

## YÖNLENDİRİLMİŞ ENERJİ TABANLI İLERİ ALGILAMA TEKNOLOJİLERİ: AKUSTİK, ELEKTROMANYETİK, LAZER, PLAZMA, ÇEKİRDEK VE PARÇACIK ALGILAMA

Bünyamin BAYRAK<sup>1</sup> Taylan SİPAHİ<sup>2,3</sup>  
TUSAŞ - Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara TUSAŞ - Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.,  
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara

### ÖZET

*Havacılık ve uzay uygulamalarında kritik önem taşıyan; akustik algılama, plazma karakterizasyonu, elektrostatik parçacıkların tespiti, çekirdek ve parçacık algılama, mesafe ölçümü, tarama ve 3B görüntüleme çözümleri için TUSAŞ kavramsal çalışmalarının odak noktası bazı teknolojilere ilişkin teknik ve teorik bilgilerin aktarımının sağlanması planlanmıştır. TUSAŞ Teknoloji Yol Haritası (TYH) nezdinde takibi sağlanan bu teknolojilerin, havacılık ve uzay uygulamalarında sürdürülebilir rekabet gücü ve inovasyonu sağlayabilmek için teknolojik kabiliyetlerin stratejik hedeflerle uyumlu hale getirilmesinin önemini vurgulayarak, ileri algılama teknolojilerine ilişkin kapsamlı bir anlayışın aktarılması amaçlanmıştır. Bu teknolojilerin önemini altının çizilmesi, havacılık ve uzay uygulamalarındaki güncel zorlukları ele almadaki önemlerini aydınlatmak ve gelecekteki gelişmeleri yönlendirme potansiyellerini vurgulamaktadır. TUSAŞ bünyesindeki mevcut eğilimler hakkında içgörüler sağlayarak, ileri algılama teknolojilerinin havacılık ve uzay uygulamalarındaki mevcut trendin aktarımının sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca, bu teknolojilerin etkinliğini ve etkisini ortaya koyan teknolojik ilerlemelerin belirli kapsamda aktarımının sağlanması ve somut faydalarının altının çizilmesi amaçlanmıştır.*

### GİRİŞ

Havacılık ve uzay platformlarında algılama teknolojilerinin büyük bir önemi vardır. Yapısal sağlık izleme sistemlerinden, uçuş test enstrümantasyonlarına ve ürün tasarımından, kalifikasyonuna kadar dayanan kapsamlı bir kullanım yelpazesi olan teknolojilerdir. Bu çalışmada, TUSAŞ TYH çerçevesinde takibi sağlanan ve TUSAŞ odak noktası olan bazı ileri algılama teknolojileri irdelenmiştir. Bu teknolojilerden kritik önem taşıyan; akustik algılama için (1) Bragg ızgaralı fiber optik algılayıcılar (Fiber Bragg Grating – FBG) ve (2) piezoelektrik algılayıcılar; plazma karakterizasyonu için (3) Langmuir problemleri; elektrostatik gaz parçacıklarının tespiti için (4) elektrostatik algılayıcılar; çekirdek ve/veya parçacık algılama için (5) Cherenkov, (6) sintilasyon ve (7) yarı iletken dedektörler; mesafe ölçümü, tarama ve 3B görüntüleme için (8) RADAR (Radio Detection and Ranging) ve (9) LIDAR (Light Detection and Ranging) sistemlerinin kullanımı öne çıkmaktadır. Çalışma odaklarına ilişkin teknik ve teorik bilgilerin aktarımının sağlanması planlanmış ve TUSAŞ bünyesindeki mevcut eğilimler ile havacılık ve uzay uygulamalarına yönelik ileri algılama teknolojileri alanında mevcut trendin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ek olarak, teknik ve teorik arka plan belirtmek adına literatür taraması yapılmış ve mevcut durum kaynaklar ile ortaya koyulmuştur.

