



Sıcak Aks Kutusu Tespit Sistemlerinde Arka Plan Işımlarının Kızılötesi Sensor Ölçüm Verilerine Etkisinin İncelenmesi

Kürşad GÖKCE

TÜBİTAK Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü, Robotik ve Akıllı Sistemler Bölümü, Kocaeli, Türkiye

kursad.gokce@tubitak.gov.tr

(Alınış/Received: 06.09.2023, Kabul/Accepted: 18.09.2023, Yayınlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Kızılötesi sıcaklık ölçüm teknolojisi, demiryolu taşıtlarının güvenliği ve verimliliği için kritik öneme sahiptir. Ancak çevresel koşullar, özellikle yansıyan radyasyona bağlı arka plan ışımaları (back-ground radiation), doğru ölçümleri engelleyebilir veya yanıltıcı sonuçlara yol açabilir. Bu çalışma, arka plan ışımalarının sıcak aks kutusu kızılötesi sıcaklık sensör ölçüm verilerine olan etkisini incelemekte ve bu etkiyi elimine edecek analitik bir yöntem önermektedir. Bu sayede daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine katkı sunmaktadır. Bu amaçla, aks kutusunun gerçek verilerine dayalı bir simülasyon modeli kurulmuş ve farklı ortam sıcaklıklarının sensör ölçüm sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarından elde edilen veriler, ortam ile ölçüm yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı azaldıkça arka plan ışımalarının etkisinin daha yüksek olduğunu göstermiştir. Örneğin 50°C bir hedef yüzey sıcaklığı ve 45°C ortam sıcaklığı altında 6,8°C bir sıcaklık sapması oluşmuştur. Ayrıca kızılötesi sensörün sıcaklığı doğru algılaması için yüzeyin yayıcılık katsayısının düzgün belirlenmesinin önemli olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kızılötesi, Sensor, Ölçüm, Sıcaklık, Aks Kutusu, Demiryolu

Investigation of the Effect of Background Radiations on Infrared Sensor Measurement Data in Hot Axle Box Detection Systems

Abstract: Infrared temperature measurement technology is of critical importance for the safety and efficiency of railway vehicles. However, environmental factors, particularly background radiations, can hinder accurate measurements or lead to misleading results. This study examines the impact of background radiations on the infrared temperature measurement data for hot axle box system and proposes an analytical method to compensate this effect, thereby contributing to achieving more precise and reliable measurements. For this purpose, a simulation model based on actual axle box data was established, and the impact of different ambient temperatures on sensor measurement data was examined. The data obtained from the simulation results indicate that the effect of background radiation becomes more prominent as the temperature difference between the environment and the measurement surface decreases. For example, a temperature deviation of 6,8°C has occurred at a target surface temperature of 50°C and an ambient temperature of 45°C. Furthermore, the results show that accurate determination of the surface's emissivity coefficient is crucial for the infrared sensor to perceive temperature correctly.

Keywords: Infrared, Sensor, Measurement, Temperature, Axle Box, Railway

1. Giriş

Demiryolu taşımacılığı, modern toplumların sürdürülebilir ve verimli ulaşım ihtiyaçlarını karşılamada kritik bir rol oynamaktadır. Demiryolu sistemleri, geniş alanları kapsayarak insan ve yük taşımacılığını en etkili ve çevre dostu şekillerde gerçekleştirmeyi sağlar. Bu sektörün karşı karşıya kaldığı önemli zorluklardan biri, demiryolu altyapısının ve taşıtlarının güvenliği ve verimliliğinin sağlanmasıdır. Bu bağlamda, aks rulman sıcaklık ölçüm sistemi, demiryolu hatlarının güvenli ve sorunsuz işletilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Özellikle demiryolu taşıtlarının yüksek hızlarda seyrettiği hatlarda, kritik aks rulman sıcaklığına sahip araçların önceden tespit edilmesi oldukça önemlidir.

Atıf için/Cite as: K. Gökce, "Sıcak aks kutusu tespit sistemlerinde arka plan ışımalarının kızılötesi sensor ölçüm verilerine etkisinin incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 17-26, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1355960

Demiryolu taşıtlarında aks kutusu sıcaklığını ölçmek için genellikle iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; Akustik Algılama Sistemi (TADS™) ve Sıcak Aks Kutusu Detektörleridir (HBD). TADS™, yol kenarı mikrofonlar kullanılarak yüksek riskli kusurları tespit etmekte ve kondüktörü uyarmaktadır [1]. Ancak TADS™ genellikle ısınmış aks rulmanlarının tespit edilmesinde yetersiz kaldığı için çok az yerde, ABD (Amerika Birleşik Devletleri) ve Kanada'da toplam 30 noktada kullanılmaktadır [2]. HBD'ler ise en yaygın rulman sıcaklık izleme sistemi olup, ABD'de bu detektörlerden ülke genelinde 6000'den fazla bulunmaktadır [3]. Tipik olarak, HBD'ler özellikle yük vagonlarının yoğun seyrettiği hatlarda yaklaşık 24 ila 48 km aralıklarla konumlandırılır. Her tren geçişinde, HBD'ler rulmanların alt yüzeyini kızılötesi sensörlerle tarar ve hedef yüzey sıcaklığı ortam sıcaklığına daha önceden belirlenmiş bir değer kadar aştığında bir uyarı verir. Genellikle bir rulmanın sıcaklığı ortam sıcaklığının 94,4°C (170°F) üzerinde veya aynı aksı paylaşan rulmanın sıcaklığından 52,8°C (95°F) daha yüksek ise alarm sinyali üretilir [4]. Sıcak aks kutusu için alarm eşik değerleri ve ölçüm sıcaklık toleransları EN 15437-1:2009 standardında tanımlanmıştır [5]. Standartta tanımlı alarm eşik değerleri Tablo 1'de ve izin verilen sıcaklık doğruluk değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. EN 15437-1:2009'a göre alarm eşik değerleri

