



Ray Sıcaklığı Takip Sistemleri (RSTS) İçin En Uygun Yerlerin Belirlenmesinde Termal Kameralardan Yararlanılması: Hızlı Analiz Metotları Geliştirilmesi

Ferhat ÇEÇEN¹, Bekir AKTAŞ²

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Göller Bölgesi Teknokent Koordinatörlüğü, Isparta, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

*cecenferhat@sdu.edu.tr

(Alınış/Received: 26.04.2024, Kabul/Accepted: 28.05.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Küresel ısınma ve iklim değişikliği tüm dünyada etkisini artırmaktadır. Bu nedenle modern demiryollarında anlık/sürekli veri sağlayan ray sıcaklığı takip sistemlerinin (RSTS) kullanılması, artık bir gereklilik hâlini almıştır. Ancak söz konusu cihazların yüzlerce kilometrelik demiryolu hat kesimleri içerisinde nerelere konumlandırılacağı konusunda belirsizlikler söz konusudur. Termal kameraların bu alanda fayda sağlayabileceği öngörülmektedir. Bununla birlikte literatürde bu kameraların ray sıcaklığı ölçümünde hangi prosedürlerle kullanılabileceğine dair çalışmalar oldukça yetersizdir. Bu çalışmada konu hakkında detaylı ölçüm ve analizler gerçekleştirilmiş ve ray gövdesinden termal görüntü alınmasının daha uygun olduğu, analizlerinde yansıyan sıcaklık değeri olarak ortam hava sıcaklığı değerinin, ray gövdesi emisyon katsayısı olarak çalışma içerisinde belirlenen ortalama değerin kullanılmasının gerçek ray sıcaklığı değerleri ile örtüşen sonuçlar sağlayabildiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Ray sıcaklığı, Küresel ısınma, İklim değişikliği, Flambaj, Ray burkulması

Use of Thermal Imaging Cameras to Identify Best Locations For Rail Temperature Monitoring Systems (RTMS): Development of Rapid Analysis Methods

Abstract: Global warming and climate change are having an increasing impact around the world. The use of modern Rail Temperature Monitoring Systems (RTMS), which provide instantaneous/continuous data, has thus become a necessity for railways. However, there is uncertainty about where these measuring and monitoring devices will be located on the hundreds of kilometers of railway lines. Thermal cameras are expected to be useful in this area. Yet, there is a lack of studies in the literature on how these cameras can be used for rail temperature measurement. In this study, detailed measurements and analyses have been carried out on the subject and it has been found that it is more appropriate to take thermal images of the rail web, using the ambient air temperature value as the reflected temperature value in the analyses, and the average value of the rail web emission coefficient which is determined in the study can give results that are consistent with the actual rail temperature values.

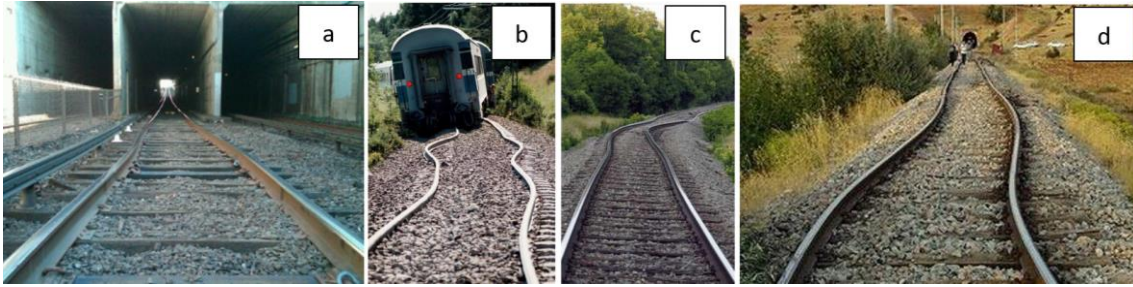
Keywords: Rail temperature, Global warming, Climate change, Sun kink, Rail buckling

1. Giriş

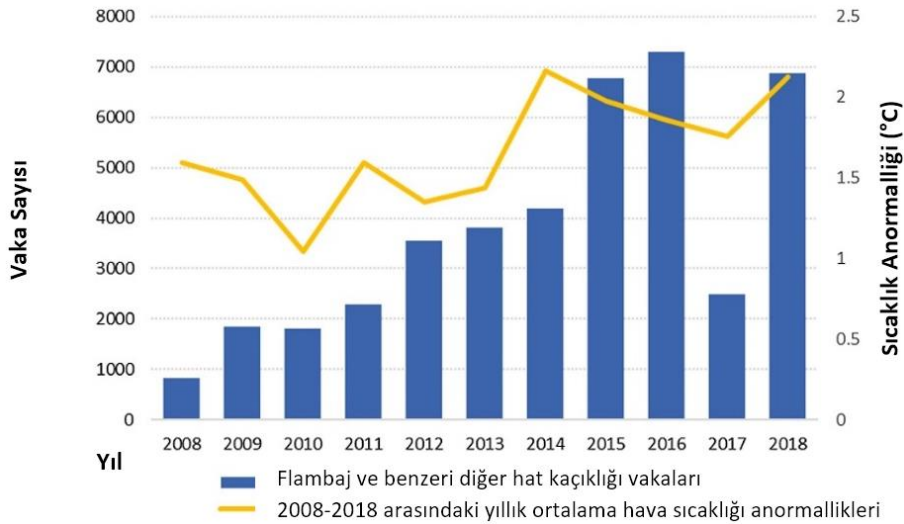
Demiryollarında ray sıcaklığı, seyrüsefer emniyeti açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu kapsamda, demiryollarında karşılaşılan en önemli sorunlardan biri “flambaj”dır [1, 2]. Bu terim, Türkçe demiryolu literatürüne Fransızcadan girmiştir (flambage des rails). Genel olarak, “termal etkiler altında rayların burkulması” olarak tanımlanabilecek flambaj vakaları için İngiltere’de “rail buckling”, Amerika’da ise “sun kink” terimleri kullanılmaktadır. Geçmişte, çoğunlukla çöl ikliminin veya ağır karasal iklimin etkin olduğu lokasyonlarda görülen flambaj hadiseleri, günümüzde küresel ısınma ve iklim değişikliğinin de etkisiyle çok daha geniş bir coğrafyada görülebilmektedir [2]. Şekil 1’de, ülkemizde ve dünyada son yıllarda kayıtlara geçen bazı flambaj örnekleri sunulmuştur [3-6]. Şekil 2’de ise Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde 2008-2018 yılları arasında kayda geçen flambaj hadiseleri çizgi grafikte, yıllar bazında meydana gelen sıcaklık

