

TEKNOFEST

HAVACILIK, UZAY VE TEKNOLOJİ FESTİVALİ

ÇEVRE VE ENERJİ TEKNOLOJİLERİ YARIŞMASI PROJE DETAY RAPORU

TAKIM ADI: KTUN Octopus Team

PROJE ADI: Araçlarda Klima Kullanımını Minimize Ederek Yakıt Tüketimi ve Karbon Emisyonunun Azaltılması: Güneşin İnfrared Işımlarını Yansıtan Cam Yüzey Kaplamaları

BAŞVURU ID: 434541

DANIŞMAN ADI: Prof. Dr. Mustafa KARAMAN

İçindekiler

1. Proje Özeti (Proje Tanımı)

Günümüz dünyasının en önemli problemleri arasında enerji arzı yer almaktadır. Enerjiye olan talep artan insan nüfusu ile hızla artmaktadır. Dünyanın enerji arzının büyük bir bölümü fosil kaynaklı yakıtlarla sağlanmaktadır. Fosil yakıtlar, birincil enerji talebinin %81'ini karşılayarak küresel enerji sistemine hâkim olmuştur. Onlarca yıllık hakimiyetin sonunda, uluslararası kabul görmüş iklim hedeflerine ulaşmak için üretim ve kullanım oranlarının hızla düşmesi gerekmektedir (Welsby D. Ve ark., 2021). Fosil yakıtlar günlük yaşantımızda sıklıkla kullandığımız ulaşım araçlarında yoğun olarak tüketilmektedir. Bu ulaşım araçlarının yakıt tüketimi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Aktif olarak karşımıza çıkan faktörlerden bir tanesi de klima kullanımınıdır. Klima kullanımı konforlu bir yolculuk sunmasının aksine motor yükünü ve yakıt tüketimini artırmaktadır. Bu problemi aşmaya yönelik çözümler sınırlı sayıdadır.

Ortama alınan ısı sadece kondüksiyon ya da konveksiyon tarafından değil aynı zamanda radyasyon(ışınım) yolu ile de transfer edilir. Proje, ortam sıcaklığına göre güneşin ısıtıcı etkisi olan infrared ışınlarını yansıtan işlevselliği artırılmış ve yüksek katma değer sağlayacak yüzeyler elde etmeyi hedeflemektedir. Güneşten yayılan ışınların %47'si kızılötesi (infrared) ışınlardan oluşmaktadır (Rubincam D.P., 1987). Radyasyon yolu ile ısı iletimini engellemek ya da yavaşlatmak için ise reflektif yüzeyler kullanılmaktadır. Ortamlardaki ısı kayıplarının ya da kazançlarının önemli bir bölümü camlarda gerçekleşmektedir. İnfrared ışınlarını belirli miktarda azaltan ama görünür ışığı da belirli oranda geçiren transparan malzemeler kullanılarak, cam yüzeyler için çok katmanlı film teknolojileri uygulanmaktadır. Bu malzemelerin eldesinde kullanılacak Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD) yöntemi çok katmanlı film teknolojileri uygulamalarında gelişime açık yöntemlerden bir tanesidir. PECVD yöntemi tek adımda ve yüksek hızlarla, yüzey sınırlaması olmadan nano ölçekli kaplamaların eldesinde kullanılan kuru bir yöntemdir. Yöntem çözelti kullanımı barındırmaması ile çevre dostu, yüksek hızlarda ve homojen kaplamaların üretimi ile uygulama kolaylığı, uygulamada yüzey sınırlamasının olmaması ile yüzey çeşitliliği gibi avantajlar sunmaktadır. Yöntemin avantajlarının yanı sıra elde edilen fonksiyonel yüzeyler ile özellikle araçlarda yazın güneş ışınlarından faydalanırken aynı zamanda klima yükünü azaltarak kullanılan yakıttan tasarruf edilebilmektedir.