<sup>1</sup> Teknoloji Yönetimi Mühendisi, E-posta: bunyamin.bayrak@tai.com.tr

<sup>2</sup> Teknoloji Geliştirme Kıdemli Lider Mühendisi, E-posta: taylan.sipahi@tai.com.tr

<sup>3</sup> Misafir Dr. Öğr. Üyesi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: taylan.sipahi@aybu.edu.tr

## YÖNTEMLER

### Teknoloji Yönetimi ve TUSAŞ Teknoloji Yol Haritası

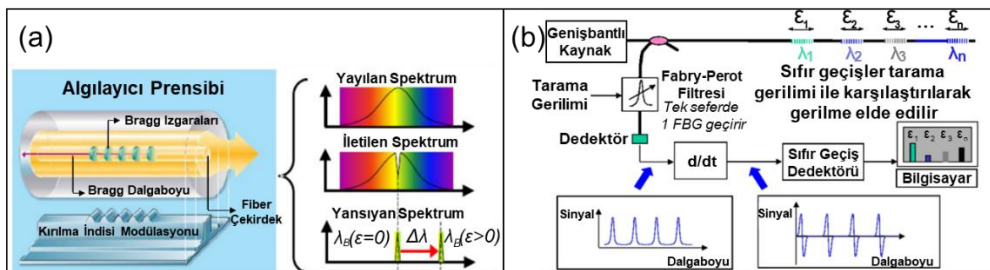
Teknoloji Yönetimi, kurumsal hedeflere ulaşmak için teknolojik kaynakların kullanımını optimize etmeyi amaçlayan, bir şirket içindeki teknolojik kaynakların stratejik planlamasını, uygulanmasını ve izlenmesini kapsar. Rekabet avantajı için teknolojik başlıklardan etkin bir şekilde yararlanmak amacıyla teknoloji, iş ve inovasyon yönlerini bütünleştiren çok disiplinli bir yaklaşımı içerir. Teknoloji Yönetimi, kuruluşların teknolojik kabiliyetlerini genel stratejik hedefleriyle uyumlu hale getirmelerini, inovasyonu teşvik etmelerini, operasyonel verimliliği artırmalarını ve dinamik pazarlarda rekabet edebilirliğini sağladığı için büyük öneme sahiptir. Ayrıca, gelişmekte olan teknolojilerin tanımlanmasını ve benimsenmesini kolaylaştırarak, teknolojiye ilişkin riskleri öne çıkarır ve zaman içinde teknolojik kaynakların sürdürülebilir gelişimine ve kullanımına olanak tanır. Sonuç olarak, etkili bir Teknoloji Yönetimi, kuruluşların gelişen teknolojik ortamlara uyum sağlaması, fırsatlardan yararlanması ve giderek artan teknoloji odaklı küresel ekonomide esnek ve güçlü bir konumda kalması için zorunludur.

**TUSAŞ Teknoloji Yol Haritası:** araştırma ve teknoloji geliştirme girişimlerine kılavuzluk eden, üniversiteler ve savunma sanayi arasında iş birliği yapılabilecek teknoloji alanlarının belirlenmesinde rol oynayan ve akademik çalışmaları TUSAŞ'ın stratejik hedefleriyle uyumlu hale getirmek için yönlendiren önemli bir karar destek sistemidir. TYH, TUSAŞ tarafından kısa, orta ve uzun vadede kazanılması gereken teknoloji konularını ve bu konuların kazanım planlarını kapsamaktadır. Düzenli olarak güncellenen yol haritası; zaman, kullanım amacı, kullanım yeri, kısıtlayıcı düzenlemeler, olası paydaşlar ve hedef platform/süreç gibi soruları kapsayan teknoloji kazanım süreçleri, gerekçeler ve alan uzmanları tarafından yapılan değerlendirmeler hakkında bilgiler içermektedir. Özellikle, hem şirket içi Ar-Ge çalışmalarını hem de dış paydaşlar ile ortak kazanılan teknoloji konularını kapsamakta ve TUSAŞ ürünleriyle ilgili gelecekteki teknolojik gelişmelere kapsamlı bir bakış açısı sağlamaktadır. Dijitalleştirilmiş süreçleri ile TYH, gerçek zamanlı analize olanak tanımakta ve tüm çalışanların erişimine açık bulunmaktadır. İç kaynakların ötesinde, savunma ve havacılık sektörlerindeki gelişmeler takip edilmekte, ilgili paydaşların yayınları ve patentleri izlenmekte, teknoloji trendleri araştırılmakta ve etki alanı yüksek potansiyel teknolojiler için izleme faaliyetleri yürütülmektedir. TUSAŞ TYH kapsamında sistematik veri toplama ve analiz çalışmaları, kurum içinde bilinçli karar almayı ve stratejik planlamayı desteklemektedir. Aynı zamanda, TUSAŞ TYH'nin sektörün yol haritaları (Savunma Sanayii Başkanlığı vb.) ile hizalı olmasıyla havacılık ve uzay platform ihtiyaçlarının ulusal planlarda yer almasına olanak sağlamaktadır.