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, B. Aktaş, “Ray Sıcaklığı Takip Sistemleri (RSTS) için en uygun yerlerin belirlenmesinde termal kameralardan yararlanılması: hızlı analiz metotları geliştirilmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 141-154, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1474099

anormallikleri ise sütunlarla gösterilmektedir [7]. Görüldüğü üzere küresel ısınma ile flambaj hadiseleri yıllar içerisinde orantılı bir şekilde artmıştır. Bu durum AB harici diğer ülkelerde de benzerdir. Amerika’da son 40 yıl içerisinde 2100 adetten fazla flambaj hadisesi kayıtlara geçmiştir [8]. Flambaj riski gelecekte de etkisini artıracak bir sorun olarak karşımızda durmaktadır. Elimizdeki meteorolojik verilere göre, flambaj hadiselerinin her 30 yılda ikiye katlanacağı öngörülmektedir [9]. Flambaj sorununun yaygınlaşmasındaki bir diğer önemli etken, modern raylı sistemlerde, ray birleşimlerinin kaynaklı ray birleşimi metoduyla yapılmasıdır [10]. Geçmişte yaygın olarak kullanılan contalı (cebireli) ray birleşimlerinde, cebire delikleri ile bulonlar arasındaki boşluklar sayesinde, rayların soğuk havalarda büzüşmesine, sıcak havalarda ise genleşmesine imkân tanınıyordu. Ancak modern demiryollarında, contalı birleşimler terk edilmekte ve raylar, birbirine, kilometrelerce mesafe boyunca kaynatılmaktadır. Bu uygulama, yüksek hız, düşük bakım ve üstün konfor sağlamaktadır [10]. Ancak, rayların sıcaklığı, gerilim olmayan sıcaklık (Stress Free Temperature, SFT) değerinin belirli bir miktar üzerine çıktığında, yani Kritik Ray Sıcaklığı değerine (Critical Rail Temperature, CRT) ulaştığında, eğer tekayyüdat (hız kısıtlaması) gibi çeşitli önlemler zamanında alınmamışsa, tren kazalarına neden olabilecek flambaj hadiseleri ile karşılaşılabilir [2, 11]. Eğer SFT değeri doğru belirlenmemiş ve hat inşa/bakım sürecinde gerilim alma işlemi [10] doğru bir şekilde yapılmamışsa, sıcak havalarda aşırı basınç kuvvetleri kaynaklı burkulmalar görüldüğü gibi, soğuk havalarda da aşırı çekme kuvvetleri kaynaklı ray/kaynak kırılmaları söz konusu olmaktadır [11].



Şekil 1. Dünyada son yıllarda meydana gelen çeşitli flambaj örnekleri: a. Amerika (Washington) [3], b. İsviçre [4], c. Kanada [5], d. Türkiye (Kahramanmaraş) [6]



Şekil 2. Avrupa Birliği ülkelerinde 2008-2018 yılları arasında kayda geçen flambaj hadiseleri ile küresel ısınma ilişkisini gösterir grafik [7]

Demiryollarında ray sıcaklığının ölçümü için ülkemizde ve dünyada yakın zamana dek en yaygın kullanılan yöntem; raylara, geçici süreyle, manuel olarak bağlanan/yönlendirilen, mekanik (analog)/dijital termometrelerdir. Bu uygulamada, CRT takibi için, hava sıcaklıklarının yüksek

seyrettiği günlerde, kritik olduğu düşünülen hat kesimlerine, bir veya birkaç görevli gönderilmekte ve önemli trenler geçmeden önce, rayların gölgede kalacak kısmına yerleştirilen/yönlendirilen termometrelerle (mekanik/analog tiplerde yaklaşık 10 dakikalık bekleme süresi ardından) lokal ölçümler alınarak, tekayyüdat uygulanıp uygulanmayacağına karar verilmektedir. Bu uygulama, düşük işletim kapasiteli hat kesimlerinde hâlen devam ettirilmektedir. Ancak modern demiryolu hatlarında, neredeyse aralıksız bir şekilde tren seferleri söz konusu olduğundan, bu uygulamanın devam ettirilmesi oldukça güçleşmiştir. Öte taraftan, günümüzde flambaj hadiseleri, yıl içerisinde daha sık görülebilen, gün içerisinde risk düzeyi oldukça değişebilen ve daha geniş bir coğrafyada etkisini gösterebilen bir problem hâline gelmiştir [2]. Dolayısıyla, bahsedilen bu konvansiyonel prosedür, özellikle yüksek işletim kapasiteli modern demiryolu işletmeciliği şartları altında, birçok açıdan yetersiz kalmıştır.

