MOBİL GÜNEŞ PANELLERİ İÇİN TRAKTÖR ÜÇ NOKTA BAĞLANTISININ KULLANIMI

Numan Nuri Can ÇEKMECE

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOBİL GÜNEŞ PANELLERİ İÇİN TRAKTÖR ÜÇ NOKTA BAĞLANTISININ KULLANIMI

Numan Nuri Can ÇEKMECE
0009-0004-6963-5933

Doç. Dr. Onur TAŞKIN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2026
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

MOBİL GÜNEŞ PANELLERİ İÇİN TRAKTÖR ÜÇ NOKTA BAĞLANTISININ KULLANIMI

Numan Nuri Can ÇEKMECE

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Onur TAŞKIN

Yenilenebilir enerji kaynaklarının tarımsal uygulamalarda kullanımı, özellikle kırsal alanlarda enerjiye erişimin artırılması açısından önem taşımaktadır. Bu bağlamda mobil güneş enerji sistemleri (mobil GES), taşınabilir yapıları sayesinde farklı çalışma alanlarında esnek kullanım olanağı sunan fotovoltaik (FV) çözümler olarak öne çıkmaktadır. Ancak mobil GES'lerin farklı yol koşullarında taşınması sırasında maruz kaldıkları titreşim ve mekanik yüklerin, sistem dayanımı ve uzun dönemli performans üzerindeki etkilerinin deneysel olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, FV panellerin traktör üç nokta askı sistemine entegre edildiği özgün bir taşıma modeli ile sistemin farklı yol koşulları (asfalt, stabilize ve tarla), taşıma hızları (8 ve 10 km/h) ve FV panel taşıma açıları (0°, 5°, 10° ve 15°) altında maruz kaldığı titreşimler deneysel olarak incelenmiştir. Ölçümler, 2025 yılının Ağustos ayı içerisinde Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle kampüsünde mobil GES üzerine monte edilen üç eksenli ivmeölçer yardımıyla gerçekleştirilmiş; elde edilen veriler frekans ağırlıklı RMS ve toplam titreşim ivmesi (K_t) parametreleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, FV panellerin performansı termal kamera ve analizör ile belirlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, yol pürüzlülüğünün artmasıyla birlikte toplam titreşim seviyelerinin değiştiği, panel taşıma açısının ise titreşimlerin yönsel bileşimini etkilediği tespit edilmiştir. FV panellerden alınan termal görüntülerde denemeler öncesinde panel yüzeyinde yaklaşık 38 °C, sonrasında ise 41 °C civarında homojen bir dağılım gözlenmiştir. Denemeler öncesi ve sonrası gerçekleştirilen FV panel verim ölçümleri, gözlenen verim farklılıklarının çevresel koşullardaki değişimlerden kaynaklandığını; uygulanan titreşim ve taşıma koşullarının FV paneller üzerinde yapısal hasar ya da performans düşüşüne neden olmadığını göstermiştir. Elde edilen bulgular, uygulanan mobil GES modelinin tarımsal uygulamalarda güvenli şekilde kullanılabileceğini ve ileri çalışmalarda titreşim sönümleme, yapı optimizasyonu ve uzun dönemli dayanım analizleri için temel veri oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Taşınabilir, katlanabilir, titreşim, termal görüntüleme
2026, xii + 40 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

USE OF TRACTOR THREE-POINT HITCH FOR MOBILE SOLAR PANELS

Numan Nuri Can CEKMECE

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Biosystems Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Onur TASKIN

The use of renewable energy sources in agricultural applications is of great importance, particularly in terms of improving access to energy in rural areas. In this context, mobile solar energy systems (mobile SES) stand out as photovoltaic (PV) solutions that offer flexible use in different working environments due to their portable structures. However, the vibrations and mechanical loads to which mobile SES are subjected during transportation under different road conditions need to be experimentally evaluated in terms of system durability and long-term performance.

In this thesis, vibrations experienced by a system in which PV panels are integrated into a tractor three-point hitch system were experimentally investigated using a novel transportation model under different road conditions (asphalt, gravel, and field), transport speeds (8 and 10 km/h), and PV panel transport angles (0°, 5°, 10°, and 15°). Measurements were conducted in August 2025 at Bursa Uludag University Görükle Campus using a triaxial accelerometer mounted on the mobile SES, and the obtained data were evaluated using frequency-weighted root mean square (RMS) acceleration and total vibration acceleration (K_t) parameters. In addition, the performance of the PV panels was assessed using a thermal camera and an analyzer.

As a result of the experimental studies, it was determined that total vibration levels varied with increasing road roughness, while the PV panel transport angle affected the directional distribution of vibrations. Thermal images obtained from the PV panels showed a homogeneous surface temperature distribution of approximately 38 °C before the experiments and around 41 °C after the experiments. PV panel efficiency measurements conducted before and after the tests indicated that the observed differences in efficiency were caused by variations in environmental conditions, and that the applied vibration and transportation conditions did not result in structural damage or performance degradation of the PV panels. The findings demonstrate that the proposed mobile SES model can be safely used in agricultural applications and provide a basis for future studies on vibration damping, structural optimization, and long-term durability analysis.

Key words: Portable, foldable, vibration, thermal imaging
2026, xii + 40 pages.

TEŞEKKÜR

Bu tezin yazılması sürecinde konunun belirlenmesinden başlayarak tezin tamamlanmasına kadar fikirleri ve disiplini ile yoğun çalışma temposu içinde bana rehberlik eden, akademik tecrübesi ile gelişimime katkıda bulunan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Onur TAŞKIN'a çok teşekkür ederim.

Tez sürecinde yapılan saha çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen, Muhammed KIR'a, Şerif ARGIN'a ve Biyosistem Mühendisliği diğer bölüm personellerine ve bu yüksek lisans tezine verdikleri maddi destekten dolayı Bursa Uludağ Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (Proje No: FYL-2025-2241) en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bağımsız bir ülkenin bir üniversitesinde araştırma ve eğitim fırsatı veren ecdadımıza teşekkürü bir borç bilirim.

Numan Nuri Can ÇEKMECE
05/01/2026

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……..……..……..vii
ABSTRACT ……...viii
TEŞEKKÜR…….ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xi
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
1. GİRİŞ……..…..1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 1
3. MATERYAL ve YÖNTEM 16
3.1 Materyal 16
3.1.1 Araştırma ekipmanı.....16
3.1.2 Araştırma alanı 17
3.2 Yöntem.....18
3.2.1 Deneme deseni 18
3.2.2 Titreşim ölçümü 19
3.2.3 FV panel verimi.....21
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....23
4.1 Asfalt….....23
4.2 Stabilize 25
4.3 Tarla 27
4.4 Toplam titreşim 29
4.5 Termal görüntüleme 31
4.6 Panel verimi.....33
5.SONUÇ 35
KAYNAKLAR 36
ÖZGEÇMİŞ…….40

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
V	Volt
A	Amper
W	Watt
kW	Kilovat
m	Metre
Ah	Ampere hour (ampersaat)
Hz	Hertz
kWp	Kilowatt-peak
mm	Milimetre
mA	Miliamper
mW	Milivat
HP	Horse power (Beygir gücü)
GPM	Gallons per minute (Dakikadaki gallon sayısı)
L	Litre
s	Saniye
km	Kilometre
DC	Direct current (Doğru akım)
AC	Alternative current (Alternatif akım)
PSD	Power spectral density
3D	3 Boyut
CO_2	Karbondioksit
kg	kilogram
BG	Beygir gücü
rpm	Round per minute (Dakikadaki devir sayısı)

Kısaltmalar	Açıklama
RES	Rüzgâr enerjisi sistemi
GES	Güneş enerjisi sistemi
FV	Fotovoltaik
PV	Photovoltaic
FEM	Finite element method (Sonlu elemanlar analizi)
CRE	Commission for regulation of electricity
IEC	International electrotechnical commission
ABD	Amerika Birleşik Devletleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Mobil GES-RES tasarımı	4
Şekil 2.2.	Mobil GES uygulaması	5
Şekil 2.3.	Origami katlama desenli GES uygulaması	8
Şekil 2.4.	Güneş enerjili elektrikli traktör	8
Şekil 2.5.	Açılabilir tip mobil GES uygulaması	9
Şekil 2.6.	Kaydırılabilir tip mobil GES uygulaması	10
Şekil 2.7.	Hibrit sistem mobil GES uygulaması	11
Şekil 2.8.	Mobil GES - su pompalama sistemi	13
Şekil 2.9.	Katlanabilir GES uygulaması	13
Şekil 2.10.	Güneş enerjili çekçek	14
Şekil 2.11.	Römorklu güneş enerjili elektrikli traktör	15
Şekil 3.1.	Çalışmada kullanılan mobil GES	17
Şekil 3.2.	Çalışmada kullanılan yol koşulları	18
Şekil 3.3.	Çalışmada kullanılan farklı taşıma açıları	19
Şekil 3.4.	Titreşim cihazının montajı	20
Şekil 3.5.	Titreşim eksenleri	20
Şekil 3.6.	Yazılım ölçüm arayüzü	20
Şekil 3.7.	Yazılım rapor arayüzü	21
Şekil 3.8.	Termal kamera (a) ve güneş panel analizörü (b)	22
Şekil 4.1.	Asfalt yol koşulunda 8 km/h hızdaki farklı eksen titreşimleri	23
Şekil 4.2.	Asfalt yol koşulunda 10 km/h hızdaki farklı eksen titreşimleri	24
Şekil 4.3.	Stabilize yol koşulunda 8 km/h hızdaki farklı eksen titreşimleri	25
Şekil 4.4.	Stabilize yol koşulunda 10 km/h hızdaki farklı eksen titreşimleri	26
Şekil 4.5.	Tarla yol koşulunda 8 km/h hızdaki farklı eksen titreşimleri	27
Şekil 4.6.	Tarla yol koşulunda 10 km/h hızdaki farklı eksen titreşimleri	28
Şekil 4.7.	Farklı yol, hız ve taşıma açısında oluşan toplam titreşim	30
Şekil 4.8	Panellerin deneme öncesi termal görüntüsü	32
Şekil 4.9	Panellerin deneme sonrası termal görüntüsü	32
Şekil 4.10	Panellerin verimlilik düzeyleri	34

1. GİRİŞ

Dünyada artan nüfus, hızlı şehirleşme ve sanayileşme, özellikle enerji talebinde hızlı bir yükselişe neden olmaktadır. Bu durum, fosil yakıt kaynaklarına bağımlılığı artırmakta; bu da ekonomik olarak büyük maliyetler ortaya çıkarmaktadır. Gerçekleştirilen hesaplamalara göre, yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılacak her dolarlık yatırım ise fosil yakıtlara göre 4 ila 15 kat daha fazla ekonomik kazanç sağlamaktadır. Bu da sadece karbon salımlarının azalmasına değil, aynı zamanda ekonomik büyümeye de katkı sunmaktadır (Amin, 2016).

Tarım sektörü, enerji tüketiminin yoğun olduğu sulama, ısıtma, soğutma gibi faaliyetlerin yanı sıra tarımsal atıkların değerlendirilmesi gibi alanlarda da etkin çözümler sunabilen yenilenebilir enerji kaynaklarının uygulanabilirliği açısından oldukça elverişli bir ortam yaratmaktadır (REN21, 2024; Acosta-Silva ve ark., 2019; Coşgun ve ark., 2024). Modern tarım uygulamalarındaki enerji yoğunluğu, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesini ve sürdürülebilir enerji teknolojilerinin benimsenmesini zorunlu hale getirdiği bilimsel literatürde açıkça belirtilmiştir (Rahman ve ark., 2022). Ayrıca su temini gibi kritik fonksiyonların dizel motorlarla karşılanması hem operasyonel maliyetleri yükseltmekte hem de çevresel risk oluşturmakta, bu nedenle özellikle güneş tabanlı sulama sistemleri gibi çözümler alternatif olarak ön plana çıkmaktadır (Anonim, 2020).

Fosil yakıtların çevresel etkileri arasında, sera gazı salımları, hava kirliliği ve bunun sonucunda oluşan olumsuz sağlık etkileri öne çıkmaktadır. Bu nedenle temiz, erişilebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelmek büyük önem taşımaktadır. Güneş enerjisi, bu amaçlara en uygun çözümlerden biri olarak öne çıkmakta; özellikle düşük işletme maliyetleri, çevre dostu yapısı ve geniş erişilebilirliği sayesinde birçok sektörde kullanılabilir bir seçenek sunmaktadır. Örneğin, güneş enerjisinin maliyeti 2010'dan günümüze yaklaşık %85 azalmış ve dünya genelinde elektrik maliyetlerinde rekabetçi bir seviyeye ulaşmıştır (REN21, 2024; Anonim, 2025a).

Güneş enerjisinin tarımda kullanımı kırsal alanlarda enerjiye erişimi kolaylaştırmakta ve üretim süreçlerinin kesintisiz şekilde devam etmesini sağlamaktadır (Rafsany ve ark., 2024). “2023/6 Tarım Arazilerinin Korunması Kullanılması ve Planlanmasına Dair

Genelge" kapsamında da aynı enerji dağıtım bölgesi sınırları içerisinde toplam 20 hektardan az tarım arazisi bulunan üreticiler için sabit olmadan kurulabilen, istenildiği zaman katlanıp taşınabilen "sulama amaçlı seyyar GES'lerin" arazinin bitkisel üretim fonksiyonunu kazı/dolgu yapılarak veya beton atılarak kısmen veya tamamen ortadan kaldırmadan kurulabileceğini ifade etmiştir.