TUSAŞ TYH'de yer alan bazı ileri algılama teknolojileri takibi gelen başlıklarda detaylandırılmıştır.

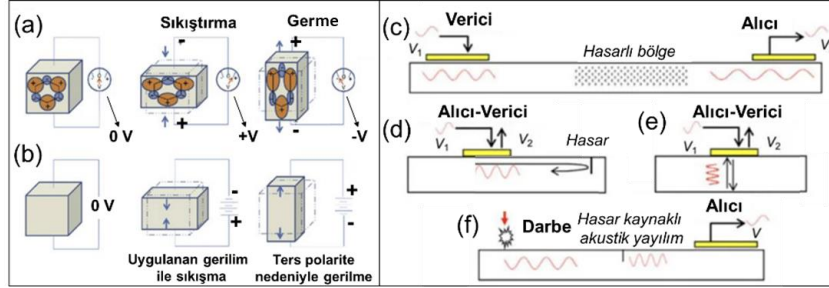
### Akustik Algılama: Fiber Optik ve Piezoelektrik Algılayıcılar

**Fiber optik algılayıcılar:** olan FBG algılayıcıları, tek modlu bir optik fiberin çekirdeği içindeki kırılma indisinin periyodik olarak değiştirilmesiyle oluşturulan Bragg ızgaraları aracılığıyla ölçüm alırlar. Optik dalgaların faz kaymalarından algılayıcının uygulandığı bölgedeki değişiklikler Bragg dalga boyu ile ilişkilendirilerek fark edilebilir. Şekil 1.a'da görüldüğü üzere, etkenlerin oluşturduğu gerilme, iletilen ve yansıyan dalgaların spektrum analizi sonucu izlenebilir. Şekil 1.b'de görüleceği üzere, FBG algılayıcıları tek bir fiber kablo içerisinde farklı Bragg dalga boylarına karşılık gelen Bragg ızgaraları ile çoklu ve dağınık ölçümler yapabilirler. Farklı Bragg dalga boyları bir filtreden geçirilerek tarama gerilimi elde edilir ve bu gerilim sıfır geçiş noktalarıyla karşılaştırılarak Bragg dalga boyuna karşılık gelen gerilme elde edilebilir. Gerilmedeki değişiklik; yüzeysel akustik yayılım, kuvvet, basınç, sıcaklık ve titreşim gibi değişkenler ile ilişkilendirilebilir [Bayrak vd., 2023; Cai vd., 2012].



Şekil 1: (a) FBG Algılayıcı Prensipleri ve (b) Ölçüm Prensipleri [Cai vd., 2012]

