

## Gıda ve Enerji Üretimini Birleştiren Arazilerde Verimlilik Analizi: Komşuköy Agrivoltaik Çiftlik Modeli

Bilge Şentürk<sup>1,2</sup>, Duygu Kuzyaka<sup>1</sup>, Ömer Yalçın<sup>1</sup>, Uğur M. Akyıldız<sup>3</sup>, Murat Eröz<sup>4</sup>, Talat Özden<sup>1,5</sup>

### ÖZET

**Amaç:** Enerjisa Üretim ortaklığıyla İstanbul, Türkiye’de kurulan ilk yükseltilmiş sabit panel sistemine sahip Komşuköy Agrivoltaik Çiftlik sahasında gerçekleştirilen tarım ve enerji üretim faaliyetlerini inceleyen bu çalışmanın temel amacı, arazinin ikili kullanımı (elektrik ve biyokütle üretimi) sonucunda arazi verimliliğindeki değişimi ortaya koymaktır.

**Yöntem:** Arazi verimliliğinin hesaplamasında esas alınan yöntem “arazi eş değer oranı (LER)”dır.

**Bulgular:** Agrivoltaik sistemde arazi eşdeğer oranının (LER) farklı bitki türlerine göre 1,33 ve 3,30 arasında değiştiği; buna göre agrivoltaik sistemlerin, gıda ve elektrik üretiminin ayrı arazilerde gerçekleştirildiği durumlara göre %33-%230 arasında daha az arazi varlığına ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir.

**Özgünlük:** Komşuköy Agrivoltaik Çiftlik, Türkiye’de sabit çift-yüzlü panel sistemi ile tasarlanmış öncül bir agrivoltaik uygulama alanıdır. Ülkemizde agrivoltaik sistemlerin performansını verimlilik yaklaşımı ile değerlendiren ilk araştırma olarak diğer pilot çalışmalarından temel farkı; biyoçeşitlilik ve ilaçsız tarıma yönelik sürdürülebilir tarım tekniklerine dayanan bir sistem üzerine odaklanmasıdır. Literatür, çoğunlukla konvensiyonel tarım tekniklerine ve monokültür ürünlere odaklanmış olup bu çalışma, sürdürülebilir bir çiftlik modeli örneği sunmaktadır. Ayrıca önceki agrivoltaik araştırmalar arasında henüz çalışılmamış bir ürün grubu olan tıbbi ve aromatik bitki örneğinin incelenmesi sonucunda bu ürün grubunun yetiştiriciliği hakkında literatüre önemli bir katkı sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Sürdürülebilir Tarım, Yenilenebilir Enerji, Agrivoltaik Sistemler (TarımGES), Arazi Verimliliği, Arazi Eşdeğer Oranı (LER).

**JEL Kodları:** C61, D,61, O13, Q1.

## The Analysis on Dual Land Use Efficiency: Integrating Food and Energy Production in A Case Study of the Komşuköy Agrivoltaic Farm Model

### ABSTRACT

**Purpose:** The primary objective of this study is to elucidate the changes in land productivity resulting from the dual use of land (both electricity and biomass production) in the Komşuköy Agrivoltaic farm which is the first site with an elevated fixed-panel system in Istanbul, Türkiye, established in partnership with Enerjisa.

**Methodology:** The method employed in calculating land productivity is the "Land Equivalent Ratio (LER)".

**Findings:** The land equivalent ratio (LER) in the Agrivoltaic system varies between 1,33 and 3,30 for different plant species. Accordingly, Agrivoltaic systems indicate a need for 33% to 230% less land compared to situations where food and electricity production are carried out on separate plots.

**Originality:** Komşuköy Agrivoltaic Farm is the first Agrivoltaic implementation designed with a fixed dual-sided panel system in Türkiye. Distinguishing itself from other pilot studies, this research is the preliminary one both for evaluating the performance of Agrivoltaic systems using a productivity approach in Türkiye and for focusing on biodiversity, natural inputs, and sustainable farming techniques for pesticide-free agriculture while most studies in the worldwide literature concentrate on conventional farming techniques and monoculture products, this research contributes as an example of a sustainable farm model, specifically for providing a significant contribution on the cultivation of medicinal and aromatic plants.

**Keywords:** Sustainable Agriculture, Renewable Energy, Agrivoltaic Systems (AgriPV), Land Productivity, Land Equivalent Ratio (LER).

**JEL Codes:** C61, D,61, O13, Q1

<sup>1</sup> ODTÜ-GÜNAM, Modül Teknolojileri Birimi, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> ODTÜ, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İktisat Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup> Komşuköy Çiftliği, Beykoz, İstanbul, Türkiye

<sup>4</sup> Enerjisa Üretim, Varlık Yönetimi ve Sürdürülebilirlik Birimi, Ataşehir, İstanbul, Türkiye

<sup>5</sup> Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Bölümü, Gümüşhane, Türkiye.

Sorumlu Yazar-Corresponding Author: Bilge Şentürk, bilge.senturk@odtugunam.org

DOI: 10.51551/verimlilik.1430853

Araştırma Makalesi / Research Article | Geliş / Submitted: 06.02.2024 | Kabul / Accepted: 04.04.2024

Atıf/Cite: Şentürk B., Kuzkaya, D., Yalçın, Ö., Akyıldız, U.M., Eröz, M. ve Özden, T. (2024). "Gıda ve Enerji Üretimini Birleştiren Arazilerde Verimlilik Analizi: Komşuköy Agrivoltaik Çiftlik Modeli", *Verimlilik Dergisi*, 58(3), 445-460.

**EXTENDED ABSTRACT**

This study focuses on addressing the increasing demand for both population and energy, predicting a growing need for more efficient land use. Agrivoltaic systems (AgriPV), designed to respond to this demand, emerge as a novel approach that could reconcile agricultural lands for both food and energy production. Within the scope of this research, horticulture-style agricultural activities conducted in the Komşuköy Agrivoltaic Farm in İstanbul, equipped with the first elevated fixed-panel system established in Türkiye, are examined. The solar PV system is fixed-angle, facing southwest (Azimuth:  $-23^\circ$ ), with panels mounted at a height of 3 meters and tilted at  $21^\circ$ . Panels are spaced 1.2 meters apart with even distribution. Rows of panels, each comprising 4 arrays, are spaced 3 meters apart. The energy production of was estimated using PVsyst software and the yield changes were calculated by measuring the crop amount for 7 different products, blueberry (blue and cargon), rosemary, eggplant, cauliflower, broccoli, pepper (bell, green, kapyra), and cucumber.

As the first agrivoltaic study based on biodiversity-oriented natural farming, commonly known as "pesticide-free agriculture," the primary objective of this article is to reveal the changes in land productivity resulting from the dual use of land (electricity and biomass production). It aims to showcase that, under favorable conditions, agrivoltaic systems can significantly increase land productivity, serving as an effective tool to meet both food security and energy needs. Additionally, the research emphasizes contributions such as supporting small-scale farming economically, enhancing adaptability and resilience to climate change, preserving agricultural areas on the urban fringe, and promoting sustainable agricultural techniques as a crucial agricultural policy instrument. The fundamental method employed in calculating land productivity in the Agrivoltaic field is the "Land Equivalent Ratio (LER), measures the usability of a land by two or more crops or production systems simultaneously. If the LER value is greater than 1, it indicates that the combination is more effective than using the same area for either agriculture or energy production alone.

$$LER = \frac{Y_{agriculture, APV}}{Y_{agriculture, reference}} + \frac{Y_{energy, APV}}{Y_{energy, groundedPV}}$$

The highest yield change was observed in rosemary, with an approximate 2.5-fold increase. Cucumber also showed a significant yield increase of about 90%. Other crops positively affected are blueberry (18% for the blue variety and 10% for the cargon variety) and bell pepper with a 2% increase. The most significant yield decrease was observed in kapyra pepper production, with a 30% reduction, followed by a 25% decrease in eggplant and a 4% decrease in green pepper production. The agrivoltaic system with an installed capacity of 21.4 kWp is estimated to have an annual total production of approximately 30 MWh. On the other hand, a conventional plant designed for the same area is estimated to produce about one-third more than the agrivoltaic system, approximately 48 MWh. Based on these productivity results, the land equivalent ratio (LER) in the Agrivoltaic system varies between 1,33 and 3,30 for different plant species. Accordingly, Agrivoltaic systems indicate a need for 33% to 230% less land compared to situations where food and electricity production are carried out on separate plots.

The findings demonstrate the positive performance of agricultural production activities conducted under an agrivoltaic system in terms of land productivity within a small-scale, sustainable farm model based on pesticide-free agriculture. Moreover, a significant yield increase was observed in the majority of the eight different planted crops. As a previously unstudied class of plants in the literature, the yield increase in rosemary, a medicinal and aromatic plant, was reflected in the land productivity value, showing a notably high LER value compared to previous findings of other agivolctaic researches. In this regard, it is important to conduct more detailed studies (based on agronomic qualities and economic evaluations) on the potential of aromatic plants.

It is also crucial to monitor physiological changes such as soil health, soil nutrient value, plant nutrient value, taste, and quality under the panels, as well as to measure changes in panel efficiency due to synergistic effects arising from agricultural activities (such as the creation of a cooler environment by plants, the impact of mulch covers on light reflection), and to calculate irrigation needs. In future studies, it is necessary to include the relevant areas and also it is important to support the productivity approach in Komşuköy with calculations related to costs and revenues. Furthermore, testing different panel technologies on larger scales will be important for a more rational presentation of agronomic and economic effects. The findings are considered important for supporting sustainable agriculture, particularly in rural and peri-urban areas, in the development of effective public policies for rural development and urbanization, and for guiding renewable energy policies.

## 1. GİRİŞ

İklim değişikliği, nüfus artışı, salgınlar, iktisadi ve siyasal krizlerin etkisiyle küresel gıda güvenliği her geçen gün daha fazla tehdit altına girmektedir. Artan nüfus, tarımsal verimliliğin artırılması yönünde baskı oluşturmakta fakat iklim değişikliği ve mevcut gıda sistemlerinin konvansiyonel tarım yöntemlerine dayanması ekolojik dengede bozulmaya yol açarak verimlilik artışını olumsuz etkilemektedir. Söz konusu sonuçlara göre iklim değişikliğine dair yapılan ölçümler, 1961'den bu yana küresel tarımsal toplam faktör verimliliğinin yaklaşık %21 oranında azaldığını göstermektedir. Bu yavaşlama, küresel çapta son 7 yıllık üretkenlik artışının kaybedilmesi anlamını taşımaktadır (Ortiz-Bobea ve diğerleri, 2021).