Sabit panellerin zarar görme riski ve farklı arazi sınıfı kullanımlarındaki kısıtlar, sabit sistemlerin esnekliğini azaltmaktadır. Bu sorunlara çözüm olarak geliştirilen taşınabilir sistemler, kolayca kurulup sökülebilen yapıları sayesinde hem mobilite sağlamaktadır hem de farklı kullanım alanlarına uyum göstermektedir. Özellikle katlanabilir panel düzenekleri ve çift eksenli güneş takip sistemleri ile desteklenen yeni nesil tasarımlar, güneş ışığının en verimli şekilde yakalanmasını mümkün kılmaktadır. Böylece, güneş enerjisinden elde edilen elektriksel dönüşüm verimi artırılmakta ve sistemin farklı çevresel koşullarda etkin bir şekilde kullanılabilmesi sağlanmaktadır (Jasim ve Taheri, 2018).

Mobil GES'ler, kırsal alanlarda şebekeden bağımsız da çözümler sunarak bu ihtiyacı karşılamada önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Mevcut mobil GES'ler genellikle tekerlekli römorklara entegre edilerek kullanılmaktadır. Ancak bu yöntem dengesizlik, ağırlık dağılımı ve yetersiz sünme dayanımı gibi problemler nedeniyle hem taşıma sırasında hem de sahada operasyonel sorunlara yol açabilmektedir. Bu sistemlerin tarla şartlarında esneklik sunmaması mobil GES'lerin tasarımına yönelik ihtiyacı artırmaktadır (Rúa Ramirez ve ark., 2019). Mobil GES'lerin tarım araçlarına entegre edilmesiyle de enerjiye ulaşımın daha kolay, sürdürülebilir ve taşınabilir hâle gelmesi mümkün olabilmektedir (Lanjekar ve ark., 2023).

Traktörlerin üç nokta bağlantı sistemleri, tarımsal ekipmanların standart ve güvenli şekilde taşınmasına olanak tanıyan yaygın bir mekanizmadır (Anonim, 2025b). Bu bağlantı noktasının, mobil GES'lerin taşıyıcı gövdesi olarak kullanılması hem mevcut traktör altyapısının değerlendirilmesini hem de taşıma sırasındaki yapısal titreşimin azaltılmasını sağlayabilecektir. Mobil GES'lerin traktör entegrasyonu sırasında yapısal

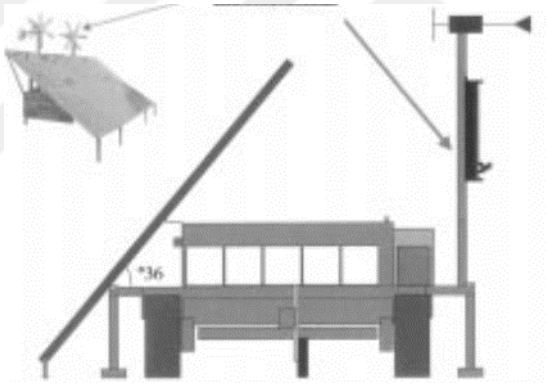
stabilite, titreşim dayanımı ve modüler taşıyıcısının uygun şekilde konumlandırılması kritik öneme sahip olacaktır.

Bu tez çalışması, FV panellerin traktör üç nokta askı sistemine entegre edilerek taşınabilirliğinin araştırılmasını oluşturmaktadır. Bu bağlamda, katlanabilir FV panel sisteminin traktör üç nokta askı sistemine monte edilerek farklı yol ve taşıma koşullarında kullanılması sırasında maruz kaldığı titreşimlerin, sistem üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi planlanmıştır. Sistem tasarımının uygunluğu, kullanım kolaylığı, çevresel dayanıklılığı ve sürdürülebilirliği de analiz edilmeye çalışılmıştır.

Tez çalışmasının sonunda, tarımda kullanılabilir, ekonomik ve çevreci bir mobil GES'in tasarım prensipleri ortaya konulmaya çalışılmış ve üç nokta askı sisteminin bu alandaki potansiyel uygulamalarına katkı sağlanması hedeflenmiştir. Geliştirilmesi hedeflenen sistemin hem tarımsal uygulamalarda enerjiye erişimi kolaylaştırması hem de Türkiye'nin tarım ve enerji politikaları açısından çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlaması beklenmektedir. Sonuç olarak, geliştirilen modelin, tarımsal faaliyetlerde enerji üretimi sağlayabilecek mobil, pratik ve uygulanabilir bir sistem sunması; aynı zamanda mobil GES tasarımında titreşim, yol pürüzlülüğü ve taşıma geometrisinin etkilerinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Alnaser (1999), güneş ve rüzgâr enerjisinin kompakt ve pratik bir şekilde kullanıldığı yenilikçi bir sistemi tanıtmıştır. Bahreyn Üniversitesi ile Long International iş birliğinde tasarlanıp üretilen mobil güneş ve rüzgâr enerjili jeneratör sistemi, 1.5 kW güç üretme kapasitesine sahiptir. Yenilenebilir enerjiye dayalı bu sistem, bir römork üzerine yerleştirilmiş ve tamamen kendi içinde çalışabilecek şekilde yapılandırmışlardır. Sistem, her biri 75 W güç üretebilen 16 adet güneş paneli, 9.8 m/s rüzgâr hızında 50 W çıkış sağlayan iki adet Rutland tipi rüzgâr jeneratörü, her biri 12 V ve 100 Ah kapasiteli 20 adet derin döngülü batarya, bir şarj kontrol ünitesi ve 1500 VA gücünde, 6.5 A akım ve 50 Hz frekans sağlayan bir voltaj dönüştürücü içermektedir. Sistemin kolay kurulum, sessiz çalışma, estetik görünüm, çevre dostu yapı, güvenilirlik ve eğitici değer gibi avantajlara sahip olduğunu vurgulamışlardır.



Şekil 2.1. Mobil GES-RES tasarımı (Alnaser, 1999)

Assmus ve ark. (2011), FV modüllerin dinamik davranışını farklı yöntemlerle analiz etmişlerdir. Açık alanda gerçekleştirilen sapma ölçümleriyle modüllerin rüzgâr yükleri altındaki dinamik davranışlarını ve rüzgâr hızı ile mekanik sapma arasındaki ilişkiyi ortaya koymuşlardır. Kapalı alan testlerinde ise modüller, akustik titreşimle uyarılmış ve bu sırada oluşan sapmaları izlemişlerdir. Farklı modüllerin rezonans frekanslarının 10–100 Hz aralığında olduğunu belirlemişlerdir. Sayısal hesaplamalar, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deneysel bulgularla yüksek oranda uyum bulmuşlardır.

Morris ve ark. (2012), güneş enerjili sulama sistemlerinin fiyatlarının düşmesi, uzun ömürlü olmaları ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle, uzak ve şebekeden bağımsız bölgelerde su pompalamak için öncelikli tercih hâline geldiğini belirtmişlerdir. Güneş enerjili su pompalamanın özellikle yaz aylarında hayvanların en çok suya ihtiyaç duyduğu zamanlarda yüksek verimle çalıştığını vurgulamışlardır. Ayrıca, bu sistemlerin doğru önlemler alındığı takdirde kış aylarında da kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.



Şekil 2.2. Mobil GES uygulaması (Morris ve ark., 2012)

Duran ve ark. (2014), dünyada hızla gelişen FV endüstrisinin eğitim ve araştırma alanlarında kullanılabilecek uygulamalarına dikkat çekmişlerdir. Araştırmada, hidroelektrik ve rüzgâr enerjisinden sonra küresel kurulu güç bakımından üçüncü en önemli yenilenebilir enerji kaynağı haline gelen FV sektörünün 2011 yılında yaklaşık %70 oranında büyüdüğünü belirtmişlerdir. Meksika'da ise Enerji Düzenleme Komisyonu (CRE) tarafından 2007 yılında yayımlanan şebeke bağlantı sözleşmesi ile küçük ölçekli FV sistemlerinin (konutlar için 10 kWp, sanayi için 30 kWp'ye kadar) kurulmasına izin verilmiş, bu durum ülke genelinde FV sektörünün önemli ölçüde gelişmesine katkı sağladığını bildirmiştir. Söz konusu gelişmeler doğrultusunda, Meksika Eyalet Özerk Üniversitesi'nde sürdürülebilir enerji sistemleri üzerine yeni bir mühendislik programı başlatılmış ve bu program kapsamında deneysel çalışmalar için mobil bir FV modül değerlendirme sistemi geliştirilmiştir. Tasarlanan mobil sistem, farklı FV modül düzenlerini (2 veya 4 modül) çeşitli konum ve açılarda deneme imkânı sunmakta; gölgelenme ve atmosferik koşulların etkilerinin incelenmesine de olanak tanımıştır. Ayrıca sistem, veri toplama donanımı sayesinde FV modül eğrilerinin elde edilmesini

sağlamıştır. Çalışmada geliştirilen prototipin, yalnızca eğitim amaçlı değil aynı zamanda farklı FV malzemelerinin ve hücre tiplerinin karşılaştırmalı olarak deneysel incelemelerinde de kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Shawky ve ark. (2015), Mısır'da içme suyu yetersizliğiyle mücadele amacıyla, ters osmoz teknolojisine dayalı tuzdan arındırma projelerinin özellikle kırsal bölgelerde uygulamaya geçirildiğini belirtmişlerdir. Ters osmoz teknolojisinin basınca dayalı bir süreç olması nedeniyle, çalışmada FV enerji ile entegre edilen mobil ve küçük ölçekli, bataryasız bir RO tuzdan arındırma sistemi prototipi tasarlamış ve test etmişlerdir. Güneş enerjisiyle çalışan bu sistem, geleneksel tuzdan arındırma süreçlerinin fosil yakıtlara bağımlılığını azaltarak operasyonel maliyetleri düşürme ve çevresel sürdürülebilirliği artırma potansiyeline sahiptir. Sistemin taşınabilirliği sayesinde, içme suyu temini olmayan izole yerleşimlere temiz su ulaştırılması hedeflenmiştir. Bu mobil FV-RO sistem, içme suyu üretimini batarya kullanmaksızın gerçekleştirebilmekte ve yüksek tuzluluk içeren yer altı sularında dahi uluslararası içme suyu standartlarını sağlayabilmiştir.

Köntges ve ark. (2016), FV modülün bir sistemine entegre edilmeden önceki taşıma süreçlerinde karşılaşabileceği tipik yük durumlarına karşı test edilmesinin gerekliliğini araştırmışlardır. Araştırmada, iyi paketlenmiş yatay ve dikey FV modül istiflerinde, taşıma sırasında modül köşelerinde oluşan titreşim ivmeleri ölçülmüştür. Dikey taşımanın, yatay istiflenmiş modüllere kıyasla hücre çatlakları üzerinde daha az etkili olduğunu belirlemişlerdir. En yüksek rastgele titreşimleri, kötü yol koşullarında küçük kamyonlar kullanan bir nakliye firmasıyla yapılan taşımalarda gözlemlemişlerdir. Yatay taşınan modüller için elde edilen rastgele titreşimlerin azaltılmış güç spektral yoğunluğu (PSD), IEC 62759-1 standardında modül paketleri için önerilen PSD spektrumuna oldukça benzediğini bildirmişlerdir.

Kilikevičius ve ark. (2016), FV sistemlerin verimliliğinin, FV modüllerinin kristal yapısının rüzgâr gibi iklimsel faktörler ve benzeri mekanik dinamik etkiler nedeniyle zarar görmesi durumunda ciddi şekilde azaldığını ortaya koymuşlardır. Mevcut FV modülü sertifikasyonlarının yalnızca statik testleri (IEC 61215 ve IEC 61646 standartlarına göre) kapsadığını, ancak FV modüllerinin gerçekte dinamik ortamlarda

çalıştığını vurgulamışlardır. Bu bağlamda, FV modüllerin sertifikalandırılmasında dinamik yük etkilerinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektir. FV modüllerin araba, tekne gibi dinamik yapıya sahip taşıtlarda kullanılması durumunda karşılaştıkları yüklerin çoğunlukla dinamik nitelik taşıdığına dikkat çekmişlerdir. Bu durumu incelemek üzere, dinamik yüklerin FV modülleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla deneysel ve teorik bir çalışma yürütmüşlerdir. Özel bir test düzeneği tasarlanarak, modüller genliği 7 mm'yi geçmeyen dışsal döngüsel dinamik yüklerle yüklenmişlerdir. Uyarımlar, 0 ila 40 Hz aralığında frekans süpürme modu kullanılarak uygulanmış ve bu yöntemle çeşitli hava koşulları simüle edilmiştir. Elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar, FV modüllerin farklı rüzgâr hızları gibi değişken çevresel koşullara verdikleri tepkileri gözler önüne sermişlerdir.