Sıcak Alarmı	Fark Alarmı	Ilık Alarmı
95°C	56°C	-
85°C	50°C	85°C
100°C	30°C	90°C
105°C	35°C	90°C

Tablo 2. EN 15437-1:2009'a göre sıcaklık doğruluk değerleri

Ölçüm Sıcaklık Aralığı	Doğruluk değerleri
-50°C – 0°C	≥±10°C
0°C – 15°C	±10°C
16°C – 20°C	±5°C
21°C – 90°C	±3°C
91°C – 120°C	±5°C

Tablo 1'de belirtilen fark alarm değerleri aynı aks üzerindeki iki rulman arasındaki sıcaklık farkını göstermektedir. Ilık alarm bilgisi ise sıcak alarm değerine ulaşmadan önce üretilen bir uyarıdır. Tablo 2'de ise farklı ölçüm sıcaklık aralıkları için ölçülen değerlerin gerçek sıcaklık değerinden izin verilen sapma miktarları belirtilmiştir.

HBD sistemleri demiryolu araçlarının tekerlek yataklarında (aks rulman) meydana gelebilecek aşırı ısınma durumlarını izlemek ve aks kitlenmelerini önceden saptamak açısından oldukça kritiktir. Aks kutusunun aşırı ısınması, hem güvenlik hem de işletme verimliliği açısından ciddi tehlikelere yol açabilir. Aşırı ısınmadan kaynaklı arıza öncesinde bir rulmandan yayılan sıcaklık 25 dakikalık bir süre içinde 800°C civarına yükselebilmektedir [6]. Bu ise aks kutularının yanmasına ve raydan çıkmaların yaşanmasına neden olmaktadır. Özellikle yük vagonlarında, yokuş aşağı seyir esnasında uzun süreli frenleme yapılması sonucu ortaya çıkan yüksek ısı, tekerlekler ve buna bağlı olarak aks kutusunun hasar almasına yol açabilmektedir [7]. İstatistikler, 2003-2012 yılları arasında Kuzey Amerika genelinde toplam raydan çıkma vakalarının %20,48'inin sıcak rulman arızalarından kaynaklandığını göstermektedir [8]. Avrupa Demiryolu Ajansının 2011 raporunda da demiryolu araçlarında raydan çıkma olaylarının önemli bir kısmının sıcak aks kutusu tespit sistemindeki arızalardan kaynaklandığı belirtilmiştir [9]. Buna ilişkin en son vaka 3 Şubat 2023 tarihinde Norfolk Southern Demiryollarına ait bir yük treninde yaşanmıştır. Yük treni Ohio'nun East Palestine bölgesinde raydan çıkmış ve sonrasında çıkan

yangında büyük bir zarar meydana gelmiştir. Federal güvenlik araştırmacılarının ön raporuna göre, yük treninin raydan çıkması, sıcak aks kutusu ölçüm sisteminin gerekli alarm bilgisini zamanında üretememiş olmasından kaynaklanmıştır. HBD sistemlerinde alarm sinyalinin daha erken üretilerek bu tip kazaların önüne geçmek mümkündür. Ancak bu durumda yanlış alarm (false-alarm) oluşabilmekte ve arızası olmayan bir tren, hattan çıkartılmakta veya gereksiz duruşlar yaşanabilmektedir. Amsted Rail şirketi tarafından 2001-2007 yılları arasında HBD sistemlerinden toplanan veriler incelenmiş ve rulman arızası nedeniyle müdahale edilen araçların yaklaşık %40'ının arızasız olduğu tespit edilmiştir [10]. Yüksek oranda yaşanan bu yanlış alarm durumları yüzünden hattan çıkartılan trenler işletme açısından zaman ve gelir kaybına yol açmaktadır.