Konvansiyonel tarımın kimyasal ilaç, gübre ve fosil yakıtlar gibi çevreye zararlı girdilere dayanması, özellikle toprak besin değerinin düşmesi ve girdi bağımlılığının artması gibi negatif etkiler yaratarak gıda güvenliğini sağlamaya yetecek uzun dönemli verimlilik artışını yavaşlatmakta (Pingali, 2012) ve gıda besin değerlerinde düşüşe yol açabilmektedir (Altieri, 1998; Horrigan ve diğerleri, 2002). Gıda güvenliği ve tarımsal verimlilik arasındaki kritik ilişki, son yıllarda özellikle uluslararası kurumlar düzeyinde kabul gören "sürdürülebilir tarım" ve "küçük çiftçilik" konularının önemini kuvvetlendirmektedir (Rossi, 2022; BM 2023). Uluslararası iklim politikaları ise, mevcut gıda sistemlerinin dönüştürülmesi yönünde ortak bir görüş birliği yaratmakta ve endüstriyel tarım, küresel ısınmaya yol açan üretim sistemlerinden biri olarak kabul edilmekte; bu nedenle çevreye ve insan sağlığına duyarlı tarımsal faaliyetlerin yaygınlaştırılması önemli görülmektedir (FAO, 2019). Sürdürülebilir tarım tekniklerinin önemini yanında, tarımsal faaliyetlerde kullanılan enerjinin fosil yakıt yoğunluğundan çıkabilmesi ve çiftçilerin enerjiye erişim zorluklarının azaltılabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması da gıda güvenliği açısından önemli kabul edilmektedir. Hem çiftlik seviyesindeki artan enerji ihtiyacı hem de makro düzeyde yükselmekte olan enerji talebi, son yıllarda tarımsal arazileri yenilenebilir enerji için kritik bir kesişim noktası haline getirmiştir. Bu nedenlerle nüfus ve enerji talebindeki artış devam ettiği sürece, arazinin daha verimli kullanım gereksiniminin artacağı tahmin edilmektedir (Dinesh ve Pearce, 2016).

Bu çalışmanın konusunu ise, tarımsal arazileri hem gıda hem de enerji üretimi açısından çatışma alanı olmaktan çıkarabilecek yeni bir yaklaşım olan "tarımsal fotovoltaiik sistemler" (uluslararası literatürde kabul gördüğü yaygın ifadeyle "agrivoltaik sistemler") oluşturmaktadır. Agrivoltaik terimi genel olarak güneş ışığının hem fotosentez hem de fotovoltaiik için eş zamanlı kullanımını ifade etmektedir (Trommsdorff ve diğerleri, 2023). Ekili/dikili arazi üzerinde yükseltilmiş fotovoltaiik paneller şeklinde 1981 yılında tasarlanan bu sistemler, arazi kullanımını optimize etmeyi amaçlamaktadır (Goetzberger ve Zastrow, 1982). Uygulamaların hayata geçtiği 2000'li yıllardan itibaren agrivoltaik sistemler üzerine yapılmış çalışmalar, öncelikle arazinin ikili kullanımından doğan verimlilik artışına dikkat çekmiştir (Dupraz ve diğerleri, 2011; Marrou ve diğerleri, 2013; Trommsdorff ve Johanna, 2016; Valle ve diğerleri, 2017). Arazilerin daha verimli kullanımının yanı sıra çiftçilerin gelir çeşitliliğini artırmak, su tüketimini azaltmak, gölgeye toleranslı bitkilerde büyüme için uygun bir mikro iklim oluşturmak ve kırsal bölgelerin elektrik ihtiyaçlarını gidermek, agrivoltaik sistemlerin sağladığı diğer faydalar arasında gösterilebilir (Trommsdorff ve diğerleri, 2023). Bu tür çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğe katkıların yanında buğday ve mısır gibi güneş ışığına fazla ihtiyaç duyan ürünlerde bir miktar verim kaybı olması beklenmektedir. Fakat sebze ve meyveciliğe dayalı tarımda fotovoltaiik panellerin ürün veriminde artışa yol açma potansiyeli (fazla ışımayı engellemesi ya da dolu/don gibi aşırı hava olaylarından koruması) ve büyük tarım makineleri gerektirmemesinden dolayı panellerin çok fazla yükseltilmesine ihtiyaç olmaması bakımından, agrivoltaik sistemler hem agronomik hem de finansal açılardan hortikültür (meyve, sebze ve çiçek yetiştiriciliği) için faydalı görülmektedir (Trommsdorff ve diğerleri, 2023).

Bu çalışma kapsamında ise Türkiye'de kurulan ilk yükseltilmiş sabit panel sistemine sahip Komşuköy Agrivoltaik Üretim Sahası'nda gerçekleştirilen hortikültür tarzı tarımsal faaliyetler incelenmektedir (Şekil 1). Araştırma sayısı ve uygulama alanlarının dünya çapında artırılmasına olan ihtiyaçla birlikte, bu çalışmanın diğer pilot çalışmalarından temel farkı; biyoçeşitlilik, doğal girdiler ve ilaçsız tarıma yönelik sürdürülebilir tarım tekniklerine dayanan bir agrivoltaik sistem üzerine odaklanması ve tarımsal üretimde önemli bir verimlilik artışı sağlanmış olmasıdır. Literatürdeki çalışmalar çoğunlukla konvansiyonel tarım tekniklerine ve monokültür ürünlere odaklanmıştır. Koruyucu tarımsal yönetim tekniklerinin (conservation agricultural management technics) agrivoltaik sistemlerle entegre edilmesinin toprak sağlığı ve ürün verimliliği üzerindeki olumlu etkisine dikkat çeken Time ve diğerleri (2023)'ne ek olarak sürdürülebilir tarım yöntemleri ile entegre edilen çok az sayıda saha çalışması mevcuttur ve bu çalışmalar yalnızca organik tarımı kapsamaktadır (Weselek ve diğerleri, 2021; Trommsdorff ve Johanna, 2016; Trommsdorff ve diğerleri, 2021; Wagner ve diğerleri, 2023). Söz konusu çalışmalar arasında agrivoltaik sistemlerin performansı, çoğunlukla geleneksel arazilere kurulan GES (güneş enerji santralleri) kapasiteleri ve monokültürel tarım ile karşılaştırılmakta olup gerçek kurulum alanlarından elde edilen veriler ile yapılmış çalışma sayısı çok azdır (Tablo 1).

Türkiye’de agrivoltaik sistemler üzerindeki araştırmalar elektrik üretim miktarı (Coşgun, 2021) ve mahsul üzerindeki etkisi (Turan, 2021)’ne yönelik potansiyel katkıları betimleyen çalışmalardan oluşmaktadır. Türkiye’deki çiftçiler üzerine Ağır ve diğerleri’nin gerçekleştirdiği araştırmada yeniliğin kabulüne dönük olumlu bir eğilim saptanmış, agrivoltaik sistemlerin ülkemizdeki çiftlik sorunlarına çözüm potansiyeli açıkça ortaya konmuştur (Ağır ve diğerleri, 2023a; Ağır ve diğerleri, 2023b). Ankara’nın Ayaş ilçesinde 2023 yılında faaliyete geçen ilk hareketli agrivoltaik sistem kapsamında elde edilen öncül bulgular aracılığıyla çiftlik gelir ve giderlerindeki değişim açıkça ortaya konmuş ve agrivoltaik sistemlerin çiftçiler açısından finansal fizibilitesi değerlendirilmiştir (Şentürk, 2023). Tarımsal faaliyetlerin ve enerji üretim kapasitesinin yüksek olduğu ülkemizde agrivoltaik sistemlerin performansını verimlilik yaklaşımı ile değerlendiren bir araştırma ise henüz yapılmamıştır. Bu çalışmanın amacı, söz konusu boşluğu doldurmak üzere kurulu bir agrivoltaik sisteme dayalı veriler üzerinden arazi verimliliğinin hesaplanmasıdır. Türkiye’de agrivoltaik arazi verimliliğinin, yalnızca marjinal arazilere kurulmasına izin verilen ve altında tarımsal faaliyetlerin gerçekleştirilmediği güneş enerji santralleri ile karşılaştırılmasının, ülkemizde tarımsal sürdürülebilirliğe katkı sunacak politikaların üretilmesi açısından önemli bir katkı sunabileceği düşünülmektedir.



Şekil 1. Komşuköy agrivoltaik pilot sahasından görüntüler

Biyçeşitliliğe dayalı doğal tarım ve literatürde kabul gördüğü ismiyle ilaçsız tarıma (pesticide-free agriculture) dayalı ilk agrivoltaik çalışma olarak bu makalenin temel hedefi, arazinin ikili kullanımı (elektrik ve biyokütle üretimi) sonucunda arazi verimliliğindeki değişimi ortaya koymaktır. Söz konusu yeniliği sürdürülebilir bir çiftlik modeli tasarımıyla birleştiren bu çalışmada agrivoltaik sistemlerin; uygun koşullar altında arazi verimliliğini önemli ölçüde arttırmak suretiyle gıda güvenliği ve enerji ihtiyacını karşılamak için etkin bir araç olabileceği; küçük çiftçiliğe ekonomik olarak destek sağlayabileceği ve iklim değişikliğine karşı uyum ve direnç kazandırabileceği; kent çeperindeki tarım alanlarının korunmasına katkıda bulunabileceği ve genel olarak sürdürülebilir tarım tekniklerinin yaygınlaşmasına destek olacağı; önemli bir tarım politikası aracı olabileceği gibi birçok katkı alanı ile birlikte faydalarının ortaya konması amaçlanmaktadır.

Bu doğrultuda, ilerleyen bölümlerde ilk olarak agrivoltaik sistemleri arazi verimlilik yaklaşımı ile ortaya koyan çalışmalar incelenmektedir. Diğer bölümde ise arazi verimlilik analizinin temel yöntemi olan “Arazi eşdeğer oranı” açıklanmakta ve Komşuköy agrivoltaik sahasına ilişkin teknik bilgiler ve sahadan elde edilen veriler sunulmaktadır. Analiz kısmında mahsul verimliliğindeki artış ve elektrik üretimi tahminlerine dayalı olarak hesaplanan arazi eş değer oranına ilişkin elde ettiğimiz bulgular, son bölümde uluslararası çalışmalar ve ayrıca yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir tarım politikaları çerçevesinde tartışılmaktadır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Agrioltaik sistemlerin faydalarını ortaya koyan çalışmalar arasındaki ortak temel yaklaşımlardan biri, farklı ürün/üretim yöntemlerinin birlikte gerçekleştiği arazilerin verimlilik değerlendirmesidir. Arazi verimliliğindeki artış; her iki üretim faaliyetinin birleştirilmesi sonucunda değişen verimlilik yüzdelerinin toplanması yoluyla elde edilir (Şekil 2). Çalışmalar, agrivoltaik arazilerde verimliliğinin geleneksel yere monte edilen GES'lere ve yalnızca tarımsal faaliyet yapılan arazilere göre önemli oranda artış meydana geldiğini göstermektedir. Örneğin Dupraz ve diğerleri (2011), arazi verimliliğinin %60-70 arasında artış gösterdiğini saptamışlardır. Trommsdorff ve diğerleri (2020, 2021), Almanya’da yaptıkları çalışmaya göre arazi verimliliğinin neredeyse %90; Hindistan’da gerçekleştirdikleri çalışmaya göre ise yaklaşık iki kat arttığını hesaplamışlardır.

Agrioltaik alandaki verimlilik yaklaşımında esas alınan yöntem ise yaygın olarak LER değerinin hesaplanmasıdır. Tarımsal üretim ve fotovoltaik üretimin birlikte uygulandığı arazilerde, ayrı uygulamaları durumundan daha büyük çıktı sağlanması, agrivoltaik sistemlerin etkinliğinin geçerliliği için bir ön koşuldur.