Verma ve ark. (2017), titreşimlerin esnek güneş paneli üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Titreşimler, esnek güneş panelinin arka tarafına yerleştirilen titreşim jeneratörüyle üretilmiştir. Sistemin performansı, güneş panelinden elde edilen gerilim (V), akım (mA) ve güç (mW) açısından analiz edilmiştir. Sonuçlar, 40 ila 680 Hz arasındaki frekans aralığı için analiz edilmiştir. En yüksek ve en düşük güç çıkışı sırasıyla 360 Hz ve 120 Hz'de 15.818 mW ve 13.92 mW olarak elde edilmiştir. En yüksek gerilim ve akım çıkış seviyeleri sırasıyla 360 Hz ve 560 Hz'de elde edilmiştir.

Jasim ve Taheri (2018), artan enerji ihtiyacı karşısında güneş enerjisinin, mevcut enerji krizine çözüm sunabilecek cazip bir seçenek hâline geldiğini ifade etmişlerdir. Ancak, panellerin sabit yapıda olması, kurulumu, taşınması ve korunmasını zorlaştırmakta ve hasar riskini artırdığını bildirmişlerdir. Araştırmacılar, Miura origami katlama desenine ve mekanik döner yapıya dayalı olarak, güneş panellerinin kolaylıkla açılıp kapanabildiği taşınabilir bir sistem prototipi önermişlerdir. Sisteme ayrıca, güneş enerjisi dönüşüm verimliliğini en üst düzeye çıkarmak amacıyla eğimli-salınımlı çift eksenli aktif bir güneş takip mekanizması entegre etmişlerdir.



Şekil 2.3. Origami katlama desenli GES uygulaması (Jasim ve Taheri, 2018)

Vaidya (2019), yerel olarak üretilen yenilenebilir enerjiyle çalışabilecek küçük boyutlu bir elektrikli traktörün uygulanabilirliğini araştırmayı hedeflemiştir. Bu doğrultuda, araştırmada alternatif teknik çözümler kullanılarak bir elektrikli traktör sistemi geliştirilmiş; sistemin çekiş gücü ve saatlik işletme maliyetleri, benzer güç seviyesindeki dizel motorlu bir traktörle karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca, uygun bir elektrik üretim, depolama ve iletim sistemiyle desteklenen prototip bir elektrikli traktör tasarlanmış ve değerlendirilmiştir.



Şekil 2.4. Güneş enerjili elektrikli traktör (Vaidya, 2019)

Rúa Ramirez ve ark. (2019), büyük ölçekli tarım arazilerinde sulama ihtiyacı duyulan alanları kapsayabilecek büyük kapasiteli ve sağlam bir FV güneş enerjili römork sisteminin tasarım ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Fosil yakıtlarla (benzin, dizel) çalışan sulama motorlarının neden olduğu çevresel ve ekonomik sorunlara karşı sürdürülebilir bir çözüm olarak güneş enerjisine dayalı bir sistemin geliştirilmesi

gerektiğini vurgulamışlardır. Geliştirilen sistem, doğal güneş döngüsünden yararlanılarak çalışmakta ve tarımsal sulamada kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Araştırmada, iklim değişikliğinin ve fosil yakıt tüketiminin yol açtığı sera gazı emisyonlarının tarımsal faaliyetler üzerindeki olumsuz etkilerine dikkat çekilmiş; tarımsal üretim alanlarının ve su kaynaklarının korunmasıyla hem çiftçilerin refahının hem de tarımsal ekonominin sürdürülebilirliğinin sağlanabileceği belirtilmiştir. Çalışmada kullanılan 2 HP gücündeki salyangoz tip elektrikli pompanın, maksimum 49 m basma yüksekliği ve 55 GPM (12.490 L/saat) debi kapasitesiyle sulama uygulamalarında verimli sonuçlar verdiği rapor edilmiştir. Boyacá bölgesi için yapılan hesaplamalarda, günde 5 saatlik sulama ile toplam 62.450 L su sağlanabileceği ve 625 ağaç için ağaç başına yaklaşık 992 L su temin edilebileceği ortaya konulmuştur. Ayrıca, sistem tasarımına eklenen yaylı sönümleme mekanizmasının titreşimleri azaltarak şasenin deformasyonunu ve yapısal aşınmayı engellediği, böylece sistemin dayanıklılığını artırdığı vurgulanmıştır.



Şekil 2.5. Açılabilir tip mobil GES uygulaması (Rua Ramirez ve ark., 2019)

Gangwar ve ark. (2020), Bihar eyaletinde yer alan Rajendra Prasad Merkez Tarım Üniversitesi tarafından geliştirilen çeşitli güneş enerjili sulama sistemlerini tanıtmışlardır. Bu sistemler arasında traktör römorkuna monte edilebilen taşınabilir sistemler de yer almaktadır. Traktör römorku üzerine yerleştirilen katlanabilir güneş panelleri ile 2 HP gücünde dalgıç pompa çalıştırılmıştır. Sistem, kolay taşınabilir yapısı sayesinde farklı tarımsal alanlarda sulama amacıyla kullanılabilmiştir. Araştırmada, güneş modüllerinin kapasitesi 1800 Wp olarak belirlenmiş ve yaklaşık 15 m basma yüksekliğinde 5,75 L/s debi elde edilmiştir. Bu sistemin günlük çıktısının 100.000 litre olduğu ve yaklaşık 2–2,5

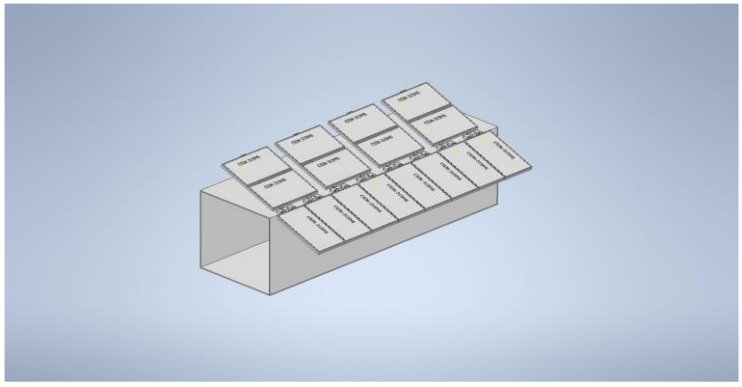
hektar tarımsal alanın sulanmasında kullanılabileceği rapor edilmiştir. Ayrıca sistemin maliyetinin yaklaşık 400.000 INR seviyesinde olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.6. Kaydırılabilir tip mobil GES uygulaması (Gangwar ve ark., 2020)

Desai ve ark. (2021), FV modüllerin taşınması sürecinin aşırı titreşim ve darbelere maruz kaldığını belirtmişlerdir. Bu dinamik yüklerin, FV modüllerdeki güneş hücreleri ve cam yapıda çatlaklara neden olabileceği ifade edilmiştir. Taşıma sırasında güneş hücrelerinde oluşan çatlakların, her zaman modülün elektriksel performansını anında etkilemediği; ancak uzun vadede, sahada çalışma sırasında rüzgâr yükü, kar yükü ve termal gerilmeler gibi çevresel etkenlerle bu çatlakların ilerleyebileceği vurgulanmıştır. Çatlakların ilerlemesi, FV modül hücrelerinde elektriksel izolasyonlara neden olarak güç kaybına yol açabilmektedir. Bu nedenle, FV modüllerin taşınma sırasında uğrayabileceği hasarın en aza indirilmesinin büyük önem taşıdığını bildirmişlerdir. Endüstri standartlarına uygun şekilde ambalajlanan FV modülleri 270 km'lik bir mesafeye taşıyarak, çeşitli modüllere ivmeölçerler yerleştirmişlerdir. Taşımaya benzer koşulların simüle edildiği sonlu elemanlar modellemesi kullanılarak FV modül montajının doğal titreşim frekanslarını hesaplamışlardır. Taşınma sırasında modüllerin doğal frekanslarında titreştiğini ortaya koymuşlardır. Simülasyonla hesaplanan ilk dört doğal titreşim frekansı, taşıma süresince FV modüllerin maruz kaldığı güç spektral yoğunluğu (PSD) profillerinde gözlemlenen tepe noktalarıyla yüksek uyum göstermiştir. Elde edilen sonuçların, FV modülleri için ambalajlama yöntemleri, modül boyutları ve malzeme seçiminin iyileştirilmesinde fayda olabileceğini ifade etmişlerdir.

Pummer ve ark. (2021), uzak ya da kentsel şantiyelere yeterli ve etik açıdan daha kabul edilebilir bir enerji kaynağı sağlayabilmek amacıyla, taşınabilir bir güneş enerjili jeneratör sisteminin tasarımı ve uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Geliştirilen mobil güneş enerjili römork; FV paneller, DC-AC dönüşümü, depolaması ile enerji dağıtımı için gerekli bileşenleri barındıran taşınabilir bir sistemdir. Taşınabilir GES tasarlanarak şebeke elektriğinin bulunmadığı kırsal ve uzak bölgelerde enerji sağlamaya yönelik bir çözüm geliştirilmiştir. Sistem, özellikle şebekeden bağımsız inşaat sahalarında, doğal afetler sırasında veya temiz enerjiye yönelmek isteyen kullanıcılar için alternatif bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Çalışmada, treylerin boyutlandırılması sırasında bir inşaat sahası örnek olarak alınmış, yük gereksinimleri hesaplanmış ve bu doğrultuda bileşen seçimi yapılmıştır. Tasarım sürecinde ayrıca Autodesk Inventor yazılımı kullanılarak treylerin 3D modeli oluşturulmuştur. Son ürün olarak MST'nin 37 kWh batarya kapasitesine, 5 kW güneş paneli gücüne ve 8 kW anlık güç sağlayabilen invertere sahip olduğu rapor edilmiştir. Sistem için malzeme maliyeti 44.050 ABD doları, işçilik dâhil üretim maliyeti 45.450 ABD doları olarak hesaplanmıştır. Ticari üretim senaryosunda, yılda yaklaşık 100 birim üretildiğinde satış fiyatının 50.000 ABD doları olacağı öngörülmüştür.

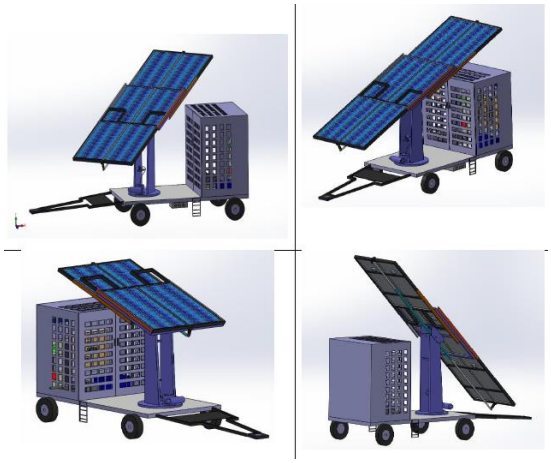


Şekil 2.7. Hibrit sistem mobil GES uygulaması (Pummer ve ark., 2021)

Nenciu ve ark. (2021), elektrikli araçlar alanında büyük bir genişleme yaşanırken, tarla koşullarında çalışan elektrikli traktörler, yüksek güç gereksinimleri ve sınırlı batarya kapasitesi nedeniyle büyük ekipman üreticileri tarafından henüz cazip görülmediğini ifade etmişlerdir. Bu temel sınırlamaya yönelik bir çözüm olarak, işlem yapılacak

arazinin yakınına kurulacak FV kaynaklar aracılığıyla bataryaların sahada şarj edilmesini ele almışlardır. Bu tür sistemlerin, özellikle elektrik şebekesinin uzak veya aşırı yüklü olduğu bölgelerde kullanılması, CO_2 emisyonlarının azaltılması ve yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması açısından önemli bir potansiyel sunduğunu bildirmişlerdir.

El-Ghetany ve ark. (2022), dizel ve elektrikli jeneratörlere alternatif bir enerji kaynağı olarak güneş enerjili su pompalama sistemlerinin çeşitli avantajlarını ortaya koymuşlardır. Bu sistemlerin çevre dostu, basit yapılı, kurulumu kolay ve her saha koşulunda erişilebilir olduğu belirtilmiştir. Sistemin performansını etkileyen başlıca parametrelerin ise FV modülünün eğim açısı ve yönelimi olduğu, çünkü bu parametrelerin güneş ışınımını, elektriksel güç üretimini ve günlük üretilen su miktarını doğrudan etkilediği vurgulanmıştır. Mısır'ın Giza kentinde bulunan Ulusal Araştırma Merkezi'ne bağlı Güneş Enerjisi Bölümü bünyesinde gerçekleştirdikleri araştırmada, güneş panellerinin kolayca katlanabilir yapıda tasarlanması sayesinde sistemin farklı alanlara taşınarak sulama amacıyla kullanılabildiği belirtmişlerdir. Bu taşınabilirlik, özellikle altyapının yetersiz olduğu veya şebekeden uzak tarım alanlarında önemli bir avantaj sağlamıştır. Ayrıca mobil GES'in, farklı bölgelerde kurulum kolaylığı sunarak sulama ihtiyacına göre esnek kullanım imkânı verdiği vurgulanmıştır. Güney yönelimli ve eğim açıları 0°, 10°, 40° ve 80° olan durumlarda, en yüksek günlük su üretiminin yaz aylarında, en düşük üretimin ise kış aylarında gerçekleştiğini bulmuşlardır. Yaz mevsiminde maksimum su üretimini, 10° eğim ve 0° sapma açısıyla (güney yönelim) elde etmişlerdir. Kış mevsiminde ise en yüksek verimi, 60° eğim ve 0° sapma açısıyla kaydetmişlerdir. Bu doğrultuda, FV sisteminin eğim ve yönelim optimizasyonunun, tüm yıl boyunca su üretim verimliliği üzerinde belirleyici bir rol oynadığı sonucuna varmışlardır.