2. Problem/Sorun:

Günlük yaşantımızda sıklıkla kullandığımız ulaşım araçlarının iç ortamındaki ısı konfor oldukça önem arz etmektedir. Bu ısı konforu sağlamak için en çok tercih edilen yöntem klima kullanımınıdır. Her ne kadar ısı konforumuzu stabil tutuyor olsalar da klimalar araç motorundan güç alırlar ve buda standart kullanım koşullarında araç üreticileri tarafından bildirilen yakıt tüketiminden %60'a kadar daha yüksek yakıt tüketimine neden olmaktadır (Mogro A.E. ve Huertas J.I., 2021). Yakıt kullanımını azaltma amacı ile klima kullanımına alternatif olarak araç camlarının açık kullanılması da çözüm olarak görülmüş fakat 70 km hızın üzerinde klima kullanmak cam açmaya oranla daha az yakıt tüketimi sağlamıştır. Klima, yakıt tüketimini %10

civarında yükseltirken cam açmak aracın aerodinamiğini bozduğu için yaklaşık yine bu hızda %20 oranında yükseltmektedir (Mogro A.E. ve Huertas J.I., 2021).

Çözüm olarak infrared ışınlarını belirli miktarda azaltan ama görünür ışığı da belirli oranda geçiren film uygulaması olan atermik camlar sunulmuştur. Ancak atermik camlar düşük verim, uygulamadaki yüzey kısıtlılığı, ışık geçirgenliğinin düşük olması, maliyetin yüksek olması, uzun ömürlü olamaması ve RFID etiketlerini devre dışı bırakması gibi dezavantajlara sahiptir. Bu sorunlar da enerji geri dönüştürme maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca araçlar ve cihazların parçaları da ortam ısısından etkilenirler ve hararet gibi aksaklıklar yaratabilir.

Bu sorunların önüne geçebilmek için camlardan içeriye alınan infrared ışınlarını dış ortama yansıtan, yüksek katma değere sahip transparan ve uygulanabilirliği artırılmış fonksiyonel kaplamalar yapılması gerekmektedir.

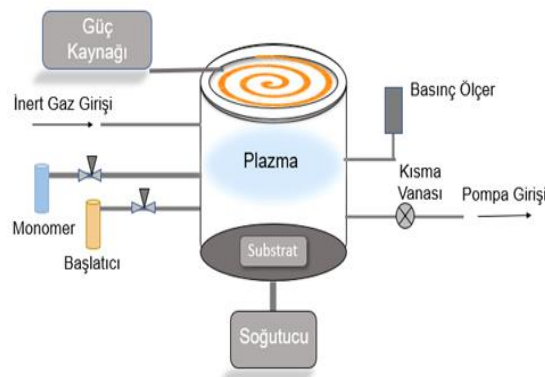
3. Çözüm

Proje, güneşin yaydığı infrared ışınlarını araç içine girmeden camlardan çevreye yansıtacak çok katmanlı kaplamalar sahip reflektif camların üretilmesini amaçlamaktadır.

Camların üretiminde Bragg Reflektörü prensibi kullanılmıştır. Bu prensip doğrultusunda düz cam substratı üzerine farklı kırılma indislerine sahip kimyasallar Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD) reaktörü ile farklı kalınlıklar da çok katmanlı yapılar halinde kaplanacaktır. Elde edilen katmanlar ortam ısısını artıran 750 nm- 1µm aralığındaki infrared ışınlarını yansıtırken diğer dalga boylarındaki ışınları geçirerek klima kullanımını azaltacaktır.

Özellikle Avrupa'da son yıllarda artan karbon emisyon değerlerini azaltmaya yönelik hedefler belirlenmiştir. Bu doğrultuda binek bir aracın fosil yakıt kullanımını sonucunda 2130 kg olan CO₂ emisyonunun ısıtma/soğutma ihtiyacını karşılayan kısmını üstün nitelikli araç camı kaplamaları ile klima kullanımını minimuma indirgeyerek yakıt tüketiminin azaltılması ve dolaylı olarak karbon emisyon değerinin düşürülmesi öngörülmektedir (Yu A. ve ark., 2018). Proje sonunda daha çevreci, işlevselliği artırılmış ve yüksek katma değer sağlayacak yüzeyler elde edilecektir.