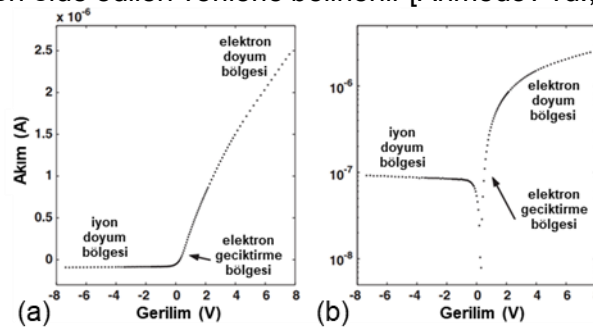
**Piezoelektrik algılayıcılar:** Şekil 2.a'da görüldüğü gibi, bir piezoelektrik kristale dış bir kuvvet uygulandığında kristal yüzeyinde pozitif ve negatif yükler oluşarak kristalde potansiyel gerilim meydana gelir. Bu yüklerin yoğunluğu uygulanan kuvvetle orantılıdır. Mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi piezoelektrik etki olarak adlandırılır. Şekil 2.b'de görüldüğü üzere, ters piezoelektrik etki ise elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesidir. Ters etki, piezoelektrik malzeme, malzemeye uygulanan elektrik alanına orantılı olarak şekil değiştirir ve değişim ölçülerek elektrik alanının büyüklüğü çıkarılabilir. Elektrik alan kaldırıldığında asıl şekline geri dönerler [Bayrak vd., 2023; Ju vd., 2023]. Yönlendirilmiş akustik dalga yayılımının farklı modlarında kullanımları ise Şekil 2'de; (c) aktüatör modu ile hasar ölçümü, (d) yankı modu ile hasar ölçümü, (e) kalınlık ölçümü ve (f) darbe tespiti için görülebilir [Ju vd., 2023].



Şekil 2: (a) Piezoelektrik ve (b) Ters Piezoelektrik Etki; (c), (d), (e) ve (f) Ölçüm Prensipleri [Ju vd., 2023]

### Plazma Karakterizasyonu: Langmuir Problemleri

Langmuir problemlerinde polarlama gerilimi, prob ucu ile bir (veya çoklu) referans elektrot veya plazma arasına uygulanır. Bu gerilim değiştirilerek, yakındaki elektronlar ve iyonların enerji dağılımı ve davranışı etkilenir. Düşük enerjili elektronlar, polarlama geriliminin oluşturduğu potansiyel bariyeri aşamayabilir ve düşük gerilimlerde toplanan akımda azalmaya neden olabilir. Ancak, yüksek enerjili elektronlar potansiyel bariyeri daha kolay aşabilir ve toplanan akımda bir artışa yol açabilir. Bu değişiklikler, farklı enerji seviyelerindeki parçacıkların seçici olarak ölçülmesini ve plazma içindeki elektron enerji dağılımının belirlenmesini sağlar. Plazmadaki parçacık davranışları, proba akan akımın polarlama gerilimi değişimine bağlı olarak Şekil 3'te görüldüğü gibi akım-gerilim (I-V) eğrisinin üç bölgesi ele alınarak incelenir; elektron doyum bölgesi (EDB), elektron geciktirme bölgesi (EGB) ve iyon doyum bölgesi (İDB). Plazma potansiyeli, EDB ve EGB arasındaki geçişi belirler; bu potansiyel, logaritmik I-V eğrisinin türeviyle elde edilir. İDB'de iyon akımı sabittir ve plazma potansiyeli negatiftir; buna karşılık, EGB'de elektron akımı sabittir ve plazma potansiyeli pozitifdir. İyonlar İDB'de maksimum termal hızda toplanır ve nispeten sabit bir iyon akımı gözlemlenir. EDB'de prob elektronları toplar ve polarlama gerilimi arttıkça elektron akımı da artar. Elektron enerji dağılım fonksiyonu, EGB ve İDB'den elde edilen verilerle belirlenir [Ahmedov vd., 2021; Lebreton vd., 2006].



Şekil 3: I-V Karakteristiği; (a) Gerilim ve Akım Doğrusal, (b) Gerilim Doğrusal ve Akım Logaritmik Ölçekli [Lebreton vd., 2006]

### Gaz Parçacıklarının Tespiti: Elektrostatik Algılayıcılar

Elektrostatik algılayıcıların temelinde elektrostatik indüksiyon prensibi yatmaktadır. Parçacıklar algılayıcı probundan geçerken, yükten kaynaklanan elektrik alanının bir kısmı prob yüzeyinde birleşir. Fazla yükün dengelenmesi için elektronların prob içinde yeniden dağılımı gerçekleşir ve elektrostatik parçacıkların elektrostatik indüksiyon sinyali olarak ortaya çıkan bir akım oluşur. Bu akım çok küçük olduğundan ilk önce yükseltilir ve sonra işlenerek ortamdaki yüklü parçacıkların yoğunluğu anlaşılabilir [Hao vd., 2019].