Şekil 2.8. Mobil GES - su pompalama sistemi (El-Ghetany ve ark., 2022)

Sagor ve ark. (2023), tarımsal kullanım amacıyla güneş enerjisiyle çalışan elektrikli çapa makinesi tasarlamayı hedeflemişlerdir. Bu çalışmanın temel amaçları; yakıt tüketimini azaltmak, çevreyi kirletmeyen bir sistem geliştirmek ve enerji fiyatlarındaki artışların önüne geçmektir. Çalışmanın çıktıları, traktör bataryasının şarjda kalmasını sağlayacak taşınabilir bir şarj istasyonu prototipinin geliştirilmesine de katkı sağlamaktadır. Yapılan testlerde, sistemin herhangi bir sorun yaşanmaksızın çalıştığı ve elde edilen verilerin belirlenen mühendislik standartları çerçevesinde kabul edilebilir olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 2.9. Katlanabilir GES uygulaması (Sagor ve ark., 2023)

Lanjekar ve ark. (2023), geleneksel enerji talebini azaltmak ve sera gazı salımlarını en aza indirmek amacıyla elektrikli araçlara yönelik ilginin arttığını belirtmişlerdir. Bugüne

kadar yapılan çalışmalarda tarımsal taşımacılık (örneğin iş gücü, tarım aletleri ve ürün nakli) konusundaki uygulamaların sınırlı kaldığını ifade etmişlerdir. Bu nedenle, Hindistan'daki tarım koşullarına uygun şekilde, arka tahrikli ve 450 W kapasiteli üç tekerlekli bir güneş enerjili çekçek tasarlamış, geliştirmiş ve yerel iklim koşullarında değerlendirmişlerdir. Geliştirilen araç, üç adet 150 watt'lık polikristal güneş paneli içermekte olup, üretilen elektrik enerjisi 48 volt 30 Ah kapasiteli bir lityum iyon bataryada depolanmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, geliştirilen aracın taşıma kapasitesi 300 kg'dır ve işçi veya ürün taşımacılığında kullanılabilmektedir. Bu araç sayesinde yıllık yaklaşık 350 litre fosil yakıt tasarrufu sağlanmakta ve yaklaşık 837 kg CO_2 salımı önlenmektedir. Sonuç olarak, güneş enerjili tarım aracı, yalnızca fosil yakıt tüketimini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda sera gazı salımının büyük ölçüde azaltılmasına da katkı sunmaktadır.



Şekil 2.10. Güneş enerjili çekçek (Lanjekar ve ark., 2023)

Rafsany ve ark. (2024), çok amaçlı tarımsal uygulamalar için geliştirilen "Güneş Enerjili Elektrikli Traktör" projesini tanıtmışlardır. Bu traktör, FV paneller, lityum-iyon batarya ve çift motor sisteminin entegrasyonu yoluyla geleneksel tarım uygulamalarını dönüştürmeyi amaçlamaktadır. Arazi testleri; traktörün sürme, harmanlama ve sulama gibi işlemleri yüksek verimlilik, çok yönlülük ve güvenilirlikle gerçekleştirebildiğini göstermişlerdir. Ayrıca, bu yenilikçi çözümün ekonomik uygulanabilirliği ve çevresel etkileri de analiz edilmiş ve sürdürülebilir tarıma önemli katkılar sunabileceği vurgulamışlardır.



Şekil 2.11. Römorklu güneş enerjili elektrikli traktör (Rafsany ve ark., 2024)

Albadry ve ark. (2025), tarım sektörünün sulama, hasat ve taşıma gibi faaliyetlerde yoğun şekilde fosil yakıtlara bağımlı olduğundan, güneş enerjisi teknolojilerinin entegrasyonun bu alanda önemli faydalar sağlayabileceğini ifade etmişlerdir. Söz konusu teknolojiler; maliyetleri düşüreceğini, verimliliği artıracağını ve çevresel etkileri azaltacağını ifade etmişlerdir. Operasyonel maliyetleri ve çevresel etkileri en aza indirerek yükleme verimliliğini artırmak amacıyla güneş enerjili bir şeker kamışı yükleme makinesi tasarlamışlardır. Geliştirilen sistem; güneş panelleri, batarya grubu, elektrik motoru ve hidrolik bileşenlerden oluşmakta olup, 1500 kg ağırlığında ve 250 kg yük kapasitesine sahip olup 2 m/s hızda çalışmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Enerji hesaplamalarına göre günlük 24.000 Wh enerji gereksinimi, 710 W gücünde güneş panelleri ve batarya sistemi ile karşılanmaktadır. İlk yatırım maliyeti yaklaşık 500.000 EGP olarak hesaplanan sistemin, dönüm başına yalnızca 50 EGP'lik işletme maliyetiyle sürdürülebilir ve ekonomik bir alternatif sunduğu ifade edilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Araştırma ekipmanı

Asılır tip ekipman bağlamanın avantajlarından (yol durumunda kolayca taşınabilmesi, ekipmanın çalışmasının kontrolünün kolay olması ve traktöre bağlanan ekipmanın ağırlığı dinamik yük olarak arka aksa aktarılabildiğinden traktörde patinajı azaltma) (Gülsoylu ve Çakmak, 2016) faydalanmak için uygulamadaki ve literatürdeki mobil GES örneklerinden farklı olarak üç nokta askı sistemi aracılığı ile taşınması bu tez çalışmasında gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen mobil GES'in üç nokta askı sistemi, eski bir helikopter tip ot toplama makinesinin yeniden şekillendirilmesi ile oluşturulmuştur. Yol durumunda taşıma kolaylığı sağlamak ve muhafaza zamanlarında alan ihtiyacını azaltmak için de manuel olarak 90° katlamalı bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen mobil GES'in denemeleri için Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Biyosistem mühendisliği Bölümü traktörü olan New Holland L65 (65 BG) kullanılmıştır. Traktörün kütlesi 3200 kg olmakla beraber ön tarafına tutunmayı arttırmak ve şahlanmayı engellemek amacıyla ağırlığı 40 kg olan 6 adet ağırlık yerleştirilmiştir. Traktörün boyutları 2860x2050x4280 (uzunluk, genişlik, yükseklik) mm'dir. Traktörün ön tekerleri 7.50 R 18 ve arka tekerlekleri 16.9 R 30 boyutlarında olup ön tekerler için iz genişliği 1680 mm ve arka tekerler için 1630 mm'dir. Ön lastiklerde 18 PSI, arka lastiklerde ise 30 PSI hava basıncı uygulanmıştır.

Şekil 3.1'de iki panelden (SFP250, Solarfield, Türkiye) oluşturulmuş mobil GES'in farklı görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.1a'da üç nokta askı sistemine bağlantı düzeni, Şekil 3.1b'de kullanım pozisyonu (açık), Şekil 3.1c'de panellerin taşıma kolaylığı sağlayacak kapalı pozisyonu ve Şekil 3.1d'de traktör hidrolik alt kollarının GES'i yerden yükselterek taşıma pozisyonuna getirilmesi gösterilmiştir. Sonuç olarak 8 cm genişlikte ve yaklaşık 2 m uzunlukta (çatı dahil) paneller taşınabilmesi için gerekli koşullar oluşturulmuştur.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan mobil GES

3.1.2 Araştırma alanı

FV paneller verimliliklerini bazı bozulmalar sonucunda kaybederler. Bu hata veya kusurlar; EVA kahverengileşmesi, EVA'da delaminasyon ve kabarcık oluşumu, arka tabaka polimer çatlakları, ön yüzey kirlenmesi, panelin alt kenarında kararma, bağlantı kutusu korozyonu, akım çubuğu oksidasyonu ve solması, bağlantı kablolarında yalıtım bozulması, cam kırılması, salyangoz izleri, hızlı performans düşüşü ve hızlı yapısal bozulma vb. şekilde sınıflandırılabilir (Djordjevic ve ark., 2014). Ayrıca, Fitz (2012) taşıma esnasındaki titreşimler de çatlaklara neden olabileceğini bildirmiştir. Bu doğrultuda, tez çalışması 2025 yılı ağustos ayında Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle kampüsünde bulunan ve Şekil 3.2a'da gösterilen asfalt, Şekil 3.2b'de gösterilen stabilize ve Şekil 3.2c'de gösterilen tarla koşullarında yürütülmüştür.



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan yol koşulları

3.2 Yöntem

3.2.1 Deneme deseni

Tez çalışmasında traktör orta kolda bulunan hidrolik pistonun (60 cm, Führer, Türkiye) ayarlanması ile mobil GES için farklı eğimler oluşturulmuştur. Şekil 3.3a'da 0º, Şekil 3.3b'de 5º Şekil 3.3c'de 10º ve Şekil 3.3d'de 15º eğim ile 3 tekerrürlü denemeler gerçekleştirilmiştir.

Farklı yol (asfalt, stabilize ve tarla) koşullarında traktör 8 km/h hız için 3. takviye, 2. vites ve 1450 rpm'de ve 10 km/h hız için ise 3. takviye ve 3. vites 1800 rpm'de 150 sn süreyle ilerlemiştir. Titreşimin azaltılabilmesi amacıyla paneller zincir ile sabitlenmiş ve paneller arasına plastik takozlar yerleştirilmiştir.



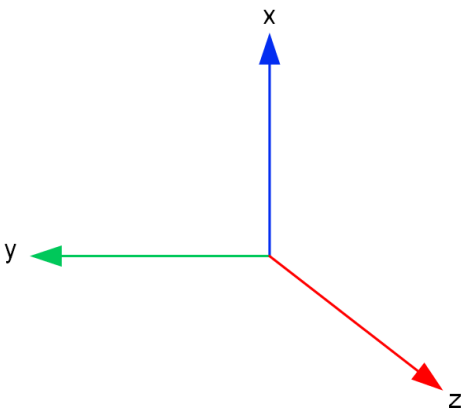
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan farklı taşıma açıları

3.2.2 Titreşim Ölçümü

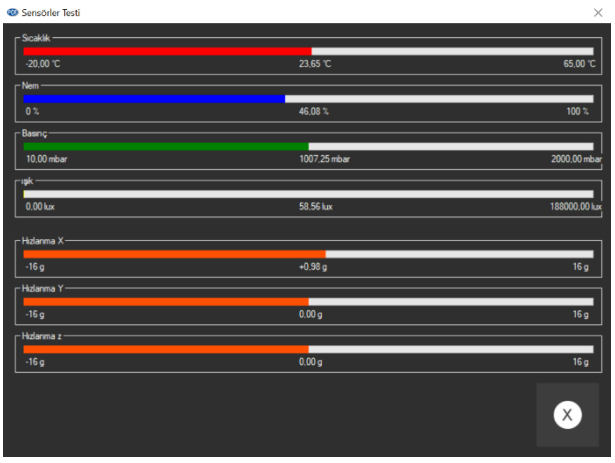
Şekil 3.4'de gösterilen ölçüm cihazı (PCE-VDL 16I, PCE Ins., Almanya) mobil GES üzerine montajlanmıştır (Mert ve ark., 2021). Ölçümler 200 Hz frekans ile "g" değerleri olarak cihazın içinde bulunan veri kaydediciye 3 boyutlu dikey, yatay ve düşey (x, y, z) olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.5). Ölçüm arayüz görüntüsü Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.4. Titreşim cihazının montajı

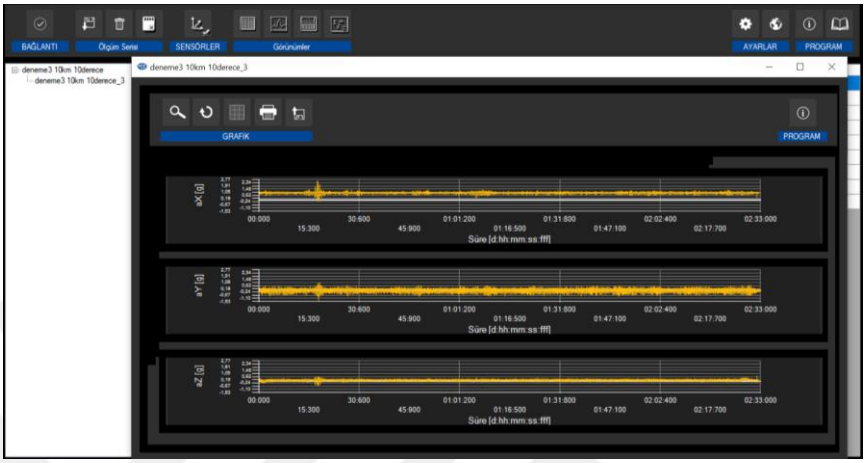


Şekil 3.5. Titreşim eksenleri



Şekil 3.6. Yazılım ölçüm arayüzü

Sensörde toplanan veriler cihaza ait Şekil 3.7'de gösterilen yazılım (PCE-VDL X) ile test, analiz ve rapor oluşturma gibi bir takım araçları birleştiren komple bir arayüz ile incelenebilmektedir. Ölçüm sonuçlarının tablo görünümü, kombine görünümü ya da istatistiksel değerlendirmelerine imkân sağlamaktadır.