Tüm bu olaylar demiryolu araçlarının sürekli izlenerek aşırı ısınma durumlarının hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilmesinin, demiryolu taşımacılığının güvenliği ve işletme verimliliği açısından ne kadar hayati bir konu olduğunu göstermektedir. Ancak, demiryolu taşıtlarının çalıştığı çeşitli dış ortam koşulları, sıcak aks kutusu ölçüm sistemlerinin performansını etkilemektedir. Özellikle açık havada veya farklı iklim koşullarında çalışan demiryolu hatlarında, hedef yüzeyin etrafındaki sıcak nesnelere veya yüzeyden yansıyan ve yayılan kızılötesi (infrared) ışınım (radyasyon), doğru sıcaklık ölçümlerini zorlaştırabilir ve yanlış alarm durumlarının oluşmasına yol açabilir. Bu nedenle, demiryolu taşımacılığı alanında kullanılan sıcak aks kutusu ölçüm sistemlerinde arka plan kızılötesi ışınım etkisinin anlaşılması ve ele alınması büyük önem arz etmektedir. Arka plan ışınımını dikkate alan bir uygulamada diferansiyel dönüşüm yöntemi ile arka plan ışınımını kompanze edilmiş ve kızılötesi sıcaklık ölçüm sonuçları %0,01-%5 arasında değişen doğrulukta elde edilmiştir [11]. Arka plan ışınımını, sıcaklık ölçümünde kullanılan kızılötesi termal görüntüleyiciler için de oldukça önemlidir. Kızılötesi termal görüntüleyiciler nesne yüzeyinin yansıtıcılığı (reflectivity) ve yayıcılığı (emissivity), ortam sıcaklığı, atmosferik koşullar ve ölçme mesafesi gibi birçok faktörden etkilenmektedir [12]. Kızılötesi termal görüntüleyicilerde bu faktörlerin ve arka plan ışınımının sıcaklık ölçüm sonuçlarına etkisi deneysel olarak da ortaya konmuştur [13]. Bir başka çalışmada ortam sıcaklığı kaynaklı arka plan ışınımının PbSe (lead selenide) tipi sıcaklık sensör karakteristiği üzerindeki etkisi incelenmiş ve arka plan ışınımının parazit etki olarak mutlaka değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Buna ilişkin bir ölçüm düzeneği hazırlanarak lineer kompanzasyon yöntemi ile arka plan ışınımının etkisi elimine edilmiş ve 20°C'lik bir ortam sıcaklığı değişimi için 3°C'den daha az sıcaklık ölçüm hatası elde edilmiştir [14].

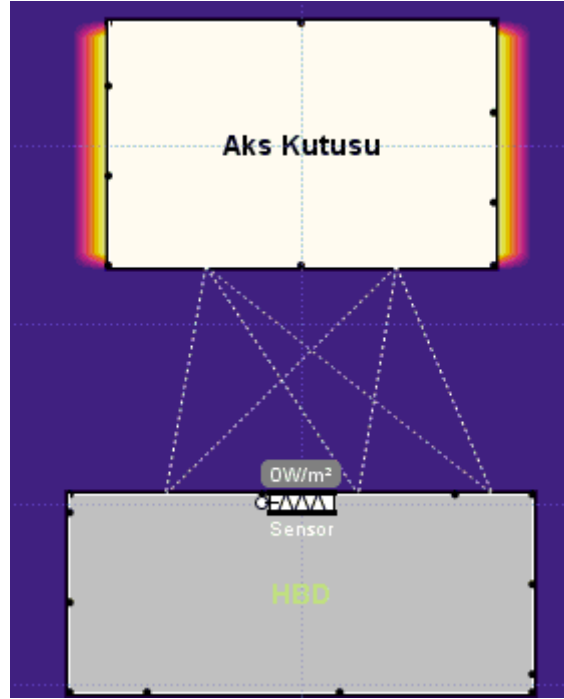
Özetle sıcak aks kutusu kaynaklı raydan çıkmalara önlenmesi veya yanlış alarm durumlarının oluşmaması için hassas bir sıcaklık ölçümü yapılması ve gerekli uyarı sinyalinin zamanında üretilmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, HBD sistemlerinin performansını etkileyen arka plan kızılötesi ışınımının hedef yüzey ölçüm sıcaklığına olan etkisi farklı ortam sıcaklıkları için analiz edilmiş ve bu etkiyi elimine edecek analitik bir yöntem önerilmiştir. Bu analiz çalışması literatürde yapılan bazı deneysel çalışmaların sonuçlarını da destekleyecek şekilde teorik bir altyapı teşkil etmiştir. Analitik bir yöntemle arka plan ışınımının etkisinin ortaya konması sadece demiryolu uygulamaları özelinde değil farklı dalga boyu aralıklarında kızılötesi sensör kullanılan başkaca alanlara da bu analizin kolayca uygulanabilmesini sağlamıştır. Ayrıca kızılötesi sıcaklık sensör verilerinin doğru bir şekilde elde edilmesi için yayıcılık katsayısının doğru değerde belirlenmesinin önemi ortaya konmuştur. Makalenin ikinci kısmında sıcak aks kutusu ve kızılötesi sensör davranışını modellemek için kullanılan simülasyon ortamından ve izlenen yöntemden bahsedilmiştir. Üçüncü kısımda ise analiz sonuçlarına değinilmiş ve bulgular ortaya konmuştur. Son kısımda ise yapılan çalışmanın sonuçları verilmiştir.

2. Metot

Kızılötesi sensörden toplanan sıcaklık verilerini simüle etmek için Energ2D termal analiz programında bir sahne ortamı kurulmuştur. Burada örnek bir aks kutusunun taban ölçülerinde

(yaklaşık 200x270 mm) bir geometrik yüzey oluşturulmuş ve hareketli yüzeyden yayılan termal radyasyon (W/m^2) bir sensör yardımıyla algılanmıştır. Sensör, EN 15437-1:2009'da HBD sistemi için verilen montaj ölçülerine uygun olacak şekilde ölçüm yüzeyinden 50 cm aşağıya ve kutuyu en az 100 mm genişlikte tarayacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 1'de oluşturulan simülasyon sahnesi görülmektedir.