Bu nedenle LER değerinin 1 (bir)'in üzerinde olması beklenir.<sup>6</sup> Nitekim LER hesaplamasına dayanan neredeyse tüm çalışmalarda farklı agrivoltaik sistemler için bulunan LER değerleri 1,1-2,9 arasında değişiklik göstermektedir (Tablo 1). Yalnızca bir çalışmada üç farklı panel sistemi arasında “kuzey güney yönünde eğimli panel” ve “dikey panel” sistemleri için bulunan LER değeri 1'e çok yakındır (Ahmed ve diğerleri, 2022).

Farklı iklim ve panel sistemlerine göre tarımsal ürünlerde verim kaybı yaşanabileceği gibi özellikle kurak bölgelerde ya da kuraklık yaşanan dönemlerde ya da yarı saydam panel sistemlerinde tarımsal verim artabilmekte ya da önemli bir değişim gözlenemebilmektedir. Elektrik üretiminde ise geleneksel panellere göre verim kaybı çoğunlukla daha yüksek olabilmektedir. Fakat yeniliğin özündeki felsefe, tarımsal üretimin her zaman önceliklendirilmesidir ve bunu sağlamak için enerji üretimindeki kayıplar göz ardı edilmekte ve sistemin optimizasyonu bu öncelik ve önkabule göre tasarlanmaktadır (Schindele ve diğerleri, 2020). Bu nedenle panel yapısının hem gölgeleme hem de arazide kapladığı konstrüksiyon alanının mahsul verimliliğine etkisini minimize edecek teknolojilerin geliştirilmesi önemlidir. Söz konusu amaç doğrultusunda yapılan optimizasyon çalışmalarında uygun gölgeleme oranlarında mahsul veriminin olumsuz etkilenmediğine yönelik önemli sonuçlar elde edilmiştir (Marrou ve diğerleri, 2013; Valle ve diğerleri, 2017; Barron-Gafford ve diğerleri, 2019; Sekiyama ve Nagashima, 2019; Hudelson ve Lieth, 2021). Böylece gıda ve enerji üretimini optimize eden uygun agrivoltaik sistemlerin ekonomik bağlamda yaygınlaşma olanakları artmıştır (Marrou ve diğerleri, 2013).



Şekil 2. Agrivoltaik sistemlerde arazinin ikili kullanımı

Şimdiye dek agrivoltaik sistemler üzerine yapılan araştırmaların önemli bir kısmı simülasyon çalışmalarından oluşmaktadır. Pilot alan üzerine yapılmış deneye dayalı çalışma sayısı oldukça azdır (Valle ve diğerleri, 2017; Barron-Gafford ve diğerleri, 2019; Andrew ve diğerleri, 2021; Trommsdorff ve diğerleri, 2020; Trommsdorff ve diğerleri, 2023). Hem simülasyona hem de deneye dayalı araştırmalar arasında arazi verimliliği hesaplayan çalışmalara ait bulgular ise Tablo 1'de sunulmaktadır.

Avrupa'da ilk agrivoltaik sistem, Fransa'da kurulmuş olup Dupraz ve diğerleri (2011)'ne ait öncül araştırmada buğday üretimine dayalı bir agrivoltaik çiftlik modeli üzerinden tahminlenen veriler, biyoyakıt üretimine dayalı sistemler ile karşılaştırılmıştır. Sabit panellere ait farklı gölgeleme oranlarına göre (düşük ve yüksek olmak üzere) arazi verimliliğinin %60-70 arasında arttığı tespit edilmiş ( $LER_{max}=1,73$ ) ve agrivoltaik sistemlerin, biyoyakıt üretimine dayalı sistemlere göre çok daha fazla verimli olduklarına dikkat çekilmiştir. Sabit panellere yönelik bir tahminleme ise Beck ve diğerleri (2012)'ne aittir. Agrivoltaik sistemler kapsamında yetiştirilebilecek ürünleri gölgeye duyarlılık anlamında üç kategoriye ayırmışlardır. Buna göre panel sistemi altında verimlilik düşüşü gösterebilecek ürünler olarak mısır, buğday ve bahçe bitkileri gibi (hortikültür) ürünler; olumsuz etkilenmeyecek ürünler olarak çavdar, yulaf ve pancar; gölgeden dolayı verim artışı beklenebilecek ürünler olarak patates, yeşil yapraklılar (salata) ve ıspanak örnekleri üzerinden yaptıkları sınıflamada, gölgede verim değişimi beklenmeyen ve verim artışı beklenen ürün grupları üzerine geliştirdikleri modellerde LER değerleri sırasıyla 1,6 ve 1,9 arasında bulunmuştur.

Hareketli panele dayalı agrivoltaik sistem üzerine yapılan ilk çalışmada ise arazi verimliliğinin 1'den büyük (1,35-1,73) olduğu gösterilmiştir; bu da aynı miktarda enerji ve biyokütle üretmek için ayrı arazilerde gözlemlenen üretimlere kıyasla agrivoltaik sistemlerde %35 ila %73 oranında daha az arazi alanına ihtiyaç duyulacağını göstermektedir (Valle ve diğerleri, 2017). Amaducci ve diğerleri (2018) ise yaklaşık 40 yıllık iklim verisi kullanarak mısır üretimi üzerine yaptıkları simülasyon çalışmasında; agrivoltaik sistemlerdeki elektrik üretim miktarını, mısırın biyogaz elde etmek amacıyla yetiştirildiği durumda elde edilen elektrik üretim miktarı ve geleneksel yere monte edilen GES ile elde edilen elektrik üretim miktarı ile karşılaştırmışlardır. Her iki durumda, agrivoltaik sistemlerin arazi verimliliği diğerlerine göre maksimize ederek enerji üretimi iki katına çıkabilmektedir. Böylece yenilenebilir enerji üretimi alanında agrivoltaik

<sup>6</sup> Örneğin LER değerinin 1,5 bulunması şu durumu ifade etmektedir: 100 dekarlık bir agrivoltaik arazide üretilen mahsul ve enerji, aynı miktarda fakat ayrı olarak üretilmek istenirse, toplamda 150 dekarlık bir araziye ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıntılı bilgi için çalışmanın üçüncü kısmı (3.4.) incelenebilir.

sistemlerin biyoyakıt ve geleneksel yere monte edilen GES'lere göre daha verimli oldukları savunulmaktadır.

Ahmed ve diğerleri (2022) altı farklı ülkede (Vietnam, Bangladeş, Çin, Hindistan, Mısır ve Brezilya) belirledikleri pirinç yetiştirme alanları üzerindeki simülasyon çalışmalarında üç farklı panel sisteminin (sabit ve çift yüzü olmak üzere yatay, dikey ve eğik) arazi eş değer oranı değerlerini hesaplamışlar ve bu kapsamlı çalışmaya göre incelenen ülkelerin neredeyse tümü için en yüksek LER değerini, yatay panel sisteminde saptamışlardır.

Trommsdorff ve diğerleri (2021) Almanya'da organik üretim yapan bir çiftlikte kışlık buğday, kereviz, yonca ve patates üzerine yaptıkları çalışmada, inceledikleri agrivoltaik çiftliğin arazi eş değer oranını yere kurulu GES'ler ile kıyasladıklarında, mahsul verimliliğindeki artışla beraber kurak dönemde arazi verimliliğinin neredeyse %90'a kadar arttığını ortaya koymuşlardır. Riaz ve diğerleri (2021) ise yine farklı panel sistemlerine ait LER değerlerini inceledikleri çalışmalarında, lahana üretim miktarını en az %80 oranında korumak koşuluyla farklı gölge duyarlılıklarına göre LER oranını 1,33 ve 2,9 arasında bulmuşlardır. Katsikogiannis ve diğerleri (2022), Amerika Birleşik Devletleri'nin Boston şehrinde yaban mersini üzerinde farklı fotovoltaik sistemler ile oluşturdukları modele ait elektrik üretimi, geleneksel yere monte edilen panellere göre %33 düşüş göstermiş olsa da arazi verimliliğini optimize eden en uygun sistem olan doğu-batı takipli panellerin kullanılmasıyla LER değerinin %50 artış gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Çok yıllık bitkiler üzerine yapılan çalışmalar arasında Trommsdorff ve diğerleri (2023)'nin elma yetiştiriciliği yapılan üç farklı agrivoltaik çiftlikte gerçekleştirdikleri ekonomik performans analizine göre arazi eşdeğer oranı, mahsul veriminde değişim olmadığı varsayımı altında, ortalama 1,54 olarak tahmin edilmiştir. Casares de la Torre ve diğerleri (2022)'nin İspanya'da zeytin çiftliğinde ise arazi verimlilik değerinin %47,2 oranında arttığını saptamışlardır. Mahsul üretiminden farklı olarak hayvancılığa ilişkin Andrew ve diğerleri (2021) tarafından yapılmış bir çalışmaya göre ise, koyun eti verimliliğinde önemli bir değişim saptanmazken çayır verimliliğinde düşüş bulunmuş fakat arazi verimliliğinin 1,68-2,04 arasında arttığı tespit edilmiştir. Buna göre mevcut çalışmada geleneksel açık meralara kıyasla agrivoltaik çiftlikte toplam yıllık otlak veriminin daha düşük olmasına rağmen, enerji ve mera tabanlı koyun eti üretiminin birleştirilmesinin büyük avantaj sağladığı görülmüştür.

Sebze ve meyve üretimi üzerine yapılan çalışmalar sonucunda LER değerlerinin 1,5 ve üzerinde saptanmış olduğu görülmektedir. Konvansiyonel tarıma dayalı olan mısır, pirinç, buğday gibi ürünlerde ise arazi verimlilikleri daha düşük bulunmuştur. Elbette elde edilen veriler, önemli oranda sabit, güneş takipli, farklı yükseklik ve sıklıkta kurulan panel teknolojilerine bağlı olarak değişmektedir (Tablo 1).

### 3. YÖNTEM

#### 3.1. Agrovoltaik Çiftlik Modeli

İstanbul Beykoz'da 18 dekar üzerine kurulan Komşuköy Çiftliği içinde yer alan agrivoltaik pilot sahası, 2022 yılında Enerjisa üretim ortaklığıyla kurulmuştur. Referans alanıyla beraber yaklaşık 700 m<sup>2</sup>dir (Şekil 3). Bölge Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre yazları sıcak ve kurak geçen ılıman iklime sahiptir (Peel, ve diğerleri (2007)) ve Tablo 2'de yer alan teknik bilgilere göre yıllık yataya gelen toplam ışım miktarı yaklaşık 1450 kW/m<sup>2</sup>'dir. Çiftlikte doğal tarım yöntemleri uygulanmaktadır ve pilot alanda aynı yöntemlerle 7 farklı ürün (yaban mersini (blue ve cargon), biberiye, patlıcan, karnabahar, brokoli, biber (dolmalık, sivri, kapyra), salatalık) kimyasal ilaç kullanılmadan yetiştirilmektedir. Sulama, elektrik enerjisiyle çalışan damlama sistemiyle gerçekleştirilmektedir.