Şekil 3.7. Yazılım rapor arayüzü

Titreşim değerlerinin belirlenmesinde TS EN ISO 5349-1 standardına göre frekans ağırlıklı ivmenin karelerinin ortalamasının karekökü (Root Mean Square – RMS) değeri (ahw) ele alınmaktadır. Ölçümlerde her titreşim koordinat ekseni için ivme değerleri ölçülmüştür. Üç eksenli frekans ağırlıklı ivmeleri birleştiren toplam titreşim ivmesi değerleri (K_t) ise Eşitlik 1 ile belirlenmiştir (Mert ve ark., 2021).

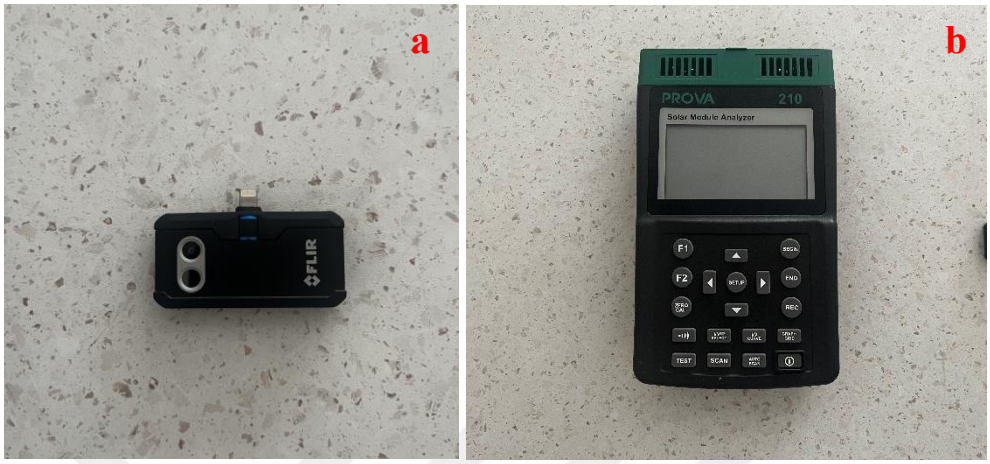
$$K_t = \sqrt{K_x^2 + K_y^2 + K_z^2} \quad (1)$$

Eşitlikte; K_x: x eksenindeki, K_y: y eksenindeki, K_z: z eksenindeki frekans ağırlıklı ivmenin RMS değeri (m/s^2)'dir. Tüm eksenlerdeki ölçümler herhangi bir düzeltme yapılmadan ham veri şeklinde alınarak değerlendirilmiştir.

3.2.3 FV Panel Verimi

Denemeler öncesinde ve denemeler sonrasında her bir güneş paneldeki olası mikro çatlaklar Şekil 3.8a'da gösterilen termal kamera (One Pro-IOS, Flir, ABD) ile araştırılmış ve güneş panellerinin güç değerlerindeki değişim ise Şekil 3.8b'de gösterilen güneş paneli

analizörü (Prova 210, Tayvan) ile incelenmiştir. Elde edilen veriler ilgili cihazlara ait yazılımlar ile analiz edilmiştir (Taşkın, 2019).

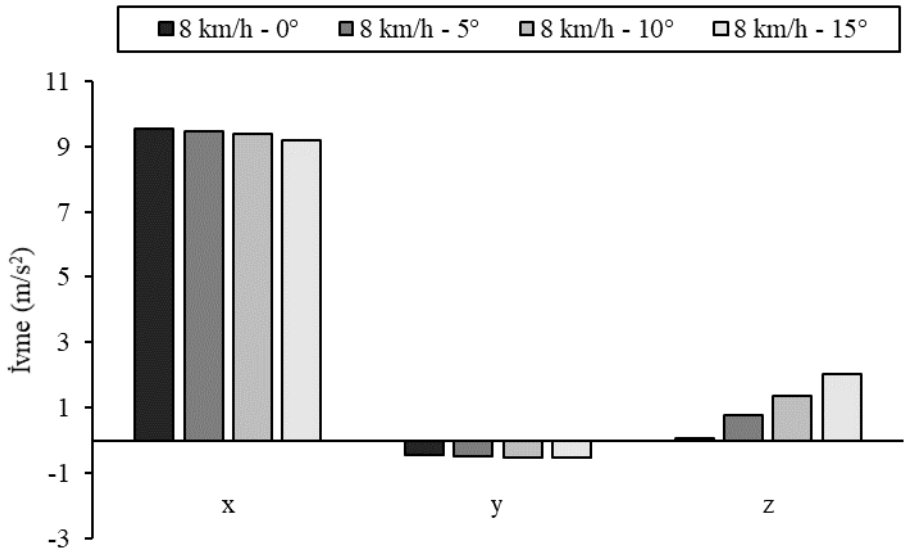


Şekil 3.8. Termal kamera (a) ve güneş panel analizörü (b)

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

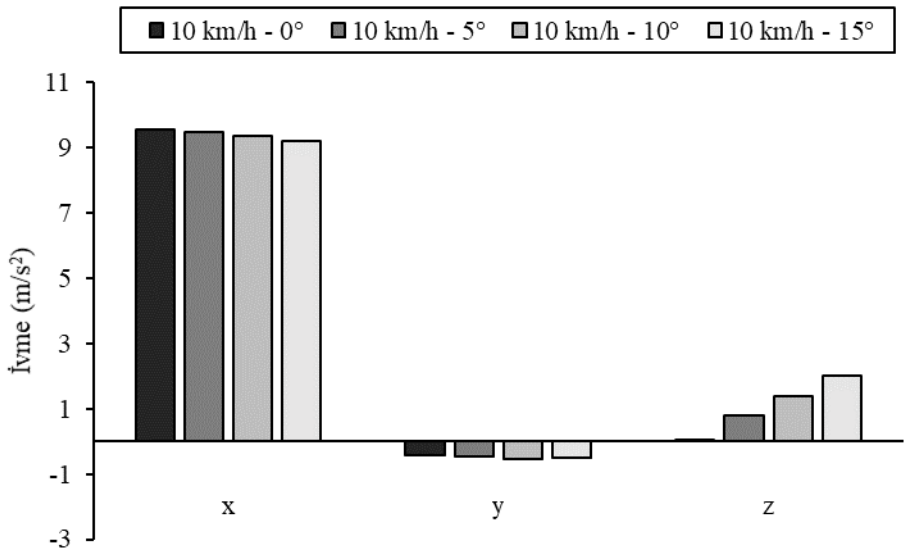
4.1 Asfalt

Şekil 4.1'de asfalt yol koşullarında 8 km/h hız ve farklı taşıma açısı sonucu elde edilen veriler gösterilmiş ve karşılaştırılması yapılmıştır. Asfalt yolda, traktörün x ekseni (dikey) titreşimlerinin diğer eksenlerden yüksek olduğu görülmüştür. Bağlantı geometrisinin simetrik olması ve yanal hareketlerin sınırlanması sonucu yatay yönde (y ekseni) ortalama titreşim ivme değerlerinin 0° (-0,43 m/s^2), 5° (-0,46 m/s^2), 10° (-0,52 m/s^2) ve 15° (-0,50 m/s^2) eksi değerlerde bulunması ile sistemin sol yönde küçük titreşim davranışları sergilediği belirlenmiştir. Panel taşıma eğim açısı arttıkça (0°-15°), z ekseninde (ileri-geri yön) titreşim ivmesinin arttığı ölçülmüştür. Bu, panelin eğim açısının değişmesiyle ağırlık merkezinin yukarı/öne kayması, dikey doğrultuda sönümleyici elemanların (veya orta kol pistonunun) farklı kuvvet dağılımına maruz kalması, asfalt yoldan gelen mikro darbelerin panel düzlemine dik bileşeninin artması gibi nedenlerle açıklanabilir. Jang ve ark. (2021) Traktöre akuple Çin lahanası hasat makinesinin titreşim analizlerini yapmıştır. Oluşan titreşimin sadece hasat makinesinin bileşenlerine zarar vermekle kalmadığı, aynı zamanda rahatsız edici bir çalışma ortamı yarattığını bildirmişlerdir. Bu nedenle, hasat işinin verimliği ve hasat makinesinin hasarlara dayanıklılığı için çalışma ortamının optimize edilmesi gerektiğini bildirmişlerdir.



Şekil 4.1. Asfalt yol koşulunda 8 km/h hızdaki farklı eksen titreşimleri

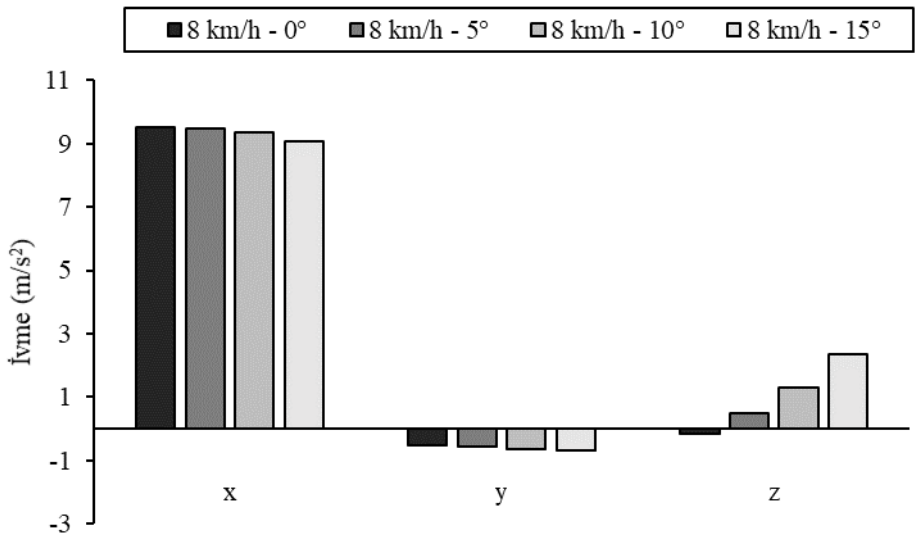
Şekil 4.2'de asfalt yol koşullarında 10 km/h hız ve farklı taşıma açısı sonucu elde edilen veriler gösterilmiş ve karşılaştırılması yapılmıştır. 10 km/h hızda da en baskın titreşim düşey eksendeki (x ekseni) bileşende gözlenmiştir. Açı değerleri arttıkça x ekseninde titreşimlerin azaldığı ölçülmüştür. Panel belirli bir açıya getirildiğinde panel çerçevesinin, montaj elemanlarının ve bağlantı noktalarının farklı yönlere karşı daha rijit hâle gelmesi mümkündür. Bu durum, düşey doğrultudan gelen titreşimin bir kısmının yapı içi dağılım ile sönümlenmesine yol açarak x eksenindeki ivme değerlerini azaltabilir. Ancak hız artmasına rağmen tüm eksenlerde titreşim değerlerinin 8 km/h hıza göre yaklaşık aynı seviyede kalması, asfalt yüzeyin düzgünlüğü nedeniyle titreşim enerjisinin büyük kısmının sabit kaldığını göstermektedir. Asfalt zeminde hız artışı sistemin doğal titreşim karakterini yüksek düzeyde etkilememiştir**.** Panel eğimi arttıkça z ekseninde ortalama titreşim ivme değerleri 0° (0,05 m/s^2), 5° (0,77 m/s^2), 10° (1,37 m/s^2) ve 15° (1,98 m/s^2) şeklinde arttığı kaydedilmiştir. Altınkaradağ (2008) farklı çeşitlerdeki tarım makinalarının traktörün ön aksı, koltuk braketi ve arka aksında oluşturduğu titreşimleri araştırmıştır. 7 ayaklı çizel ile yaptığı çalışmada arka aksın z ekseninde 1. tekerrür (0,05319 m/s^2), 2. tekerrür (0,05584 m/s^2) ve 3. tekerrür (0,06566 m/s^2) ortalama titreşim değerleri gözlemlemiştir. 25 cm'lik 4 soklu pulluk ile çalıştığında ise arka aksın z ekseninde 1. tekerrür (0,05531 m/s^2), 2. tekerrür (0,05363 m/s^2) ve 3. tekerrür (0,06209 m/s^2) ortalama titreşim değerlerini kaydetmiştir.



