

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKUSTİK DALGALARIN FOTOVOLTAİK GÜNEŞ
PANELLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YASİN APAK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

HAZİRAN 2019

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKUSTİK DALGALARIN FOTOVOLTAİK GÜNEŞ
PANELLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YASİN APAK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

HAZİRAN 2019

Tezin Başlığı: AKUSTİK DALGALARIN FOTOVOLTAİK GÜNEŞ
PANELLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Tezi Hazırlayan: YASİN APAK

Sınav Tarihi:

Yukarıda adı gecen tez, jürimizce değerlendirilerek Fizik Bölümü Genel
Fizik Anabilim dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı:	Doç. Dr. Serkan ALAGÖZ	
	İnönü Üniversitesi	
	Prof. Dr. Ali ŞAHİN	
	İnönü Üniversitesi	
	Doç. Dr. Fethi DAĞDELEN	
	Fırat Üniversitesi	

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “AKUSTİK DALGALARIN FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

YASİN APAK



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AKUSTİK DALGALARIN FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YASİN APAK

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Genel Fizik Anabilim Dalı

35 + vii sayfa

2019

Danışman: Doç. Dr. Serkan ALAGÖZ

Photovoltaik (PV) güneş panellerinin enerji üretim verimliliğini düşüren önemli faktörlerden biri panel yüzeyinin temizliğidir. Havada taşınan toz ve kirletici materyaller panel yüzeylerinde toplanmakta ve yüzeylerin ışık geçirgenliğini azaltarak enerji üretim verimliliğini düşürmektedir. Açık hava ortamlarında bulunan ve yüzlerce metre kare alana sahip PV panel yüzeylerinin temizliği uygulamada önemli bir sorun haline gelmiştir.

Panel yüzeylerinin, en az donanım, güç tüketimi gereksinimleri ile etkin temizliğinin sağlanması için yöntem geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında katı yüzeylerinde ilerleyen yüzey akustik dalgalarının panel temizliğinde uygulanma imkânları araştırılmıştır. Bu amaçla, panel yüzeyine yerleşen toz parçacıklarının koparılmasında etkin rol oynayan fiziksel mekanizmalar teorik olarak incelenmiştir. Kolomenskii ve ekibi tarafından önerilen mikron düzeyi parçacıkların koparılma analizi, makroskopik ölçeklere genişletilerek genelleştirilmiştir. Bu analiz ile toz parçacığının boyutlarına ve panel eğimine bağlı olarak toz koparım koşulları elde edilmiştir. Teorik bulguların etkileri, geliştirilen deney düzeneği ile yapılan deneysel çalışmalarla gözlemlenmiştir. Yapılan teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda yüzey akustik dalgalarının PV panel temizliğinde etkin olabildiği durumlar ve yöntemin eksiklikleri tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Akustik temizlik, akustik yüzey dalgaları, PV güneş panellerinin yüzey temizliği, parçacık koparımı süreçleri

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF EFFECTS OF ACOUSTIC WAVES ON PHOTOVOLTAIC SOLAR PANELS

YASİN APAK

Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Physics

35 + vii pages

2019

Supervisor: Doç. Dr. Serkan ALAGOZ

Cleaning of panel surfaces is one of the substantial factors that decrease energy generation efficiency of Photovoltaic (PV) solar panels. The dust and spoiling materials, which is transported in air, can gather on panel surfaces and reduce energy generation efficiency by decreasing transparency of the surfaces. The cleaning of panel surfaces, which spreads hundreds of square meter area, becomes an important issue in application.

Several methods have been proposed to enable effective cleaning of panel surfaces with lesser hardware and power consumption requirements. In this study, contributions of surface acoustic waves, which can propagate surfaces of solids, to panel surface cleaning have been investigated. For this purpose, physical mechanisms, which play role in detachment process of particles residing on the panel surface, were considered theoretically. The analyses, given for detachment of micron level particles by Kolomenskii et al., are generalized by extending to macroscopic scales. By using these analyses, detachment conditions of dust particles, which depend on particle size and panel surface angle, have been obtained. Effects of theoretical findings were observed in experimental studies, which were conducted by developed experimental setup. According to results of theoretical and experimental studies, circumstances that acoustic surface waves are effective in PV panel surface cleaning, and the shortcomings of the method are discussed.

Keywords: Acoustic cleaning, acoustic surface waves, surface cleaning of PV solar panels, particle detachment process

TEŞEKKÜR

Tez konumun şekillenmesinde ve çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü ilgi, anlayış, destek ve katkıları için danışman hocam Sayın Doç. Dr. Serkan ALAGÖZ' e;

TEŞEKKÜR EDERİM.



İÇİNDEKİLER

	ÖZET.....	i
	ABSTRACT.....	ii
	TEŞEKKÜR.....	iii
	İÇİNDEKİLER.....	iv
	ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
	ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
	SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
1.	GİRİŞ	1
2.	KAYNAKÇA ÖZETLERİ	3
2.1.	Akustik Yüzey Dalgaları ile Temizlik Amaçlı Uygulamaları.....	3
3.	KURAMSAL TEMELLER VE UYGULAMALAR	6
3.1.	Lineer Akustik Dalga Denklemi	6
3.2.	Tozların Küresel Partikül Modeli	8
3.3.	Mikro Düzeylerde Partiküllerin Yüzeylerden Koparılma Olayının Analizi.....	9
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI	13
4.1.	Akustik Yüzey Dalgaları İle Makro Düzeylerde Partiküllerin Eğimli Yüzeylerden Koparılma Olayının Analizi	13
4.2.	DeneySEL Çalışmalar	19
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ	28
5.1.	Sonuçlar ve Öneriler.....	28
6.	KAYNAKÇA	32
	ÖZGEÇMİŞ.....	35

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Basınç alanlarına eşlik eden yüzey dalgaları ve yüzey partiküllerine etkileri.....	7
Şekil 3.2.	Basitleştirilmiş küresel toz partikülü modeli.....	9
Şekil 3.3.	Akustik yüzey dalgalar ile partiküllerin yüzeyden kopma ve sürüklenme olaylarının temsili gösterimi [5].....	10
Şekil 4.1.	Akustik yüzey dalgalar ile toz parçacıklarının eğimli yüzeyden kopma ve sürüklenme olaylarında etkin olan kuvvetler.....	13
Şekil 4.2.	Farklı yarıçaplardaki $d = \{0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 1, 2\}$ mm parçacıkların yüzeyden koparılabilmesi için farklı yüzey açılarındaki ihtiyaç duyulan yüzey normali yönünde minimum ivme değerlerinin logaritmik ölçekte değerleri	16
Şekil 4.3.	Farklı yarıçaplardaki $d = \{0.5, 0.8, 1, 2\}$ mm büyük parçacıkların yüzeyden koparılabilmesi için ihtiyaç duyulan yüzey normali yönünde minimum ivme değerlerinin farklı yüzey açılarına göre lineer ölçeklerde değerleri.....	17
Şekil 4.4.	Türkiye'nin içinde bulunduğu bölgenin ortalama güneş panel açısı $\theta = 39^\circ$ için parçacıkları yüzeyden koparmak için gereken minimum yüzey normali ivmeler.....	18
Şekil 4.5.	20 W Sunlike SL020-12 model güneş paneli.....	20
Şekil 4.6.	Piezoelektrik titreşim üretici.....	20
Şekil 4.7.	Rigol DS 5102C dijital osiloskop cihazı.....	21
Şekil 4.8.	Deney düzeneğinin resimleri.....	21
Şekil 4.9.	Deney düzeneğinin devre şeması.....	22
Şekil 4.10.	Temizlik öncesi kum ile kirletilmiş panel.....	23
Şekil 4.11.	Akustik yüzey dalga uygulamasından sonra kum tanelerinden kısmı olarak temizlenen panelin resmi.....	23
Şekil 4.12.	Akustik yüzey dalga uygulaması sürecinde panel geriliminde gözlemlenen değişim.....	24
Şekil 4.13.	Temizlik öncesi ince kum ile kirletilmiş panel.....	25
Şekil 4.14.	Akustik temizlik sonrasında kısmi olarak temizlenmiş panel yüzeyi ve kum yığının oluşumu.....	25
Şekil 4.15.	Akustik yüzey dalga uygulaması süresince panel gerilimin zamanla değişimi.....	26
Şekil 5.1.	Sıfır derece panel açısında farklı boyutlarda kum tanelerinin panel yüzeyine dizilimi. Soldan sağa doğru ortalama parçacık büyüklüğü artmaktadır.....	29
Şekil 5.2.	30 saniye akustik yüzey dalgalarına maruz bırakılan kum tanelerinin hareketleri sonucu elde edilen dağılım.....	29

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1.	Akustik temizliğin farklı aşamalarında panel çıkış gerilimi....	27
--------------	---	----



SİMGELER VE KISALTMALAR

p	Basınç
$\vec{v}$	Parçacık hızı
K	Bulk modülü
ρ	Yoğunluk
c	Dalga hızı
m	Kütle
$\vec{F}$	Kuvvet
$\vec{F}_n$	Yüzey normalı yönünde kuvvet bileşeni
$\vec{F}_t$	Yüzeye teğet kuvvet bileşeni
$\vec{a}$	İvme
$\vec{a}_n$	Yüzey normalı yönünde ivme bileşeni
$\vec{a}_t$	Yüzeye teğet yönünde bileşeni
d	Yarıçap
V	Hacim
$\vec{v}_t$	Yüzeye teğet hız bileşeni
$\vec{F}_{ad}$	Yapışma kuvveti
A_{132}	3 ortam için Hamaker sabiti
A_{ij}	2 ortam için Hamaker sabiti
z_o	Parçacık ile yüzey arası mesafe
$\vec{F}_d$	Sürtünme kuvveti
μ	Sürtünme katsayısı
$\vec{G}$	Yer çekim kuvveti
$\vec{G}_n$	Yer çekim kuvvetinin yüzey normalı yönünde bileşeni
$\vec{G}_t$	Yer çekim kuvvetinin yüzeye teğet yönünde bileşeni
$\vec{g}$	Yer çekim ivmesi
θ	Global en iyi parçacık konumu
$\overline{h\omega}_{132}$	Lifshitz-Van der Waals sabiti

1. GİRİŞ

Akustik dalgalar katı, sıvı ve gaz ortamlarında yayılan elâstik (esnek) dalgalardır. Madde ortamında yayılım kabiliyetine sahip akustik dalgalar bu ortamlarda enerji taşınımı ve güç aktarımı sağlayabilirler. Gaz ortamlarında yayılan akustik dalgalar ses dalgaları olarak adlandırılır ve bu dalgalar canlılar tarafından iletişim amacı olarak kullanılır. Yansıyan akustik dalgaları değerlendirerek ortam bilgisi toplayan canlılar mevcuttur. Sıvı ortamlarda daha uzak mesafeler kat eden akustik dalgalar deniz canlıları için haberleşme ve sonar amaçlı kullanılmaktadır. Katı ortamda yüksek enerji yayılımı sağlayan dalgalara örnek olarak deprem dalgaları verilebilir. Deprem dalgaları yeryüzünde yayılan yüksek enerjili akustik dalgalardır ve taşıdığı enerji ile yüzeyde büyük bir yıkım gücü ortaya çıkarırlar. Dalga yayılımında ortam yoğunluğu arttıkça akustik dalga hızı ve enerji aktarım kapasitesi artmaktadır. Bu nedenle katı ve sıvı ortamlar gaz ortamlara nazaran akustik dalgalar ile daha yüksek enerji aktarım kapasitesi gösterirler [1,2].