Santral teknolojisi ise; güney-batı yönünde (Güneye yönelim [Azimuth] açısı<sup>7</sup>: -23°) yerleştirilen sabit açılı güneş enerjisi santralının taşıyıcı yüksekliği 3 m'dir. Panellerin eğim açısı 21°'dir. Paneller homojen dağılımla aralarında yaklaşık 1,2 m boşluk olacak şekilde yerleştirilmiştir. 4 diziden oluşan panel sıraları arası yaklaşık 3 m'dir. Agrovoltaik santralin kurulu olduğu arazi 373 m<sup>2</sup> olmakla beraber panellerin arazi üzerinde kapladığı toplam alan 80 m<sup>2</sup>'dir. Paneller çift yüzü tasarıma sahiptir ve iki yüzeyinden de elektrik üretebilmektedir. Santralin kurulu güç kapasitesi 21,4 kWp'tir. Sistem elektrik şebekesine bağlantısız olarak çalışmaktadır ve tamamen öztüketime dayalı olarak işletilmektedir. Çiftliğin 24 kW'lık çok kısıtlı bir enerji depolama sistemi bulunmaktadır.

<sup>7</sup> Güney 0°, doğu -90° kabul edilerek tanımlanmıştır.

**Tablo 1. Arazinin verimlilik değerine ilişkin (LER ölçümü yapan) çalışmalara ait bulgular**

Yer	Tarımsal faaliyet ve ürün	Panel Özellikleri	Arazi Eşdeğer Oranı (LER değeri)	Kaynak
Montpellier, Fransa	Konvansiyonel çiftlik (durum buğdayı)	Tam aralık Yarım aralık	1,32 1,64	Dupraz ve diğerleri (2011)
Central Europe	Konvansiyonel çiftlik (mısır, buğday, ispanak)	Sabit	1,6-1,9	Beck ve diğerleri (2012)
Montpellier, Fransa	Geleneksel sebzeçilik (marul)	Sabit Hareketli	>1,5	Valle ve diğerleri (2017)
Montpellier, Fransa	Geleneksel sebzeçilik (marul)	Tam aralık Yarım aralık	>1	Elamri ve diğerleri (2018)
Po Valley, Kuzey İtalya	Konvansiyonel çiftlik (mısır)	Sabit Hareketli	1,23-2,05	Amaducci ve diğerleri (2018)
Kuzey Kafkasya, Rusya	Konvansiyonel çiftlik (Pancar ve marul)	Sabit eğimli	1,45-1,7	Kostik ve diğerleri (2020)
Baden- Württemberg, Almanya	Organik tarım (patates) (kereviz) (yonca) (kışlık buğday)	Sabit/eğimli/ çift yüzlü	1,57-1,86 1,56-1,87 1,67-1,70 1,56-1,78	Trommsdorff ve diğerleri (2021)
Lahore, Pakistan	Konvansiyonel çiftlik (Marul)	Dikey, tek yüz (kuzey-güney) Dikey, Çift yüz (doğu-batı)	1,33-2,2	Riaz ve diğerleri (2021)
Vasterås, İsveç	Konvansiyonel çiftlik (yulaf ve patates)	Sabit dikey/ çift yüzlü	1,2	Elia Campana ve diğerleri (2021)
Güney Doğu Hindistan	Konvansiyonel çiftlik çeltik (pirinç)	Dikey sabit	1,27-1,55	Vijayan ve diğerleri (2021)
Giang, Vietnam	Konvansiyonel çiftlik çeltik (pirinç)	-Sabit dikey -Sabit yatay -Sabit eğik olmak üzere üç farklı çift yüzlü panel sistemi	0,9-1,2 1,0-1,1	Ahmed ve diğerleri (2022)
Jiangsu, Çin			1,2-1,3	
Damietta, Mısır			1,2-1,45	
Rio Grande do Sul, Brezilya			1,35-1,55	
Haryana, Hindistan			1,35-1,5	
İspanya	Konvensiyonel bağcılık (üzüm)	Sabit dikey, tek ve çift yüzlü panel sistemi	1,27-1,5	Padilla ve diğerleri (2022)
Boston, ABD	Konvensiyonel çiftlik (yaban mersini)	Sabit eğimli, dikey ve hareketli olmak üzere üç farklı panel sistemi	1,5	Katsikogiannis ve diğerleri (2022)
Gelsdorf, Almanya Kressbronn, Almanya	Organik tarım (elma)	Sabit eğimli, dikey ve hareketli olmak üzere üç farklı panel sistemi	1,54*	Trommsdorff ve diğerleri (2023)
Bavendor, Almanya Oreagon, ABD	Konvansiyonel tarım (elma) Koyun yetiştiriciliği çayır (ot) koyun (canlı ağırlık)	Sabit eğimli, geleneksel yere monte güneş panelleri	1,81 2,04	Andrew ve diğerleri (2021)

Not: \* çiftliklerin ortalama değerlerini göstermektedir.



Şekil 3. Komşuköy agrivoltaik alanı uydu görüntüsü

Tablo 2. Komşuköy agrivoltaik sahasına ilişkin teknik bilgiler

Özellik	Birim	Veri/Bilgi
Yer	enlem - boylam	41,128877° - 29,272742°
Toplam alan	m <sup>2</sup>	687
Agrivoltaik alan	m <sup>2</sup>	387
Referans alan	m <sup>2</sup>	300
Kaplama oranı <sup>8</sup>	%	24,62
Yataya gelen toplam ışımaya (GHI)	kW/m <sup>2</sup> /yıl	1450
Performans oranı <sup>9</sup>	%	89,37
PV bozunma oranı (degradation)	%/yıl	0,4
Panel ömrü	yıl	25-30
Kurulu güç kapasitesi	kWp	21,4
Yıllık elektrik üretim miktarı	MWh/yıl	30,57
Tarımsal faaliyet grubu	---	Hortikültür
Ekilen tarımsal ürün grupları	Sebze, meyve ve aromatik bitkiler	Yaban mersini (blue ve cargon), biberiye, patlıcan, karnabahar, brokoli, biber (dolmalık, sivri, kapyra), salatalık
Sulama yöntemi	---	Damlama (elektrik enerjisi)

### 3.2. Tarımsal Üretim

Çiftlikte gerçekleştirilen tarımsal faaliyetler sürdürülebilir tarım tekniklerine uygun olarak yürütülmüş ve ekim sezonu öncesinde toprak analizi yapılmış olup panel altı ve kontrol alanındaki toprak yapısının benzer özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir. Toprak ihtiyacına göre doğal gübre kullanılmış ve zararlılarla mücadelede ise mekanik yöntemler arasında el ile müdahale, ayrıca biyolojik preditörler (yaban arısı, ördek, keçi) ve kardeş bitkiler olarak adlandırılan aromatik bitkiler (örneğin tuta zararlısı için lavanta) kullanılmıştır. Hem kontrol hem de agrivoltaik alanda bitki başına aynı miktarda sulama yapılmıştır. Her bir bitki grubu, birer sıra olarak kuzey-güney yönlerinde ekilmiş olup en batıda yer alan sırada yaban mersini (blue) ve en doğuda kalan sırada ise salatalık ekimi yapılmıştır (Şekil 4).

Şekil 4'te modellenen tarımsal ürünler arasında yaz mevsimine denk gelen ilk hasat döneminde yaban mersini, biberiye, patlıcan, biber çeşitleri ve salatalık olmak üzere toplamda 5 temel ürün (8 çeşit) hasat edilmiştir. Brokoli ve karnabahar hasadı kış döneminde gerçekleşecektir. Hasat miktarlarına ait veriler, biberiye hariç, diğer ürünler için kilogram cinsinden kayıt altına alınırken, biberiyenin küçük yapraklı olmasından dolayı hasat miktarı desimetreküp üzerinden ölçülmüştür. Her bir veri, bitki başına ortalama hasat miktarını ifade etmektedir (Tablo 4).

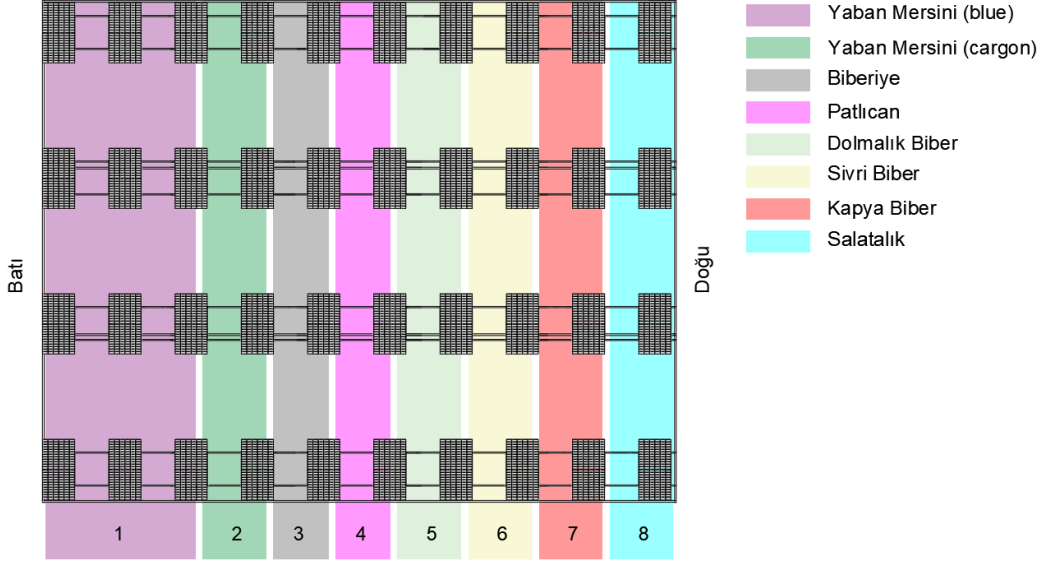
Tarımsal üretime ilişkin bulgular ayrıntılarıyla dördüncü bölümde sunulmakta olup tarımsal faaliyetlerin sürdürüldüğü dönemde panel altında ve açık alandaki bitki gelişimine ilişkin gözlemlerin özetlenmesi, ilerleyen kısımda bulguların yorumlanması açısından önemlidir. Buna göre panel altındaki bitki bünyelerinin açık alandaki bitkilere göre belirgin şekilde daha canlı ve verimli geliştiği önemli bir gözlemdir (Biberiyedeki gelişim farkı için bkz. Şekil 5). Gövde gelişimi sonucunda ise ilerleyen dönemde hasat miktarının olumlu yönde etkilenmiş olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlem, bitkilerin ekim dönemine denk gelen ve nispeten serin geçen günlerde gelişim aşamalarını panel altında daha az stresle tamamlamış olabilecekleri ve bu nedenle daha sağlıklı bir kök ve bağışıklık sistemine sahip olabilecekleri şeklinde yorumlanabilir. Diğer bir olasılık,

<sup>8</sup> Kaplama oranı; panellerin yatay izdüşüm alanının toplam arana oranıdır.

<sup>9</sup> Performans oranı; güneş enerjisi santrali üretim performansının IEC 61724 standartına göre hesaplandığı büyüklük.



büyüme döneminde paneller altında yeterli seviyede ışık alamayan bitkilerin daha fazla ışığa ulaşabilmek için gövde gelişimlerini maksimize etmeye çalışması (Gruntman ve diğerleri, 2017) ile açıklanabilir. Nitekim Zervoudakis diğerleri (2012) ve Şeker ve diğerleri (2023)'nin çalışmalarında biberiye bitkisinde gölgeleme etkisi sonucunda bitki boylarının, Rezai ve diğerleri (2018)'nin çalışmasında ise gövde genişliğinin arttığı tespit edilmiştir<sup>10</sup>.