Şekil 4.2. Asfalt yol koşulunda 10 km/h hızdaki farklı eksen titreşimleri

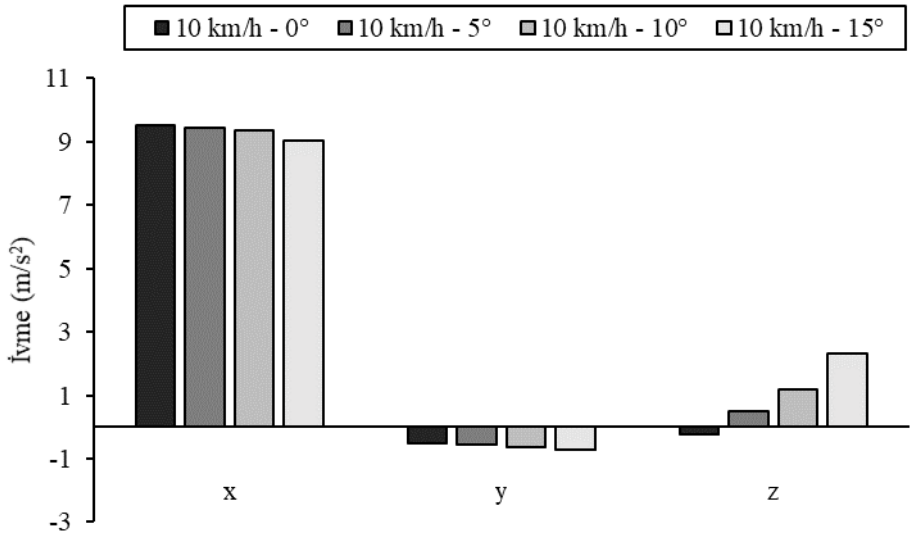
4.2 Stabilize

Şekil 4.3'te stabilize yol koşullarında 8 km/h hız ve farklı taşıma açısı sonucu elde edilen veriler gösterilmiş ve karşılaştırılması yapılmıştır. Stabilize yol yüzeyi asfalt ile kıyaslandığında daha düzensiz olduğu için hem ortalama titreşim büyüklüklerinde hem de standart sapmalarda artış görülmektedir. Dikey eksendeki (x) ortalama titreşim ivme değerleri 9,54 m/s^2 (0°), 9,47 m/s^2 (5°), 9,35 m/s^2 (10°) ve 9,05 m/s^2 (15°) şeklinde kaydedilmiştir. Ölçümlerde z ekseninde (ileri–geri) 0° için elde edilen negatif ortalama değeri, titreşim genliğinin azlığından ziyade sensör referans yönü, montaj açısı, yerçekimi bileşeni ya da test sırasında oluşan yönlü ivmelenme (ör. araç pitch/frenleme etkileri) gibi önemli yönlü bileşenlerin varlığına işaret etmektedir. Negatif ortalamanın fiziksel nedeni sensör montajında küçük bir yönelim sapması veya test koşullarındaki yönlü ivmelenme ile açıklanabilir. Yılmaz ve Gökduman (2020) yaptıkları çalışmada 3 farklı çalışma hızlarında (3.5 km/h, 4.5 km/h ve 5.5 km/h) konvansiyonel biçerdöverlerdeki gürültü ve titreşimi analiz etmiştir. Makine ve rotor hızlarının x, y ve z yönlerindeki ivmeölçerlerin ortalama değer aralıkları üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.3. Stabilize yol koşulunda 8 km/h hızdaki farklı eksen titreşimleri

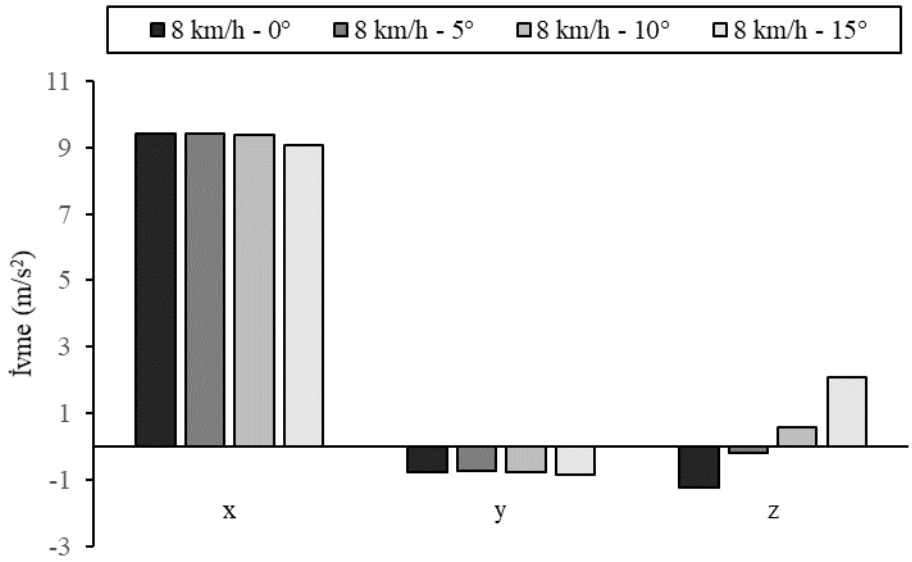
Şekil 4.4'de stabilize yol koşullarında 10 km/h hız ve farklı taşıma açısı sonucu elde edilen veriler gösterilmiş ve karşılaştırılması yapılmıştır. Ölçülen verilerin ortalama titreşim değerleri 8km/h hız ile alınan değerlere yakın seyretmiş olsa da ölçülen en yüksek ve en düşük değerler arasında tüm eksenlerde artış belirlenmiştir. Ortalama titreşim ivme değerleri x ekseni için 0° (9,52 m/s^2), 5° (9,44 m/s^2), 10° (9,35 m/s^2) ve 15° (9,05 m/s^2), y ekseni için 0° (-0,52 m/s^2), 5° (-0,57 m/s^2), 10° (-0,65 m/s^2) ve 15° (-0,70 m/s^2), z ekseni için 0° (-0,25 m/s^2), 5° (0,49 m/s^2), 10° (1,20 m/s^2), 15° (2,33 m/s^2) şeklinde hesaplanmıştır. x eksenindeki değerlerin azalması, panelin titreşimi azaltmasından değil; titreşim enerjisinin eksenler arasında yeniden dağıtılmasından kaynaklanmıştır. Panel 0°, 5°, 10° ve 15° açılarına getirildikçe panelin ve bağlantı kolunun etkin kütle merkezi öne doğru kaymıştır. Bu durum düşey darbelerin (x ekseni) artık panel yapısına aynı doğrultuda iletilmemesine, düşey titreşim enerjisinin ileri–geri (z ekseni) doğrultusuna aktarılmasına neden olmuştur. Bu nedenle x ekseni değerleri 9,52 → 9,05 m/s² arasında düşerken, z ekseni değerleri –0,25 → 2,33 m/s² gibi bir artış göstermiştir. Bu, sistemin "titreşim enerjisini yönlendirme biçiminin" açısal konumla değiştiğini gösteren önemli bir dinamik bulgudur. Altınkaradağ (2008) farklı çeşitlerdeki tarım makinalarının traktörün ön aksı, koltuk braketi ve arka aksında oluşturduğu titreşimleri araştırmıştır. 14'lü hidrolik diskaro ile yapılan çalışmada z ekseni yönünde ön aksta 0,15293 m/s^2, koltuk braketinde 0,10344 m/s^2 ve arka aksta 0,068543 m/s^2 gözlemlendiğini bildirmiştir.



Şekil 4.4. Stabilize yol koşulunda 10 km/h hızdaki farklı eksen titreşimleri

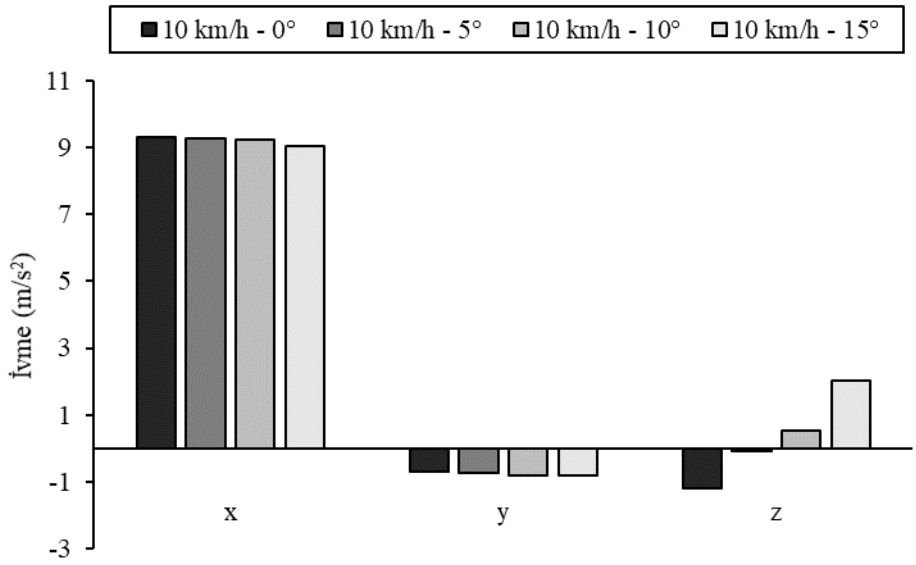
4.3 Tarla

Şekil 4.5'de tarla yol koşullarında 8 km/h hız ve farklı taşıma açısı sonucu elde edilen veriler gösterilmiş ve karşılaştırılması yapılmıştır. Tarla yolu, stabilize ve asfalt yola göre çok daha düzensiz ve darbe yoğun ortama sahip olduğu için titreşim seviyelerinin hem ortalama hem de standart sapma açısından daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. X ekseni için ortalama titreşim ivme değerleri 0° (9,44 m/s^2), 5° (9,42 m/s^2), 10° (9,38 m/s^2) ve 15° (9,05 m/s^2), y ekseni için, 0° (-0,78 m/s^2), 5° (-0,73 m/s^2), 10° (-0,79 m/s^2) 15° (-0,85 m/s^2) ve z ekseni için 0° (-1,23 m/s^2), 5° (-0,20 m/s^2), 10° (0,56 m/s^2) ve 15° (2,10 m/s^2) şeklinde ölçülmüştür. Tarla yol koşullarında elde edilen eksen bazlı verilerin, taşıma açısı arttıkça z ekseninde (ileri–geri) belirgin bir artış gösterdiği kaydedilmiştir. Bu artış, panelin eğim almasıyla etkin kütle merkezinin öne kayması, düşey darbelerin panel düzlemine göre yeniden yönlendirilmesi ve gövdenin boyuna eksendeki salınım etkinliğinin (pitch) panel montajına doğrudan iletilmesi ile açıklanabilir. Mert ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada Santrifüj gübre dağıtma makinesinde iki farklı tahrik sisteminin karşılaştırılmasını yapmıştır. Mekanik sistemin toplam titreşim ivmesi makine üzerinde 68,36 m/s^2, traktör sürücü koltuğunda ise 3,23 m/s^2 olmakta iken hidrolik sistemin toplam titreşim ivmesi makine üzerinde 60,02 m/s^2, traktör sürücü koltuğunda ise 2.64 m/s^2 olarak belirlendiğini bildirmişlerdir.



Şekil 4.5. Tarla yol koşulunda 8 km/h hızdaki farklı eksen titreşimleri

Şekil 4.6'da tarla yol koşullarında 10 km/h hız ve farklı taşıma açısı sonucu elde edilen veriler gösterilmiş ve karşılaştırılması yapılmıştır. Ortalama titreşim ivme değerleri x eksenini için 0° (9,32 m/s^2), 5° (9,30 m/s^2), 10° (9,26 m/s^2) ve 15°(9,04 m/s^2), y ekseni için, 0°(-0,69 m/s^2), 5°(-0,73 m/s^2), 10° (-0,83 m/s^2) ve 15° (-0,82 m/s^2) ve z ekseni için 0° (-1,20 m/s^2), 5° (-0,08 m/s^2), 10° (0,54 m/s^2) ve 15° (2,01 m/s^2) şeklinde ölçülmüştür. Z eksenindeki değerler açı değişimine en duyarlı eksen olarak dikkat çekmektedir. 0°'de -1,20 m/s² seviyesinde olan ortalama z ekseni ivmesi, 5°'de -0,08'e kadar azalmakta, 10°'de pozitif değerlere geçerek 0,54 m/s² seviyesine ulaşmakta ve 15°'de 2,01 m/s² ile belirgin şekilde artmaktadır. Bu yüksek değişim, panel eğimindeki artışla birlikte düşey darbelerin ileri–geri doğrultusuna yön değiştirdiğini, panelin kütle merkezinin öne kaymasıyla traktörün boyuna eksendeki (pitch) salınımlarının z eksenine daha güçlü biçimde iletildiğini ve sistemin z ekseninde daha az sönümlü bir dinamik davranış geliştirdiğini göstermektedir. Ayrıca eğim arttıkça panel montaj geometrisi değiştiği için gelen impulsif tarla darbelerinin bir kısmı z eksenine yeniden projekte olmakta ve titreşim enerjisi eksenler arasında yeniden dağılmıştır. Altınkaradağ (2008) farklı çeşitlerdeki tarım makinalarının traktörün ön aksı, koltuk braketi ve arka aksında oluşturduğu titreşimleri araştırmıştır. Gübreleme makinası ile yapılan çalışmada x ekseni yönünde ön aksta 0,19892 m/s^2, koltuk braketinde 0,23224 m/s^2 ve arka aksta 0,4319 m/s^2 titreşim değerleri gözlemlendiğini bildirmiştir.