Mühendislikte akustik dalgalar madde ortamında enerji ve sinyal aktarımı gereken birçok uygulamada kullanılırlar. Örneğin, görüntüleme (sonar, ultrasonik görüntüleme vs.), ses sistemleri, temizlik vb. Akustik dalga ile taşınan enerji, kirletici materyallerin yüzeylerden temizlenmesi için kullanılmıştır.

Akustik dalgalar ile yüzey temizliği, uygulama ölçeğine göre iki grupta değerlendirilmelidir.

a) Mikro ölçekte akustik dalga uygulamaları: Genelde mikro mekanik sistemlerde akustik yüzey dalgaları oluşturularak katı yada sıvı yüzeylere tutunan biyomateryal , partiküller, sıvı damlaları gibi materyallerin yüzeyden taşınmasında önemli bir kullanım bulmuştur. [3,4,5]

b) Makro ölçekte akustik dalga uygulamaları: Makro ölçekte ise genelde erişimi zor olan mekanik parçaların, bacaların, depoların temizlenmesinde kullanılır. Eğer temizlik yapılacak ortam hava ise yüksek güçlü ses dalgaları üretilir. Bu yüksek güçlü akustik dalgaların oluşturduğu titreşimin depo, baca gibi ortamların kirlenmesinin önüne geçilmesi hedeflenir. Akustik dalgalar doğrudan temizleme yerine kirlenme olayını geciktirmek için de uygulanır. Yüzeye yapışan katı parçaların

hava ortamında akustik dalgaya maruz bırakılarak temizlenmesi tam bir temizlik sağlayabilir. Ancak, akustik dalgalar parçacık ve tozların hava yolu ile yüzeye taşınıp birikmesini önleyebilmekte ve dolayısı ile kirlenmeyi geciktirebilmektedir [1]. Sıvı ortamında ise bu ortamda iletilen akustik dalgalar ile kavitasyon (kabarcık oluşumu, soğuk kaynama) oluşumu temizleme işlemine katkı sağlayabilmektedir.

Bu çalışmada, Güneş paneli gibi eğimli yüzeylerin toz ve partikülden temizlenmesi için akustik yüzey dalgalarının kullanımı incelenecektir. Bu amaçla yüzey dalgaları ile partikül temizliği teorik olarak incelenmiş ve eğimli yüzeylerden parçacıkların koparılması ve yerçekimin etkisi incelenmiştir. Güneş paneli temizlik süreçlerine etkiyen faktörler değerlendirilmiştir. Deneysel çalışma kısmında, kurulan deneysel ölçüm sistemi ile akustik yüzey dalgalarının panel temizliğinde uygulanabilirliği araştırılmış, sonuçlar paylaşılmış, farklı frekanslarda oluşturulan akustik yüzey dalgalarının etkileri incelenmiştir.

İkinci bölümde çalışmada lineer akustik dalga modeli tanıtılmış ve yüzey dalgaları ile partikül etkileşimi için literatürde önerilen yöntemler anlatılmıştır. Ayrıca, bu bölümde akustik dalga ile temizlik konusunda kısa bir literatür araştırması sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, akustik yüzey dalgaları ve partikül etkileşimi için literatürde önerilen yöntemler Güneş paneli temizliği için genişletilmiştir. Literatürde verilen yöntem ve modeller mikro ölçekler için yapılmış ve bu nedenle yüzey eğimi ve partikül kütesine bağlı yerçekimi kuvvetinin etkileri dikkate alınmamıştır. Bu değerlendirmeler, güneş panellerinin analizi için makro düzeylere genişletilmiş, panel eğimi ve kütle çekim kuvvetinin önem kazandığı makro ölçeklerde toz temizliği için analizler yapılmış ve sürece etkiyen faktörler göz önüne alınmıştır. Daha sonra, akustik yüzey dalgaları ile panel temizliğinin deneysel çalışması için geliştirilen deney düzeneği tanıtılmış ve deneysel çalışma sonuçları değerlendirilmiştir.

Dördüncü bölümde elde edilen sonuçlar sunulmuş ve bulgular tartışılmıştır. Sistemin iyileştirilmesi için önerilen sunulmuştur.

2. KAYNAKÇA ÖZETLERİ

2.1. Akustik Yüzey Dalgaları ile Temizlik Amaçlı Uygulamaları

Akustik yüzey dalgaları genelde mikro ölçeklerde ve mikro-mekanik sistemlerde uygulama bulmuştur. Mikro ölçeklerde veya mikro-mekanik sistemlerde akustik temizlik için yüzey dalgalarını kullanan pek çok çalışma yapılmıştır. Bunlardan bazıları:

Mikro-filtreler biyoloji ve medikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu yapılar milimetrik düzeyde hacme sahip sıvı ortamlardan mikro ölçekteki partikül ve yapıları ayırmak için kullanılmaktadır [4,6,7]. Örneğin kan plazmasının kandan ayrıştırılması, biyolojik hücrelerin ve DNA zincirlerinin parçalanması, yönlendirilmesi veya ayrıştırılması gibi işlemler mikro düzeylerde akustik dalgaların filtre yüzeylerinde bu parçacıklara etki etmesi ve onları sürükleyebilmesi ile sağlanmaktadır [4]. Mikro ölçeklerde parçacıkların yönlendirme veya ayrıştırma işlemlerini sağlayan kuvvetler akustik dalgalar ve titreşimler ile kolaylıkla oluşturulabilmektedir. Cotan ve ekibi mikro-filtrelerin akustik temizliği için bir çalışma yapmış, silisyum nitrat yüzey üstüne piezoelectric film (ZnO) ile üretilen esnek düzlem dalga cihazı ile bu filtrelerle kendi kendini temizleme özelliği kazandırmıştır [4]. Çalışmasında 10 mikro metre'ye kadar partikülleri yüzeyden koparıp, filtre çıkışlarına yönlendirebilmiştir.

Diğer bir çalışmada, yüzey akustik dalgalarının mikro dizilerde yüzeye tutunan proteinlerin yüzeyden koparılması ve mikrodizi sensörlerin hasar görmeden temizlenmesi uygulaması gösterilmiştir. Kirlenen mikro makine ve sensörlerin tekrar kullanımı için bu hassas sistemlerin yapılarına zarar vermeyecek duyarlılıkta temizlik işlemi gerekmektedir. Bu çalışmada ultrasonik frekanslarda üretilen yüzey dalgalarının 40 mikrometre büyüklüğe kadar yüzeye yapışan proteinleri koparabildiği gösterilmiştir. Böylece akustik temizleme süreci 11.24 mW güç harcanarak mikrodizi sensörlere zarar vermeden gerçekleştirilmiştir. Temizliğin etkinliği, temizlik öncesi ve temizlik sonrasını gösteren fluorsan yoğunluk (intensity) resimleri ile açık bir şekilde gösterilmiştir [3].

Bir diğ er uygulama, partikül ve toz temizliğinin çok önemli olduğu yarıiletken ve entegre devre üretim teknolojileri için önerilmiştir. Yarıiletken ve entegre devre üretim süreçleri mikron altı teknolojilere ulaştı ve silisyum tabakaların yüzeyinde oluşturulan mikro-elektronik eleman ve yapıların (transistor yapıları, kontak noktaları, iletim yolları vs.) sorunsuz çalışabilmesi için mikron-altı hassasiyette silisyum tabakaların yüzey temizliğinin yapılması gerekmektedir. Kolomenskii ve ekibi bu konuda yaptığı çalışmasında çok küçük parçacıkların silisyum yüzeyden koparılabilmesi için akustik yüzey dalgası uygulanmasını öneren analizler sunmuştur [5]. Yapılan deneysel çalışmalarda temizlenen silisyum tabaka yüzeyi resimler ile gösterilmiştir. Kolomenskii ve ekibinin çalışması, bu tez çalışmasının teorik kısmı için bir temel teşkil etmiştir. Tez  alışmamızda, Kolomenskii ve ekibinin analizleri, eğimli güneş paneli yüzeyi ve makro ölçekli tozlar için genişletilmiştir.

Makro-ölçeklerde de akustik temizlik uygulamaları yapılmıştır. Verhaagen ve ekibi, üç boyutlu basılan yapıların yüzeylerinin ultrasonik dalgalar ile temizlenebileceğini göstermiştir [8]. Ayrıca, Koruk ve ekibi tarafından  t lerde metal yüzeyde kireç taşı birikimini en aza indirmek için ultrosonik titreşimlerin kullanılabilceği gösterilmiştir [9]. Bu çalışmada,  t n n metal yüzeyine dokunan bir piezoelektrik ultrasonik dalga üretici ile  t  yüzeyi 35-40 KHz frekansında titreştirilerek kireç birikiminin azaltılabileceği belirtilmiştir.

PV güneş panellerinin enerji üretim verimliliğinin panel yüzeyi temizliğine bağımlı olduğu ve dış ortam koşullarında yüzey temizliği yapılmaması durumunda panel veriminin düştüğünü gösteren çalışmalar mevcuttur [10,11,12]. Fırçalama veya silmeye dayalı mekanik kaba temizliğin [13] sürekli yapılamaması, ekipmanın ağır ve büyük olması, toplamda çok geniş alanlara ulaşan panel yüzeylerine kurulmasının maliyetli olması, yüksek güç tüketmesi ve panel yüzeylerine zarar vererek zamanla ışık geçirgenliğinin azaltabilmesi gibi nedenlerden dolayı yüzeyde hasar bırakmayan, büyük ve ağır mekanik ekipmana ihtiyaç duymayan, düşük güç gereksinimi olan ve elektriksel olarak kontrol edilebilen yöntemlerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu noktada kendiliğinden-temizlenme (self-cleaning) adı verilen yöntemler geliştirilmiştir [14]. Bu yöntemlerin etkili olanlarından biri uzay çalışmalarında NASA tarafından tercih edilmiş olan elektrostatik yöntemdir. Bu

yöntem elektrik perde adı verilen ve panel yüzeyini kaplayan bir katman üzerinde toz partiküllerinin yüklenmesi ve uygun şekilde oluşturulan elektrostatik kuvvetler ile yüklenen toz parçacıklarının yüzeyden koparılması prensibine dayanır [15,16]. Ayrıca, kendiliğinden temizlik için elektronik kontrol ve güç tüketimi gereksinimi olmayan nano düzeyde yüzey iyileştirme teknikleri ile kir tutmayı azaltan yöntemler PV panel temizliği için önerilmiştir. Doğadaki bitki yapraklarının kendini temizleme özelliğinden esinlenilerek su tutmazlık özelliğine sahip özel panel yüzeyleri ile kirlenme etkisi azaltılmaya çalışılmıştır [17,18,19,20]. PV panellerin yüzeylerinin temizlenmesi için elektrostatik ve yüzey iyileştirme yöntemleri dışında akustik yöntemlerde uygulanmıştır. Örneğin, solar panel temizliği için temizleyici sıvının etkinliğini artırmak için ultrasonik kavitasyon uygulaması Vasiljev ve ekibi tarafından araştırılmıştır [2]. Çalışmada nümerik analiz ve deneysel gözlemler ile piezoelektrik üreteçler ile oluşturulan ultrasonik dalgaların 1 mm'ye varan kalınlıkta sıvı katmanında temizlik etkisini incelenmiştir. Sıvı içinde ultrasonik dalgalar ile oluşturulan çok yüksek ve çok düşük basınçlı alanların etkisi ile oluşan ultrasonik kavitasyon ve bunun panel temizliğine etkileri gösterilmiştir [2].

Bu tez çalışmasında, PV güneş panel yüzeyinin, elektronik olarak kontrol edilebilme özelliğine sahip yüzey dalgaları uygulaması ile akustik temizleme etkisi araştırılacaktır.