Şekil 4. Ürün ekim planı

Diğer bir gözlem ise hasat sezonunda panel altında olan bazı bitkilerin (örneğin kapyra biber) daha uzun süre tazeliğini koruması ve bazı bitkilerde hastalıklara karşı dayanıklılığın artmasından dolayı mahsul kaybının az olmasıdır. Örneğin açık alanda salatalık üretimi, mantar hastalığı sonucunda önemli bir kayıp vermişken, panel altında aynı hastalık yaşanmış olsa da mahsul kaybının daha az olduğu gözlenmiştir. Bu gözlem ise, literatürde gölgeleme ve karışık ekim yöntemlerinin toprak sağlığını arttırdığına ve bu sayede daha sağlıklı ürün ve verimli tarıma olanak sağladığına yönelik bulgular ile açıklanabilir (Menezes ve diğerleri, 2017; Dollinger ve Jose, 2018).

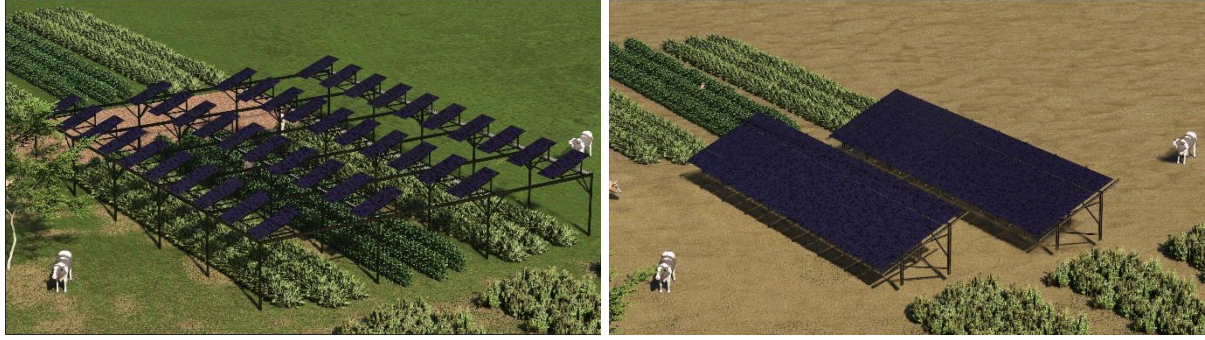


Şekil 5. Biberiye bitkisinin referans açık alanda (solda) ve panel sistemi altındaki gelişimi (sağda)

### 3.3. Elektrik Üretimi ve Işık Dağılımı

Proje kapsamında Tablo 2'de ayrıntıları sunulan yaklaşık %25 kaplama oranına sahip agrivoltaik sistemin üretim verileri PVsyst yazılımı kullanılarak tahminlenmiştir. Analiz için oluşturulan tasarımın detayları bölüm 3.1'de sunulmuştur. Ayrıca, çalışma kapsamında, enerji üretimine dayalı verimlilik hesaplamalarının yapılabilmesi için aynı alanda geleneksel araziye kurulu olarak enerji üretimi yapılması durumundaki üretim de PVsyst aracılığı ile hesaplanmıştır. Hesaplamalara ait konsept tasarımlar Şekil 6'da sunulmuştur.

<sup>10</sup> Şeker ve diğerleri (2023)'ne ait çalışmada gölge altındaki biberiyede yağ oranının açık alanda yetiştirilen biberiyeye göre arttığı tespit edilmiştir. Bu durum mahsul miktarına ek olarak tıbbi değeri bulunan ürünlerde agrivoltaik sistemlerin kalite (nitelik) değişimine yol açabileceğini de göstermesi açısından önemlidir.



a) Agrivoltaik

b) Arazi kurulumlu GES

**Şekil 6. Komşuköy agrivoltaik ve aynı alana geleneksel arazi kurulumlu GES tasarımı**

Her iki tasarım için yürütülen PVsyst analizlerindeki detaylar Tablo 3'te sunulmuştur.

**Tablo 3. PVsyst analizinde kullanılan başlangıç verileri**

Parametre	Agrivoltaik	Geleneksel Arazi Kurulum
TMY veri olasılığı	P50	P50
Güneye yönelim açısı	-23°	0°
Sistem toplam kaybı	10,6%	13,6%
Tasarım alanı büyüklüğü	387 m <sup>2</sup>	387 m <sup>2</sup>
Sistem toplam kurulu gücü	21,4 kWp	34,2 kWp
İnverter gücü	20 kW	30 kW
Panel eğim açısı	21°	25°
Performans oranı	89,4%	86,4%

Agrivoltaik tasarımları geleneksel tasarımlardan ayıran önemli özelliği sadece yükseklik kazandırılmış taşıyıcı sistem değil, aynı zamanda tasarımın altında yürütülecek olan tarımsal faaliyet süresince bitkilerin üzerine düşen ışık dağılımındaki değişimdir. Agrivoltaik sistem altındaki bu değişim bitkinin aktif fotosentez dönemini doğrudan etkilemekte ve verimliliği değiştirebilmektedir. Bu etkinin olası sonuçlarının yorumlanabilmesi için tasarım altında yürütülecek tarımsal aktivitedeki bitki türlerinin maruz kalacağı ışık dağılımının yüzdesel değişimi, tarım uzmanına sayısal veri ile sunulmalıdır. Bu sayısallaştırma için bu çalışmada Rhinoceros programı ve Ladybug aracı kullanılarak projenin kurulduğu koordinata özel olarak ışık dağılımı analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonrasında elde edilen agrivoltaik sistem altındaki ve açık alandaki ışık dağılımındaki değişim aktif fotosentezin (PAR) bir fraksiyonu olarak Eşitlik 1 ile hesaplanmış ve aylık bazlı yıllık ortalama değer olarak ele alınmıştır (Trommsdorff ve Johanna, 2016).

$$PAR(d) = \frac{G_{hor}(d; \alpha; panel\ alti)}{G_{hor}(referans\ alan)} \times 100 \quad (1)$$

Burada  $G_{hor}$  zemine gelen toplam yatay ışımının hektar başına (kWh/ha) büyüklüğüdür;  $\alpha$  panel açısı ve  $d$  ise paneller arası mesafedir.

### 3.4. Verimlilik Analizi: Arazi Eşdeğer Oranı (LER)

Arazi Eşdeğer Oranı (Land Equivalent Ratio), bir arazi parçasının aynı zamanda iki veya daha fazla ürün veya üretim sistemi tarafından kullanılabilirliğini ölçen bir yöntemdir ve ilk olarak sürdürülebilir tarım pratiklerinden biri olan "nöbetleşe ekim" in etkinliğini ölçmek için kullanılmıştır (Mead ve Willey, 1980). Aynı arazide ürünlerin her sezonda farklı yerlere ekimi yoluyla arazideki verim artışını ortaya koyan bu hesaplama yöntemi, daha sonra farklı tarımsal üretim sistemlerine de (örneğin tarımsal ormancılık/agroforestry) uyarlanmıştır (Newman, 1986). Tarımsal üretim ve elektrik üretiminin birleştirildiği agrivoltaik sistemlerdeki verimi ortaya koyan çalışmalarda LER değerinin kullanımı, tarım ve fotovoltaik enerji üretiminin aynı arazi üzerindeki verimliliğinin aynı araziler üzerinde yapıldığı durumla karşılaştırılması şeklindedir. Temelde LER, agrivoltaik sistemin kurulduğu alanın, agrivoltaik sistemden elde edilen tarımsal ve elektriksel üretime denk bir üretimin aynı arazilerde gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan toplam alanla oranını temsil etmektedir ve Eşitlik 2'deki gibi gösterilebilir (Elamri ve diğerleri, 2018).

$$LER = \frac{Y_{tarım, APV}}{Y_{tarım, referans}} + \frac{Y_{enerji, APV}}{Y_{enerji, yere\ kurulum}} \quad (2)$$

LER değeri 1'den büyükse, kombinasyonun, aynı alan üzerinde yalnızca tarım veya enerji üretimi yapmaktan daha etkili olduğunu gösterir.

Bu çalışma kapsamında hesaplanan LER değerleri, agrivoltaik sistemlerin aynı arazide yere monte edilen geleneksel GES'lere ve geleneksel bir çiftliğe göre ne kadar daha verimli olduğunu ortaya koymaktadır. Buna göre formüle uygun hesaplamada kullanılmak üzere eşitlikte verilen değerler;  $Y_{tarım, APV}$ : Komşuköy Agrivoltaik pilot sahasında panel altındaki alanda elde edilen mahsul miktarlarını (bitki başına);  $Y_{tarım, referans}$ : Komşuköy Agrivoltaik pilot sahasında açık (referans) alanda elde edilen mahsul miktarlarını (bitki başına);  $Y_{enerji, APV}$ : Komşuköy Agrivoltaik pilot sahasında mevcut kurulu panel sistemi için hesaplanan elektrik üretim kapasitesini;  $Y_{enerji, yere kurulum}$  ise aynı arazide geleneksel GES modellemesi sonucunda tahminleme yoluyla hesaplanan elektrik üretim verilerini ifade etmektedir.

## 4. BULGULAR

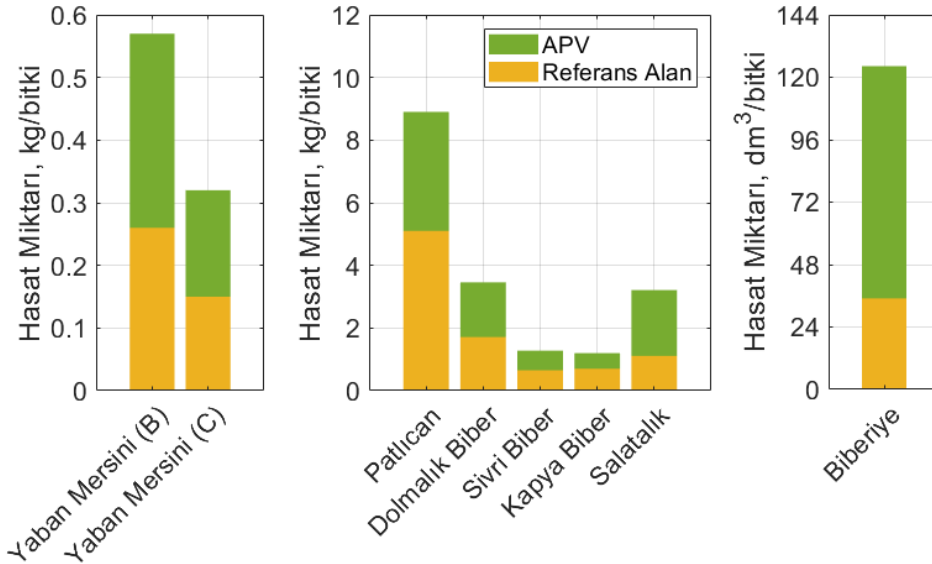
### 4.1. Tarımsal Üretime İlişkin Ampirik Bulgular

Sekiz farklı bitki çeşidinin panel altında ve açık alandaki üretim miktarları bitki başına düşen değerler olarak Tablo 4'te verilmektedir. Her bir ürünün verimlilik artışları Şekil 5'te gösterilen grafikte yer almakta olup ürünler meyve, sebze ve aromatik bitki grubu olarak üçe ayrılmıştır.