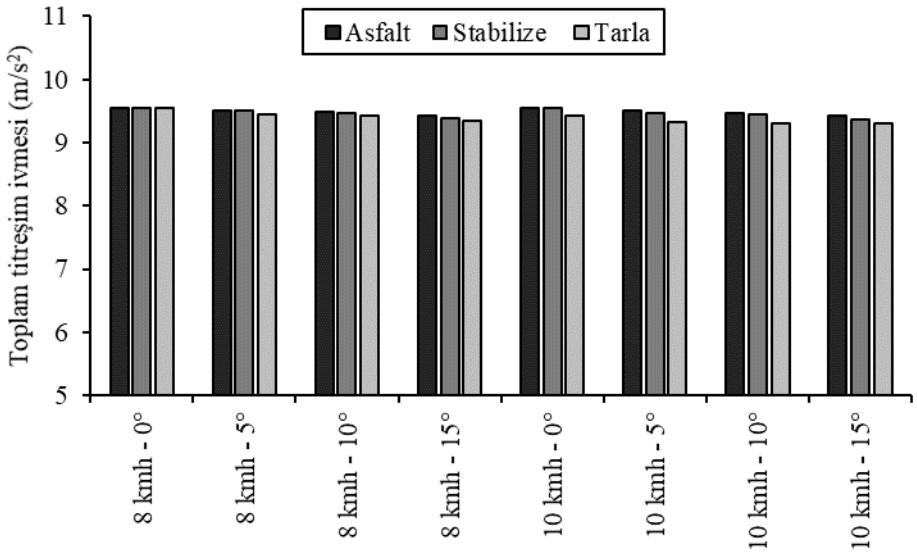
Şekil 4.6. Tarla yol koşulunda 10 km/h hızdaki farklı eksen titreşimleri

4.4 Toplam Titreşim

Şekil 4.7'de farklı yol, hız ve taşıma açısı koşulları sonucu elde edilen veriler gösterilmiş ve karşılaştırılması yapılmıştır. 8 km/h, 0° için tüm yol koşullarında toplam titreşim oranı çok yakın kaydedilmiştir. Diğer açı ve hız durumlarında en yüksek toplam titreşim ivmesi değerleri asfalt yol koşunlunda belirlenmiştir. Bunun nedeni asfalt zeminin sertliği ve yük aktarımının sönümlenmeden doğrudan panele ulaşması, yüzey düzgün olmasına rağmen sönümleme düşük olduğu için panel gövdesinin daha fazla titreşim enerjisine maruz kalması ile açıklanabilir. Mühendislik açısından değerlendirildiğinde, asfalt yol koşullarında panel bağlantı elemanlarının daha fazla yorulma yüküne maruz kalmasıdır. Bu nedenle en güçlü bağlantı tasarımları sert zemine göre planlanmalıdır. Tarla koşullarında ortalama titreşim ivmesi değeri düşük olsa da varyans yüksek bulunmuştur. Bu sonuç da darbeli yüklerin daha tehlikeli olabileceğini göstermektedir. Eğim arttıkça titreşim ivmesi değerlerinin azalması, panelin daha uygun bir taşıma açısına sahip olduğunu düşündürebilir ancak ileri–geri salınımlar artabileceğinden bütünsel olarak değerlendirmek gerekmektedir. Mert ve ark. (2021) tarafından yürütülen ve santrifüjlü gübre dağıtma makinelerinde tahrik mekanizmalarının ergonomik etkilerini irdeleyen çalışmada, geleneksel kuyruk mili (PTO) tahriki ile alternatif hidrolik motor tahriki, toplam titreşim ivmesi parametresi açısından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. New Holland TD100D traktör ve çift diskli gübre serpme makinesi kullanılarak gerçekleştirilen saha denemelerinde, titreşim verileri TS EN ISO 5349-1 ve ISO 2631 standartlarına dayanak oluşturacak şekilde, üç eksenli (x, y, z) ivmeölçer kullanılarak hem makine şanzımanı üzerinden hem de traktör sürücü koltuğundan kaydedilmiştir. Araştırma bulgularına göre, frekans ağırlıklı ivmelerin karesel ortalaması (RMS) üzerinden hesaplanan toplam titreşim değerleri incelendiğinde; mekanik sistemin makine gövdesi üzerinde oluşturduğu toplam titreşim ivmesi 68,36 m/s^2 iken, hidrolik tahrik sisteminde bu değer istatistiksel olarak anlamlı bir azalma ile 60,02 m/s^2 seviyesine gerilemiştir. Operatör maruziyeti açısından kritik olan sürücü koltuğu ölçümlerinde ise mekanik sistemde 3,23 m/s^2 olan toplam titreşim değeri, hidrolik sistemde 2,64 m/s^2 olarak tespit edilmiştir. Melemez ve Tunay (2010) yaptıkları çalışma ile insan vücudundaki rezonans frekansları ele almış, ardından traktörlerde titreşim oluşumunun makine tipi, zemin pürüzlülüğü, ilerleme hızı ve koltuk-süspansiyon sistemi gibi faktörlere bağlı olarak değiştiği ortaya konulmuştur. Çalışmada uygun koltuk tasarımı,

düşük lastik basıncı, operatör eğitimi ve çalışma süresinin düzenlenmesi gibi ergonomik önlemlerin titreşim maruziyetini azaltmada kritik rol oynadığı belirtilmiştir. Bu bulgular ışığında, ormancılık sektöründe traktör kaynaklı toplam titreşimin risk değerlendirmesiyle izlenmesi ve operatör sağlığının korunması için sistematik önlemler alınması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Tur ve ark. (2018) üretimde mikro çatlak tespit edilemeyen FV panellerin nakliye sonrasında dikkatsizce taşınması, panelde yeni mikro çatlakların oluşmasına neden olabileceğini ifade etmişlerdir. Darbe veya titreşimden kaynaklı mikro çatlaklar da zamanla FV panelin performansını düşürebileceğini bildirmişlerdir. Bhore ve ark. (2023) çevredeki dinamik yüklerin oluşturdukları titreşimlerin, FV panellerin montaj konfigürasyonu ile önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmışlardır. Bu nedenle, çevredeki dinamik yük koşulları nedeniyle oluşan titreşimleri azaltmak için en iyi montaj konfigürasyonuna sahip damperler/izolatörler seçilmesini önermişlerdir. Bu tür tasarımların, mikro çatlak oluşumunu azaltacağını ve FV panellerin ömrünü etkili bir şekilde uzatarak güneş enerjisi üretimini maksimum kapasitede tutacağını ifade etmişlerdir.



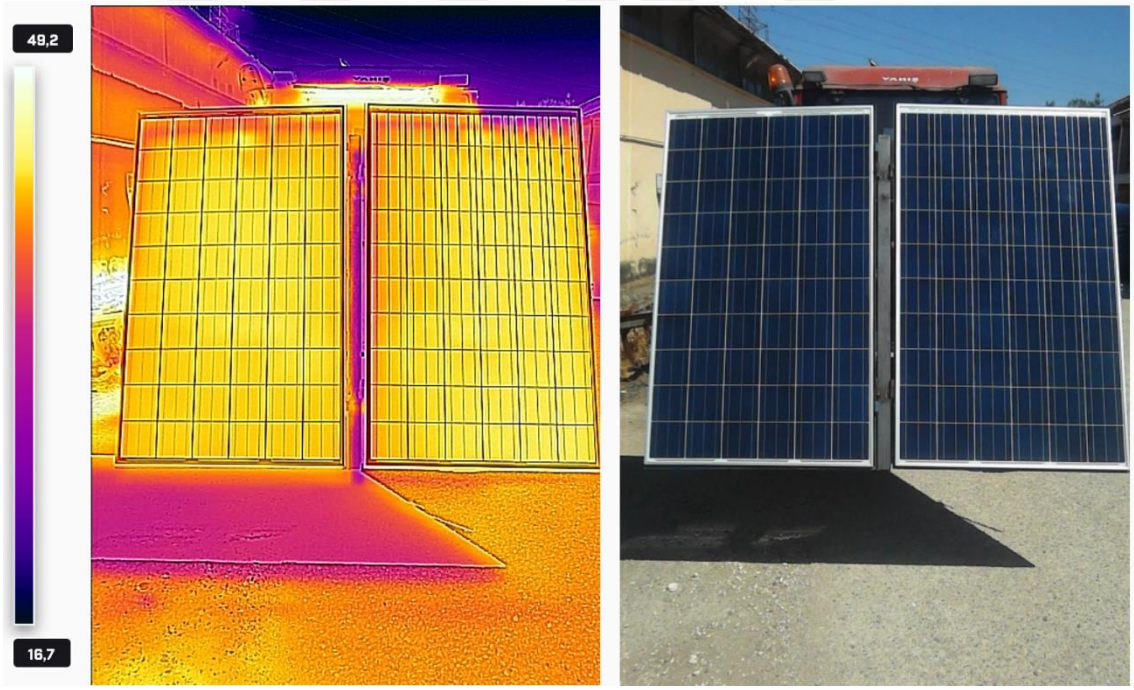
Şekil 4.7. Farklı yol, hız ve taşıma açısında oluşan toplam titreşim

4.5 Termal Görüntüleme

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da sırasıyla denemeler öncesinde ve denemeler sonrasında alınan FV panellerin termal görüntüleri sunulmuştur. Termal görüntüleme yoluyla yapılan temel analizler sonucunda FV paneller üzerinde herhangi bir hasar görüntülenmemiştir. Panel yüzeyinde denemelerden önce yaklaşık 38° C derece homojen bir sıcaklık dağılımı gözlenirken denemeler sonrası ise yaklaşık 41° C civarında homojen bir dağılım gözlenmiştir. Bu tez çalışmasının aksine Taşkın (2021) yaptığı araştırmada, fiziksel hasarlı güneş panelinden üretilebilen toplam güç miktarlarını araştırmıştır. İncelenen panelde yaşanan ısınmanın tanımlanması için termal kamera kullanılmıştır. Panel en verimli çalışma konumunda (güney yön - 72°) toplam üretim kapasitesinin %9,34'ünü elektrik olarak dönüştürmüştür. Diğer taraftan, fiziksel hasarlı noktada 41,3 °C sıcaklık belirlerken, panel yüzeyinde ise ortalama 38,6 °C homojen olmayan dağılım oluştuğunu bildirmiştir. Nakliye kaynaklı hasarların termal imzalarının oluşum sürecini irdeleyen Dhimish ve ark. (2022), lojistik aşamasında %2,2 oranında mikro çatlak oluşumu gözlemlemelerine rağmen, bu hasarların kurulumdan hemen sonra termal anomali vermediğini raporlamıştır. Ancak, 6 aylık saha operasyonu sonrasında yapılan incelemelerde, çatlaklı hücrelerin tamamında 10 °C ile 20 °C arasında sıcaklık artışları (sıcak nokta) tespit edilmiştir. Bu bulgu, mobil GES sistemlerinin de termal denetim yapılırken, nakliye sonrası hasarın elektriksel dirence dönüşmesi için sisteme belirli bir operasyonel süre tanınması gerektiğini vurgulamaktadır. Hasar tespit yöntemlerinin karşılaştırmalı analizini yapan Asif ve ark. (2024), termal görüntülemenin, karmaşık elektrolüminesans yöntemine kıyasla sahada uygulanabilir, hızlı ve etkili bir alternatif olduğunu doğrulamıştır. Araştırmacılar, FV modül yüzeyinde ortalama sıcaklığın 10 °C üzerinde seyreden bölgelerin, elektriksel izolasyona neden olan majör çatlaklara işaret ettiğini belirleyerek, termal incelemeler için güvenilir bir hasar eşik değeri tanımlamıştır.



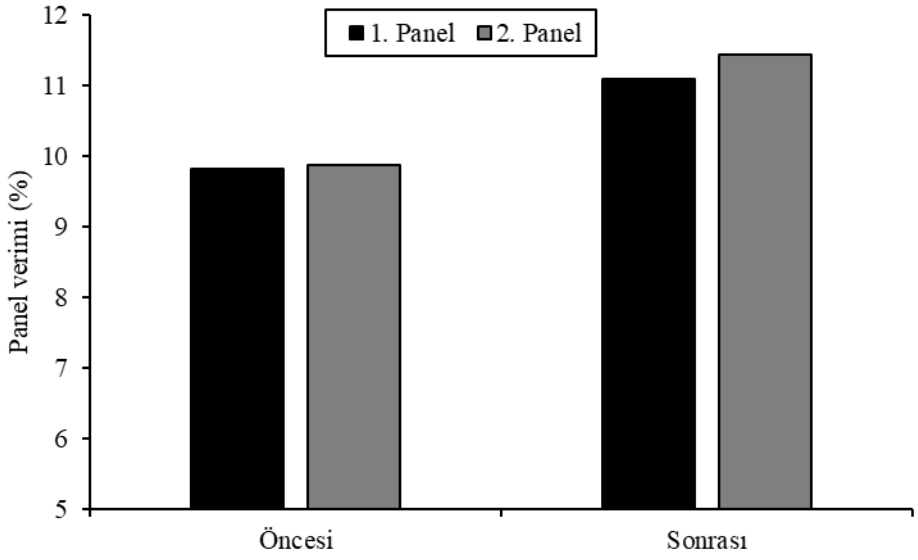
Şekil 4.8. Panellerin deneme öncesi termal görüntüsü