Sıcak aks kutusu paslanmaz çelik bir malzemenin özelliklerinde tanımlanmıştır. Simülasyon çalışmalarında kutunun sıcaklığı $100^\circ C$, termal iletkenliği $45 W/mK$, özgül ısı $420 J/kg^\circ C$ ve yoğunluk $7850 kg/m^3$ olarak girilmiştir. Kutunun yayıcılık katsayısının bulunması için TCDD'den temin edilen örnek aks kutusu üzerinde sıcaklık testleri yapılmıştır. Kutu üzerine bağlanan termocouple çiftlerinden okunan değerlerle Fluke marka termal kameradan okunan sıcaklık verileri farklı yayıcılık katsayıları girilerek eşleştirilmiştir. Farklı aks kutuları teste tabi tutulmuş ve ölçüm sonuçlarına bağlı olarak ortalama 0,85-0,90 arasındaki değerlerin uygun olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak simülasyonda aks kutusu yayıcılık katsayısı 0,875 olarak girilmiştir. Sıcak aks kutusu sensörün üzerinden belirli bir hızda geçirilerek sensörden okunan termal radyasyon değerleri hesaplamalarda kullanılmak üzere zamana bağlı olarak W/m^2 cinsinden bir tabloya yazılmıştır.



Şekil 1. Simülasyon sahnesi

2.1. Termal radyasyon sıcaklık ilişkisi

Simülasyon çıktısı olan sensör termal radyasyon değerlerinden sıcaklık verisi elde edebilmek için Planck'in radyasyon kuralından (Planck's Radiation Law) yararlanılmıştır. Bu kural 1900 yılında Alman fizikçi Max Planck tarafından sıcak bir cisimden yayılan spektral radyasyon yayılımını ifade etmek üzere ortaya konulmuştur. Buna göre Denklem 1'de verildiği üzere her cisim sıcaklığına ve dalga boyuna bağlı olarak bir radyasyon yaymaktadır.

$$R = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (1)$$

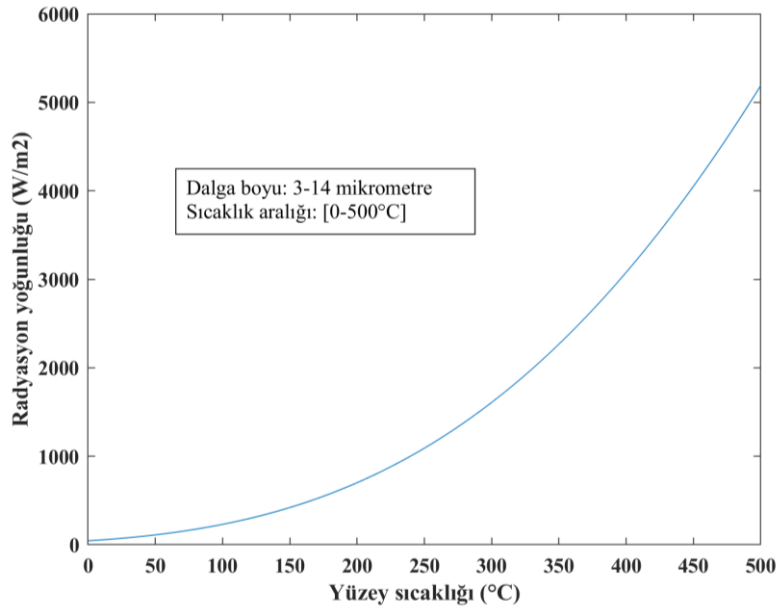
$$c_1 = 2hc^2$$

$$c_2 = h \frac{c}{k_B}$$

Burada λ dalga boyu (m), T yüzey sıcaklığı (K), R termal radyasyon (W/m^2), h Planck sabiti (J/Hz), c ışık hızı (m/sn), k_B Boltzmann sabitidir (J/K). Denklem 2 ile R fonksiyonunun belirli bir dalga spektrum aralığı ve sıcaklık değeri için integrali alınarak o aralık için toplam termal radyasyon yoğunluğu, R_T , elde edilmiştir.

$$R_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R d\lambda \quad (2)$$

Hesaplamlarda sıcak aks kutusu tespit sistemlerinde kullanılan ve piyasada bulunan mevcut kızılötesi sensörlerin spektral algılama ve ölçüm sıcaklık aralıkları dikkate alınmıştır. Buna göre, orta-uzun kızılötesi dalga boyu aralığını kapsayacak şekilde $\lambda_1 = 3\mu m$ ve $\lambda_2 = 14\mu m$ olarak seçilmiştir. $[0-500^\circ C]$ sıcaklık ölçüm aralığı için $1^\circ C$ hassasiyetle sensörün sıcaklığa bağlı termal radyasyon yoğunluk eğrisi Şekil 2'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 2. Radyasyon yoğunluğuna bağlı sıcaklık eğrisi

Şekil 2'deki eğriden yararlanılarak verilen bir radyasyon yoğunluğu için sıcaklık değeri hesaplanmıştır. Bunun için eğri Denklem 3'de gösterildiği gibi üçüncü dereceden bir polinom fonksiyonu olarak ifade edilmiştir.