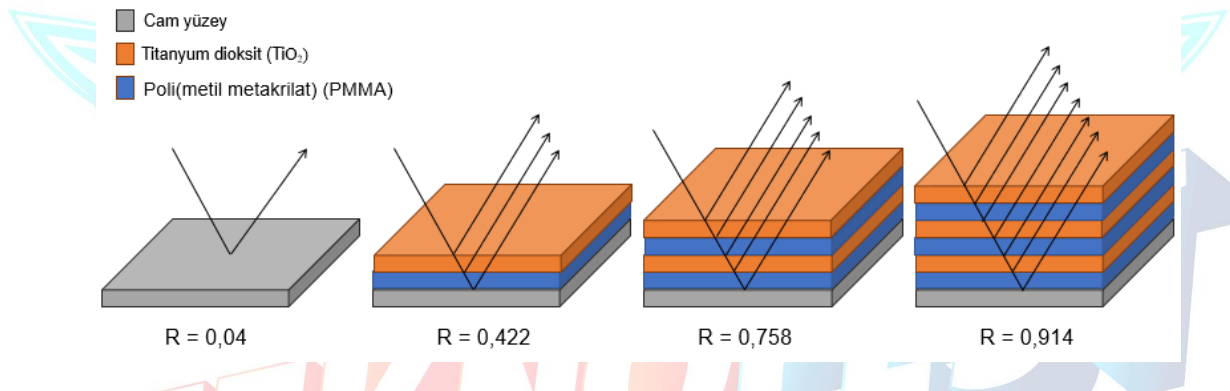
Prensip çeşitli yüzeyler üzerine uygulanabilmektedir fakat bu proje cam substratı üzerinden yürütülmüştür. Prototip için cam, çeşitli kimyasallar ve PECVD reaktörü kullanılmıştır. PECVD reaktörünün şematik gösterimi Şekil 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.1. PECVD reaktörünün şematik gösterimi

4. Yöntem

Cam yüzeyine nano boyutta kimyasal kaplamalar PECVD reaktörü ile gerçekleştirilecektir. Konya Teknik Üniversitesi İnce Film Kaplama Laboratuvarında bulunan CVD sistemi genel hatları ile kapalı bir vakum reaktörü, vakum pompası, substrat soğutucu, DC güç kaynağı, plazma kaynağı ve eşleştirici ile kontrol ekipmanlarından oluşmaktadır. Deney sürecince substrat sıcaklığı, reaktör basıncı ve gaz akış hızları kontrol edilecektir. Ayrıca deney esnasında gerçek zamanlı film kalınlıkları, dolayısı ile biriktirme hızları interferometre sistemi ile optik olarak ölçülecektir. Reaktör basıncını istenilen değerde tutmak için ise PID kontrollü bir basınç kontrol sistemi kullanılacaktır. 13,56 MHz radyo frekanslı (RF) plazma jeneratörü kuvars cam üzerine yerleştirilmiş bobinli anten bağlanmıştır (Gürsoy M. ve ark., 2016). Nano boyutta kaplamalar Bragg Reflektörü prensibine dayandırılarak gerçekleştirilecektir. Prensip yüksek ve düşük kırılma indisine sahip farklı kalınlıklarda belirli sayıda malzeme katmanının yığındaki her arayüzde gelen ışının bir kısmını yansıtması ilkesine dayanır. Cam yüzey üzerine Bragg Reflektörü prensibi temelinde uygulanacak çok katmanlı kaplamaların tasarımı Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Cam yüzey üzerine Bragg Reflektörü prensibi temelinde uygulanacak çok katmanlı kaplamaların tasarımı

