doi: 10.1016/J.APACOUST.2014.02.020.
- [27] Sandy Brown, “Gatwick Airport acoustic wall.” Accessed: Sep. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.sandybrown.com/project/?Co=SBA&ID=141>
- [28] E. Demir and S. Uçar, “Trafik akışının yollardaki fotovoltaik paneller ile elektrik üretimine etkisi,” *Kent Akademisi*, vol. 14, no. 2, pp. 335–346, Jun. 2021, doi: 10.35674/kent.873920.
- [29] S. Kim, J. An, H. Choi, and T. Hong, “Assessment the technical and economic performance of a window-integrated PV system using third-generation PV panels,” *Energy Build*, vol. 286, May 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.112978.
- [30] F. Emiroğlu, A. Aybek, and H. Kuzu, “İki farklı fotovoltaik (PV) enerji sisteminin farklı hayvancılık işletmelerinde kullanımının değerlendirilmesi,” *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, vol. 26, no. 3, pp. 808–820, Dec. 2021, doi: 10.37908/mkutbd.957647.

- [31] T.C. Enerji Bakanlığı ve Tabii Kaynakları Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, “Güneş Enerjisi.” Accessed: Oct. 14, 2024. [Online]. Available: <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes>
- [32] T. Huld and A. M. Gracia Amillo, “Estimating PV module performance over large geographical regions: The role of irradiance, air temperature, wind speed and solar spectrum,” *Energies (Basel)*, vol. 8, no. 6, pp. 5159–5181, 2015, doi: 10.3390/en8065159.
- [33] A. Etcı and A. Bilhan, “PVSyst ile Konya ilinde sabit ve çift eksenli güneş takip sisteminin modellenmesi,” *European Journal of Science and Technology*, Jan. 2022, doi: 10.31590/ejosat.1039800.
- [34] L. Sun, J. Bai, R. K. Pachauri, and S. Wang, “A horizontal single-axis tracking bracket with an adjustable tilt angle and its adaptive real-time tracking system for bifacial PV modules,” *Renew Energy*, vol. 221, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2023.119762.
- [35] S. Güneş and R. Hacıoğlu, “Enerji gereksinimlerine dayalı fotovoltaik güneş enerji santrali analizi ve tasarımı,” *Karaelmas Fen ve Müh. Derg.*, vol. 14, no. 2, pp. 97–110, 2024, doi: 10.7212/karaelmasfen.1447542.
- [36] S. R. Wadhawan and J. M. Pearce, “Power and energy potential of mass-scale photovoltaic noise barrier deployment: A case study for the U.S,” 2017, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2017.05.223.
- [37] World Bank Group, “Urban population (% of total population).” Accessed: Oct. 08, 2024. [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS>
- [38] Ş. ve İ. D. B. T.C. Çevre, “Kentsel- kırsal nüfus oranı.” Accessed: Oct. 08, 2024. [Online]. Available: <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/kentsel---kirsal-nufus-orani-i-85670>
- [39] D. M. Kammen and D. A. Sunter, “City-integrated renewable energy for urban sustainability.” [Online]. Available: <http://science.sciencemag.org/>
- [40] K. Panicker, P. Anand, and A. George, “Assessment of building energy performance integrated with solar PV: Towards a net zero energy residential campus in India,” *Energy Build*, vol. 281, p. 112736, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2022.112736.