**Tablo 4. Ekilen ürünler ve bitki başına üretim miktarları**

	Yaban Mersini (blue) (kg)	Yaban Mersini (cargon) (kg)	Biberiye (dm <sup>3</sup> )	Patlıcan (kg)	Dolmalık Biber (kg)	Sivri Biber (kg)	Kapya Biber (kg)	Salatalık (kg)
Açık Alan (referans)	0,26	0,15	35	5,10	1,71	0,65	0,70	1,11
Agrivoltaik alan	0,31	0,17	89,3	3,80	1,75	0,63	0,50	2,10

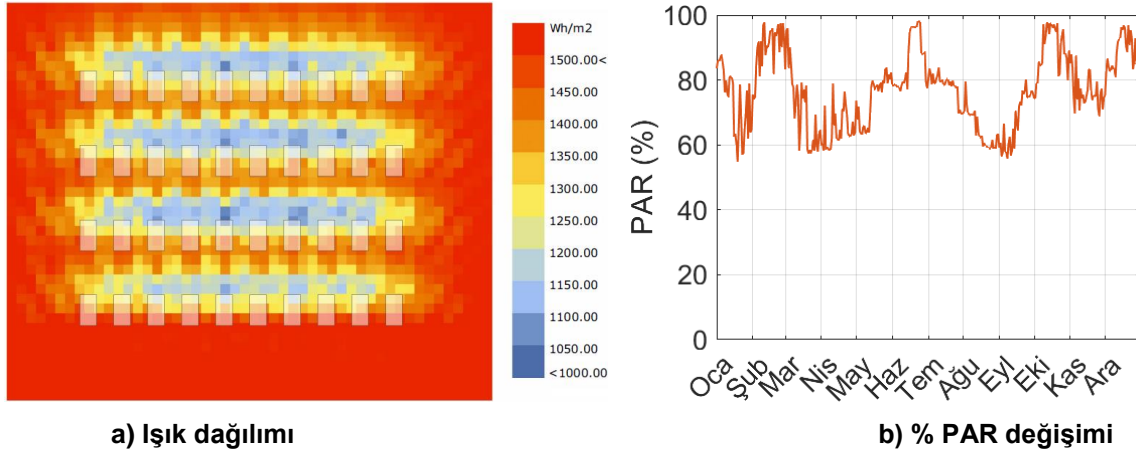
Hasadı yapılan ürünler arasında en yüksek verimlilik değişimi biberiyede görülmektedir. Yaklaşık 2,5 kat artış gösteren biberiyeye ek olarak salatalıkta da yaklaşık %90 verimlilik artışı görülmüştür. Verimlilik değerleri olumlu etkilenen diğer ürünler ise sırasıyla yaban mersini (blue çeşidi için %18 ve cargon çeşidi için %10) ve %2 ile dolmalık biberdir. En fazla verimlilik düşüşü ise %30 azalışla kapya biber üretiminde görülmüş olup patlıcan ve sivri biber üretiminde sırasıyla %25 ve %4 düşüş yaşanmıştır.



**Şekil 7. Ekilen ürünler ve bitki başına üretim miktarları**

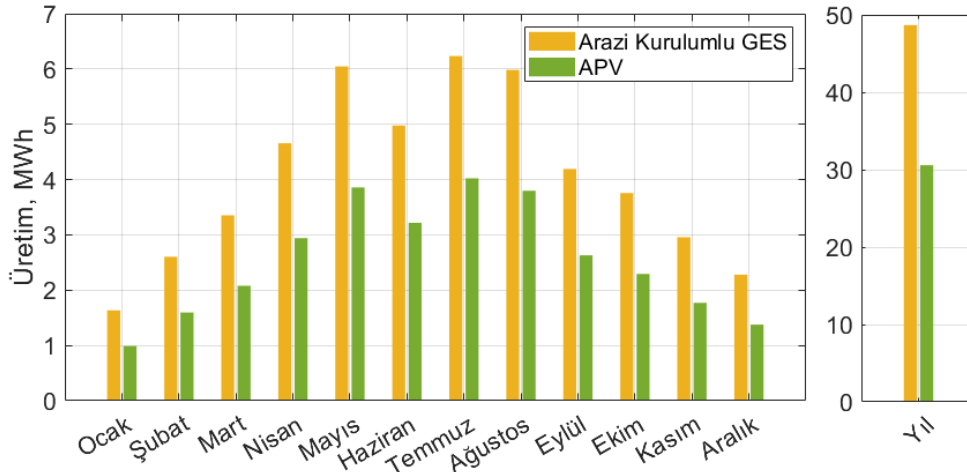
### 4.2. Enerji Üretimine İlişkin Bulgular

Komşuköy Agrivoltaik sahasına ilişkin bilgiler (Tablo 2 ve 3) ürün ekim planındaki (Şekil 4) gibi tasarlanarak sistemin ışık dağılımı analizi yapılmıştır (Şekil 8a). Yaklaşık %25'lik kaplama oranına sahip agrivoltaik tasarımın altında kalan bazı bölgelerde ışımının yaklaşık 1000 – 1200 Wh/m<sup>2</sup> değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak daha düşük değerde bir dağılım gözlemlenmemiştir. Agrivoltaik altında merkez noktadaki ışık dağılımı sonuçları ve harici alandaki ışık dağılımı sonuçları bağıntı (1)'e göre hesaplanarak PAR'ın fraksiyonu Şekil 8b'deki gibi elde edilmiştir. Sonuçlar, agrivoltaik tasarımın PAR değerini Ocak, Mart, Nisan ve Eylül ayları haricinde %70'in altında düşmediğini göstermektedir.



**Şekil 8. Agrivoltaik sistem (APV) altında yıllık bazlı ışık dağılımı ve Eşitlik 1'e göre aktif fotosentez değişimi**

Agrivoltaik sistemin güneye yönelim açısı  $-23^\circ$  derecedir (Tablo 3). Bu durum geleneksel GES'e göre enerji üretiminin daha düşük olacağı anlamına gelmektedir. Bununla birlikte agrivoltaik santrallerin altındaki ışık dağılımının tarıma elverişli bir seviyede olabilmesi için birim alan başına kurulu güçleri geleneksel arazi kurulumlu GES'lere göre daha düşük olabilmektedir. Bu iki durumun etkisinin sonucu olarak Şekil 9'da sunulduğu gibi 21.4 kWp'lik kurulu gücü olan agrivoltaik sistemin yıllık toplam üretiminin yaklaşık 30 MWh olacağı hesaplanmıştır. Diğer taraftan aynı büyüklükteki alanda güneye bakılı  $25^\circ$  panel açısı ile tasarlanan geleneksel santralin (Şekil 6b) ise agrivoltaik sisteme göre yaklaşık üçte bir oranında daha fazla üretim yapabileceği (yaklaşık 48 MWh – Şekil 9) hesaplanmıştır.



**Şekil 9. Agrivoltaik (APV) ve arazi kurulumlu GES için enerji üretim sonuçları**

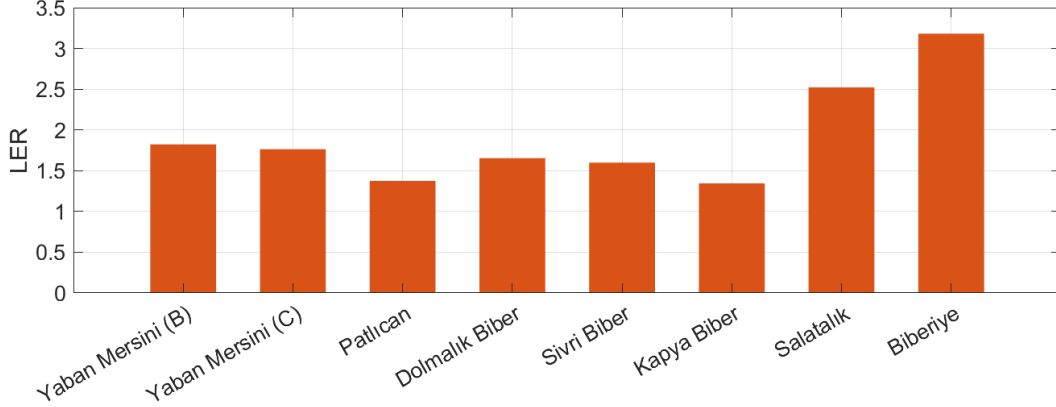
İki güneş enerjisi santral tipi arasındaki üçte birlik fark neredeyse her ayın enerji üretim sonuçlarına yansımaya rağmen bazı kış aylarında bu fark azalmış, yaz aylarında ise daha çok artmıştır. Ancak enerji üretimine ait hesaplamayı yapan PVsyst yazılımı agrivoltaik sistem altındaki tarımsal üretimden kaynaklı buharlaşma sayesinde panel verimlerinin artması (Barron-Gafford ve diğerleri, 2019) ve buna bağlı olarak santral üretiminin artmasını dikkate almamaktadır. Başka bir deyişle bu enerji üretim hesaplamalarının, saha testlerinde üçte birden daha düşük oranda fark olacak şekilde agrivoltaik lehine sonuçlanması beklenebilir.

#### 4.3. Arazinin İkili Kullanım Verimliliği: LER Analizi

Arazinin ikili kullanımına yönelik verimlilik analizleri Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır ve arazide üretilen tarımsal ürünlere ait LER değerleri Şekil 10'da sunulmaktadır. Tüm ürünlerde LER değeri 1'in üzerinde bulunmuş olup Komşuköy agrivoltaik çiftliği, mevcut ürün gruplarına göre etkili bir performans göstermiştir.

En büyük LER değeri 3,3 ile aromatik bitki grubunda yer alan biberiyeye aittir. LER değerinin bu kadar yüksek çıkması, panel altındaki mahsul miktarının açık alandaki mahsul miktarının 2,5 katı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu verim artışının biberiyenin gölgede yetişmeye uygun bir bitki olmasından (Şeker ve diğerleri, 2023) kaynaklandığı düşünülmektedir. Verimlilik artışı oldukça yüksek tespit edilen bu ürünün

agrivoltaik sistem altında ekilmesi sonucunda arazi verimliliği 3,3 kat artmaktadır. Başka bir deyişle agrivoltaik sistem kapsamında elde edilen biberiye miktarı ve elektrik miktarının ayrı arazilerde üretilmesi durumunda 3,3 kat daha fazla arazi gerekmektedir. Panel altında verimlilik düşüşünün %30 ile en yüksek olduğu kapyra biber için hesaplanan LER değeri (1.33)'ne göre arazinin ikili kullanımından kaynaklanan verimlilik ise %33 artmaktadır. Sonuç olarak her ürün çeşidinde arazi verimliliğinin önemli ölçüde arttığı saptanmıştır.