Günümüzde çeşitli ülkelerde uygulanmaya başlanan ve ülkemizde de çeşitli kurum ve kuruluşlar tarafından Ar-Ge çalışmaları yürütülen modern ölçüm metodu, çeşitli dijital sıcaklık ölçer sensörlerin, çeşitli veri iletişim ağlarına bağlanarak, ray sıcaklıklarının anlık ve sürekli olarak takip edilmesidir. Söz konusu Ray Sıcaklığı Takip Sistemleri (RSTS) bazı ülkelerde oldukça yaygınlaşmış ve özel altyapılar kurulmuştur. Ancak bu yöntemin de çeşitli dezavantajları mevcuttur. Öncelikle, RSTS cihazları, bazı ülkelerde (ABD [12] vb.), internet erişiminin hâlihazırda mevcut olduğu, tren istasyonları yakınındaki lokasyonlarda kurulmaktadır. Söz konusu sistemlerin test aşamalarında bu tarz uygulamalarla yetinilebilir. Ancak kilometrelerce uzunluğundaki demiryolu hat kesimlerinde, mikro ve makro iklimsel koşullar oldukça değişken olduğundan ve dolayısıyla ray sıcaklıkları, hat boyunca oldukça değiştiğinden [2]; flambaj riski yüksek noktaların önceden belirlenmesi ve RSTS cihazlarının bu noktalara monte edilmesi daha güvenilir sonuçlar sağlayacaktır. Kilometrelerce uzunluğundaki demiryolu ağlarında, ray sıcaklıklarının yüksek seyrettiği lokasyonların belirlenebilmesi için ise; geçmişte flambaj hadiseleri yaşanan sicilli hat kesimlerinin yanı sıra, gelecekte benzer hadiselerin yaşanabileceği riskli alanların da belirlenmesi gerekecektir. Bu esnada ise; çok dar bir alanı temsil eden (noktasal ölçüm alan) ölçüm metotları yerine, geniş bir alandaki (global) sıcaklık verilerini, hassas bir şekilde ölçmeye, kaydetmeye ve analiz etmeye imkân tanıyan termal kameraların kullanılması önemli bir avantaj sağlayacaktır. Bu kameralar, görevliler tarafından yaya turnelerde veya dron ile kullanılabilir gibi, yüksek bir noktadan geniş bir hat kesiminin termal kontrolü için de kullanılabilir. Bu cihazlar, İngiltere’de, yolcu trenlerine dahi monte edilmeye başlanmıştır. Şekil 3’te buna dair bir örnek sunulmuştur.



Şekil 3. Seyir halinde hat analizi gerçekleştiren yolcu treni ve termal kamerayla kaydedilen görüntü [13]

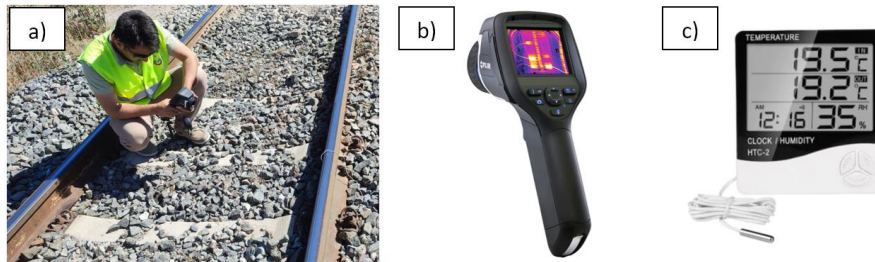
Literatürde demiryollarının termal kameralarla analiz edildiği çalışma sayısı oldukça azdır. Bu konuda erişilebilen ilk kaynak, Ferranti ve ark. (2006)’na aittir [2]. Bu çalışmada, flambaj riski nedeniyle uygulanan uzun mesafeli tekayyüdatların daha kısa mesafelere düşürülebilmesi amacıyla ray sıcaklıklarının seyir halindeki bir tren üzerinden ölçülüp, demiryolu hattının termal haritasının oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışma sonunda, üst yüzeyin rayların en soğuk yüzeyi olduğu çıkarımında bulunulmuş ve ray gövdesinden ölçüm alınması önerilmiştir. Nitekim Şekil 3’te görülen, İngiltere’de 2023 yılında kullanımına başlanılan yolcu trenlerindeki örnek bir termal kamera görüntüsü de (-7,4/+7,9 °C) bunu göstermektedir. Ancak gerçekte ray üst yüzeyinin

gövdesine nazaran çok daha soğuk olması gibi bir durum söz konusu değildir. Nitekim Mirkovic ve ark. (2021) tarafından termokupl sensörlerle yürütülen detaylı ölçümler de bunu göstermektedir [14]. Daha doğru bir yaklaşım şudur ki; ray üst yüzeyinin termal kamera analizlerini olumsuz etkileyen bir karakteri söz konusudur. Ray üst yüzeyinin bu yanıltıcı karakteristiği nedeniyle, Şekil 3’te sunulan, post-modern ölçüm treninin “ray üstünden” aldığı termal ölçümler -demiryolu hattının termal haritasının oluşturulması açısından- yetersiz kalacaktır. Termal kameralarla yürütülen bir diğer çalışma ise Berg ve ark. (2015)’na [15] aittir. Bu çalışmada, termal kamera, tren lokomotifinin ön kısmına monte edilmiş ve demiryolu seyir güzergâhında, seyrüsefer emniyetini tehdit edecek herhangi bir engel mevcut olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Yaman ve Karaköse (2018) [16] ise ray yüzeyindeki anormalliklerin termal kameralarla tespit edilip edilemeyeceğini araştırmışlardır. Bir diğer çalışmada, Stypułkowski (2021) ve ark. [17], termal kameraları, otomatik demiryolu makaslarının ısıtma tertibatlarının kış aylarında doğru bir şekilde çalışıp çalışmadıklarını kontrol etmek amacıyla kullanmışlardır.