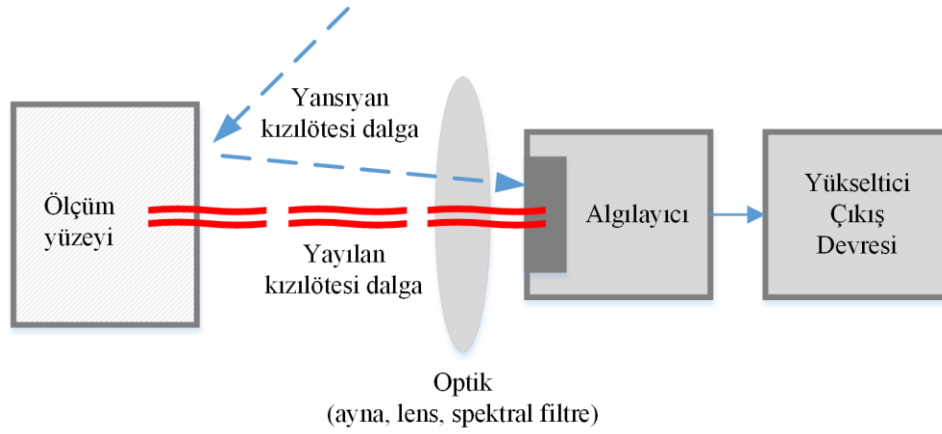
$$R_T = AT_S^3 + BT_S^2 + CT_S + D \quad (3)$$

$$R_T = \prod_{k=1}^n (T_S - r_k)$$

Burada T_S sensörden okunan sıcaklık değerleri olup katsayılar Şekil 2'deki eğriden $A = 2e^{-5}$, $B = 9,4e^{-3}$, $C = 0,55$, $D = 55,76$ olarak hesaplanmıştır. Reel katsayılı ve tek dereceli her polinomun en az bir reel kökü vardır ve bu fonksiyonun verilen bir radyasyon yoğunluğu için elde edilen pozitif reel kökü, $r_k \in \mathbb{R}^+$, sıcaklık bilgisini vermektedir. Böylece simülasyon ortamında sensörden okunan termal radyasyon verilerinden sıcaklık bilgisi elde edilebilmektedir.

2.2. Arka plan ışımasının elimine edilmesi

Kızılötesi sensörler Şekil 3’de görüldüğü gibi belirli dalga boyuna duyarlı optik algılama elemanları üzerinden termal radyasyonu algılamakta ve üzerine düşen sıcaklığa bağlı olarak bu değişimi elektriksel bir sinyale dönüştürmektedirler. Ancak üretilen bu sinyal çok zayıf olduğundan genellikle bir yükseltici devre üzerinden çıkışa aktarılmaktadır. Sensörler sadece ölçüm yüzeyinden gelen radyasyonu değil aynı zamanda ortam içerisinde diğer cisimlerden yansıyan termal radyasyonu da algılamaktadırlar. Arka plan ışıması olarak adlandırılan bu parazit etki ortam sıcaklığına bağlı olarak sensörden okunan sıcaklık verilerini de olumsuz etkilemektedir. Özellikle algılama elemanları tarafından üretilen sinyal çok düşük seviyede olduğundan ve sonrasında bu sinyal yükseltildiğinden parazit bileşende yükseltilerek çıkışa aktarılır ve ölçüm sonuçlarında önemli sapmalara neden olur.



Şekil 3. Kızılötesi sensör algılama birimi

Dolayısıyla ölçüm yüzeyinin gerçek sıcaklığını bulabilmek için yüzeyden yansıyan bu arka plan ışımasının bertaraf edilmesi önemlidir. Sensör tarafından algılanan radyasyon değerinden yansıyan radyasyon miktarı (arka plan ışıması) çıkartılırsa yüzeyden yayılan radyasyon miktarı bulunabilir. Bunun için Denklem 4’de belirtilen analitik ifade kullanılarak arka plan ışımasının etkisi elimine edilmiştir.

$$R_{TG}(T_G) = R_{TS}(T_S) - (1 - \varepsilon)R_{TO}(T_O) \quad (4)$$

Burada ε malzemenin yayıcılık katsayısıdır. Kızılötesi sensörlerin genellikle yayıcılık katsayısı ayarlanabilir olup, sağlıklı ölçüm alınabilmesi için malzemenin yayıcılık katsayısının doğru bir şekilde belirlenerek sensöre önceden tanıtılması oldukça önemlidir. R_{TS} sıcak aks kutusundan yayılan ve yansıyan radyasyon miktarlarının toplamı olup sensör tarafından algılanan simülasyon çıktısıdır. R_{TS} nin bilinmesi durumunda Denklem 3 yardımıyla T_S sensör sıcaklık değerleri elde edilebilir. R_{TO} , ortam sıcaklığı, T_O , ya bağlı yansıyan radyasyon değeridir. Simülasyonda ortam sıcaklığı $T_O = 23^\circ C$ olarak ayarlanmıştır. Denklem 3’deki polinom fonksiyonuna T_O değerleri girilirse bu ortam sıcaklıklarına karşılık gelen R_{TO} değerleri hesaplanabilir. Sensör tarafından algılanan toplam radyasyon değerinden, R_{TS} , yansıyan radyasyon değeri, R_{TO} , çıkartılırsa yayılan radyasyon değeri, R_{TG} , elde edilir. R_{TG} hesaplandığında benzer şekilde yine Denklem 3 yardımıyla ortam sıcaklığına bağlı arka plan ışımasından arındırılmış yüzeyin gerçek sıcaklık değeri, T_G , bulunabilir.