Şekil 10. Tarım ürünlerine göre LER değerleri

## 5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışma kapsamında Enerjisa Üretim ortaklığıyla İstanbul, Türkiye'de kurulan ilk yükseltilmiş sabit panel sistemine sahip Komşuköy Agrivoltaik Çiftlik sahasında gerçekleştirilen hortikültür tarzi tarımsal faaliyetler incelenmiş ve arazinin ikili kullanımı (elektrik ve biyokütle üretimi) sonucunda arazi verimliliğinin %33-%230 arasında arttığı ortaya konmuştur. Literatürde de belirtildiği gibi, 1'den büyük LER değeri, arazinin tarım ve enerji üretimi amaçlı ikili kullanımının, aynı alan üzerinde yalnızca tarım veya yalnızca enerji üretimi yapmaktan daha etkili olduğunu ifade etmektedir. Çalışmamıza ait bulgular ilaçsız tarıma dayalı ve küçük ölçekli sürdürülebilir bir çiftlik modelinde arazi verimliliği açısından agrivoltaik sistem altında gerçekleştirilen tarımsal üretim faaliyetlerinin olumlu performansını ortaya koymaktadır. Üstelik ekilen sekiz çeşit bitkinin önemli bir kısmında miktara dayalı verim artışı tespit edilmiştir.

Agrovoltaik alandaki diğer araştırmalar, arazi verimliliğinin iki katına kadar çıkabildiğini göstermektedir (örneğin konvansiyonel marul üretimi için bkz. Riaz ve diğerleri, 2021). Bu çalışmaya ait bulgular ise, literatürdeki çalışmalar arasında özellikle sebzeçiliğe dayalı agrivoltaik sistem verimlilikleri ile uyumluluk göstermiştir. Ancak literatürde daha önce çalışılmamış bir bitki sınıfı olarak tıbbi ve aromatik bitkilerden olan biberiye üretimindeki verim artışı, arazi verimlilik değerine de yansıtılarak literatürdeki bulgulara göre oldukça yüksek bir LER değeri ortaya koymuştur. Bu anlamda, biberiye tarzi aromatik bitkilerin agrivoltaik sistemler ve sürdürülebilir gıda sistemleri içindeki potansiyeli için daha ayrıntılı (agronomik nitelik ve ekonomik değerlendirmelere dayalı) çalışmaların yapılması önemlidir.

Hububat ve yağlı tohumlar gibi görece büyük arazilerde ve monokültüre dayalı tarımsal alanlarda agrivoltaik sistemlerin inşası, sebze ve meyveciliğe ve kısmen biyoçeşitliliğe dayalı daha küçük arazilere göre daha maliyetlidir. Bu durum başta arazinin büyüklüğünden kaynaklandığı gibi, tarımsal makine ve teçhizatların monokültürel tarımda daha yoğun olması ve belirli bir yükseklik ve sağlamlık gerektirmesidir. Söz konusu yenilikçi yaklaşımın bu sebeplerle sürdürülebilir tarım tekniklerine dayalı çiftlikler için daha verimli sonuçlara yol açtığı söylenebilir. Agrovoltaik sistemlerin refahın adil dağılımını gözetilen politikalar doğrultusunda yaygınlaşması, küçük çiftçiliği ve gıda güvenliğini destekleyebilecek potansiyeli de ortaya çıkarabilecektir. Sürdürülebilir tarım uygulamaları alanında ülkemizde desteklerin yeterli olmaması, çiftçilerin bu tür uygulamaları benimseme olanaklarının oldukça düşük olması ve mevcut gıda sisteminin ağırlıklı olarak konvansiyonel tarıma dayalı olması karşısında, özellikle sürdürülebilir teknikleri benimseyen çiftliklerin yenilenebilir enerji ile desteklenmesi, bu tür çiftliklerin hem ekonomik yönden yaygınlaştırılmasını kolaylaştıracak hem de tanınırlığını ve ilgi çekiciliğini arttırabilecektir.

Bir agrivoltaik sistemin uygunluğunun değerlendirilmesi için temel göstergelerden biri panellerin tarımsal alandaki mikro iklimi ve bundan kaynaklanan ürün verimliliğini ne şekilde etkilediğidir (Weselek ve diğerleri, 2021). Bu çalışma kapsamında ölçülen tüm bitki örneklerinde arazi verimliliğinin artıyor olmasının yanında ürün verimliliğinin de olumlu etkilendiği bazı bitki türleri tespit edilmiştir. Fakat paneller altında toprak sağlığı, toprak besin değeri, bitki besin değeri, tat ve kalitesi gibi fizyolojik değişimlerin izlenmesi ve sinerjik etkilerden biri olarak tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan etkilerle (örneğin bitkilerin daha serin bir ortam yaratması, malç örtülerinin ışık yansımaya etkisi gibi) panel verimliliğindeki değişimlerin ölçülmesi ve tüm

bu konulara ek olarak sulama ihtiyacının da hesaplanması çok önemlidir. Gelecek dönemdeki çalışmalar kapsamında Türkiye’de kurulan pilot sahalarda söz konusu alanların da araştırma kapsamına alınması gerekmektedir. Böylece agrivoltaik sistemlerin hem ekolojik hem de ekonomik faydalarının bütüncül bir değerlendirilmesi mümkün olacaktır. Ayrıca farklı panel teknolojilerinin daha geniş arazilerde denenmesi, agronomik ve ekonomik etkilerin daha rasyonel biçimde ortaya konması açısından da önemli görülmektedir.

Özetle, agrivoltaik sistemlerin hem mahsul hem de yenilenebilir enerji üretimine daha az arazi kullanımına olanak tanıması bakımından oldukça verimli sistemler olduğunu ortaya koyan bu çalışmada sabit panellerle tasarlanmış ilk agrivoltaik Türkiye örneği olarak da öncül bir deneysel çalışma alanı da sunulmuştur. İlerleyen çalışmalarda verimlilik yaklaşımının, aynı zamanda maliyet ve gelirle ilgili bir hesaplama ile de desteklenmesi önemlidir. Literatürde LER değerlendirmesi yapan diğer çalışmaların da vurguladığı şekilde (Willockx ve diğerleri, 2020; Ahmed ve diğerleri, 2022) agrivoltaik sistemlerden üretilen elektriğin mevcut piyasada nasıl değerlendirildiği, tarımsal ürün fiyatları, pazar olanakları gibi ekonomik değerlendirmeler arazi verimliliğine ilişkin faydaları daha net ortaya koyabilecektir. Bu amaçla ilerleyen dönemlerde, Komşuköy Çiftliği’nde gerçekleştirilecek agrivoltaik faaliyetlere ilişkin finansal fizibilite bilgisinin de üretilmesi ve yeniliğin yaygınlaştırılabilmesi için uygun koşulların belirlenmesi hedeflenmektedir. Agrivoltaik sistemler bu tür bulguların ortaya konması sonucunda hem sürdürülebilir çiftliklerin yaygınlaşmasını hem de yenilenebilir enerji yatırımlarının hızlanmasını aynı anda destekleyebilecektir. Kırsal alanda şebekeye bağlı olmayan çiftliklerde enerji ihtiyacını karşılamak hem maliyetleri düşürmek hem de sulama olanaklarını arttırmak için önemli katkı sunabilirken, kent çeperinde ise şebekeye bağlı olarak yürütülecek agrivoltaik faaliyetler, kentlerin karbonsuzlaşma politikalarını destekleyebilecektir. Kısaca kırsal kesimle beraber kent çeperinde gelişen tarımın desteklenmesinin, kırsal kalkınma ve kentleşme açısından etkin kamu politikaları geliştirilmesi ve enerji politikalarına yön verilebilmesi adına da önemli olduğu düşünülmektedir.

Tüm bu nedenlerle agrivoltaik çalışmaların deneysel alanda desteklenmesi, yaygınlaştırılması ve bu kapsamda üretilen bilgi ve veriler ışığında Türkiye’de tarımsal üretimi destekleyen ve yenilenebilir enerji kullanımıyla birleştiren özel bir yasal zemine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle şebekeye bağlı agrivoltaik sistemlere ilişkin oluşturulabilecek yasal zemin, kapsamlı ve detaylı mevzuatlarla hayata geçirilebildiği ölçüde hem tarımsal hem de enerji alanındaki sorunlara önemli çözüm olanakları sunabilecektir. Yasal zemine ek olarak Japonya başta olmak üzere Çin, Güney Kore vd. ülkelerde sağlanan teşviklere (Shindele ve diğerleri, 2020) ve ABD’de bu alana özel bütçe ayrılmasına (DOE-USA, 2022) benzer şekillerde Türkiye için agrivoltaik araştırma alanına ek kaynak yaratılması önemli bulunmaktadır.

### **Bilgilendirme / Acknowledgements**

Yazarlar, çalışmadaki bazı üç boyutlu grafiklerin oluşturulmasında verdiği destekten dolayı ODTÜ Mimarlık Bölümünden Dilara Güney’e ve verilerin bilimsel alanda değerlendirilmesi için göstermiş olduğu çabadan dolayı Enerjisa Üretim’den Mehmet Evren Eynehan’a teşekkür eder.

*The authors would like to thank Dilara Güney from Department of Architecture at METU for her support in creating some three-dimensional graphics in the study, and Mehmet Evren Eynehan from Enerjisa Üretim for his efforts in scientific evaluation of the data.*

### **Yazar Katkıları / Author Contributions**

*Bilge Şentürk: Literatür taraması, Kavramsallaştırma, Metodoloji, Analiz, Makale Yazımı-rijinal taslak  
Duygu Kuzkaya: Veri derlemesi, Makale Yazımı-inceleme ve düzenleme  
Ömer Yalçın: AgriPV tasarım, Analiz  
Uğur M. Akyıldız: Tarımsal üretim, Veri derlemesi;  
Murat Eröz: Santral kurulumu, Veri derlemesi  
Talat Özden: Analiz, Metodoloji, Değerlendirme, Modelleme, Makale Yazımı*

*Bilge Şentürk: Literature review, Conceptualization, Methodology, Analysis, Writing-original draft  
Duygu Kuzkaya: Data Curation, Writing-review and editing  
Ömer Yalçın: AgriPV design, Analysis  
Uğur M. Akyıldız: Agricultural production, Data Curation  
Murat Eröz: Installation, Data Curation  
Talat Özden: Analysis, Methodology, Discussion, Modelling, Writing-original draft*

### **Çatışma Beyanı / Conflict of Interest**

Yazarlar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan edilmemiştir.  
*No potential conflict of interest was declared by the authors.*

### **Fon Desteği / Funding**

Bu çalışmada TarımGES (agrivoltaik sistem) kurulumu aşamasındaki tedarik süreçlerinde (panel, konstrüksiyon, batarya, bağlantı malzemeleri vb.) Enerjisa Üretim tarafından fon desteği sağlanmıştır.  
*Enerjisa has provided funding support for the procurement processes during the installation phase of AgriPV (agrivoltaic system), including panels, construction, batteries, connection materials, etc.*

### **Etik Standartlara Uygunluk / Compliance with Ethical Standards**

Yazarlar tarafından, çalışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir. *It was declared by the authors that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.*

### **Etik Beyanı / Ethical Statement**

Yazarlar tarafından bu çalışmada bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan edilmiştir. *It was declared by the author(s) that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.*



Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmalarını CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır. *The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.*