- [41] E. Bazdar, F. Nasiri, and F. Haghghat, “Resilience-centered optimal sizing and scheduling of a building-integrated PV-based energy system with hybrid adiabatic-compressed air energy storage and battery systems,” *Energy*, vol. 308, p. 132836, Nov. 2024, doi: 10.1016/J.ENERGY.2024.132836.
- [42] E. De Schepper, S. Van Passel, J. Manca, and T. Thewys, “Combining photovoltaics and sound barriers - A feasibility study,” *Renew Energy*, vol. 46, pp. 297–303, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.renene.2012.03.022.
- [43] A. M. Abdelshafy, O. Samir, A. Elnozahy, and A. F. M. Ali, “Innovative energy management strategy of battery and fuel cell buses charging station,” *Energy Convers Manag*, vol. 315, p. 118815, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2024.118815.
- [44] V. Kumar, V. R. Teja, M. Singh, and S. Mishra, “PV Based off-grid charging station for electric vehicle,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 4, pp. 276–281, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.IFACOL.2019.08.211.
- [45] M. Nazari-Heris, S. Asadi, and B. Mohammadi-Ivatloo, “Review on techno-socio-economic studies of electric vehicles in electrical energy systems,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 10, p. 100782, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.PRIME.2024.100782.
- [46] “Highway Renewable Energy: Photovoltaic Noise Barriers,” Washington, Aug. 2017. Accessed: Sep. 30, 2024. [Online]. Available: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/32521/dot_32521_DS1.pdf
- [47] T. Zhong *et al.*, “Assessment of solar photovoltaic potentials on urban noise barriers using street-view imagery,” *Renew Energy*, vol. 168, pp. 181–194, May 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.12.044.
- [48] Y. Wang, “Application of solar noise barrier power generation system envisaged on urban elevated roads,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1549/5/052118.
- [49] M. Gu *et al.*, “Estimation of environmental effect of PVNB installed along a metro line in China,” *Renew Energy*, vol. 45, pp. 237–244, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.renene.2012.02.021.

- [50] A. Vallati, R. De Lieto Vollaro, A. Tallini, and L. Cedola, “Photovoltaics noise barrier: Acoustic and energetic study,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2015, pp. 716–723. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.797.
- [51] I. Shoukry, J. Libal, R. Kopecek, E. Wefringhaus, and J. Werner, “Modelling of bifacial gain for stand-alone and in-field installed bifacial PV modules,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, Aug. 2016, pp. 600–608. doi: 10.1016/j.egypro.2016.07.025.
- [52] Jong M, Donker M, Verkuilen S, and Folkerts W, “Self-shading in bifacial photovoltaic noise barriers,” in *Proceedings of the 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Munich, 2016, pp. 20–24.
- [53] L. Soares and H. Wang, “Sustainability impact of photovoltaic noise barriers with different design configurations,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 116, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.trd.2023.103624.
- [54] G. J. Faturrochman, M. M. de Jong, R. Santbergen, W. Folkerts, M. Zeman, and A. H. M. Smets, “Maximizing annual yield of bifacial photovoltaic noise barriers,” *Solar Energy*, vol. 162, pp. 300–305, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.01.001.
- [55] T. Nordmann, T. Vontobel, and • L Clavadetscher, “5 Years of practical experience in development and improvement of bifacial photovoltaic noise barriers along highways and railway lines in SWITZERLAND.” [Online]. Available: www.tnc.ch
- [56] “Solar Highways,” 2017. Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.solarhighways.eu/en>
- [57] F. Hasmaden, N. Yüğrük Akdağ, and G. Zorer Gedik, “Performance evaluation of fixed and single-axis sun tracker photovoltaic noise barrier: a case study for Turkey,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 21, no. 14, pp. 9219–9236, Oct. 2024, doi: 10.1007/s13762-024-05538-3.
- [58] K. Zhang *et al.*, “Power generation assessment of photovoltaic noise barriers across 52 major Chinese cities,” *Appl Energy*, vol. 361, May 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.122839.

- [59] H. S. Hwang, S. Yun, J. C. Kim, and D. Lee, “Numerical analysis on the cooling and electrical performances of photovoltaic noise barrier,” *Appl Therm Eng*, vol. 235, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121361.
- [60] K. Zhang *et al.*, “Integrating photovoltaic noise barriers and electric vehicle charging stations for sustainable city transportation,” *Sustain Cities Soc*, vol. 100, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.scs.2023.104996.
- [61] N. Li, Z. Su, H. Jerbi, R. Abbassi, M. Latifi, and N. Furukawa, “Energy management and optimized operation of renewable sources and electric vehicles based on microgrid using hybrid gravitational search and pattern search algorithm,” *Sustain Cities Soc*, vol. 75, p. 103279, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.SCS.2021.103279.
- [62] P. Kamkird, N. Ketjoy, W. Rakwichian, and S. Sukchai, “Investigation on temperature coefficients of three types photovoltaic module technologies under Thailand operating condition,” in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2012, pp. 376–383. doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.1282.