3. KURAMSAL TEMELLER VE UYGULAMALAR

3.1. Lineer Akustik Dalga Denklemi

Lineer dalga denklemi, uzay ve zaman ekseninde akustik bir dalgayı oluşturan mekanizmaların lineer olduğu varsayımı altında elde edilir ve temel dalga özelliklerinin tanımlanmasında ve analizinde kullanılır. Lineer dalga denkleminin türetilmesi için akustiğin üç temel denklemi olan Durum Denklemi, Süreklilik Denklemi ve Euler Denkleminin birlikte kullanılarak tek bir denklem haline getirilmesi ile elde edilir [21]. Lineer dalga denklemini basınç dalgasının (p) yayılımı

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

denklemi ile ifade edilir. Burada c sonlu genliğe sahip akustik bir dalganın yayılma hızı (faz hızı) olup yayılma ortamının K bulk modülü ve ρ yoğunluğuna bağlı olarak

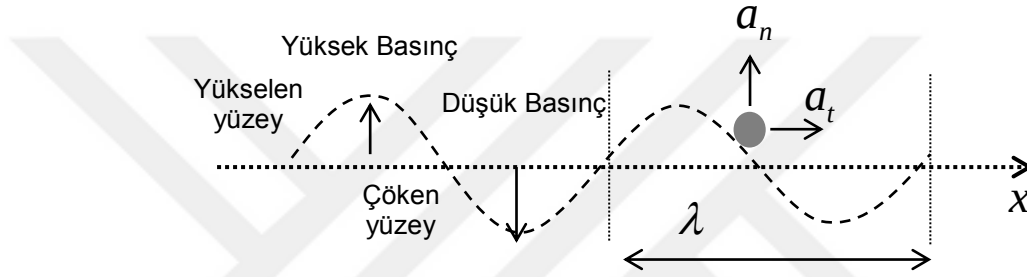
$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3.2)$$

ile ifade edilir.

Akustik dalgalar bir ortam içerisinde ilerlerken ortamda bulunan molekülleri titreşim hareketine zorlarlar. Bu zorlama, ortam içerisindeki parçacıkların yer değiştirmesine ve bunun sonucunda da dalganın ilerlemesi esnasında yerel olarak basınç alanının ve parçacık yoğunluğun değişmesine neden olur [21]. Lineer dalga denklemi parçacıkların ortalama bir konum etrafında yer değiştirme hareketi yapması sonucu basınç alanlarının ortamda yayılımını ifade eder. Yayılım ortamını oluşturan parçacıkların titreşimini sağlayan yer değiştirme hareketi için hızı v ile ifade edilirse, homojen olmayan bir ortamda ilerleyen akustik dalgalar hem basınç hem de v parçacık hızına bağlı denklem çifti ile ifade edilir [22,23].

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p \quad \frac{\partial p}{\partial t} = -K \nabla v \quad (3.3)$$

Katı yapı içinde ilerleyen basınç alanları, katı yapının süreksizlik gösterdiği kenar ve yüzeylerde yüzey dalgalarına yol açarlar. Yüzey dalgaları katı malzemenin yüzeyi boyunca ilerleyen ve basınç alanının dağılımına bağlı olarak yüzeyde ilerleyen, tepe ve çukurlar oluşturan (yüzey titreşimleri) dalga yapılarıdır. Şekil 3.1’de yüzey dalgası temsili olarak çizilmiştir. Bu çalışmada yüzey dalgalarının yüzey normali ve yüzeye teğet oluşturdukları kuvvetler önem kazanmaktadır. Bu kuvvetler yüzeye yapışan ve kirliliğe yol açan partiküllerin uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır [5].



Şekil 3.1 Basınç alanlarına eşlik eden yüzey dalgaları ve yüzey partiküllerine etkileri

Şekil 3.1. Yüzey dalgasının bir parçacığa uyguladığı koparma ve süpürme kuvvetlerine yol açan ivme bileşenleri

Yüzeyde yapışmış bir m kütleli parçacık yüzey dalgası ile etkileştiği durumda yüzey normali doğrultusunda parçacığa etki eden kuvvet F_n olsun. Bu durumda dalganın yüzey normali doğrultusunda oluşturduğu ivme,

$$a_n = \frac{F_n}{m} \quad (3.4)$$

olarak ifade edilir. Bu ivme parçacığın yüzeyden ayrılmasını sağlayan koparma kuvvetine yol açar. Bu m kütleli parçacığın yüzeyde sürüklenmesine yol açan dalga hareketinin yüzeye teğet oluşturduğu kuvveti F_t ile gösterelim. Bu kuvvete yol açan yüzeye teğet ivme,

$$a_t = \frac{F_t}{m} \quad (3.5)$$

ile hesaplanır [5]. Şekil 3.1’de yüzey dalgasının bir parçacığa uyguladığı koparma ve süpürme kuvvetlerine yol açan ivme bileşenleri temsili olarak gösterilmiştir. Dalganın yayıldığı ortamı oluşturan katı ortamın moleküllerinin veya parçacıkların hızının yüzeyde de yaklaşık korunduğu varsayılırsa, dalga hareketine katılan bir yüzey molekülüne veya parçacığın etkiyen ivme, denklemi (3.3)’ de $a = \frac{\partial v}{\partial t}$ kullanılarak,

$$a = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (3.6)$$

olarak ifade edilebilir. Katı yüzeyi ile etkileşim içinde olan ve yüzeye tutunmuş kirlenici parçacıklar bu ivmeye maruz kalacaktır. Bu ifade, yüzeye tutunan bir parçacığa etki eden ivmenin, yüzey civarında basınç dalgasının gradyanına, diğer bir ifade ile yüzey boyunca değişimine bağlı olduğunu gösterir. Diğer taraftan, malzemenin yüzeyi civarında yoğunluğunun düşmesi nedeni ile, $\frac{1}{\rho}$ çarpanı ile orantılı olarak kirlenici parçacığın ivmenin artacağı görülür. Bu ivmenin yol açtığı kuvvetler yüzeye tutunan parçacıkların yüzeyden koparılması ve sürüklenmesi olaylarında rol oynamaktadır. Bu etki akustik yüzey dalgaları ile temizlik sağlar.

3.2. Tozların Küresel Partikül Modeli

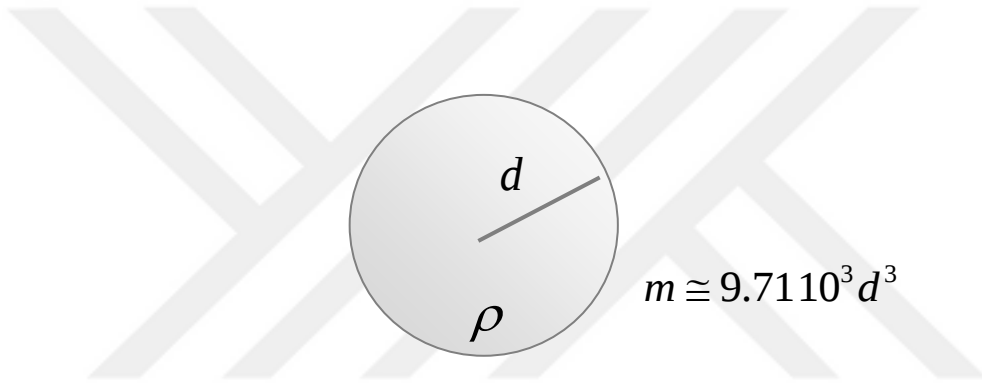
Hava yolu ile taşınan toz partikülleri genelde çok küçük boyutlu kum parçacıklarıdır. Bu partiküller rüzgâr gibi birçok doğal etmen ya da insan faaliyetleri gibi yapay bir çok etmen sonucu yüzeyden havalanır ve hava ile taşınımı gerçekleşir. Tekrar yerçekimi ve diğer etken kuvvetlerin (aerodinamik, elektrostatik kuvvetler) etkisi ile tekrar yüzeylere konarlar. Zamanla yüzeylerde biriken toz parçacıkları temiz kalması istenen yüzeylerde kirlenmeye yol açar. Bu durum özellikle cam gibi yüzeylerde ışık geçirgenliğini azaltır. Kirlenmeye yol açan

hareketli toz parçacıkları, teorik çalışmalarda basitleştirme için silisyum yapılı küresel parçacıklar olarak modellenmiştir [5].

şekil 3.2’de basitleştirilmiş küresel toz partikülü modeli ve analizlerde ihtiyaç duyulan temel model parametreleri gösterilmiştir. Toz partikülünün yoğunluğu (ρ) silisyum yapılı tozlar için $2.32 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ alınır. Buna göre toz partikülünün kütlesi, yarıçapı d parametresine bağlı olarak,

$$m = V\rho = \frac{4}{3}\pi d^3\rho \cong 9.71 \cdot 10^3 d^3 \quad (3.7)$$

ifade edilir.

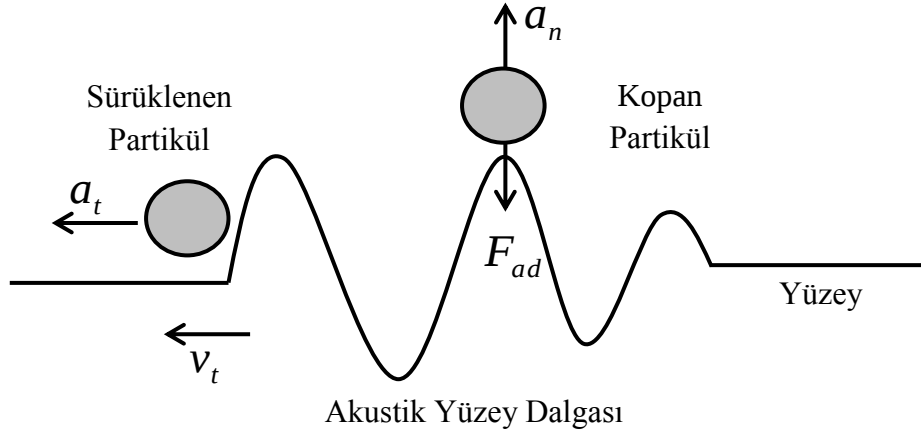


şekil 3.2. Basitleştirilmiş küresel toz partikülü modeli

3.3. Mikro Düzeylerde Partiküllerin Yüzeylerden Koparılma Olayının Analizi

şekil 3.3’de akustik yüzey dalgalar ile partikllerin yüzeyden kopma ve sürüklenme olaylarının temsili gösterimi çizilmiştir [5]. Yüzey dalgalarının, yüzeyde oluşturduğu hareketler sonucu da yüzeyde tutunan partiküllere uyguladığı kuvvet iki temel bileşene sahiptir.

- (i) Dalganın yüzey normali yönünde oluşturduğu ivmelenme sonucu partikülleri yüzeyden ayıran koparma kuvveti
- (ii) Dalganın yzeeye teğet yönde oluşturduğu ivmelenme nedeni ile partikülleri yüzeyden sürükleyen sürükleme kuvveti.



Şekil 3.3. Akustik yüzey dalgalar ile partiküllerin yüzeyden kopma ve sürüklenme olaylarının temsili gösterimi [5]

Bu kuvvetlerin yüzeyde tutunan partiküllere etkileri ve partikül temizliğindeki rolü şöyle analiz edilmiştir.