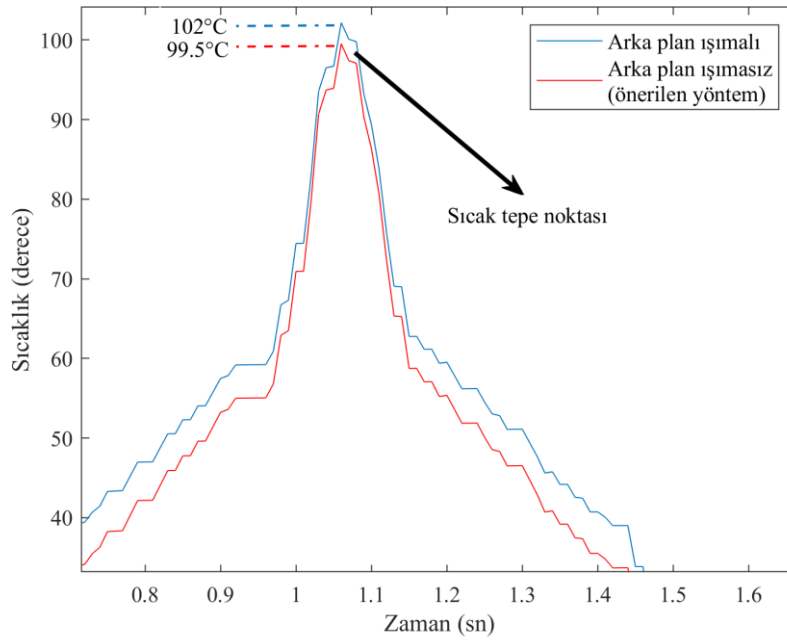
3. Bulgular

Arka plan ışımasının sensör sıcaklık verilerine etkisini incelemek üzere simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyon ortamında Tablo 3’de verilen parametreler kullanılmıştır.

Tablo 3. Simülasyon parametreleri

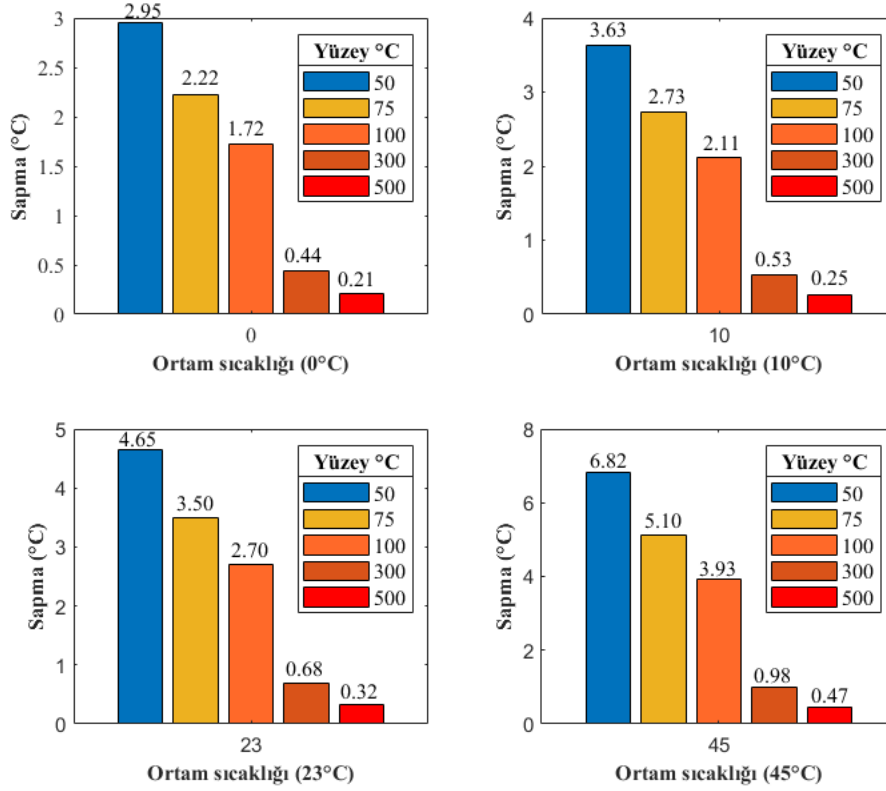
Parametre	Değer
Aks kutusu yayıcılık katsayısı, ϵ	0,875
Aks kutusu sıcaklık set değeri	100°C
Aks kutusu termal iletkenliği	45 W/mK
Aks kutusu özgül ısı	420 J/kg°C
Aks kutusu yoğunluğu	7850 kg/m ³
Ortam sıcaklığı, T_O	23°C

Simülasyon ortamında sensör tarafından algılanan R_{TS} değerleri zamana bağlı olarak bir tabloya girilmiştir. Girilen değerler ve Tablo 3’de verilen parametreler kullanılarak sensörün algıladığı T_S ve hesaplanan gerçek sıcaklık değeri T_G elde edilmiştir. Algılanan sıcaklık değeri ile hesaplanan gerçek sıcaklık değeri Şekil 4’de üst üste çizdirilmiştir.

**Şekil 4.** Algılanan ve hesaplanan gerçek sıcaklık değişim grafiği

Şekil 4’de ortam sıcaklığına bağlı arka plan ışımasının etkisi görülmektedir. Gerçek sıcaklığı 100°C olan aks kutusunun en sıcak noktada sensör tarafından algılanan değeri 102°C’dir. Bu ise %2 sapma anlamına gelmektedir. Arka plan ışıması Denklem 4 yardımıyla elimine edildiğinde ise hesaplanan gerçek sıcaklık değeri 99,5°C olup gerçek değere oldukça yakındır. Bu durumda gerçek değerden %0,5 kadar bir sapma söz konusudur.