Plazma polimerizasyonu için tipik mekanizma hem gaz hem de substrat yüzeyinde meydana gelen çok aşamalı reaksiyonlar içerir. Projede PECVD reaktörü ile nano boyutlu yüzey kaplamalarının sentezinde Metil Metakrilat (99% saflık) (MMA) ve Titanyum (IV) izopropoksit (97% saflık) (TTIP) kimyasalları ve substrat olarak cam kullanılacaktır. Kimyasallar sıcaklık kontrollü bir bubbler aracılığı ile vakumlu reaktör haznesine buhar fazında beslenecektir. Buhar fazındaki kimyasallara (monomerlere) plazma gücü uygulanacak ve elektriksel deşarj oluşturularak reaktif türler tarafından cam yüzeyinde polimerizasyon gerçekleştirilecektir. Polimerizasyon süresi Bragg Reflektörü prensibi temelinde belirlenmiş kalınlıkların interferometre ile tayinine bağlı olarak değiştirilecektir. Kaplama sonunda yığın yapıda keskin arayüz ve yüksek oranda yeniden üretilebilir katmanlılığına sahip yüksek performanslı optik dielektrik özelliklere sahip Polimetil metakrilat (PMMA) ve Titanyum dioksit (TiO₂) polimer kaplamalarının elde edilmesi öngörülmektedir. Daha önceki analizlerde Polimetil metakrilat (PMMA) ve Titanyum dioksit (TiO₂) polimerlerinin kırılma indislerinin sırasıyla $n = 1,49, 2,614$ olduğu belirlenmiştir.

İncelenecek bağımlı parametreler kaplama hızları ve kaplanan filmlerin kimyasal ve morfolojik yapılarıdır. Bağımsız (deneysel) parametreler reaktöre beslenen gazların çeşitleri ve derişimleri, reaktör basıncı, kimyasalların ve substrat sıcaklığıdır. Kaplanan filmlerin kimyasal yapıları, FTIR analizi ile açığa çıkarılacak ve yüzey morfolojileri optik mikroskop ile analiz edilecektir. Deney çalışması gerçekleştirilirken kullanılan parametre değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

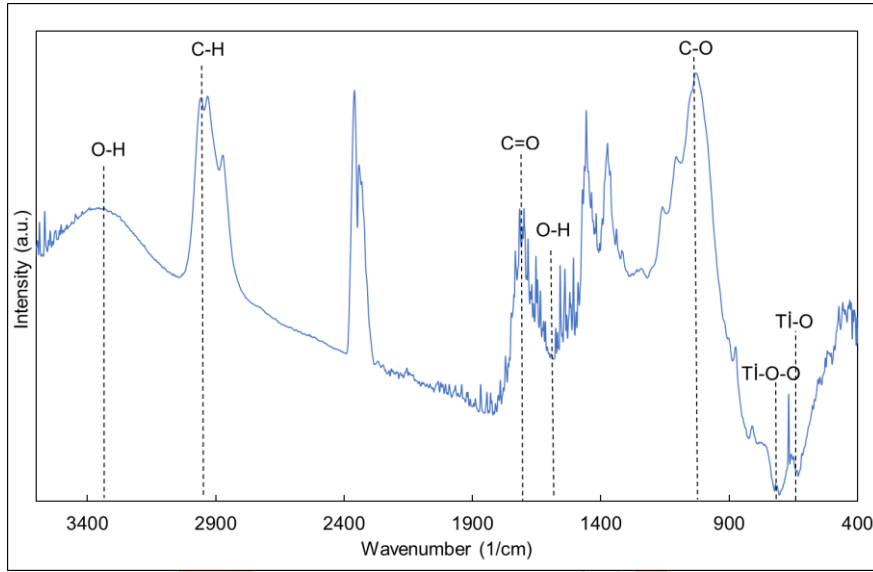
Tablo 4.1. Deneysel çalışma verileri

	TiO ₂	PMMA
Reaktör Basıncı (mtorr)	110	100
Monomer Akış Hızı (sccm)	0,5	0,95
Substrat Sıcaklığı (°C)	20	20
Monomer Sıcaklığı (°C)	60	-
Reaktör Sıcaklığı (°C)	70	30
Plazma Gücü (watt)	50	30
Reaksiyon Süresi (dk)	15	5