Şekil 4.9. Panellerin deneme sonrası termal görüntüsü

4.6 Panel Verimi

Şekil 4.10'da denemeler öncesi ve denemeler sonrası yapılan panellerin verim ölçümleri karşılaştırılarak gösterilmiştir. Denemeler öncesinde 1. ve 2. panel verimleri ölçülerek 1. panel (sağ) verimi %9,83, 2. panel (sol) verimi %9,87 olarak kaydedilmiştir. Denemeler sonrası yapılan analizlerde ise 1. Panel verimi %11,10 ve 2. panel verimi ise %11,45 olarak kaydedilmiştir. Denemeler sonrası verim değerlerinde düşüş ölçülmemesi, yaşanan titreşimlerin olumsuz bir sonuç yaşatmadığı olarak değerlendirilebilir. Bu tür mekanik denemelerin FV panel performansını artırıcı bir etkisi bulunmadığından, verim artışı panelde meydana gelen yapısal bir iyileşmeye işaret etmemektedir. Elde edilen farkların, ölçümlerin farklı zamanlarda gerçekleştirildiği dikkate alındığında; güneş ışınımındaki değişimler, ortam sıcaklığı gibi iklimsel koşullardaki farklılıklar gibi çevresel parametrelerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. FV panellerin verim değerleri iklimsel etkenlere bağlı olduğundan, denemeler öncesi ve sonrası arasındaki bu değişimin doğal bir farklılık olduğu anlaşılmaktadır. Shen ve ark. (2024) yaptıkları çalışmada, titreşim altındaki bir panelde maksimum çıkış gücünde yaklaşık %5,5 azalma, dolayısıyla enerji dönüşüm veriminde kayıp rapor etmişlerdir. Buna ek olarak, titreşim seviyesinin toz birikimini azaltarak panel yüzeyinin temiz kalmasını sağlayabileceği önerilmiş ancak bu temizlik etkisi ile titreşim kaynaklı elektriksel kayıplar arasında net bir denge kurulması gerektiği vurgulanmıştır. Al-Showany (2016), tarafından yapılan çalışmada FV panellerin verimliliğinin çevresel koşullara yüksek derecede duyarlı olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Çalışmada sıcaklık artışının panel çıkış gerilimini düşürerek maksimum güç noktasında anlamlı kayıplara yol açtığı, ayrıca toz birikiminin kısa devre akımı ve güç çıkışını %3,8–13,8 aralığında azalttığı rapor edilmiştir. Araştırma, panel veriminde ölçüm zamanına bağlı olarak ışınım şiddeti, panel yüzey sıcaklığı ve atmosferik koşullardaki değişimlerin belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Yaşanan verim farklılıklarının mekanik etkilerden ziyade çevresel koşul değişimlerinden kaynaklandığı literatür tarafından da desteklenmektedir.



Şekil 4.10. Panellerin verimlilik düzeyleri

5. SONUÇ

Bu tez çalışması ile, 2025 yılı ağustos ayında Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle kampüsünde gerçekleştirilen deneysel ölçümler sonucu mobil GES'in traktör üç nokta askı sistemine entegre edilerek farklı yol tipleri (asfalt, stabilize, tarla), ilerleme hızları ve panel taşıma açıları altında maruz kaldığı titreşim karakteristikleri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir.

Üç eksenli frekans ağırlıklı ivme ölçümleri değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular, panel eğim açısının sistemin dinamik davranışlarında değişikliğe sebep olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle tarla koşullarında yüksek düzensizlik kaynaklı impulsif darbe yüklerinin düşey eksenden boyuna eksene yön değiştirdiği; panel eğiminin artmasıyla kütle merkezinin öne kayması sonucunda ileri–geri doğrultudaki (z ekseni) titreşim bileşenlerinde belirgin artışlar meydana geldiği belirlenmiştir.

Üç nokta askı sisteminin rijitlik ve sönüm özelliklerinin panel bütünlüğünü koruduğu, ölçüm periyotlarında hem toplam titreşim seviyelerinin fiziksel hasar eşiğinin altında kaldığı hem de panel veriminde deneysel titreşim yüklerine bağlı performans düşüşü gözlenmediği tespit edilmiştir. Denemeler öncesi ve sonrası panel verim farklılıklarının çevresel koşul değişkenlerinden kaynaklandığı doğrulanmış; mekanik titreşimin güneş paneli hücre performansını kısa vadede etkilemediği görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar, mobil GES uygulamalarında taşıyıcı sistem geometrisinin, panel eğiminin ve yol pürüzlülüğü bileşiminin titreşim enerji dağılımını belirleyen kritik parametreler olduğunu göstermekte; mobil GES sistemlerinin tasarım optimizasyonu, yorulma davranışı, bağlantı elemanı dayanımı ve sönümleyici entegrasyonu konularında ileri mühendislik çalışmalarına yön verecek nitelikte teknik veriler sunmaktadır. Sonuç olarak katlanabilir tasarım ile 200 cm genişliğinde ve toplam 500 W gücünde iki güneş panelinin 8 cm'lik kompakt bir genişlik içinde taşınmasını bu tez kapsamında mümkün kılınmıştır. Gelecek çalışmalarda yapılabilecek yeni mobil GES'in ön hesaplamalarında maksimum ekipman genişliği (2,55 m) ve yeni tip güneş panelleri (550 W maksimum güce sahip yarı kesilmiş teknoloji) ağırlığı ve boyutu göz önüne alındığında, toplam 27,5 kW kurulu güce karşılık gelen 50 adet güneş panelinin uygulanabilirliği araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

Acosta-Silva, Y. D. J., Torres-Pacheco, I., Matsumoto, Y., Toledano-Ayala, M., Soto-Zarazúa, G. M., Zelaya-Ángel, O., & Méndez-López, A. (2019). Applications of solar and wind renewable energy in agriculture: A review. *Science Progress*, 102(2), 127-140.

Albadry, A. Y., Tarabye, H. H. H., Abazid, A. L. A., & Nasrat, L. S. (2025). Design and calculation of solar power operated sugarcane loading machine. *International Journal of Applied Energy Systems*, *7*(2), 36-40.

Alnaser, W. E. (1999). Mobile solar and wind-powered generator (MSWPG). *Applied Energy*, *64*(1-4), 97-105.

Al-Showany, E. F. A. (2016). The impact of the environmental condition on the performance of the photovoltaic cell. *American Journal of Energy Engineering*, *4*(1), 1-7.

Altınkaradağ, A. (2008). Farklı tarımsal alet ve makinalar ile çalışmada traktörde oluşan titreşimin saptanması. *Yüksek Lisans Tezi*, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Tekirdağ.

Amin, A. Z. (2016). The real cost of Energy: Why renewable make more sense. https://www.irena.org/News/articles/2016/Apr/The-Real-Cost-of-Energy-Why-Renewables-Make-More-Sense (Erişim Tarihi 17.12.2025)

Asif, M., Ali Kamran, M., Ullah Zafar, F., & Gul, R. M. (2024). Thermal imaging: an alternative approach for crack identification in solar panels. *Key Engineering Materials*, *993*, 85-91.

Anonim, (2020). Powering agriculture: Irrigation. https://energypedia.info/wiki/Powering_Agriculture%3A_Irrigation (Erişim Tarihi 18.12.2025)

Anonim, (2025a). Renewable energy–powering a safer and prosperous future. https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy (Erişim Tarihi 17.12.2025)

Anonim, (2025b). Three-point hitch. https://en.wikipedia.org/wiki/Three-point_hitch (Erişim Tarihi 17.12.2025)

Assmus, M., Jack, S., Weiss, K. A., & Koehl, M. (2011). Measurement and simulation of vibrations of PV-modules induced by dynamic mechanical loads. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *19*(6), 688-694.

Bhore, C. V., Andhare, A. B., Padole, P. M., Loyte, A., Vincent, J. S., Devarajan, Y., & Vellaiyan, S. (2023). Experimental investigation on minimizing degradation of solar energy generation for photovoltaic module by modified damping systems. *Solar Energy*, 250, 194-208.

Coşgun, A. E., Endiz, M. S., Demir, H., & Özcan, M. (2024). Agrivoltaic systems for sustainable energy and agriculture integration in Turkey. *Heliyon*, *10*(11).

Desai, U., Vasudevan, D. P., Kottantharayil, A., & Singh, A. (2021). Prediction of vibration induced damage in photovoltaic modules during transportation: finite element model and field study. *Engineering Research Express*, *3*(4), 045045.

Dhimish, M. (2020). Micro cracks distribution and power degradation of polycrystalline solar cells wafer: Observations constructed from the analysis of 4000 samples. *Renewable Energy*, *145*, 466-477.

Djordjevic, S., Parlevliet, D. & Jennings, P. (2014). Detectable faults on recently installed solar modules in Western Australia, *Renewable Energy*, 67, 215-221.

Duran, D., Martínez, I., Weber, B., Rincón, E., & Juárez, J. (2014). Design of a mobile photovoltaic module system for demonstration and experimentation. *Energy Procedia*, *57*, 32-38.

El-Ghetany, H. H., Halawa, M. A., Mohammed, M. A., & Elmasry, I. A. (2022). Experimental investigation of a mobile pv water pumping system. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, *17*(65), 1290-1314.

Fitz, E. (2011). The bottom line impact of pv module reliability. https://www.dsneg.com/info/solar-pv-module-faults-and-failings-41440985.html. (Erişim Tarihi 17.12.2025)

Gangwar, A., Singh, A. K., Kumari, N., Rai, A., & Kumar, M. (2020). Solar based irrigation pump for agricultural crop production. *Indian Farmer*, *7*, 515-518.

Gülsoylu, E., & Çakmak, B. (2016). Traktör ve makina üç-nokta askı düzeni boyutlarının yük kaldırma kapasitesine etkisi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 12(4), 235-242.

Jang, B. E., Chowdhury, M., Ali, M., Islam, M. N., Swe, K. M., Jung, D. U., & Chung, S. O. (2021). Stability and vibration analysis of a tractor-mounted Chinese cabbage collector. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 733(1), 012021.

Jasim, B., & Taheri, P. (2018). An origami-based portable solar panel system. *IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference,* 199-203.

Kilikevičius, A., Čereška, A., & Kilikevičienė, K. (2016). Analysis of external dynamic loads influence to photovoltaic module structural performance. *Engineering Failure Analysis*, *66*, 445-454.

Köntges, M., Siebert, M., Morlier, A., Illing, R., Bessing, N., & Wegert, F. (2016). Impact of transportation on silicon wafer-based photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *24*(8), 1085-1095.

Lanjekar, P. R., Dulawat, M. S., Makavana, J., & Chauhan, P. M. (2023). Solar-powered farm rickshaw for agricultural transport. *Energy Nexus*, 9, 100181.

Manu, O., Verma, J. K., Kalra, P., Singh, J., Kaur, J., Bhatia, H., & Sidhu, E. (2017). Performance analysis of effect of vibrations on solar panel conversion efficiency. *International Conference on Smart Technologies for Smart Nation,* 635-638.

Melemez, K., & Tunay, M. (2010). Ormancılıkta traktör titreşiminin ergonomik değerlendirmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, A*(1), 96-108.

Mert, C., Aybek, A., & Kuzu, H. (2021). Santrifüj gübre dağıtma makinesinde iki farklı tahrik sistemin uygulamasının karşılaştırılması. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, *18*(4), 660-674.

Morris, M., Lynne, V., Engineer, N. E., & Lent, C. (2002). Solar-powered livestock watering system. *National Sustainable Agriculture Information Service*. 1-12.

Nenciu, F., Matache, M. G., Cristea, M., Găgeanu, I., & Voicea, I. (2021). Research on the use of photovoltaic systems to power off-road electric tractors. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, *14*(3), 53-57.

Pummer, M., Salazar, J. & Suminski, B., (2021). Mobile solar power trailer. *Lisans Bitirme Tezi*, The Faculty of The Electrical Engineering Department California Polytechnic State University, San Luis Obispo.

Rafsany, M. A., Rizve, A. Z., & Paul, A. K. (2024). The multipurpose solar-electric tractor: a sustainable solution for farmers*IEEE International Conference on Power, Electrical, Electronics and Industrial Applications,* 82-85).

Rahman, M. M., Khan, I., Field, D. L., Techato, K., & Alameh, K. (2022). Powering agriculture: Present status, future potential, and challenges of renewable energy applications. *Renewable Energy*, *188*, 731-749.

Ramirez, E. R., Moreno, S. H., Alarcón, H. P., González-Amarillo, Á., & Comba, A. G. (2019). Design of a trailer for photovoltaic solar pumping. *Technology*, *10*(11), 339-352.

REN21, (2024). Renewables 2024 global status report collection, *Renewables in Energy Demand*.

Sagor, A. R., Mridul, T. M., Bhuiyan, M. M. H., Mridha, F. A., Hazari, M. R., & Rahman, M. A. (2023). Design and implementation of solar PV operated E-power tiller. *3rd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques,* 368-373).

Shawky, H. A., Fatah, A. A. A., ElFadl, M. M. A., & El-Aassar, A. H. M. (2015). Design of a small mobile PV-driven RO water desalination plant to be deployed at the northwest coast of Egypt. *Desalination and Water Treatment*, *55*(13), 3755-3766.

Shen, X., Wu, Y., Yuan, Q., He, J., Zhou, C., & Shen, J. (2024). Characteristic study of a typical satellite solar panel under mechanical vibrations. *Micromachines*, *15*(8), 996.

Taskin, O. (2019). Kusurlu güneş panelinde (PV) verimlerin ölçülmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *24*(1), 289-298.

Tur, M. R., Colak, İ., & Bayindir, R. (2018). Effect of faults in solar panels on production rate and efficiency. *International Conference on Smart Grid*, 287-293.

Vaidya, A. S. (2019). A study of solar electric tractor for small scale farming. *International Journal of Science and Research*, *8*(3), 1255-1259.

Yilmaz, D., & Gökduman, M. E. (2020). Development of a measurement system for noise and vibration of combine harvester. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *13*(6), 104-108.