Küçük partiküllerin katı yüzeye yapışmasında rol oynayan temel etkileşimin, Van der Waals kuvveti ile ortaya çıkan moleküler etkileşim olduğu görülmüştür [5]. Küresel formdaki partiküllerin katı yüzeyine en yakın noktada ortaya çıkan yapışma kuvveti (adhesion force) [5,23,24,25]

$$F_{ad} = A_{132} \frac{d}{12z_o^2} \quad (3.8)$$

ile ifade edilmiştir. Burada A_{132} sabiti Hamaker sabitidir. Partiküle yüzeyi için 1, katı yüzeyi için 2 ve ara ortam bulunması durumunda 3 indisi ile ifade edilir [5,24]. A_{132} sabiti farklı materyallerden oluşan partikül ile katı yüzeyi arasında hava ortamı olduğunu durum için kullanılabilir. Bu sabitin değeri her materyalin ikili etkileşimlere göre Hamaker sabitlerine bağlı olarak şöyle ifade edilmiştir [24].

$$A_{132} = A_{12} + A_{33} - A_{13} - A_{23} \quad (3.9)$$

Burada A_{ij} ilgili i ve j indisli materyallerin etkileşimi için Hamaker sabitleridir [24]. Bu çalışmada ortamın hava olduğu varsayılmıştır. Parametre d parçacık

yarıçapını ve z_o parçacık ile yüzey arasındaki uzaklığı gösterir. Bu kuvvetin değeri bulunan ortam için hesaplanır.

Partikülün yapıştığı yüzeyden koparılmasında akustik yüzey dalgalarının uygulanması durumunda yüzey normali yönünde oluşan yüzey hareketleri sonucu ortaya çıkan koparma kuvveti önem kazanır. Bu kuvvet dalganın yüzey normali yönünde oluşturduğu ivmenin a_n değerine bağlı olarak [5],

$$F_n = ma_n \quad (3.10)$$

ile ifade edilir. Akustik yüzey dalgaları ile etkileşim sonucunda yüzeyde bulunan partikülün yüzeyden ayrılabilmesi için oluşan yüzey normali yönünde F_n kuvvetinin, yapışma kuvvetinden daha büyük olması diğer bir ifade ile $F_n > F_{ad}$ olması gerekir. Bu koşulu sağlayan yüzey normali yönünde oluşması gereken ivme için,

$$a_n > \frac{F_{ad}}{m} \quad (3.11)$$

verilmiştir [5]. Genelde akustik dalga uygulaması periyodiktir ve bu durumda ivmelenme kısa süreli pulse'lar (vurular) formunda gerçekleşir. Bu durum için partikülün kazandığı kinetik enerji dikkate alan yüzeyden kopma koşulu,

$$\frac{1}{2}mv_n^2 > F_{ad}z_o \quad (3.12)$$

ile ifade edilmiştir [5]. Burada yüzeyden kopma için parçacığın yüzey normali yönündeki hızı v_n sonucu kazandığı kinetik enerjisinin $(\frac{1}{2}mv_n^2)$ yüzey yapışma kuvvetine bağlı olan potansiyel enerjiden $(F_{ad}z_o)$ büyük olması gerekmektedir. Bunun sonucunda partikül yüzeyden ayrılabilir. Yüzeye yapışma potansiyeli yüzeyden 4-10 Å⁰ uzaklıkta minimum olur. Bu nedenle hesaplamalarda z_o 4 Å⁰ alınır.

Parçacığı yüzey boyunca sürüklemek için gereken kuvvet, statik sürtünme katsayısı dikkate alınarak,

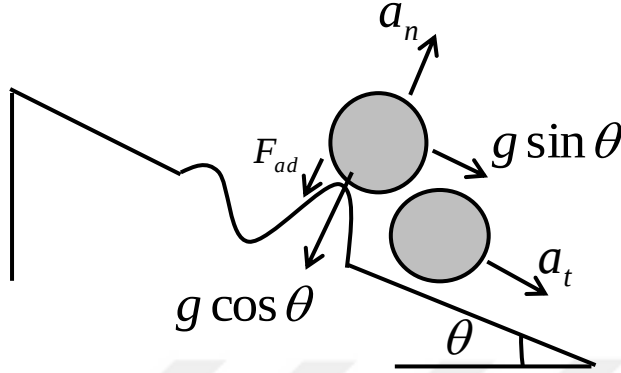
$$F_d = ma_t > \mu F_{ad} \quad (3.13)$$

olarak ifade edilmiştir [5]. Burada akustik yüzey dalgası sonucu yüzeye teğet yönde oluşan ivmenin (a_t) yol açtığı kuvvetin sürtünme kuvvetini yenmesi gerekir. Sürtünme katsayısı μ genelde 0.5 ile 2 arasında değer alır. Cam-cam yüzeyler için μ değeri 0.9 ile 1.0 arasındadır. Cam-metal yüzeyler arasında μ 'nun değeri 0.5 ile 0.7 arasında değer alır.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Akustik Yüzey Dalgaları İle Makro Düzeylerde Partiküllerin Eğimli Yüzeylerden Koparılma Olayının Analizi



Şekil 4.1. Akustik yüzey dalgaları ile toz parçacıklarının eğimli yüzeyden kopma ve sürüklenme olaylarında etkin olan kuvvetler

Bir önceki bölümde çok küçük partiküllerin yüzey dalgaları ile etkileşimi sonucu yüzeyden kopma ve sürüklenme olaylarının analizleri sunulmuştu [5]. Bu analizlerde parçacıkların çok küçük partiküller (aerosollar) olduğu varsayımı altında kütle çekim kuvveti etkisi ihmal edilmişti. Dolayısı ile partikülün yapıştığı yüzeyin eğimi dikkate alınmamıştı. Bu analizlerin yarıçapları 10-20 μm kadar olan havada uçuşma kabiliyetine sahip aerosol partikülleri için yeterli olduğu görülmüştür.

Akustik yüzey dalgalarının, Güneş paneli yüzeyi temizliğinde kullanım uygulaması için daha büyük yarıçaplara sahip toz partiküllerinin eğimli yüzeylerden koparılması ve sürüklenmesi olaylarının incelenmesi gerekmektedir. Bu bölümde, mikro-düzey aerosollar için önerilen teorik yaklaşımı daha büyük ebatlara sahip ve eğimli bir yüzeyde tutunmuş olan makro ölçeklerde toz parçacıklarının kopma ve sürüklenme olaylarının analizi için genişleteceğiz.

Partikül ebatları büyüdüğü zaman kütlesi büyür ve yer çekimi kuvveti önem kazanır. Bu kuvvet tutunma yüzeyi eğimine bağlı olarak yüzeye dik (G_n) ve yüzeye teğet (G_t) iki bileşen ile ifade edilebilir. Yerçekimi kuvvetini eğimli bir yüzeye tutunan m kütleli parçacı için,

$$G_n = mg \cos(\theta) \text{ ve } G_t = mg \sin(\theta) \quad (4.1)$$

ile ifade edebiliriz. Burada g yerçekimi ivmesi ve θ yüzeyin eğim açısıdır. Şekil 4.1’de akustik yüzey dalgalar kullanımı ile eğimli yüzeyden toz partiküllerinin kopma ve sürüklenme olaylarında etkin kuvvetler görülmektedir. Eğimli bir yüzeyde tutunan bir toz partikülünün yüzey dalgaları yardımı ile yüzeyden koparılması için akustik yüzey dalgalarının yüzey normali yönünde oluşturduğu F_n kuvvetinin, yüzeye yapışma kuvveti olan F_{ad} ve kütle çekim kuvvetinin normal yönünde bileşeni olan G_n toplamından daha büyük olması gerekir.

$$F_n > F_{ad} + G_n \quad (4.2)$$

Burada, yüzey dalgasının yol açacağı yüzeye dik normal kuvveti $F_n = ma_n$ alınırsa

$$a_n > \frac{F_{ad}}{m} + \frac{G_n}{m} = \frac{F_{ad}}{m} + g \cos(\theta) \quad (4.3)$$

elde edilir. Burada denklem (3.8) ile ifade edilen yapışma kuvveti (adhesion force) ve küresel parçacık kütlesi $m = V\rho = \frac{4}{3}\pi d^3\rho$ dikkate alınırsa, yüzeyden kopma için gereken ivme

$$a_n > \frac{A_{132}}{9\pi d^2 \rho z_o^2} + g \cos(\theta) \quad (4.4)$$

elde edilir. Burada yüzeye tutunan bir partikülün yüzeye olan uzaklığı (z_o) tipik olarak $4 A^\circ$ alınır. A_{132} Hamaker sabiti, Lifshitz tarafından geliştirilen Makroskopik teoride, dielektrik materyaller için şu çözüm önermiştir.

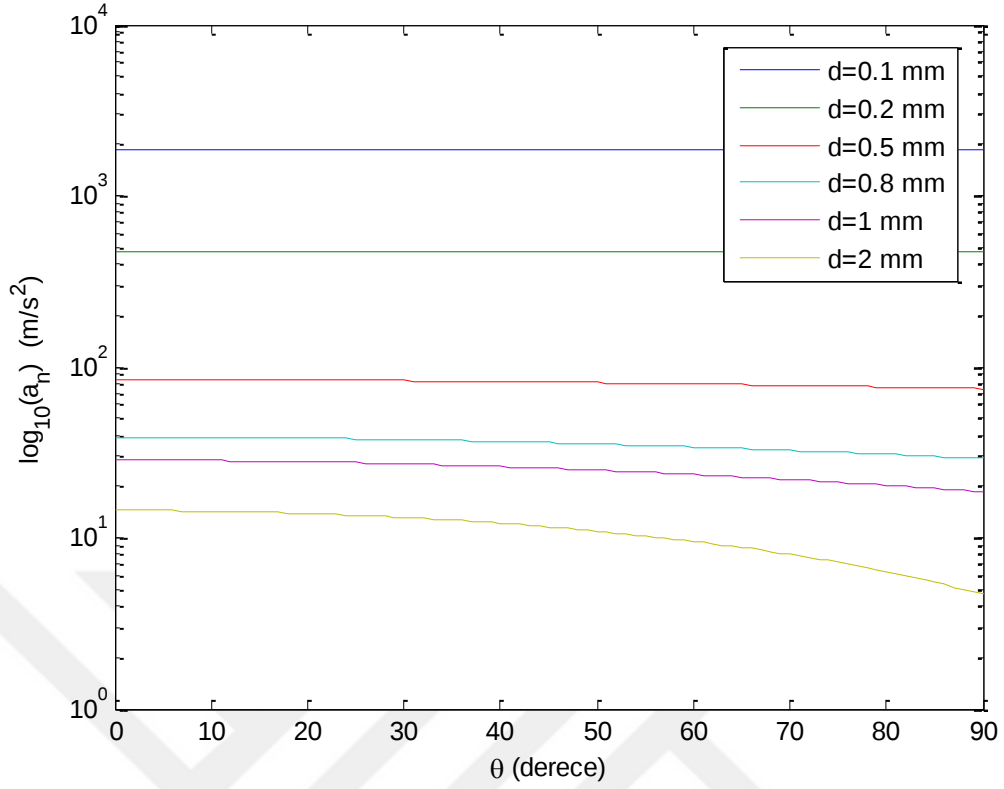
$$A_{132} = \frac{3}{4\pi} h\bar{\omega}_{132} \quad (4.5)$$

Burada $h\bar{\omega}_{132}$ sabiti Lifshitz-Van der Waals sabiti olarak adlandırılmış ve değerleri tipik olarak $0.2 - 15$ eV arasında belirlenmiştir [24,25,26]. Bu tezde toz partiküllerinin büyük oranda silisyum içerdiği ve dielektrik materyal özelliklerine sahip olduğu varsayılmıştır. Panel yüzeyinin ana maddesi silisyum olan cam olduğu

varsayılmıştır. Dolayısı ile cam yüzeye tutunan toz parçacığı için Lifshitz-Van der Waals sabitinin Si-Si hava ortamı için olan değerleri alınır. Si-Si vakum ortamı için $\hbar\omega_{132}$ değeri 6.76 eV ölçülmüş. Si-Si su ortamı için 3.49 eV ölçülmüştür. Si-Si hava ortamı için $\hbar\omega_{132}$ değerinin bu iki değer arasında bir değer olan (ortalama değer) 5.12 eV alınmıştır. Bu sabitin Joule biriminde değeri $8.19 \cdot 10^{-19}$ J olarak elde edilir. ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) Bu durumda, denklem (4.5)'a göre Hamaker katsayısı için $A_{132} \approx 1.9 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ elde edilir. Bu katsayı denklem (4.4)'de değerlendirilirse, toz- hava-cam ortamları için denklem (4.4) daha sade bir formda,