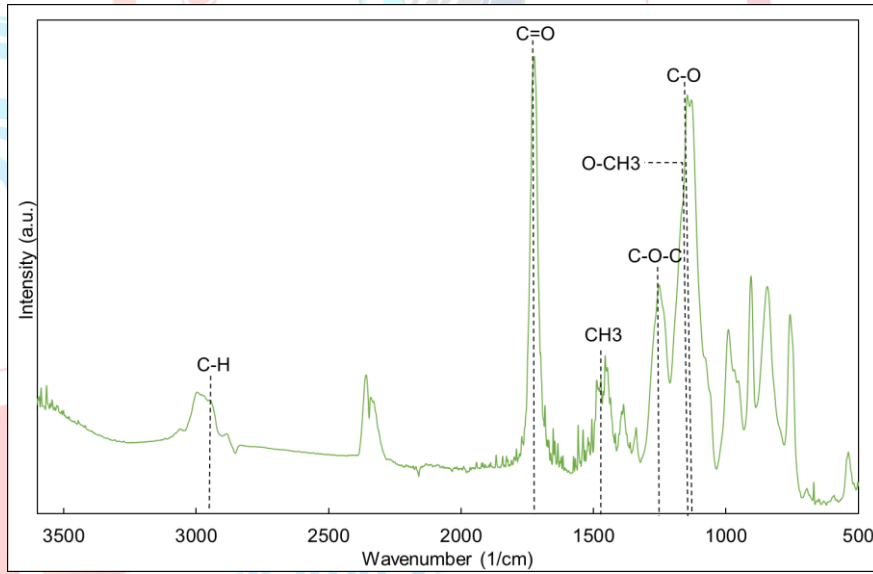


Şekil 4.1. Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme işlemi sonrası a) polimetil metakrilat (PMMA) kaplı silikon wafer ve cam yüzeyi b) titanyum dioksit kaplı silikon wafer ve cam yüzeyi

PECVD tekniği kullanılarak elde edilen PMMA ve TiO₂ kaplamalarının silikon wafer üzerindeki görüntüsü Şekil 4.1’de verilmiştir. Kaplamaların cam yüzeyler üzerinden alınan numuneleri ile FTIR analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 4.2 e Şekil 4.3’de sunulmuştur.



Şekil 4.2. PECVD ile kaplama sonrası cam yüzeyinden alınmış TiO_2 FTIR spekturumu



Şekil 4.3. PECVD ile kaplama sonrası cam yüzeyinden alınmış PMMA FTIR spekturumu

Şekil 4.2’de 50 W plazma gücünde biriktirilen TiO_2 ’in FTIR spekturumu görülmektedir. 600 cm^{-1} de gözlemlenen tepe noktası Ti-O-O bağının titreşiminden kaynaklanmaktadır. $1720,35 \text{ cm}^{-1}$ ’deki absorpsiyon zirvesi anhidrit grubunun C=O bağlı titreşiminin özelliğinden doğmuştur. Şekil 4.3’de ise PMMA spekturumu, ester grubunun C=O gerilmesinden dolayı $1723,52 \text{ cm}^{-1}$, C-O-C gerilmesinden dolayı ise $1252,57 \text{ cm}^{-1}$ de absorpsiyon tepe noktası gözlenmiştir (Koysuren O. ve ark., 2014; Casserly T. B. ve Gleason K.K., 2006). FTIR sonuçları yüzeylerdeki PMMA ve TiO_2 varlığını kesin olarak kanıtlamıştır.