Sonuç olarak, demiryollarında ray sıcaklığı ölçümü, seyrüsefer emniyeti açısından kritik bir öneme sahiptir. Konvansiyonel geçici süreli manuel ölçüm yöntemleri ise etkinliğini yitirmiştir. Modern demiryolu işletmeciliğinin ihtiyacı olan ve anlık-sürekli veri sağlayan yeni teknolojilerin (RSTS cihazlarının) kullanılabilmesi için ise, ölçüm cihazlarının konumlandırılacağı en uygun lokasyonların belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla noktasal ölçüm alan mekanik/dijital sıcaklık ölçerler yerine, global ölçüm sağlayan cihazlara ihtiyaç vardır. Termal kameralar bu alanda oldukça faydalı olabilecektir. Ancak mevcut literatürde, termal kameraların ray sıcaklığı ölçümünde hangi prosedürlerle kullanılabilmesine dair çalışmalar, oldukça az sayıda, kapsam olarak yetersiz ve hatta yanıltıcı bilgiler içerebilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmanın amacı, termal kameralarla ray sıcaklığı ölçüm prosedürlerinin belirlenmesi ve mevcut mekanik/dijital termometrelerle ray sıcaklığı ölçümü uygulamalarından çok daha fazla bilgiyi, yüksek hassasiyetle ve daha kısa zamanda elde edebilecek pratik yöntemler ortaya konulmasıdır.

2. Metot

Termal analizler esnasında, Şekil 4.a ve 4.b’de görülen, FLIR E60 termal kamera kullanılmıştır. Üretici firma beyanına göre, bu termal kameranın sıcaklık ölçüm aralığı -20 ile 650 °C, doğruluğu ± 2 °C veya ölçülen değer’in %2’si (hangisi büyükse), kızılötesi çözünürlüğü 320x240 piksel, görüş alanı (FOV) 25°x19° ve uzamsal çözünürlüğü 3,43 mrad’dır. Termal kamerayla alınan görseller, FLIR Tools 6.4 yazılımında analiz edilmiştir. Bu esnada Şekil 4.c’deki HTC-2 Termo-Higrometre de kullanılmıştır. Üretici beyanına göre, cihazdaki dâhili ve hârici (K-tipi) sıcaklık sensörlerinin doğruluğu ± 1 °C, dâhili nem sensörünün doğruluğu ise $\pm 5\%$ ’tir. Cihazdaki dâhili sensörler, ortam iklim parametrelerinin belirlenerek, FLIR Tools yazılımına bilgi girişi amacıyla kullanılmıştır. Cihazın 140 santimetrelik kablosu ucundaki hârici termokupl ise, izole bantla ray yüzeyine yapıştırılarak, FLIR Tools analiz sonuçlarının kontrol edilmesinde ve geriye dönük çözümlene analizi (back-analysis) metoduyla emisyon katsayılarının (emissivity coefficient) belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu katsayı hakkında detaylı bilgiler referansı verilen kaynakta [18] mevcuttur.



Şekil 4. a) Termal kamera ile görüntü alınması, b) FLIR E60 termal kamera, c) HTC-2 termo-higrometre

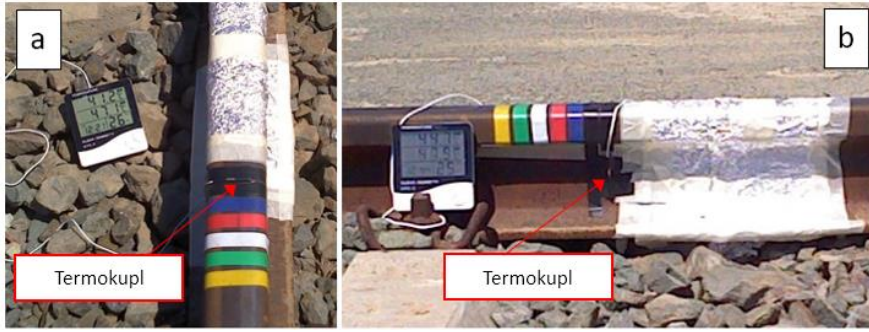
2.1. Yansıyan sıcaklık değerlerinin belirlenmesi için kullanılan metot

Termal analizlerde ihtiyaç duyulan ilk parametre, yansıyan sıcaklık değeridir (reflected temperature). Gerek demiryolu raylarının değişen düzlemlere sahip topolojisi, gerekse ölçüm alan kişinin termal kamerayı tutma açısına bağlı olarak yansıyan sıcaklık değerleri değişmektedir. Bu durum Şekil 5’te tasvir edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, rayların gökyüzüne dönük yüzeylerinden yansıyan sıcaklık, atmosferin soğuk tabakalarından gelen kızılötesi ışınlar nedeniyle genellikle sıfıra yakın veya negatif değerler almakta, ray gövdesi ve paralelindeki düzlemler söz konusu olduğunda ise, termal kamera açısına bağlı olarak, çevredeki çeşitli nesnelerin (balast, travers, diğer ray, ölçüm yapan kişi vs.) sıcaklıklarından etkilenmektedir.