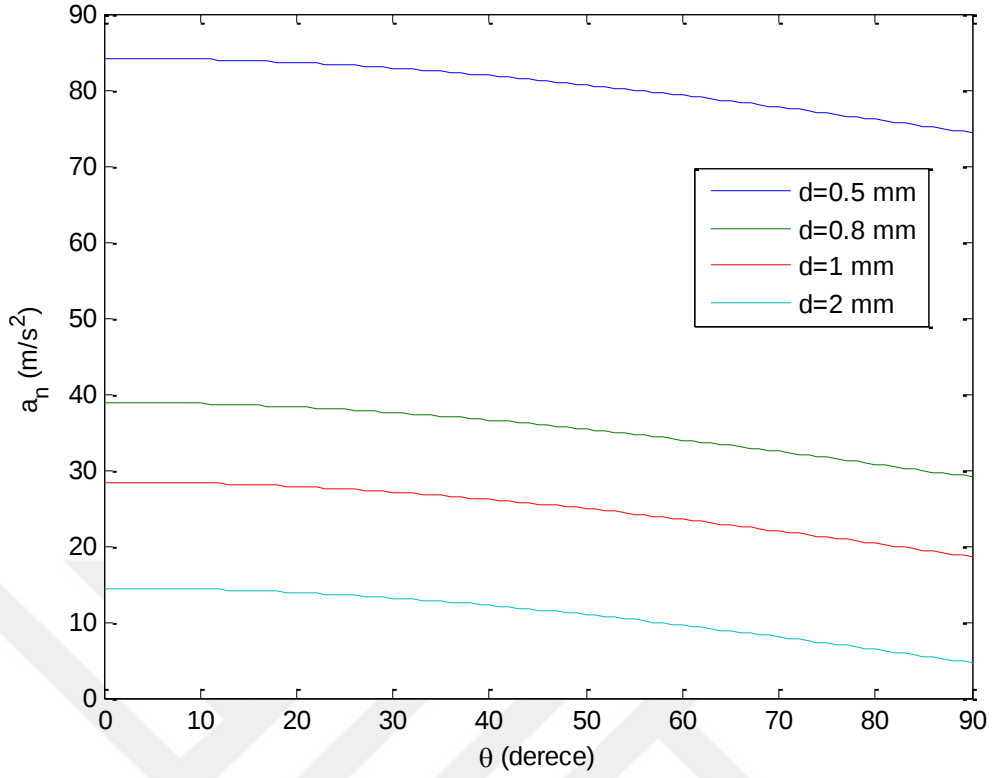
$$a_n > \frac{6.9 \cdot 10^{-21}}{d^2 \rho z_o^2} + g \cos(\theta) \quad (4.6)$$

ile ifade edilebilir. Burada partikül yoğunluğu (ρ) silisyum yapıli tozlar için $2.32 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ve yer çekim ivmesi (g) 9.8 m/s^2 alınır. Denklem (4.6) ile bir partikülü yüzeyden koparmak için yüzey normali yönünde gereken minimum ivme için hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 4.2'de farklı yarıçapta partikülleri yüzeyden koparmak için gereken yüzey normali yönünde minimum ivme değerlerinin logaritmik ölçekte değerleri görölmektedir. Parçacık yarıçapı küçöldükçe (0.1 mm ve 0.2 mm'de) yüzey açısı (θ)'nın dikkate alınır bir etkisinin kalmadığı gözlenmektedir. Bu sonuçlar yer çekimi ivmesinin, çok küçük partiköllerin (Aerosol partiköllerinin) yüzeyden koparılmasında önemli bir etkisinin olmadığı varsayımını doğrulamıştır [5]. Dolayısı ile bu sonuçlar aerosol partiköller için (1 -10 micro metre yarıçaplı partiköller) bir önceki bölümde Kolomenskii ve ekibinin yer çekimi ihmal edilerek yapılmış analizlerinin geçerliliğini göstermiştir. Partiköl yarı çapı 0.5 mm ve üstü için yüzeyin eğim açısının etkisi gözle görölebilir düzeye ortaya çıkmaktadır. Toz parçacığı büyüdüğüçe eğim açısına bağıli olarak ihtiyaç duyulacak normal yönlü ivmenin azalması daha belirgin olarak grafikte görölmüştür. Bu ölçeklerde yer çekiminin etkisini yüzey açısı θ 'ya bağıli olarak daha iyi gözlemleyebilmek için Şekil 4.3'de parçacık yarıçapları 0.5 mm ve üstü için yüzey açısına bağıli olarak parçacık koparmak için gereken minimum normal yönlü ivme değerleri gösterilmiştir. Parçacık yarıçapı arttıkça, yüzey açısına bağıli yerçekimi ivmesinin etkisinin arttığı görölmektedir. Bu sonuçlar ile 0.5 mm yarıçap üstü tozların cam yüzeyinden koparılmasında yüzey eğiminin rolünü olacağı ortaya konmuştur.



Şekil 4.2. Farklı yarıçaplardaki $d = \{0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 1, 2\}$ mm parçacıkların yüzeyden koparılabilmesi için farklı yüzey açılarında ihtiyaç duyulan yüzey normali yönünde minimum ivme değerlerinin logaritmik ölçekte değerleri

Şekil 4.3. farklı yarıçaplardaki $d = \{0.5, 0.8, 1, 2\}$ mm büyük parçacıkların yüzeyden koparılabilmesi için ihtiyaç duyulan yüzey normali yönünde minimum ivme değerleri farklı yüzey eğimleri için lineer ölçeklerde çizilmiştir. Panel açısının artmasına bağlı olarak normal yönünde koparma ivmesinin değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bu durum, büyük parçacıklar için Van der Waals kuvvetine dayalı ivme bileşeni $\frac{6.9 \cdot 10^{-21}}{d^2 \rho z_o^2}$ teriminin etkisinin azaldığını ve yerçekimi ve panel açısına bağlı $g \cos(\theta)$ terimin etkisinin arttığını göstermiştir.



Şekil 4.3. Farklı yarıçaplardaki $d = \{0.5, 0.8, 1, 2\}$ mm büyük parçacıkların yüzeyden koparılabilmesi için ihtiyaç duyulan yüzey normali yönünde minimum ivme değerlerinin farklı yüzey açılarına göre lineer ölçeklerde değerleri

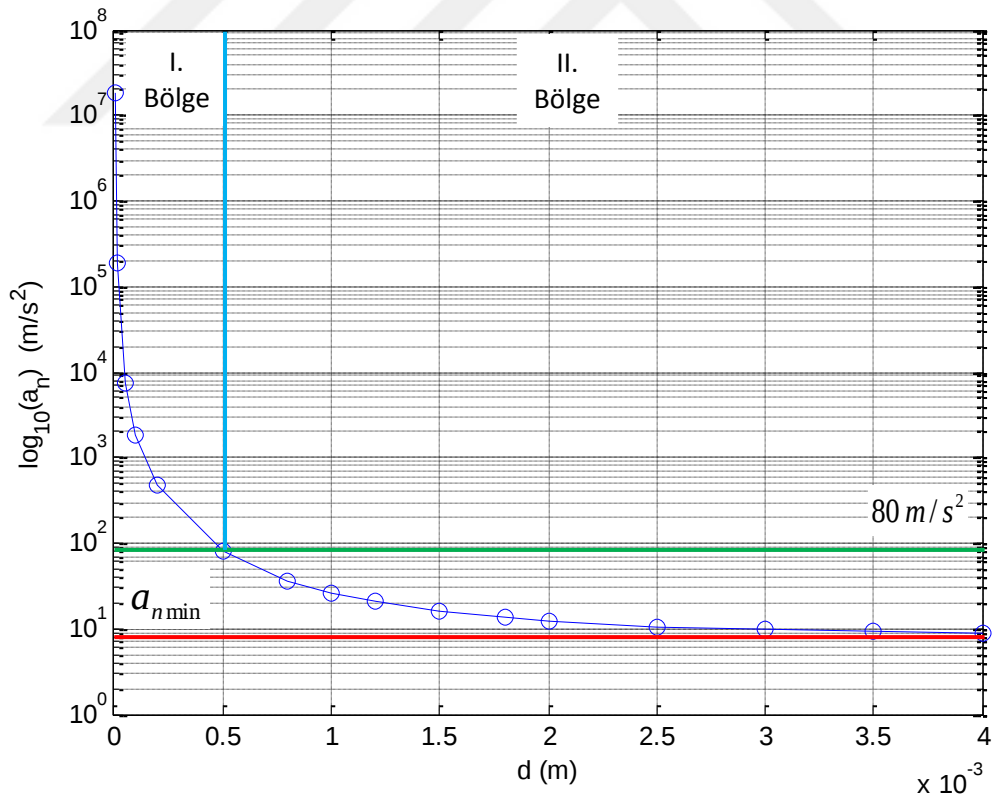
Türkiye'nin bulunduğu enlemde güneş panelleri için önerilen eğim açısı ortalama 39 derece civarındır. Şekil 4.4'de $\theta = 39^\circ$ yüzey eğimi için parçacıkların yüzeyden koparmak için gereken minimum yüzey normali ivmeleri görülmektedir. Bu grafiğe göre şu sonuçlar elde edilmiştir.

(i) Yaklaşık 1 mm yarıçaplı ve daha büyük toz parçacıklarının yüzeyden kopabilmesi için gereken yüzey normali ivmesi büyük değişim göstermemektedir.

(ii) Toz parçacıklarını $a_{n\min} = 8 \text{ m/s}^2$ altında normal ivme değerlerinin yüzeyden koparamayacağı görülmektedir. Bunun temel nedeni, bu ivme düzeyi ve daha düşük normal ivmelenmelerin F_{ad} ve G_n toplamını yenemiyor olmasındandır. Bunun doğal sonucu olarak normal yönünde 8 m/s^2 üzerinde normal ivme oluşturmayan yüzey dalgaları yüzey temizliğine hiçbir katkı sağlamayacaktır.

(iii) $a_n = 80 \text{ m/s}^2$ düzeyinde bir normal ivme sağlayan akustik yüzey dalgaları 0.5 mm ve daha üstü yarıçapa sahip toz partiküllerinin yüzeyden koparılması için yeterli olabileceği öngörülmüştür. (Şekil 4.4’de II. Bölge)

(iv) Çok küçük parçacıkların (0.2 mm ve altı yarıçaplı) yüzeyden koparılması için gereken yüzey normali yönünde ivme bileşenin üstel bir şekilde arttığı görülmüştür. (Şekil 4.4’de I. Bölge) Dolayısı ile çok küçük parçacıkların yüzeyden koparılması için çok yüksek ivme oluşturulmasına ihtiyaç duyulur. Bu güçte yüzey dalgalarının oluşturulmasındaki teknik zorluklar ve yüzeyi oluşturan malzemenin dayanım limitleri nedeni ile pratikte gerçekleştirilebilir olmayacağı öngörülmektedir. Malzemenin dayanım sınırları içinde kalabilecek güçlerde yüzey dalgalarının ile büyük toz parçacıklarının yüzeyden koparılmasında kullanılabileceği görülmüştür. Tozlu güneş paneli uygulamasında ışık geçirgenliğinin azalmasında büyük toz parçalarının etkisi daha fazladır. Bu nedenle akustik yüzey dalgaları ile büyük tozların temizlenebilmesi PV panel enerji verimine olumlu katkılar sağlar.