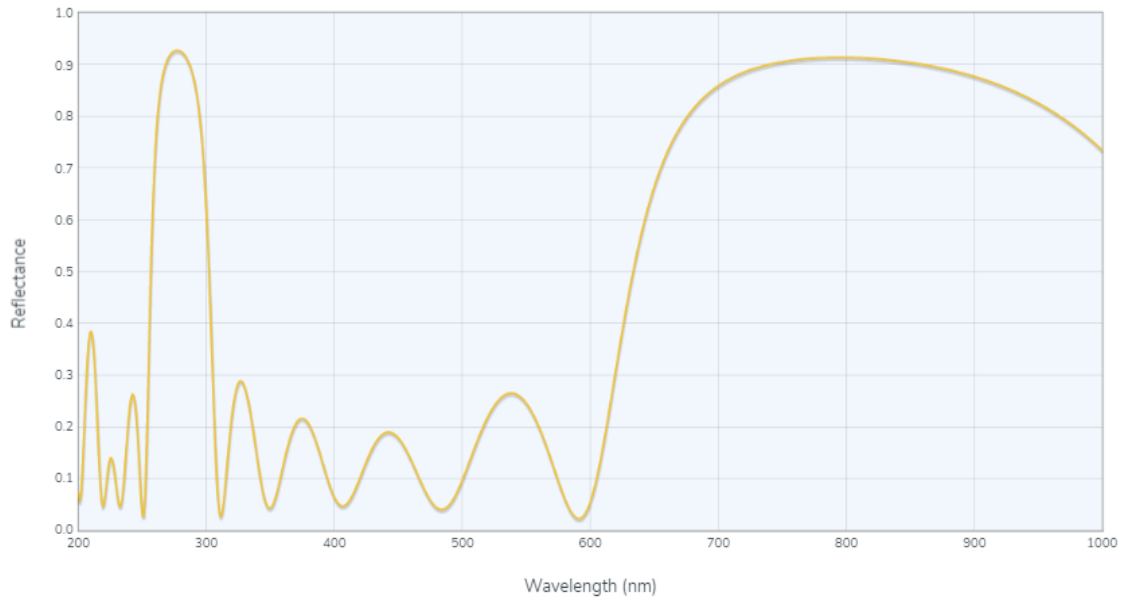
Projenin son aşamasında polimerler Bragg Reflektörü temelinde belirlenen kaplama kalınlıklarında üst üste katmanlı olarak kaplanarak reflektif yüzeyler üretilecektir.

5. Yenilikçi (İnovatif) Yönü

Güncel olarak araçlardaki ısı konforu sağlamak için infrared ışınlarını belirli miktarda azaltan ama görünür ışığı da belirli oranda geçiren film uygulaması olan atermik camlar kullanılmaktadır. Atermik camlar iki cam arasına Polivinil Butiral (PVB) filmlerinin yerleştirilmesi ile elde edilmektedir. Bu camlar arayüzey de kullanılan filme göre farklı renklerde üretilmektedir. Bazı üretici firmalar cam yüzeyine üçlü gümüş metal oksit katmanları uygulayarak yalıtım özelliklerini güçlendirmeyi hedeflemiştir. Yüksek performans sağlamak amacıyla gümüş benzeri kimyasalların kullanımı atermik camların maliyetini artırmaktadır. Aynı zamanda atermik camların metalik yüzeyleri sebebiyle RFID etiketlerini devre dışı bırakıyor olması problem teşkil etmektedir.

Geliştirmiş olduğumuz çok katmanlı nano boyutlu kaplamalar atermik camlardan çok daha üstün özellikler sergileyecektir. PECVD yönteminin kuru bir yöntem, kaplamaların nano boyutta transparan ve doğrudan istenilen yüzeye uygulanabiliyor olması da elde ettiğimiz polimer katmanlarının atermik camlara kıyasla birçok farklı yüzeye uygulanabileceğini göstermektedir. Atermik camlar infrared ışınları %40-80 aralığında yansıtılabiliyorken geliştirdiğimiz kaplama %92 oranında yansıma sağlayabilecektir (Anonim1., 2022; Anonim2., 2022; Anonim3., 2022). Sentezlenen yüzeyin çok düşük miktarlardaki kimyasallar ile elde edilmesi maliyeti düşürürken kaplamanın transparan olması renkli atermik camlara göre kullanım alanlarındaki sınırlamaları ortadan kaldıracaktır. Sentez sürelerinin oldukça kısa olması seri üretimde kâr oranını olumlu yönde etkileyecektir.

Geliştirilen kaplamanın cam yüzey üzerine 6 katmanlı olarak sentezlenmesi ile Şekil 5.1’de verilen 750 nm- 1µm aralığındaki infrared ışınlarının yansıma değeri 0,914 olarak elde edilecektir. Bu değer Filmetrics Reflectance Calculator ölçüm robotu ile öngörülen tahmini değer olarak hesaplanmıştır (Anonim1.,2022).



Şekil 5.1. TiO₂/PMMA ile kaplanmış cam yüzeyinin infrared ışınlarını yansıtma oranlar (Anonim1., 2022)

6. Uygulanabilirlik

Nanoteknolojik kaplamaların PEVCD yöntemiyle yapılması, işletme giderleri oldukça düşürmüş, kısa sürede transparan ve homojen kaplamalar elde etme imkânı sunmuştur. Söz konusu kaplamanın uygulanmasında yüzey seçme sorunu olmadığından infrared ışınlarına maruz kalınan birçok alanda kullanımı mümkündür.