Şekil 5. Termal kamera ile raylardan görüntü alınması esnasında yansıyan sıcaklık değerinin değişkenliği

Bu çalışmada, yansıyan sıcaklık değerinin doğru bir şekilde belirlenmesi için, Şekil 6’da görülen, “buruşturulmuş alüminyum folyo ile kaplama” metodu kullanılmıştır. Bu esnada da yaklaşık 30 cm genişliğinde, yaklaşık 10 mikron kalınlığında, tek kat folyo kullanılmıştır. Bu metot, yansıyan sıcaklık değerlerinin belirlenmesi için çeşitli kaynaklarda [18] önerilen pratik bir metottur. Ancak, ray sıcaklığı ölçümünde kullanıldığı herhangi bir çalışmaya literatürde denk gelinmemiştir. Alüminyum folyo, çevreden gelen kızılötesi ışınları, neredeyse tamamen yansıtan bir karaktere sahiptir (emisyon katsayısı $\leq 0,1$). Buruşturulup düzeltilmesindeki mantalite ise çevre koşullarını daha iyi temsil edebilmesidir. Ayrıca ölçüm yapılacak nesnenin (bu örnekte rayın) geometrik formunu alacak şekilde kaplama yapılabilmesi bir diğer avantajıdır. Tüm bu özellikleri sayesinde, folyo kaplı olmayan paralel düzlemlerden yansıyan sıcaklık değerlerinin olabildiğince gerçeğe yakın bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır. Ancak ölçüm alınırken mümkün mertebe geniş bir alanın sıcaklık değerlerinin ortalamasının alınmasına ve (kamera) ölçüm açısının mümkün mertebe değiştirilmemesine dikkat edilmeli ve yazılım analizinde, emisyon katsayısı 1,00 girilerek analiz yapılmalıdır. Alüminyum folyonun emisyon katsayısı oldukça düşük (sıfıra yakın) olmasına rağmen, yazılıma 1,00 değeri girilmesinin nedeni, alüminyum folyonun değil, çevreden yansıyan sıcaklığın tespit edilmeye çalışılmasıdır.



Şekil 6. Yansıyan sıcaklık ve emisyon katsayısı değerlerinin belirlenmesi için kullanılan ölçüm düzeneği: a) Ray üst yüzeyine, b) Ray gövdesinin orta yüksekliğine termokupl bağlanarak termal görüntü alınması

Bu çalışma kapsamında, analiz yapılacak konuya bağlı olarak, bazen ray üstünden (Şekil 6.a), bazen de ray gövdesinin orta yüksekliğinden (Şekil 6.b) termal ölçümler alınmıştır. Ray üstündeki ve gövdesindeki yüzeylerin düzlemleri farklı olduğundan, her iki yüzeyden de farklı açılarda termal görüntüler alınmıştır. Bu sayede farklı açılardan ölçüm sonuçlarına etkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Termal görüntüler bilgisayara aktarıldıktan sonra, FLIR Tools yazılımında “analiz alanları” belirlenmiş ve bu alan içerisindeki tüm piksellerin okuduğu sıcaklık değerlerinin ortalaması kullanılmıştır. Bu esnada FLIR Tools yazılımına girilen parametreler ise şu şekildedir:

- Emisyon katsayısı : 1,00
- Yansıyan sıcaklık : 0 °C (emisyon 1.00 olduğundan herhangi bir değer girilebilir)
- Ölçüm mesafesi : 2,0 m
- Ortam hava sıcaklığı : 27.0 °C (HTC-2 dâhili sıcaklık sensörüyle ölçülmüştür)
- Nem : %25 (HTC-2 dâhili nem sensörüyle ölçülmüştür)

Ray üst yüzeyinden ve gövdesinden, çeşitli açılarla alınan termal görsellerin, yukarıdaki yazılım ayarları ile elde edilen analiz sonuçları ise, “3. Bulgular” bölümünde, yorumlanarak sunulmuştur.

2.2. Emisyon katsayılarının belirlenmesi için kullanılan metot

Termal kameralar ile kaydedilen görüntülerin analizinde kullanılan bir diğer önemli parametre emisyon katsayısıdır [18]. Bu amaçla Şekil 6’da görülen “elektrik izolasyon bandı ile kaplama” metodu kullanılmıştır. Bu metot, emisyon katsayısının belirlenmesi için çeşitli kaynaklarda önerilen [18] pratik bir metottur. Bununla birlikte, erişilebilen literatür kaynaklarında, ray sıcaklığı ölçümlerinde kullanıldığı herhangi bir çalışmaya denk gelinmemiştir. Öte taraftan, bu metodun kullanılabilmesi için termal emisyon katsayısı bilinen izolasyon bantları kullanılmaktadır. Ancak bu bantların hem ulaşılabilirliği zor hem pahalı hem de hassas bilimsel çalışmalar için yetersiz görülebileceğinden, bu çalışmada, piyasada rahatlıkla bulunabilen, çeşitli renklerdeki basit elektrikçi bantları (izole bantlar) kullanılmıştır. Bu nedenle, öncelikle kullanılacak elektrik bantlarının emisyon katsayıları, hassas bir şekilde belirlenmiş, ardından ray sıcaklığına dair ölçümlerde kullanılmıştır. Bu kolaylığın sağlanabilmesi için ise, yansıyan sıcaklık belirlemelerinde kullanılan, Şekil 6’daki termo-higrometrenin kullanılması yeterli gelmektedir. Şöyle ki, bu cihazın hârici termokupl sensörü kullanılarak, ölçüm yapılacak ray yüzeyinin sıcaklık değeri ölçülmüştür. Ardından termal kamera ile ilgili yüzeyin termal görüntüsü kaydedilerek FLIR Tools yazılımında “geriye dönük çözümleme analizine” (back analysis) tâbi tutulmuştur. Yani termal görüntüdeki sıcaklık değerinin, termo-higrometre ile ölçülen sıcaklık değeri ile örtüşmesini sağlayan emisyon katsayısı, deneme-yanılma metoduyla, farklı emisyon katsayıları girilerek, belirlenmiştir. Burada dikkat gerektiren bir husus, yansıyan sıcaklık değeri, rayların farklı düzlemlerinde değiştiği gibi, emisyon katsayısı da değişkenlik göstermektedir. Bunun nedeni, ray yüzeylerinin “korozyon” ve “işletim” kaynaklı nedenlerle değişken karakteristikler göstermesidir. Konunun daha iyi anlaşılması için Şekil 7 hazırlanmıştır.