### Çekirdek Algılama: Cherenkov ve Sintilasyon Dedektörleri

**Cherenkov dedektörleri:** Cherenkov radyasyonunu tespit etmeye yarayan, görünür ışık veya UV fotonlarını tespit ederek bir parçacık dedektörü olarak işlev görürler. Yüklü parçacıklar bir ortamdan ışığın faz hızından daha hızlı geçtiğinde, neredeyse anlık olarak yayılan bu radyasyon pikosaniyeler içinde ölçülebilir. Parçacık geçişi için bir yayıcı ve bir fotodetektörden oluşurlar. Yüklü bir parçacık, malzeme içindeki ışığın faz hızını aştığında, yörüngesi boyunca kutuplaşma yaratarak dipol alanının çökmesi ile Cherenkov radyasyonunun yayılmasıyla sonuçlanır. Bu dedektörler, farklı tipleri ile kütleye bağlı bir eşige dayanan benzer enerji veya momentuma sahip ışınım yapan ve yapmayan parçacıkları ayırt edebilirler veya parçacıkları izleyebilir ve tanımlayabilirler [Nuclear Power, 2022a].

**Sintilasyon dedektörleri:** sintilasyon etkisini kullanarak radyasyon tespiti yapabilirler. Bu etki, bir saydam malzemeden parçacıkların geçmesiyle oluşan ışık yayılmalarıdır. Bir sintilatör ve bir fotodetektörden oluşan bu dedektörler, radyasyonun sintilatörü tetikleyerek radyasyonun enerjisiyle orantılı olarak değişen yoğunlukta parlamalar yaymasıyla çalışır. Fotodetektör, bu ışığı bir elektrik sinyaline dönüştürür ve elektronikler aracılığıyla bu sinyal işlenir [Nuclear Power, 2022b].

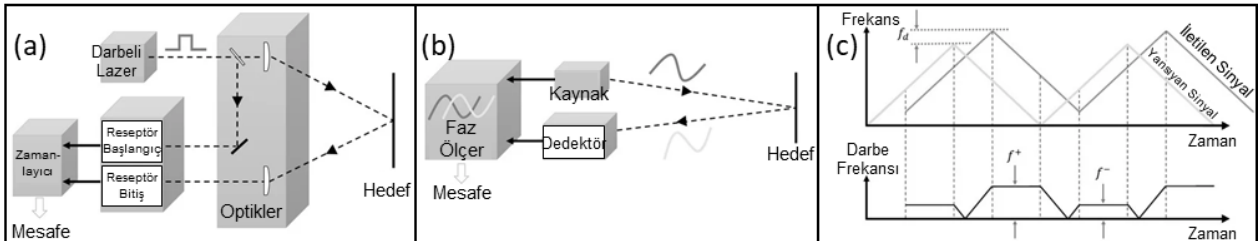
### Parçacık Algılama: Yarı İletken Dedektörler

**Yarı iletken dedektörler:** dozimetri için bir diyotun ters polarlı p-n birleşiminden yararlanırlar. Burada tükenmiş bölgenin yakınında iyonlaştırıcı radyasyon tarafından üretilen fazla yükler, elektrik alanının varlığında sürüklenme yoluyla süpürülür. Bu yükler harici bir elektrik alanıyla toplanır, yüke duyarlı bir ön yükselteç kullanılarak yükseltilir ve dijital bir sayacı tetiklemek için darbeler halinde şekillendirilerek darbe sayma modunda parçacık tespitine olanak sağlar. Alternatif olarak, integral modunda, radyasyon çarpması sırasında biriken enerjiyi tahmin etmek için gerilim veya akım geçişi ölçülür ve dolaylı olarak toplam birikmiş doz ölçülebilir [Karmakar vd., 2021].