Şekil 4.4. Türkiye'nin içinde bulunduğu bölgenin ortalama güneş panel açısı $\theta = 39^\circ$ için parçacıkları yüzeyden koparmak için gereken minimum yüzey normali ivmeler

4.2. Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde güneş panel yüzeylerinde akustik yüzey dalgaları oluşturmak için geliştirilen deney seti tanıtılacak ve toz temizliği için yapılan deneylerin sonuçları sunulacaktır.

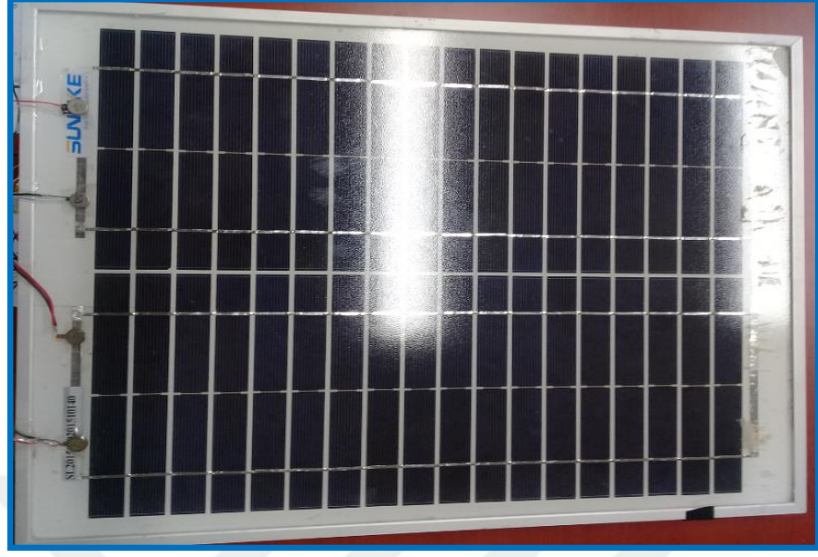
Deney düzeneği şu bileşenlerden oluşmaktadır:

- 20 W Sunlike SL020-12 model güneş paneli: 37 cm x 31 cm ebatlarında cam mika kaplı panelin resmi Şekil 4.5’de görülmektedir.

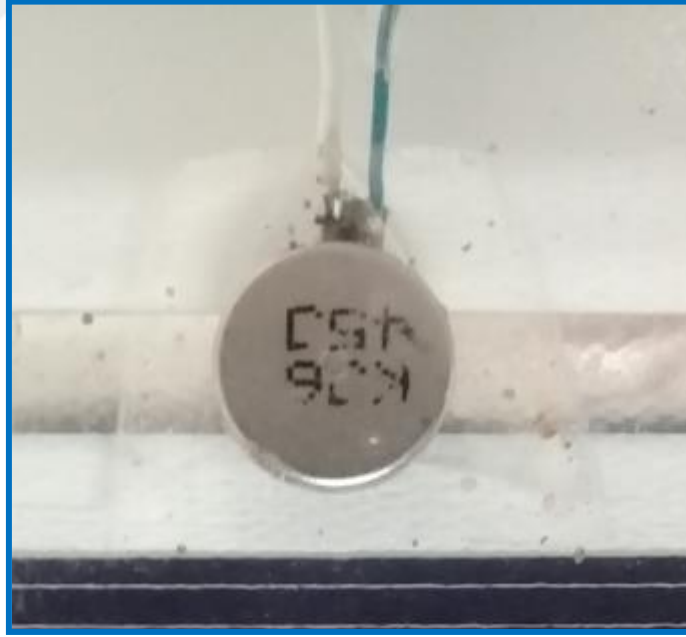
- Piezoelektrik titreşim üretici: Şekil 4.6’de titreşim oluşturmak için kullanılan piezoelektrik titreşim üreteçleri görülmektedir. Bu üreteçler doğrudan panel yüzeyine tutturulmuştur. Ürettikleri titreşim enerjisi yüzey ile kontak noktasından yüzey dalgalarına dönüşmektedir. Deneyde bu titreşim üreteçlerden 4 tane bağlanarak bir dalga üreticisi dizisi oluşturulmuş ve PV panel üzerinde oluşturulan yüzey dalgalarının gücü artırılmıştır. Piezoelektrik titreşim üreteçleri uygulanan DC gerilim ile rezonans frekanslarında titreşim üretmektedir. Deneysel çalışmada titreşim oluşturmak için 6 V DC gerilim uygulanmıştır.

- Rigol DS 5102c (100 Mhz İki kanallı Dijital Depolamalı Osiloskop) Ölçüm cihazı: Şekil 4.7’de panel gerilimlerinin bilgisayar ortamında izleyebilmek için kullanılan dijital osiloskop görülmektedir. Bu dijital osiloskop panel çıkışına bağlanan 1 M Ω yük direnci üzerine zamanla değişen gerilim değerlerini ölçmüştür.

- Thurlby-Thandar TG230 model Gerilim Kaynağı: Dört adet piezoelektrik titreşim üreteçlerinin sürülmesi için 6 Volt DC gerilim çıkış sağlayabilen gerilim kaynağı kullanılmıştır.



Şekil 4.5. 20 W Sunlike SL020-12 model güneş paneli.

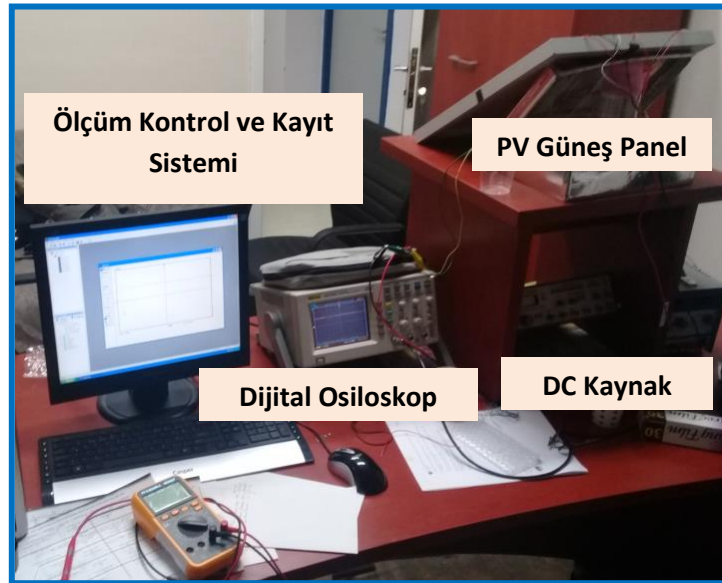


Şekil 4.6. Piezoelektrik titreşim üretici

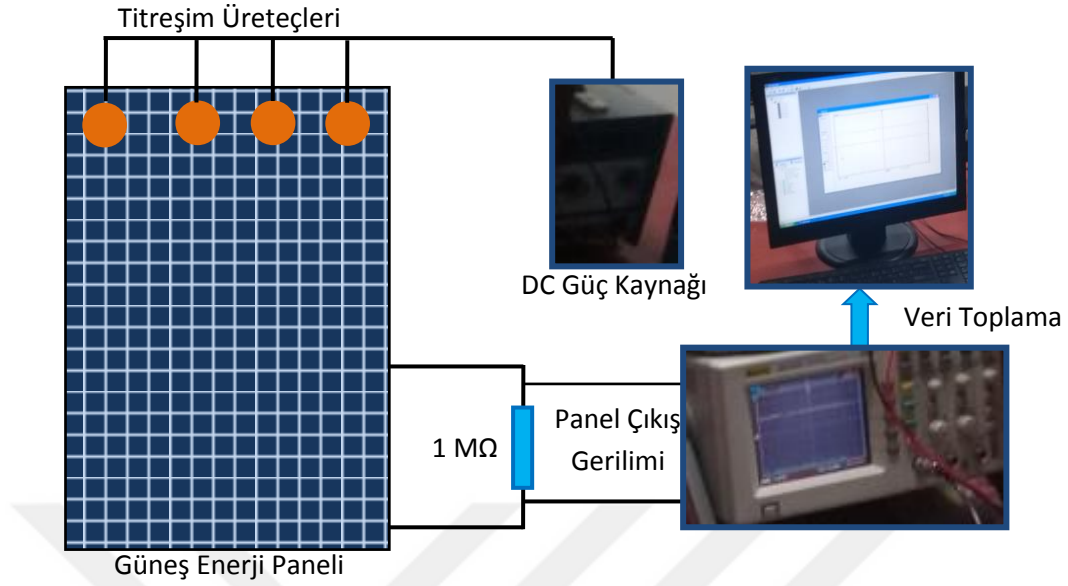


Şekil 4.7. Rigol DS 5102C dijital osiloskop cihazı

Deney düzeneğinin resmi Şekil 4.8’da görülmektedir. Deney sisteminin devre şeması Şekil 4.9’da verilmiştir. Panele bağlanan 1 M Ω yük direnci panelden gelen enerjinin tüketilmesini sağlamaktadır. Bu yük direnci üzerindeki gerilim dijital osiloskop ölçüm cihazı ile izlenmektedir.



Şekil 4.8. Deney düzeneğinin resimleri



Şekil 4.9. Deney düzeneğinin devre şeması

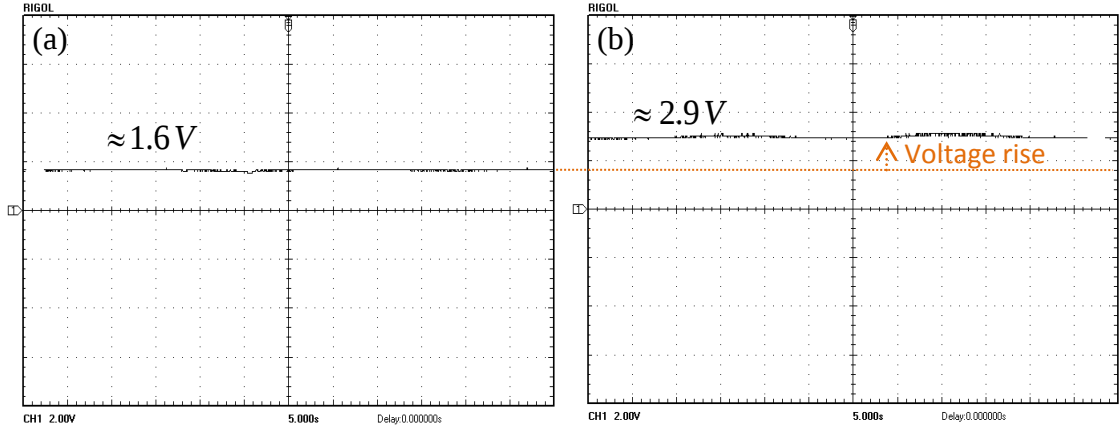
Şekil 4.10 ve 4.11’de akustik temizlik öncesi ve temizlik sonra panel yüzeyinin resimleri görülmektedir. Panel temizlik öncesi, ortalama 1 mm ebatlara sahip ince kum ile kirletilmiştir. Genelde hava taşınımı ile gelen iri toz parçacıkları çöl kaynaklıdır ve ince kum yapısındadır. Bu parçacıkların panelden silinerek temizlenmesi panel yüzeyinin çizilmesine yol açarak enerji verimini kalıcı olarak düşürebilmektedir. Dolayısı ile bu toz parçalarının yüzeyden akustik dalgalar ile uzaklaştırılmasının panel ömrünü ve verimini artırması beklenir. Temizlik işlemi 6 V gerilim ile uyarılan 4 adet titreşim üreticinin 39 derece panel açısında 10 dakika süresince çalıştırılması ile gerçekleştirilebilmiştir. Oluşan yüzey dalgalarının nispeten iri taneli toz parçacıklarını yüzeyden daha kolay uzaklaştırabildiği gözlenmiştir. Küçük parçalar belirli bölgelerde yığınlar oluşturmuş ve bu bölgelerde akustik temizliğin istenilen düzeyde gerçekleşemediği gözlenmiştir. Akustik yüzey dalgaları ile sağlanan temizlikten sonra panel yüzeyinin resmi Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Bu temizlik işlemi boyunca panel çıkış gerilimindeki artış Şekil 4.12’de görülmektedir. Çıkış geriliminin artışı, temizlenen panel yüzeyinin ışık geçirgenliğinin artması bir sonudur ve akustik temizliğin gerçekleştiğini gösterir.