Şekil 4’de görülen arka plan ışımasının etkisi ortam sıcaklığına, yüzey sıcaklığına ve yüzeyin yayıcılık katsayısına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 5’de yayıcılık katsayısı sabit tutularak farklı dış ortam sıcaklıkları (0-10-23-45°C) ve farklı yüzey sıcaklıkları (50-75-100-300-500°C) için sensörün algıladığı sıcaklığın gerçek sıcaklık değerinden ne kadar saptığı görülmektedir.



Şekil 5. Algılanan ve hesaplanan gerçek sıcaklık değişim grafiği

Şekil 5'den görüleceği üzere, en büyük sapma 6,82°C olarak dış ortam sıcaklığı 45°C ve yüzey sıcaklığı 50°C olması durumunda gerçekleşmiştir. Yani gerçek sıcaklık değeri 50°C olmasına rağmen arka plan ışımasının etkisiyle sensör bunu 56,82°C olarak algılamıştır. Yüzey sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki fark arttıkça bu sapma miktarı da düşmektedir. Örneğin 300°C yüzey sıcaklığı ve 23°C ortam sıcaklığı için sapma miktarı 0,68°C'dir. Sıcak aks kutusu tespit sistemleri için EN 15437-1:2009'da belirtilen uyarı seviyeleri (95°C-105°C) ve izin verilen doğruluk değerleri ($\pm 3^\circ\text{C}$, $\pm 5^\circ\text{C}$) göz önüne alındığında özellikle yazın sıcak hava koşullarında yanlış alarm durumlarının önüne geçmek için bu sapma miktarlarının dikkate alınması gerektiği görülmektedir.

Ölçüm sonuçlarının doğruluğuna etki eden bir başka parametrede yayıcılık katsayısıdır. Yüksek yayıcılık katsayısına sahip malzemelerin (mat, boyalı yüzeyler) yansıtıcılık (reflectivity) katsayısı düşük olduğundan arka plan ışımasının etkisi de daha azdır. Ancak yüksek yansıtıcı yüzeylerin (açık renkli parlak, cilalı yüzeyler, örneğin disk yüzeyleri) yayıcılık katsayıları düşük olduğundan ($\varepsilon < 0,3$) yüzey sıcaklıklarının doğru bir şekilde algılanabilmesi için kızılötesi sensörlerin yayıcılık katsayısının önceden düzgün bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Aksi halde ölçüm sonuçlarında ciddi sapmalar oluşabilmektedir. Örneğin yayıcılık katsayısı $\varepsilon = 0,3$ olarak bilinen parlak yüzeyli bir malzeme 23°C ortam sıcaklığında 100°C'ye kadar ısıtılmış ve $\varepsilon = 0,9$ olarak kalibre edilmiş bir termal kamera ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Termal kamera ile 100°C'lik yüzey ortalama 50°C olarak ölçülmüştür. Bu ise kritik sıcaklığa ulaşmış bir aks kutusunun daha düşük sıcaklıkta algılanarak olası bir rulman arızasının önceden tespit edilememesi anlamına gelmektedir. Böyle bir durumda ısınan aks kutusunun yanması ve ciddi kazalara yol açması kaçınılmazdır.

4. Sonuç

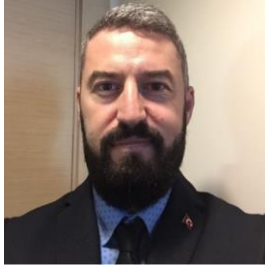
Bu çalışmada, demiryolu taşımacılığında emniyet kritik bir sistem olan sıcak aks kutusu ölçüm sistemlerinin performansını etkileyen arka plan (back-ground) kızılötesi (infrared) ışımının hedef yüzey ölçüm sıcaklığına olan etkisi farklı ortam ve yüzey sıcaklıkları için detaylı bir şekilde incelenmiştir. Simülasyon ortamında aks kutusu hedef ölçüm yüzeyi ve sensör modellemesi yapılarak veriler toplanmıştır. Toplanan verilerden radyasyon yoğunluk dağılım fonksiyonu kullanılarak sıcaklık bilgisi üretilmiştir. Arka plan ışımının parazit etkisi analiz edilerek bu etkiyi elimine edecek analitik bir yöntem önerilmiştir. Arka plan ışımının elimine edilmesiyle hesaplanan sıcaklık değerindeki doğruluk oranının örneğin 100°C yüzey sıcaklığı için 0-45°C ortam sıcaklığı aralığında ortalama %2,6 arttığı görülmüştür. Bu artış, ortam sıcaklığının üzerindeki daha düşük yüzey sıcaklıkları için daha da fazla gerçekleşmiştir. Farklı ortam ve yüzey sıcaklıkları altında arka plan ışımının etkisi analiz edilerek ölçüm sonuçlarının nasıl etkilendiği incelenmiştir. Hedef yüzey ve ortam arasındaki sıcaklık farkı azaldıkça arka plan ışımının etkisinin de yüksek olduğu görülmüştür. Sıcak aks kutusu için yaklaşık 100°C'de alarm sinyali üretildiğinden bu etkinin özellikle yazın 40-45°C gibi yüksek sıcaklıklarda yanlış alarm üretilmesine yol açabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca kızılötesi sensörler için yayıcılık katsayısının doğru bir şekilde ayarlanmasının önemi ortaya konmuştur. Yüksek yayıcılık katsayısına ayarlanmış bir sensörün, gerçekte daha düşük yayıcılık katsayısına sahip bir yüzeyin sıcaklığını olması gerekenden düşük ölçtüğü ve buna bağlı olarak kritik seviyeye ulaşmış bir aks rulman arızasının önceden tespit edilememesine yol açabileceği görülmüştür. Bu çalışmanın sonuçları, demiryolu taşımacılığının güvenliği ve verimliliği için daha hassas sıcaklık ölçüm sistemleri tasarımını desteklemeyi amaçlamaktadır. Sıcak aks kutusu ölçümü ile ilgili gelecekte yapılması planlanan saha çalışmaları ile önerilen analitik yöntemin gerçek verilerle de doğrulanması planlanmaktadır. Ayrıca Comsol gibi sonlu elemanlar analizi programı ile de yöntemin doğrulanması sağlanabilir.