### Mesafe Ölçümü, Tarama ve 3B Görüntüleme: RADAR ve LIDAR

**RADAR:** anteninden hedef yönünde ışık hızında yayılan elektromanyetik radyo dalgaları hedef ile karşılaştıklarında farklı yönlerde geri yansır. Alıcı, yansıyan dalgaları yakalayıp yön ve varış zamanlarını ayırt eder ve RADAR, hedefin; mesafesi, hızı ve yönü hakkında bilgi sağlayabilir.

**LIDAR:** çalışma prensibi, ışık darbelerinin yayıldıktan sonra geri yansmasıyla geçen uçuş süresini hesaplamalar ile ilişkilendirerek mesafeyi ölçebilmesine dayanmaktadır. Şekil 4.a'da görüldüğü üzere, Darbeli LIDAR, ışığın doğrudan modülasyonuna dayanır ve ışığın sabit hızından dolayı hedef mesafesi geçen zamanla doğru orantılıdır. Işığın hedefe gidiş-dönüş süresi kat edilen mesafenin iki katıdır. Mesafe ise ışık hızı ile gidiş-dönüş süresinin çarpımının yarısıdır. Şekil 4.b'de görüldüğü gibi ise, Genlik Modülasyonlu Sürekli Dalgalı LIDAR'da optik güç sürekli bir ışık dalgasında sabit bir frekansta modülasyona uğrar ve bu frekansta sinüzoidal veya kare dalga ile yayılan bir ışınla iletilir. Hedeften yansımanın ardından mesafe ölçümü yansıyan ve iletilen sinyaller arasındaki faz kaymasından çıkarılır. Son olarak, Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalgalı LIDAR'da anlık olarak yayılan optik sinyalin frekansı, kaynağa uygulanan gücün değiştirilmesiyle periyodik olarak modüle edilir. Şekil 4.c'de görüldüğü üzere, yansıyan sinyal ile kaynak çıkışından türetilen referans sinyal karşılaştırılır ve gecikmeden kaynaklı sinyaller arasında sabit bir darbe frekansı açığa çıkar. Darbe frekansı, gidiş-dönüş süresi ve dolayısıyla hedef mesafesi ile doğru orantılıdır [Royo ve Ballesta-Garcia, 2019].



Şekil 4: (a) Darbeli LIDAR, (b) Genlik ve (c) Faz Modülasyonlu Sürekli Dalgalı LIDAR Ölçüm Prensipleri [Royo ve Ballesta-Garcia, 2019]

## SONUÇ

(1) FBG algılayıcılar, hafiflik, kompakt yapı, yüksek stabilite ve düşük güç tüketimi avantajlarıyla yapısal sağlık izleme sistemlerinde yüzeysel akustik yayılım, kuvvet, basınç, sıcaklık ve titreşim; (2)

piezoelektrik algılayıcılar, hafif ve küçük boyutları ile yapısal sağlık izleme sistemlerinde yüzeysel akustik yayılım, kuvvet, yer değiştirme, ivme, kalınlık ve basınç; (3) Langmuir problemleri, uydularda elektrikli itki sistemlerinde veya hava araçlarında kanat akış kontrol sistemlerinde plazmanın elektron yoğunluğu, iyon yoğunluğu, plazma potansiyeli ve elektron enerji dağılımı; (4) elektrostatik algılayıcılar, hava motorlarında egzozda yer alan elektrostatik parçacıkların tespiti ile motor arıza öngörüsü ve hizmet ömrü tahminleri; (5) Cherenkov, (6) sintilasyon ve (7) yarı iletken dedektörler, uydularda uzay ortamındaki radyasyon ve parçacıkları tanımlama ve izleme; (8) RADAR ve (9) LIDAR sistemleri ise silah sistemlerinde, yer veya hava platformlarında 3B görüntüleme, tarama, yön ve mesafe ölçümleri için kullanılmaktadırlar.