Elektrik, petrol gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarının kullanımının yoğun olduğu araçlar, binalar, alışveriş merkezleri ve dış cephesi çoğunlukla cam olan plazalar gibi ortamlarda yaz aylarında klima kullanımını azaltarak elektrik ve yakıttan hem tasarruf edilebilir hem de kullanılan kaynakların çevreye olan zararı minimuma indirilebilir. Yer yüzünden daha fazla infrared ışınlarına maruz kalan uzay araçlarının ve uçakların parçalarında kullanılarak ortam ısı miktarı ayarlanabilir ve canlı ortamının sıcaklığı azaltılabilir.

Projenin ilk aşamasında infrared ışınlarının doğrudan nüfuz ettiği camlar temel alınmış olsa da kaplama yüzeyinin seçiminde sınırlamanın olmaması kullanım alanını genişletebilecektir. Elektronik sistemlere sahip olan birçok araç ve cihaz ortam ısısından etkilenerek çeşitli aksaklıklara yol açabilir. Bu sorunun önüne geçmek için binek araçlar, uzay araçları ve uçakların cam yüzeyleri dışında gövde ve kaput kısımları da kaplanarak devrelerde ısıdan kaynaklı hararet ve arızaların önüne geçilebileceği tahmin edilmektedir.

7. Tahmini Maliyet ve Proje Zaman Planlaması

Projede kullanılan kimyasalların bulunabilirliği yüksek ve oldukça ekonomiktir. Ayrıca seri üretime geçilmesi durumunda toptan şekilde yapılacak satın alımların ve işletme giderlerinin en aza indirilmesiyle daha da ekonomik bir şekilde ürüne dönüştürülmesi öngörülmektedir. Üretimi yapılmış bir adet prototipin (test aşamasındaki analiz maliyetleri de dahil) değeri yaklaşık 463,64 TL/adet'tir. Gerçek boyutlu bir araç camı için bu miktar (araç camı fiyatı dahil) 1013,64 TL/adet olacağı öngörülmüştür.

Projemiz yüksek işçilik ve yüksek kalite ile en az 1000-1500 TL bandında uygulanabilir olacaktır.

Tablo 7.1. Projenin zaman planlaması

İş Paketleri	1.ay	2.ay	3.ay	4.ay	5.ay	6.ay	7.ay
Hazırlık aşaması (Literatür Taraması, Malzeme Seçimi ve Temini)							
PECVD yöntemi ile farklı iki yüzeyde TiO ₂ ve PMMA kaplamalarının sentezi ve yüzey kimyalarının kapsamlı analizi							

TiO ₂ ve PMMA kaplamalarının PECVD yöntemi ile aynı substrat üzerine çok katmanlı olarak sentezlenmesi						
Çok katmanlı yüzeyin kapsamlı yüzey analizi (FTIR, AFM, Refraktometre, Temas Açısı)						
Prototip birimlerinin montajı ve test edilmesi						

Tablo 7.2. Malzeme Listesi ve harcamalar

	Malzeme Adı	Tanımı/ Harcamanın Gerçekleştiği Dönem	Ortalama Fiyat (TL)
1	Titanyum (IV) izopropoksit (97% saflık)	Düşük kırılma indisli yüzey kaplamasında kullanılacaktır. 1.ay	1 mL-7,5
2	Metil Metakrilat (99% saflık)	Yüksek kırılma indisli yüzey kaplamasında kullanılacaktır. 1.ay	1 mL- 1,34
3	Düz Cam (12 adet)	Kaplamanın gerçekleştirileceği alttaş olarak kullanılacaktır. 1.ay	4,8
4	Diğer	Prototipin montajında ve test aşamasında kullanılacak malzemeler (termometre, ısı kaynağı, maket kartonu, şeffaf mika, plastik parçalar) 5.ay	450
	TOPLAM		463,64