Şekil 4.10. Temizlik öncesi kum ile kirlenmiş panel



Şekil 4.11. Akustik yüzey dalga uygulamasından sonra kum tanelerinden kısmi olarak temizlenen panelin resmi



Şekil 4.12. Akustik yüzey dalga uygulaması sürecinde panel geriliminde gözlemlenen değişim

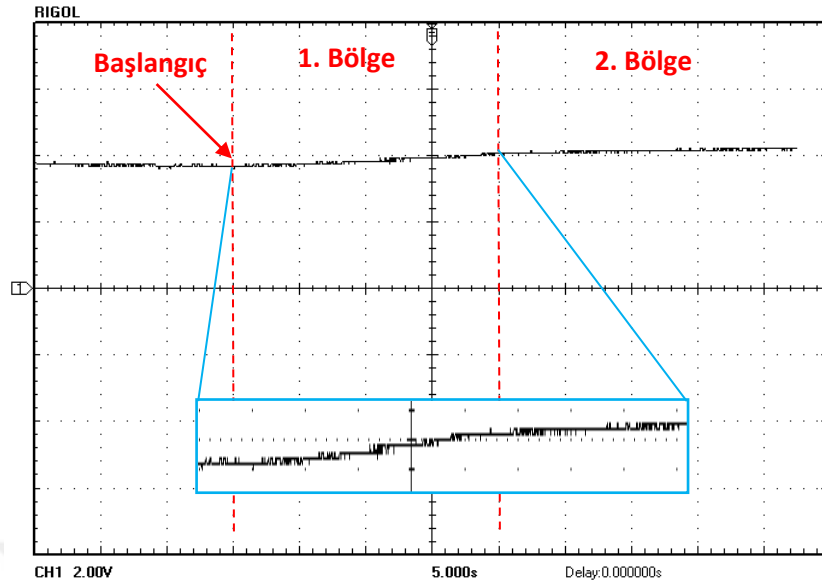
Daha ince taneli kumların neden olduğu yığılma etkisini incelemek için panel yüzeyi ince kum ile kirletilmiştir. İnce kumla kirletilen panel yüzeyi Şekil 4.13’de görülmektedir. Temizlik işlemi 6 V gerilim ile uyarılan 4 adet titreşim üreticinin 35 derece eğim açısına sahip kirli panelde çalıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. 2 dakika süresince uygulanan akustik yüzey titreşimleri sonucunda kısmi olarak temizlenen panel yüzeyinin resmi Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Titreşim üreteçlerine yakın bölgedeki ince kum, temizlik işlemi başlangıcında uygulanan akustik yüzey titreşimleri ile kaymaya başlamış ve üreteç dizisinden yaklaşık 6 cm aşağıda yığılarak panel temizliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Şekil 4.15’de bu etkiyi elektriksel olarak gözlemlemek için panel çıkış gerilinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Grafikte iki karakteristik bölge gözlenmiştir. Temizlik başladıktan sonra 1. Bölge etiketi ile gösterilen aralıkta kumlar akustik titreşim üretici dizisi yakınlarından aşağı kayarak uzaklaşması sonucunda panel geriliminin zamanla artması görülmektedir. Ancak bu artış, belli bir uzaklıkta kum tanelerinin yığılmaya başlaması ile yavaşlamış ve durmuştur. Bu etki 2. Bölge etiketi ile gerilim-zaman karakteristiğinde çıkış voltajının artış eğiliminin durması olarak görülmüştür. Yığılma probleminin çözümü için daha fazla titreşim üretici kullanılabilir veya panel açısı artırılabilir.



Şekil 4.13. Temizlik öncesi ince kum ile kirlenmiş panel



Şekil 4.14. Akustik temizlik sonrasında kısmi olarak temizlenmiş panel yüzeyi ve kum yığının oluşumu



Şekil 4.15. Akustik yüzey dalga uygulaması süresince panel gerilimin zamanla değişimi

Çizelge 1’de kum ile kirletilen bir PV panelin akustik yüzey dalgası uygulanması sonucu panel çıkış geriliminin değişimi dört karakteristik bölge için gösterilmiştir. Bunlar akustik temizlik uygulama öncesi, temizliğe bağlandığı ilk dakika ve temizliğin yavaşladığı süre ve temizliğin pratik olarak durduğu süreçler. Başlangıçta kirli durumda 2.2 V panel gerilimi ölçmüştür. Temizliğin başladığı ilk dakikada panel gerilimi %9 artmıştır. Bu zaman diliminde büyük oranda büyük kum parçalarının panel yüzeyinden tabanına göçü ve titreşim üreteçlerine yakınlarında küçük kum tanelerinin temizlenmesi gerçekleşmiştir. Temizlik işlemi 7. Dakikaya kadar gözle görülebilir düzeyde ilerlemiştir ve panel çıkış geriliminde başlangıç koşullarına göre %54 artış görülmüştür. Ancak, 7. dakikadan sonra temizlik işlemi pratik olarak durmuştur ve kısmi kirli bölgeleri oluşturan kum yığınlarında hareket gözlemlenemez duruma gelmiştir. Bu durum, panel voltajında bir artış olmaması ile sonuçlanmıştır.

Çizelge 5.1. Akustik temizliğin farklı aşamalarında panel çıkış gerilimi

<i>Uygulama Zamanı</i>	<i>Ortalama PV Panel Çıkış Gerilimi</i>	<i>Çıkış Geriliminde Değişim</i>	<i>Açıklama</i>
0	2.2 V	0	PV panelin kum ile ağır kirli durumu
1 dakika	2.4 V	9%	Büyük parçacıklar panel tabanına göçü ve küçük parçacıkların titreşim jeneratörleri yakınından uzaklaşması
6 dakika	3.7 V	54%	PV panel yüzeyinde temizliğin yavaşlaması
4 dakika	3.7 V	0%	PV panel yüzeyinde temizliğin pratik olarak durması

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Uygulanan akustik yüzey dalgaları ile taşınan enerji ile panel yüzeyinde duran kum parçalarının hareket ettirilebildiği gözlemlenmiştir. Bu durum yüzey dalgalarının taşıdığı enerjinin oluşturduğu yüzey normali yönünde ivmelenmenin, Van der Waals kuvvetine dayalı yüzeye yapışma kuvvetini yenebildiğini göstermektedir. Bu etkiyi deneysel olarak daha açık bir şekilde gözlemlemek için, panel eğim açısından bağımsız bir inceleme yapılmıştır. Bu amaçla panel yüzeye düz olarak (0 derece açı) ile yerleştirilmiş ve Şekil 5.1’de görüldüğü gibi titreşim üreticinin yakın civarına farklı büyüklükte kum taneleri bir hat boyunca dizilmiştir. 30 saniye süre ile titreşim üretici çalıştırılmış ve kum tanelerinin dağılımı incelenmiştir. Teorik analizlerde öngörüldüğü gibi büyük parçalar için Van der Waals kuvvetine dayalı yapışma kuvvetini yenmek için gereken normal yönde ivme değerleri daha düşük olduğu için büyük tanecikler daha fazla kinetik enerji kazanmış ve bunun sonucu olarak büyük parçaların daha hızlı ve daha uzak mesafelere göç edebildiği gözlemlenmiştir. Parça boyutu küçüldükçe daha yüksek koparma ivmesi gereksinimi nedeni ile göç hareketi daha yavaş gerçekleşmiştir. Bu etki sonucu ortaya çıkan kum tanecikleri dağılımı Şekil 5.2’de görülmektedir.

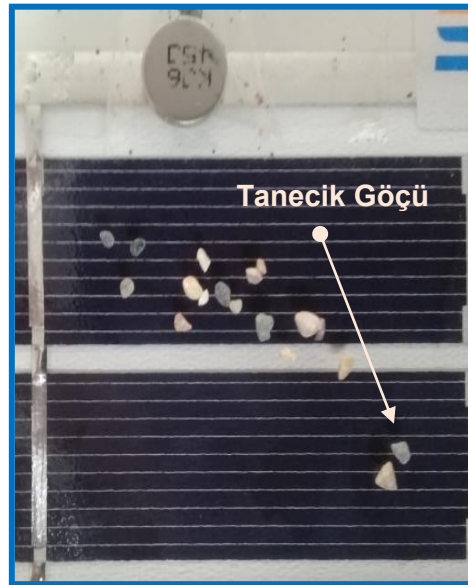
5.1. Sonuçlar ve Öneriler

Bu tez çalışmasında akustik yüzey dalgalarının PV panellerin akustik temizliğinde kullanım imkânları araştırılmıştır. Çalışmada eğimli yüzeylerde makro ölçekte parçacıkların yüzeyden koparılmasında rol oynayan fiziksel mekanizmaların analizleri yapılmıştır. Bu amaçla, Kolomenskii ve ekibinin mikron ve mikron-altı düzeyde küçük parçacıkların eğimsiz yüzeylerden koparılması için önerdikleri analizler, makroskopik kirletici parçacıkların eğimli yüzeyden koparılması durumu için genelleştirilmiştir. Böylece, makroskopik ölçeklerde olan toz parçacıkları için akustik yüzey dalgaları ile yüzeyden koparılması için gereken yüzey normali ivme koşulu elde edilmiştir. Denklem (4.4) ile ifade edilen bu genelleştirilmiş toz koparma koşulu ile analizler yapılmıştır. Bu genelleştirilmiş analizin mikron ve mikron-altı düzeyler için analizin Kolomenskii ve ekibinin analizine indirgenebildiği

görülmüştür [5] ve önerilen genelleştirilmiş analizlerin geçerliliği teyit edilebilmiştir. Bu teorik analizler sonucunda şu bulgulara ulaşılmıştır.



Şekil 5.1. Sıfır derece panel açısında farklı boyutlarda kum tanelerinin panel yüzeyine dizilimi. Soldan sağa doğru ortalama parçacık büyüklüğü artmaktadır.



Şekil 5.2. 30 saniye akustik yüzey dalgalarına maruz bırakılan kum tanelerinin hareketleri sonucu elde edilen dağılım.

(i) Denklem (4.4) ile ifade edilen parçacık koparma ivme koşulunun büyük parçacıklar için $\frac{A_{132}}{9\pi d^2 \rho z_o^2}$ ile ifade edilen Van der Waals kuvvetine dayalı bileşenin değerin çok küçülmesi sonucu yer çekimine dayalı ivme bileşenin $g \cos(\theta)$ önem kazandığı görülmüştür. Yapılan nümerik hesaplamalara göre 1-1.5 mm yarıçaplı toz partiküllerden itibaren ihtiyaç duyulan normal yönünde koparma ivmesi nerede ise parçacık boyutunda bağımsız (Şekil 4.3) hale gelmektedir. Bu bölgede koparma ivmesi panel açısına bağlı bileşen olan $g \cos(\theta)$ belirlenmektedir. Bu sonuç, büyük parçaların temizliğinde panel açısının büyük önem kazandığını ve Van der Waals kuvvetine dayalı etkileşimin önemini kaybettiğini göstermiştir. Bu etki deneysel çalışmalarda yüzey titreşimleri ile büyük kum parçalarının daha çabuk ve hızlı şekilde yüzeyden temizlenmesi ile doğrulanmıştır. Çok küçük parçalar daha yavaş temizlenmiş yada yığılmalara neden olarak akustik temizliği olumsuz etkilemiştir.