Şekil 7. Ray emisyon katsayılarının işletim sıklığına ve korozyon düzeyine bağlı olarak değişkenliği

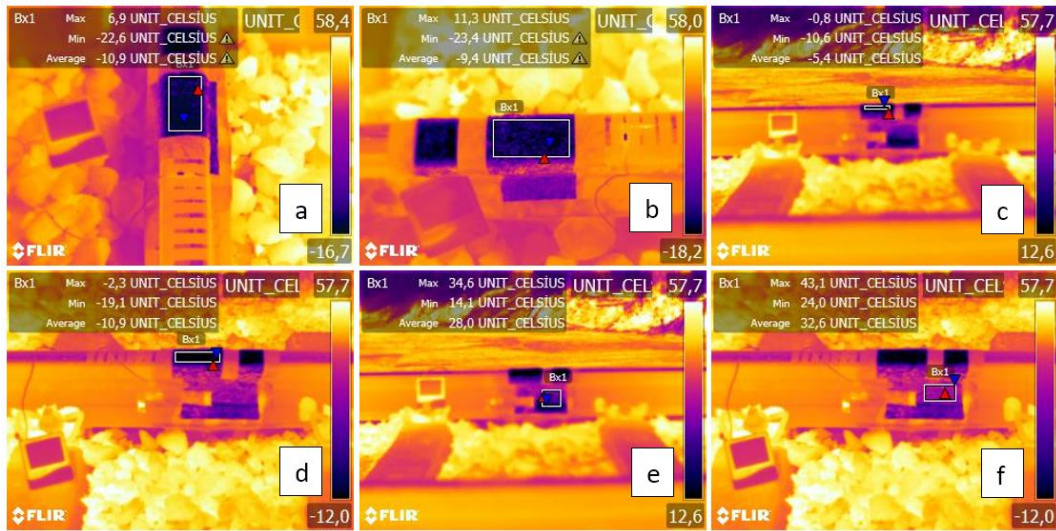
Bilindiği üzere demiryollarında kullanılan raylar, fabrikalarda imal edildiklerinde, yüzeylerinde korozyon tabakası mevcut değildir ve tüm kesitlerde homojen ve ortalama bir emisyon katsayısı söz konusudur (Şekil 7.b). Bu rayların derhal demiryoluna döşenip, hattın kısa sürede işletime açılması halinde, Şekil 7.c’de tasvir edilen bir yapı ortaya çıkmaktadır. Yani ray yüzeyleri henüz korozyon tabakası ile kaplanmadan, ray mantarının, tren tekerleri ile etkileşimde bulunduğu üst-iç yüzeyleri (sürtünme ve aşınma nedeniyle) cilâlanmaktadır (parlak bir yüzeye dönüşmektedir). Bu cilâlı yüzeylerin emisyon katsayısı (alüminyum folyo gibi) oldukça düşük bir değere sahiptir. Şekil 7.b ve 7.c’de tasvir edilen durumlar, demiryollarında, nispeten seyrek görülen hâllerdir. Gerçek hayatta, demiryollarında kullanılacak raylar, çeşitli muayene, kabul, sevkiyat ve ferfiyat süreleri akabinde, çoğunlukla tüm yüzeyleri korozyona maruz kaldıktan sonra yola döşenmekte veya hatta kullanılırken birkaç yıl içinde korozyon tabakası ile kaplanmaktadır (Şekil 7.a). Korozyon ise emisyon katsayısını artıran bir faktördür. Bu nedenle henüz işletime açılmamış, eski raylarla inşa edilen demiryolu hatlarında veya işletime kapatılmış eski hatlarda tüm ray yüzeyleri korozyon (demir oksit) tabakasıyla kaplı ve emisyon katsayısı tüm yüzeylerde yaklaşık olarak eşit ve yüksek hâldedir (Şekil 7.a). Bu demiryolu hatları, işletime açıldıktan sonra ise, ray mantarının üst-iç yüzeyi, yukarıda açıklandığı şekilde zamanla aşınıp cilâlanmakta ve emisyon katsayıları düşmektedir (Şekil 7.d). Şekil 2’deki ölçüm treninin, ray üst yüzeyini, ray gövdesinden çok daha düşük bir sıcaklıkta ölçmesinin nedeni de bu olup, ray üst yüzeyinin bu yanıtıcı karakteristiği nedeniyle literatürdeki önceki çalışmada da [2] ray üst yüzeyinin gövdesinden çok daha soğuk olduğu çıkarımında bulunulmuştur. Konuya ilişkin bulgular ilerleyen bölümde sunulmuştur.