8. Proje Fikrinin Hedef Kitle (Kullanıcılar):

Ülkemizde katma değeri yüksek nanoteknoloji üretimlerinin yaygınlaştırılması 2023 vizyon hedeflerine ulaşmamız için oldukça önemlidir. İlk adımda geliştirdiğimiz kaplama, camların sıklıkla kullanıldığı otomotiv, havacılık, uzay sanayisi gibi sektörlerde kullanılabilir. Projenin bir sonraki adımında ise fonksiyonelleştirilen kaplamalar, cam dışındaki yüzeylere de uygulanarak kullanım alanları ve işlevselliği artırılacaktır. Elde edilecek prototip ulusal/uluslararası yarışmalar, fuarlar, kongreler ve benzeri platformlarda sunulacaktır.

Proje, elde edilecek yüzeyler sayesinde enerji tüketiminin azaltılması ve bu sorunu amaç edinen birçok işletmeye, projeye yol göstermeyi hedeflemektedir.

9. Riskler

Tablo 9.1. Projenin risk planlaması ve yönetimi

	Riskler	Risk Yönetimi (B planı)
1	PECVD sisteminde kaplama kalınlığının hassasiyetinin interferometre ile ölçülememesi	Kaplama kalınlığı profilometre ile ölçülecektir.
2	TiO ₂ kaplamalarının yüksek plazma güçlerinde elde edilmesi ile doğabilecek alt yüzeydeki çoklu katman tabakalarının aşındırılması sorunu	Kaplama PECVD sisteminde atımlı(on/off) plazma yöntemi ile gerçekleştirilecektir.
3	Kaplama hızlarının yavaş olması	Sisteme kaplama hızını artıracak başlatıcı kimyasallar eklenecektir.
4	Kaplanmış yüzeylerin yansıma oranının düşük olması	Kaplama kalınlığı Bragg Reflektörü prensibine göre değiştirilecektir.



Şekil 9.1. Olasılık ve etki matrisi

10. Kaynakça ve Rapor Düzeni

- .Anonim1., 2022. "<https://filmetrics.com/reflectance-calculator>", [Erişim Tarihi: 5 Mayıs 2022]
- Anonim2., 2022. "<https://eclat-digital.com/visualization-of-car-windshields/>", [Erişim Tarihi: 29 Nisan 2022]
- Anonim3., 2022. "<https://duzcam.sisecam.com/tr/mimari-camlar/profesyoneller-icin-urun-katalogu/sisecam-iscam-sistemleri>", [Erişim Tarihi: 29 Nisan 2022]
- Casserly T. B. and Gleason K.K., 2006. "Effect of Substrate Temperature on the Plasma Polymerization of Poly(methyl methacrylate)". Chem. Vap. Deposition 2006, 12, 59–66
- Gürsoy M., Uçar T., Tosun Z., Karaman M., 2016. "Initiation of 2-Hydroxyethyl Methacrylate Polymerization by Tert-Butyl Peroxide in a Planar PECVD System". Plasma Processes and Polymers, 13, 438–446.
- Karaman M., Kooi S.E. ve Gleason K.K., 2008. "Vapor Deposition of Hybrid Organic–Inorganic Dielectric Bragg Mirrors having Rapid and Reversibly Tunable Optical Reflectance". American Chemical Society, 20, 2262–2267.
- Koysuren O., Karaman M., Yıldız H. B., Koysuren H. N. and Dınc H., 2014 "Electrospun Polyvinyl Borate/Poly(Methyl Methacrylate) (PVB/PMMA) Blend Nanofibers". Taylor & Francis.
- Mogro A.E., Huertas J.I., 2021. "Assessment of the effect of using air conditioning on the vehicle's real fuel consumption". International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 15:271–285.
- Rubincam D.P., 1987. "LAGEOS Orbit Decay Due to Infrared Radiation From Earth". Journal of Geophysical Research, 1287-129.
- Welsby D., Price J., Pye S. & Ekins P., 2021. "Unextractable fossil fuels in a 1,5 °C World", Nature, Volume 597, Pages 230–234
- Yu A., Wei Y., Chen W., Penga N., Penga L., 2018. "Life cycle environmental impacts and carbon emissions: A case study of electric and gasoline vehicles in China". Transportation Research Part D, 409-420.