(ii) Denklem (4.4) ile ifade edilen parçacık koparma ivme koşulunun çok küçük parçacıklar (mikron ve altı boyutlar) için $\frac{A_{132}}{9\pi d^2 \rho z_o^2}$ ile ifade edilen Van der Waals kuvvetine dayalı bileşenin çok büyümesi sonucu yer çekimine dayalı ivme bileşenin $g \cos(\theta)$ önemini kaybettiği görülmüştür. Bu durum Şekil 4.4'de 0.5 mm ve altı için ihtiyaç duyulan ivmenin açıdan bağımsız olarak hızla artması sonucunu doğurmuştur. (Şekil 4.4'de I. Bölge) Bu durum, Kolomenskii ve ekibinin çok küçük parçalar için yerçekim ivmesinin ihmal edileceği varsayımının desteklemiştir [5]. Sonuçta, bu bölgede çok küçük kirlitici partiküllerin akustik yolla temizlenmesinde yüzey eğimi önemini yitirmektedir. Bu durum Van der Waals kuvvetine dayalı ivme bileşenin çok büyümesi sonucunda küçük parçaların akustik dalgalar ile temizlenmesinin çok daha zorlaşmasına yol açmaktadır. Bu etki, deneysel çalışmalarda küçük parçacıkların yavaş temizlenebilmesi veya yığınlar oluşturarak kirli bölgelere yol açması ile gözlemlenmiştir.

(iii) 80 m/s² düzeyinde bir normal ivme sağlayan akustik yüzey dalgaları 0.5 mm ve daha üstü etkin yarıçapa sahip toz partiküllerinin yüzeyden koparılması için yeterli olabileceği öngörülmüştür. 8 m/s² altında normal ivme değerlerinin yüzeyden

parçacık koparamayacağı ve akustik temizliğe hiçbir katkısının olamayacağı hesaplanmıştır.

(iv) Yapılan deneysel çalışmalar ve ölçümler yüzey dalgaları ile akustik PV panel temizliğinin uygun panel açısında ve makroskopik (büyük ölçekli) tanecikli kirlenmeler için mümkün olduğunu göstermiştir. Ancak, bu yöntemin PV panellerin kısmi temizliğinde etkin olabilmesine karşın, panelin tam ve kusursuz temizliği için sadece düşük güçlü akustik yüzey dalgaları uygulamasının yeterli olmayacağı görülmüştür. Akustik titreşimlerin deneysel çalışmalarda kum yığınları bırakabildiği gözlemlenmiştir. Ancak, periyodik olarak uygulanan titreşimlerin yapışma kuvvetini düşürmesi nedeni ile uzun vadede panel kirlenmesini geciktirme etkisinin olacağı öngörülebilir. Akustik temizlik yönteminin diğer kendiliğinden-temizleme (self-cleaning) yöntemlerle birlikte kullanılması durumunda PV panel temizliğinin daha etkin yapılabilmesi beklenebilir. Bir yöntemin yetersiz kaldığı noktada diğer yöntem etkin olarak temizlik performansı iyileştirilebilir. Örneğin, akustik yüzey dalgaları ve elektrostatik temizliğin birlikte kullanımı, büyük parçacıkların yüzey dalgaları ile temizlenmesini ve çok küçük parçacıkların ise elektrostatik yöntemler [15,14,27] ile temizlenmesini sağlayarak daha her ölçekte etkin PV panel temizliğine ulaşılabilir. Ayrıca, nano ölçekte yüzey iyileştirme teknikleri (Lotus etkisi, kelebek kanadı etkisi vs.[17,18,19,20] ile desteklenmesi durumunda PV panel temizliği çok daha başarılı ve etkin bir şekilde gerçekleşebilir. Nano ölçekte yüzey iyileştirme teknikleri su tutma ve yüzeye yapışmayı zorlaştırarak kirlenmeyi zorlaştırır [17,18,19,20]. Akustik yüzey dalgaları, damlalar içinde kavitasyon ve mikro akıntılara yol açarak sıvının temizleme gücünü artırabilir [28,29,30]. Bu tür hibrid uygulamaların, birbirlerinin zayıflıklarını gidererek kendiliğinden-temizleme teknolojilerinin etkinliğini artırabileceği öngörülmüştür.

KAYNAKÇA

- [1] B.K Schimmoller, *Tuning in to acoustic cleaning*, **Power Engineering**, 103:7 (1999) 18-24.
- [2] P. Vasiljev, S. Borodinas, R. Bareikis and A. Struckas, *Ultrasonic system for solar panel cleaning*, **Sensors and Actuators A: Physical**, 200 (2013) 74-78.
- [3] S. Cular, D.W. Branch, V. R. Bhethanabotla, G. D. Meyer and H.G. Craighead, *Removal of nonspecifically bound proteins on microarrays using surface acoustic waves*, **IEEE Sensors journal**, 8:3 (2008) 314-320.
- [4] P.F. Caton and R.M.White, *MEMS microfilter with acoustic cleaning*. In *Micro Electro Mechanical Systems*, The 14th IEEE International Conference, Interlaken, Switzerland, (2001), pp.479-482.
- [5] A.A. Kolomenskii, H.A. Schuessler, V.G. Mikhalevich and A.A. Maznev, *Interaction of laser-generated surface acoustic pulses with fine particles: Surface cleaning and adhesion studies*, **Journal of Applied Physics**, 84:5 (1998) 2404-2410.
- [6] R.M. Moroney, R.M. White and R.T. Howe, *Microtransport Induced by Ultrasonic Lamb Waves*, **Applied Physics Letters**, 59 (1991) 774-776.
- [7] D.S. Ballantine, *Acoustic Wave Sensors : Theory, Design and I'hysico-Chemical Applications*, Academic Press, San Diego, 1997.
- [8] B. Verhaagen, T. Zanderink, D.F. Rivas, *Ultrasonic cleaning of 3D printed objects and cleaning challenge devices*, **Applied Acoustics**, 103 (2016) 172-181.
- [9] H. Koruka, M. Serenli, K.Y. Sanliturk, *Application of ultrasonic vibrations for minimization of the accumulation of limescale in steam iron*, **Applied Acoustics**, 135 (2018) 22-28.
- [10] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli and L. L. Kazmerski, *A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches*, **Renewable Sustainable Energy Rev.**, 22 (2013) 689-744.
- [11] M. Gostein, B. Littmann, J. R. Caron and L. Dunn, *Comparing PV power plant soiling measurements extracted from PV module irradiance and power measurements*, Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf., Tampa, FL, June, (2013), pp. 3004–3009.
- [12] L. L. Kazmerski, A.S.A.C. Diniz, C.B. Maia, M.M. Viana, S.C. Costa, P.P. Brito, C.D. Campos, L.V. M. Neto, S. De Moraes Hanriot, and L.R.D.O. Cruz, *Fundamental studies of adhesion of dust to PV module surfaces: Chemical and physical relationships at the microscale*, **IEEE Journal of Photovoltaics**, 6 (2016) 719-729.
- [13] Q. Zhang, X.L. Lu and J. H. Hu, *A solar panel cleaning system based on a linear piezoelectric actuator*. In *Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA) 2013 Symposium*, Changsha, China, October, (2013), pp. 1-4.

- [14] G. He, C. Zhou, and Z. Li, *Review of self-cleaning method for solar cell array*, **Procedia Engineering**, 16 (2011) 640-645.
- [15] T.G. Stern, D. Krumweide, E. Gaddy and I. Katz, *Development of an electrostatically clean solar array panel*, In Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, AK, USA, Sept, (2000). pp.1348-1351.
- [16] S. Masuda and M. Aoyoma, *Characteristics of electric dust collector based on electric curtain*, **Proceedings of the General Conference of the Institute of Electronic Engineers**, 821, 1971.
- [17] R. Blossey, *Self-cleaning surfaces—virtual realities*, **Nat. Mater.**, 2 (2003) 301–306.
- [18] S. Nishimoto and B. Bhushan, *Bioinspired selfcleaning surfaces with superhydrophobicity, superoleophobicity, and superhydrophilicity*, **RSC Adv.** (2012) 671–690.
- [19] K. Koch, B. Bhushan, Y.C. Jung, and W. Barthlott, *Fabrication of artificial Lotus leaves and significance of hierarchical structure for superhydrophobicity and low adhesion*, **Soft Matter**, 5:7 (2009) 1386.
- [20] G.D. Bixler and B. Bhushan, *Rice and butterflywing effect inspired self-cleaning and low drag micro/nanopatterned surfaces in water, oil, and air flow*, **Nanoscale**, 6:1 (2014) 76-96.
- [21] Serkan Alagöz, *Farklı Kristal Geometrilere Sahip Sonik Kristallerin Odaklama Özelliklerinin Deneyisel Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2009.
- [22] M.Toyokatsu, *Sonic crystals and sonic wave-guides*, **Measurement Science and Technology** 16.5 (2005) R47.
- [23] A.D. Zimon, *Adhesion of Dust and Powder*, 2nd ed. Consultants Bureau, New York, 1982.
- [24] G. Ahmadi, *London-van der Waals Force, Particle Transport, Deposition and Removal I*, Lecture Note ME437/537, Clarkson University, https://webpace.clarkson.edu/projects/crcd/public_html/me437/downloads/5_vanderWaals.pdf (online-access on 20 July 2018).
- [25] R.A. Bowling, in K. L. Mittal (Ed.) *Particles on Surfaces*, Plenum, Vol. 1, New York, 1988, p.129.
- [26] I. Ivanov, *Thin Liquid Films: Fundamentals and Applications*, CRC Press, the first edition, New York, 1988, pp. 222.
- [27] R. Sharma, C. Wyatt, J. Zhang, M.K. Mazumder and N. Mardesich, *Performance Analysis of Electrodynamic Self- cleaning Transparent Films for its Applications to Mars and Lunar Missions*, **IEEE**, 1: 1263202 (2007) pp.434–437.

- [28] M. Keswani, S. Raghavan, P. Deymier and S. Verhaverbeke, *Megasonic cleaning of wafers in electrolyte solutions: Possible role of electro-acoustic and cavitation effect*, **Microelectronic Engineering**, 86:2 (2009) 132-139.
- [29] V.N. Khmelev, S.N. Tsyganok, S.S. Khmelev, A.V. Shalunov, A.N. Lebedev, A.N. Galahov, K.V. Shalunova, Multifrequency ultrasonic transducer with stepped plate disk, in: International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009, Novosibirsk, Russia, August, 2009, pp. 250–253.
- [30] P. Vasiljev, R. Bareikis, A. Struckas, S.J. Yoon, *Ultrasonic cavitations research in flowing liquids, with low depth of duct*, **Journal of Vibroengineering**, 14:1 (2012), 95-98.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER		
Adı	Yasin	
Soyadı	Apak	
E-mail	yasin_apak@hotmail.com	
EĞİTİM VE ÖĞRETİM		
ADI	İnönü Üniversitesi	DÖNEM
Yüksek Lisans	Genel Fizik Anabilim Dalı	2019
Lisans	İnönü Üniversitesi	2015
Hazırlık		
AKADEMİK ÇALIŞMALAR		
Yüksek Lisans Tezi		
<u>Akustik Dalgaların Fotovoltaik Güneş Panellerine Etkilerinin İncelenmesi</u> , Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü Anabilim Dalı, Malatya, 2019		