**KAYNAKÇA**

- Ağır, S., Derin-Güre, P. ve Şentürk, B. (2023a). "Farmers' Perspectives on Challenges and Opportunities of Agrivoltaics in Türkiye: An Institutional Perspective", *Renewable Energy*, 212, 35-49. DOI: 10.1016/j.renene.2023.04.137
- Ağır, S., Güre, P.D. ve Şentürk, B. (2023b). "Türkiye'de Tarım ve Enerjinin Kesişimi, Tarımfv: Güncel Yazın Işığında Bir Ön Değerlendirme", *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 41(Tarım Özel Sayısı), 1-22, DOI: 10.17065/huniibf.1250434
- Ahmed, M.S., Khan, M.R., Haque, A. ve Khan, M.R. (2022). Agrivoltaics Analysis in A Techno-Economic Framework: Understanding Why Agrivoltaics on Rice Will Always Be Profitable"i *Applied Energy*, 323, 119560.
- Altieri, M.A. (1998). "Ecological Impacts of Industrial Agriculture and the Possibilities for Truly Sustainable Farming", *Monthly Review*, Vol 50, No. 3: July-August, <https://doi.org/10.14452/MR-050-03-1998-07>
- Amaducci, S., Yin, X. ve Colauzzi, M. (2018). "Agrivoltaic Systems to Optimize Land Use for Electric Energy Production", *Applied Energy*, 220, 545-561. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.081
- Andrew, A. C., Higgins, C. W., Smallman, M. A., Graham, M., ve Ates, S. (2021). "Herbage Yield, Lamb Growth and Foraging Behavior in Agrivoltaic Production System", *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 659175.
- Barron-Gafford, G.A., Pavao-Zuckerman, M.A., Minor, R.L., Sutter, L.F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D.T., Thompson, M, Dimond, K, Gerlak, A.K., Nabhan, G.K. ve Macknick, J.E. (2019). "Agrivoltaics Provide Mutual Benefits Across the Food-Energy-Water Nexus in Drylands", *Nature Sustainability*, 2(9), 848-855.
- Beck, M., Bopp, G., Goetzberger, A., Obergfell, T., Reise, C. ve Schindele, S. (2012). "Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic-Optimization of Orientation and Harvest", *Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, EU PVSEC*, Frankfurt, Germany.
- BM. (2023). "General Assembly, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development", 25<sup>th</sup> September 2015, United Nations.
- Casares de la Torre, F.J., Varo, M., López-Luque, R., Ramírez-Faz, J., Fernández-Ahumada, L.M. (2022). "Design and Analysis of A Tracking / Backtracking Strategy for PV Plants with Horizontal Trackers after Their Conversion to Agrivoltaic Plants", *Renewable Energy*, 187, 537-550.
- Coşgun, A.E. (2021). "The Potential of Agrivoltaic Systems in TURKEY", *Energy Reports*, 7(3), 105-111.
- Dinesh, H. ve Pearce, J.M. (2016) "The Potential of Agrivoltaic Systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 299-308. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.024
- DOE-USA. (2022). "DOE Announces \$8 Million to Integrate Solar Energy Production with Farming", <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-8-million-integrate-solar-energy-production-farming>, (Erişim Tarihi: 5 Ocak 2024).
- Dollinger, J., Jose, S. (2018). "Agroforestry for Soil Health", *Agroforestry systems*, 92, 213-219.
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A. ve Ferard, Y. (2011). "Combining Solar Photovoltaic Panels and Food Crops for Optimising Land Use: Towards New Agrivoltaic Schemes", *Renewable energy*, 36(10), 2725-2732.
- Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.M., Dejean, C. ve Belaud, G. (2018). "Water Budget and Crop Modelling for Agrivoltaic Systems: Application to Irrigated Lettuces", *Agricultural Water Management*, 208, 440-453.
- Elia Campana, P., Stridh, B., Amaducci, S. ve Colauzzi, M. (2021). "Optimization of Vertically Mounted Agrivoltaic Systems", *Journal of Clear Production*, 325, 1-18.
- Elia Campana, P., Stridh, B., Amaducci, S. ve Colauzzi, M. (2021). "Optimisation of Vertically Mounted Agrivoltaic Systems", *Journal of Cleaner Production*, 325, 129091.
- FAO. (2019). "Transforming Food and Agriculture to Achieve the SDGs: 20 Interconnected Actions to Guide Decision-Makers", Rome. 74. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Goetzberger, A. ve Zastrow, A. (1982). "On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation", *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 55-69. DOI: 10.1080/01425918208909875
- Gruntman, M., Groß, D., Májeková, M. ve Tielbörger, K. (2017). "Decision-Making in Plant Under Competition", *Nature Communications*, 8, 2235. DOI: 10.1038/s41467-017-02147-2
- Horrigan, L., Lawrence, R.S. ve Walker, P. (2002). "How Sustainable Agriculture Can Address the Environmental and Human Health Harms of Industrial Agriculture", *Environmental Health Perspectives*, 110, 445-456.
- Hudelson, T. ve Lieth, J.H. (2021) "Crop Production in the Partial Shade of Solar Photovoltaic Panels on Trackers", *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics Inc. DOI: 10.1063/5.0055174
- Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633-1644.



- Katsikogiannis, O.A., Ziar, H. ve Isabella, O. (2022). "Integration of Bifacial Photovoltaics in Agrivoltaic Systems: A Synergistic Design Approach", *Applied Energy*, 309, 118475.
- Kostik, N., Bobyl, A., Rud, V. ve Salamov, I. (2020). "The Potential of Agrivoltaic Systems in the Conditions of Southern Regions of Russian Federation", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 578(1), 012047.
- Marrou, H., Wéry, J., Dufour, L. ve Dupraz, C. (2013). "Productivity and Radiation Use Efficiency of Lettuces Grown in the Partial Shade of Photovoltaic Panels". *European Journal of Agronomy*, 44, 54-66.
- Mead, R. ve Willey, R.W. (1980). "The Concept of a "Land Equivalent Ratio" and Advantages in Yields from Intercropping", *Experimental Agriculture*, 16(3), 217-228.
- Menezes, K.M., Silva, D.K., Gouveia, G.V., da Costa, M. M., Queiroz, M.A. ve Yano-Melo, A.M. (2019). "Shading and Intercropping with Buffelgrass Pasture Affect Soil Biological Properties in the Brazilian Semi-Arid Region", *Catena*, 175, 236-250.
- Newman, S.M. (1986). "A Pear and Vegetable Interculture System: Land Equivalent Ratio, Light Use Efficiency and Productivity", *Experimental Agriculture*, 22(4), 383-392.
- Ortiz-Bobea, A., Ault, T.R., Carrillo, C.M., Chambers, R.G. ve Lobell, D.B. (2021). "Anthropogenic Climate Change Has Slowed Global Agricultural Productivity Growth", *Nature Climate Change*, 11(4), 306-312.
- Padilla, J., Toledo, C. ve Abad, J. (2022). "Enovoltatics: Symbiotic Integration of Photovoltaics in Vineyards", *Frontiers in Energy Research*, 10, 1007383. DOI: 10.3389/ferg.2022.1007383.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A. (2007). "Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification",
- Pingali, P.L. (2012). "Green Revolution: Impacts, Limits, and the Path ahead", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 12302-12308. DOI: 10.1073/pnas.0912953109
- Rezai, S., Etemadi, N., Nikbakht, A., Yousefi, M., Majidi, M.M. (2018). "Effect of Light Intensity on Leaf Morphology, Photosynthetic Capacity, and Chlorophyll Content in Sage (*Salvia officinalis* L.)", *Horticultural Science and Technology*, 36, 46-57.
- Riaz, M.H., Imran, H., Younas, R. ve Butt, N.Z. (2021). "The Optimization of Vertical Bifacial Photovoltaic Farms for Efficient Agrivoltaic Systems", *Solar Energy*, 230, 1004-1012.
- Rossi, R. "Small Farms' Role in the EU Food System", European Parliamentary Research Service (EPRS), [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/733630/EPRS\\_BRI\(2022\)733630\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/733630/EPRS_BRI(2022)733630_EN.pdf), (Erişim tarihi: 22.02.2024).
- Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Oberfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Goetzberger, A. ve Weber, E. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*, 265, 114737.
- Sekiyama, T. ve Nagashima, A. (2019) "Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop", *Environments*, 6(6), 65.
- Şeker, S., Çakaloğulları, U., Bayram, E., Tatar, Ö. (2023). "Production of Sage, Oregano and Rosemary under Shading Conditions and the Effects of Light on Growth and Essential Oil Properties", *Industrial Crops and Products*, 193, 116254.
- Şentürk, B. (2023). "Tarımsal Arazilerin İkili Kullanımında Gelir-Gider Analizi: Türkiye TarımGES Örneği", *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 10(4), 1147-1155.
- Time, A., Gomez-Casanovas, N., Mwebaze, P., Apollon, W., Khanna, M., DeLucia, E.H., Bernacchi, C.J. (2023). "Conservation Agrivoltaics for Sustainable Food-Energy Production", *Plants, People, Planet*, DOI: 10.1002/ppp3.10481
- Trommsdorff, M. "An Economic Analysis of Agrophotovoltaics: Opportunities, Risks and Strategies towards a More Efficient Land Use", Econstor, <https://www.econstor.eu/handle/10419/150976>, (Erişim tarihi: 15.01.2024)
- Trommsdorff, M., Hopf, M., Hörnle, O., Berwind, M., Schindele, S. ve Wydra, K. (2023). "Can Synergies in Agriculture through An İntegration of Solar Energy Reduce the Cost of Agrivoltaics? An Economic Analysis in Apple Farming", *Applied Energy*, 350, 121619.
- Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Weselek, A., Högy, P. ve Oberfell, T. (2021). Combining Food and Energy Production: Design of An Agrivoltaic System Applied in Arable and Vegetable Farming in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110694.
- Trommsdorff, M., Vorast, M., Durga, N. ve Padwardhan, S. (2020). Potential of Agrivoltaics to Contribute to Socio-Economic Sustainability: A Case Study in Maharashtra. *India AgriVoltaics 2020*, 14-16.
- Turan, N. (2021) "Agrivoltaics and Their Effects on Crops: A Review", *Journal of Muş Alparslan University Agricultural Production and Technologies*, 1(2), 39-47.

- Valle, B., Simonneau, T., Sourd, F., Pechier, P., Hamard, P., Frisson, T., Ryckewaert, M. ve Christophe, A. (2017). "Increasing the Total Productivity of A Land by Combining Mobile Photovoltaic Panels and Food Crops", *Applied Energy*, 206, 1495-1507.
- Vijayan, R.A., Sivanarul, J. ve Varadharajaperumal, M. (2021). "Optimizing the Spectral Sharing in A Vertical Bifacial Agrivoltaics Farm", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(30). DOI: 10.1088/1361-6463/abfbac
- Wagner, M., Lask, J., Kiesel, A., Lewandowski, I., Weselek, A., Högy, P., Trommsdorff, M., Schnaiker, M-A. ve Bauerle, A. (2023). "Agrivoltaics: The Environmental Impacts of Combining Food Crop Cultivation and Solar Energy Generation", *Agronomy*, 13(2), 299.
- Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I. ve Högy, P. (2021). "Agrivoltaic System Impacts on Microclimate and Yield of Different Crops within An Organic Crop Rotation in A Temperate Climate", *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5), 59.
- Willockx, B., Herteleer, B., Cappelle, J. (2020) "Techno-Economic Study of Agrovoltaic Systems FOCUSING on orchard Crops", 1761-1766. DOI: 10.4229/EUPVSEC20202020-6DO.14.2
- Zervoudakis, G., Salahas, G., Kaspiris, G. ve Konstantopoulou, E. (2012). "Influence of light intensity on growth and physiological characteristics of common sage (*Salvia officinalis* L.)", *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 55, 89-95.