3. Bulgular

3.1. Yansıyan sıcaklık değerinin belirlenmesi ve ölçüm açısının etkisi

Bu bölümde, yansıyan sıcaklık ölçümlerine ilişkin analiz sonuçları incelenmiştir. Önceki bölümde açıklanan şekilde farklı açılardan alınan termal görüntülerin analiz sonuçları, Şekil 8’de

sunulmuştur. Bu şekilde görüldüğü üzere, ölçüm yapılan açıya bağlı olarak yansıyan sıcaklık değerleri az-çok değişmektedir. Örneğin ray mantarı üst yüzeyi için; Şekil 8.a'daki açıyla yapılan ölçümde ortalama (Bx1-Average) $-10.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Celcius) sıcaklık belirlenmiştir. Bu değer, Şekil 5'te izah edildiği üzere, atmosferin yüksek ve soğuk tabakalarından gelen kızılötesi ışınların baskınlığını göstermektedir. Aynı analiz alanında, bu kez ray düzlemine dik istikamette (Şekil 8.b'de görüldüğü şekilde) ölçüm alınmış ve bu kez ortalama $-9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ölçülmüştür. Bu değer de negatif olmasına rağmen, farklı açıyla alındığı için önceki değerden yaklaşık $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ farklılık söz konusu olmuştur. Şekil 8.c ve 8.d ise daha yatık açılarla elde edilen analiz sonuçları görülmektedir ($-5,4$ ve $-10,9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Görüldüğü üzere ölçüm açısı, ray üstünden alınan ölçümleri az-çok etkilemektedir. Ancak ray üstünden alınan tüm analiz sonuçlarının, yüksek atmosfer tabakalarından etkilendiği bariz bir şekilde ortadadır. Ölçümlerin alındığı Ağustos 2023 ayında ortam hava sıcaklığı $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarında olmasına rağmen, ray yüzeyinden yansıyan sıcaklık belirlemelerinin tümü negatif değerlere sahiptir. Ölçüm açısının sonuçları etkilemesi, kısmen de olsa, ray gövdesi için yapılan ölçümler için de geçerlidir. Şekil 8.e ve 8.f'de, bu bölgeye ait farklı açılarla ölçülen 2 farklı termal görüntü sunulmakta olup, ortalama sıcaklıklar sırasıyla $28.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü üzere; ray gövdesinde, pozitif ve ortam sıcaklığına yakın ($27,0\text{ }^{\circ}\text{C}$) sonuçlar elde edilmiştir. Bunun nedeni, ray gövdesi düzleminin atmosferin yüksek tabakalarına değil, aksine yeryüzüne (sırasıyla balast, traversler, karşı paralel ray, ölçüm yapan kişi, katener direkleri, ağaçlar, binalar, istinat/şev yapıları, tepeler, dağlar vs.) dönük olmasından kaynaklanmaktadır. Tüm bu nesnelerin sıcaklıkları az-çok farklı olmakla birlikte, "ortalamaları" ortam hava sıcaklığına yakındır veya en azından yüksek atmosfer katmanları kadar farklı değildir.

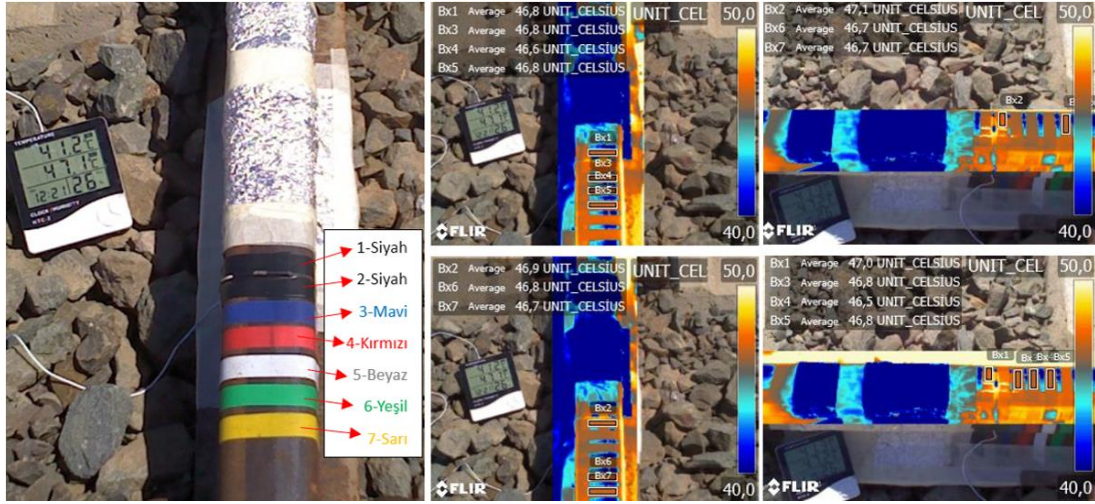


Şekil 8. Alüminyum folyo kullanılarak ray üst yüzeyi ve gövdesinde ölçülen yansıyan sıcaklık değerleri

Sonuç olarak, buruşturulmuş alüminyum folyo kaplaması ile yansıyan sıcaklık belirlemesi, demiryollarında ray sıcaklığının detaylı analizlerinde kullanılabilir bir metottur. Ancak özellikle sık seferler düzenlenen hat kesimlerinde ve/veya uzaktan kontrol edilen ölçümlerde uygulanması mümkün olmayabilecektir. Ray üst yüzeyinin emisyon katsayısı (cilâlanma nedeniyle) hat boyunca değişken ve genel itibarıyla oldukça düşük olduğundan ve düzlemsel olarak yüksek atmosfer tabakalarına dönük olduğundan, daha pratik bir yöntem önerilmesi mümkün olmamıştır. Ancak, ray gövdesine ait yansıyan sıcaklık değerinin, alüminyum folyo kullanılmadan, yaklaşık olarak tahmin edilmesi mümkündür. Daha önce değinildiği üzere; bu sıcaklık, ortam hava sıcaklığı ile yakından ilişkilidir. Bu değer tespiti ise oldukça kolaydır. Dolayısıyla ivedilik arz eden saha ölçümlerinde, ray gövdesinden (rail web) ölçüm alınması şartıyla, yansıyan sıcaklık değeri olarak, ortam hava sıcaklığının kullanılması, gerçeğe yakın sonuçlar sağlayabilecek pratik bir yöntem olarak not edilmelidir.