Bu teknolojilerin kullanımları ve sağladıkları avantajların yanı sıra, havacılık ve uzay uygulamalarındaki önemleri ve ilişkin ihtiyaçlar gözetildiğinde, havacılık ve uzay şirketlerinin bu teknolojiler çerçevesinde; insan kaynağı, altyapı ve ürünleşme planları gibi noktaları değerlendirmeleri kritik önem taşımaktadır. Ek olarak, bu teknolojilerin çift kullanım potansiyelleri belirlenmeli ve sivil kuruluşlar eşliğinde çoklu sektörlerde kullanımlarının değerlendirilmesiyle ortak çalışmaların yürütülmesi önerilmektedir.

### Kaynaklar

- Ahmedov, H., Korutlu, B., Orhan, R., Okumuş, E. ve Aslan, N., 2021. *Optimization Method for Electron Energy Distribution Function in Non-Equilibrium Plasma*, Acta Materialia Turcica, Cilt.5, Sayı.1, s.18-23.
- Bayrak, B., Ergin, B., Doran, D. A., Düzgün, M., Dalveren, Y. ve Çelik, E., 2023. *Havacılık ve Uzay Uygulamalarında Yapısal Sağlık İzleme İçin Yer Değiştirme ve Kuvvet Sensörleri*, LIFT UP Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Projeleri Programı 2022-2023 Projeleri Bildiri Kitabı, Cilt.4, Sayı.1, s.352-356.
- Cai, J., Qiu, L., Yuan, S., Shi, L., Liu, P. ve Liang, D., 2012. *Structural Health Monitoring for Composite Materials*, Composites and Their Applications.
- Hao, Z., Yin, Z., Zhensheng, S., Yu, H. ve Guang, W., 2019. *Design and Research of Electrostatic Sensor Based on Aero-Engine Airway Electrostatic Monitoring Technology*, Journal of Physics: Conference Series, Cilt.1237, Sayı.5, s.052036.
- Ju, M., Dou, Z., Li, J.-W., Qiu, X., Shen, B., Zhang, D., Yao, F.-Z., Gong, W. ve Wang, K., 2023. *Piezoelectric Materials and Sensors for Structural Health Monitoring: Fundamental Aspects, Current Status, and Future Perspectives*, Sensors, Cilt.23, Sayı.1, s.543.
- Karmakar, A., Wang, J., Prinzie, J., De Smedt, V. ve Leroux, P., 2021. *A Review of Semiconductor Based Ionising Radiation Sensors Used in Harsh Radiation Environments and Their Applications*, Radiation, Cilt.1, Sayı.3, s.194-217.
- Lebreton, J.-P., Stverak, S., Travnicek, P., Maksimovic, M., Klinge, D., Merikallio, S., Lagoutte, D., Poirier, B., Blelly, P.-L., Kozacek, Z. ve Salaquarda, M., 2006. *The ISL Langmuir Probe Experiment Processing Onboard DEMETER: Scientific Objectives, Description and First Results*, Planetary and Space Science, Cilt.54, Sayı.5, s.472-486.
- Nuclear Power, 2022a. *Cherenkov Detector*, <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/radiation-detection/cherenkov-detector/> (29.03.2024).
- Nuclear Power, 2022b. *Scintillation Counter – Scintillation Detector*, <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/radiation-detection/scintillation-counter-scintillation-detector/> (29.03.2024).
- Royo, S. ve Ballesta-Garcia, M., 2019. *An Overview of LIDAR Imaging Systems for Autonomous Vehicles*, Applied Sciences, Cilt.9, Sayı.19, s.4093.
- Waykar, Y. A., 2014. *LIDAR Technology: A Comprehensive Review and Future Prospects*, Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, Cilt.9, Sayı.7.
- Yang, T., Li, F. ve Zheng, R., 2021. *Recent Advances in Radiation Detection Technologies Enabled by Metal-Halide Perovskites*, Materials Advances, Cilt.2, Sayı.21, s.6744-6767.