Kaynakça

- [1] G. B. Anderson, "Acoustic detection of distressed freight car roller bearings," in *ASME/IEEE Joint Rail Conference*, Colorado, USA, 2007, pp. 167-171
- [2] J. Montalvo, C. Tarawneh, and A. A. Fuentes, "Vibration based defect detection for freight railcar tapered-roller bearings," in *Proceedings of the 2018 Joint Rail Conference*, Pittsburgh, USA, 2018
- [3] C. Tarawneh, J. Aranda, V. Hernandez, S. Crown, and J. Montalvo, "An investigation into wayside hot-box detector efficacy and optimization," *International Journal of Rail Transportation*, vol. 8, no. 3, pp. 264-284, 2020, doi: 10.1080/23248378.2019.1636721
- [4] C. Tarawneh, J. Montalvo and B. Wilson, "Defect detection in freight railcar tapered-roller bearings using vibration techniques," *Rail. Eng. Science*, vol. 29, pp. 42-58, 2021, doi: 10.1007/s40534-020-00230-x
- [5] *Railway applications - axlebox condition monitoring - interface and design requirements - Part 1: Track side equipment and rolling stock axlebox*, BS EN 15437-1:2009+A1:2022, 2023
- [6] O. Lunys, S. Dailydka, and G. Bureika, "Investigation on features and tendencies of axle-box heating," *Transport Problems*, vol. 10, no. 1, pp. 105-114, 2015, doi: 10.21307/tp-2015-011
- [7] N. Karagoz, H. İ. Acar, and B. Selcuk, "Pik döküm ve kompozit fren pabucu kullanılan yük vagonunda uzun süreli frenlenme sonucu tekerlekte açığa çıkan ısı dağılımının sayısal analiz metodu ile incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sayı.12, ss.64-72, Tem. 2020, doi:10.47072/demiryolu.746008
- [8] Federal Railroad Administration, Washington, DC, USA. *Effectiveness of wayside detector technologies on train operation safety*. Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://railroads.dot.gov/elibrary/effectiveness-wayside-detector-technologies-train-operation-safety>
- [9] European Railway Agency, England. *Assessment of freight train derailment risk reduction measures: Part A Final Report*. Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.era.europa.eu/system/files/2022/10/DNV%20study%20on%20freight%20train%20derailments.pdf>

- [10] C. Tarawneh, L. Sotelo, A. A. Villareal, N. D. L. Santos, R. Y. Lechtenberg, and R. Jones, "Temperature profiles of railroad tapered roller bearings with defective inner and outer rings, in *Proceedings of the 2018 Joint Rail Conference*, Columbia, USA, 2016
- [11] D. H. Shin, M. Kim, J. S. Kim, B. J. Lee, and J. Lee, "Precise infrared thermometry with considering background radiation for gas turbine air cooling application," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 158, 2020, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106534
- [12] Y. H. Li, X. G. Sun, and G. B. Yuan, "Accurate measuring temperature with infrared thermal imager," *Optics and Precision Engineering*, vol. 9, pp. 1336-1341, 2007
- [13] Y. Zhang, Z. Wang, X. Fu, F. Yan, and T. Kong, "An experimental method for improving temperature measurement accuracy of infrared thermal imager," *Infrared Physics & Technology*, vol. 102, 2019, doi: 10.1016/j.infrared.2019.103020
- [14] F. J. M. Meca, M. M. Quintas, F. J. R. Sanchez, and P. R. Sainz, "Infrared temperature measurement system using photoconductive PbSe sensors without radiation chopping," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 100, pp. 206-213, doi: 10.1016/S0924-4247(02)00069-9

Özgeçmiş



Kürşad GÖKCE

Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimini, İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimini ve Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde doktora eğitimini tamamlamıştır. Endüstriyel otomasyon, demiryolu ve otomotiv sektöründe faaliyet gösteren çeşitli firmalarda elektrik elektronik sistem tasarımı alanında 20 yılı aşkın iş tecrübesi bulunmaktadır. Son 7 yıldır TÜBİTAK RUTE Robotik ve Akıllı Sistemler Bölümünde başuzman araştırmacı ve Proje Yürütücüsü olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: kursad.gokce@tubitak.gov.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.