3.2. Farklı renkteki izole bantların emisyon katsayılarının belirlenmesi

Yansıyan sıcaklık değerlerinin belirlenmesinden sonra sıra, kullanılacak bantların emisyon katsayılarının belirlenmesine gelmektedir. Bu amaçla hazırlanan ölçüm düzeneği Şekil 6 ve 9'da sunulmuş olup, görüldüğü üzere 6 farklı renkte (siyah renk farklı markada 2 adet olmak üzere, toplamda 7 adet) elektrikçi bandı (izole bant) kullanılmıştır. Kullanılan bantların kalınlıkları yaklaşık aynıdır ve tek kat olarak uygulanmıştır. Edinilen tecrübeler göre, yapıştırma esnasında ray ile bant arasında hava boşluğu kalmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca bantlar yapıştırıldıktan sonra bir miktar beklenerek (yaklaşık 10 dk) ray sıcaklığı ile eşitlenmesine imkân tanınmalıdır.



Şekil 9. İzole bantların emisyon katsayılarının belirlenmesi için hazırlanan düzenek ve analiz sonuçları

Şekil 9'daki termal görüntülerde, renk paleti dar bir sıcaklık bandı (40-50 °C) ile kısıtlanmış ve dijital görüntü içinde termal görüntü (picture in picture) modu uygulanmıştır. Bu şekilde, sonuçların daha anlaşılır olması amaçlanmıştır. Ölçümlerde, hârici termokupl, 1 ve 2 numaralı siyah bantların arasında kalacak şekilde raya yapıştırılmıştır. Bunun akabinde, her bir bant için daha önce alüminyum folyo için yapıldığı gibi dikdörtgen analiz alanları belirlenmiştir. Şekilde görülebilen bu işaretli "analiz alanlarındaki" en düşük, en yüksek ve ortalama (average) sıcaklık değerlerinin belirlenmesi için FLIR Tools yazılımına girilen parametreler ise şu şekildedir:

- Yazılıma girilen emisyon katsayıları: 0,90↔0,99,
- Yansıyan sıcaklık: Şekil 9'da raya dik ölçüm açısı için -10,9 °C, raya paralel/yatay ölçüm açısı için ise -9,4 °C (önceki bölümde belirlenen ve Şekil 8'de geçen değerler),
- Ölçüm mesafesi: 2,0 m,
- Ortam hava sıcaklığı: 27,0 °C (Termo-higrometrenin dâhili sensörüyle belirlenmiştir),
- Nem: %26 (Termo-higrometrenin dâhili nem sensörüyle belirlenmiştir).

Geriye dönük çözümlenme analizi akabinde (0,90 ile 0,99 arasında değişen emisyon katsayıları için termo-higrometre ölçümleriyle en yakın örtüşmeyi sağladığı) belirlenen değerler şöyledir:

- Siyah bantların emisyon katsayısı: 0,95 (Şekil 9, No.1/2: 46,8 °C (dikey), 47,0 °C (yatay)),
- Mavi bant emisyon katsayısı: 0,95 (Şekil 9, No.3, 46,8 °C (dikey), 46,8 °C (yatay)),
- Kırmızı bant emisyon katsayısı: 0,95 (Şekil 9, No.4, 46,6 °C (dikey), 46,5 °C (yatay)),
- Beyaz bant emisyon katsayısı: 0,95 (Şekil 9, No.5, 46,8 °C (dikey), 46,8 °C (yatay)),
- Yeşil bant emisyon katsayısı: 0,96 (Şekil 9, No.6, 46,8 °C (dikey), 46,7 °C (yatay)),
- Sarı bant emisyon katsayısı: 0,96 (Şekil 9, No.7, 46,7 °C (dikey), 46,7 °C (yatay)).

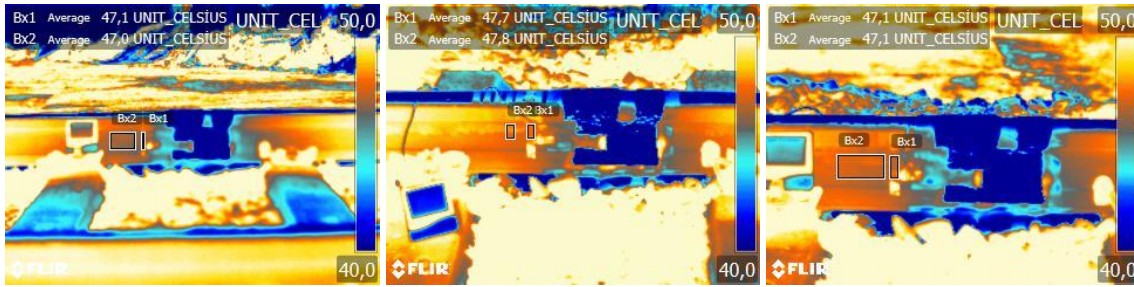
Tespit edilen bu değerler, çeşitli kaynaklarda 3M type 88 siyah vinil elektrikçi bandı için verilen 0,96 emisyon katsayısı ile benzer/eşittir [18]. Sonuçta, yansıyan sıcaklık değerleri, emisyon katsayısından etkilenmemekle birlikte, emisyon katsayısı yüksek bir nesnenin (izole bant gibi) termal kamerayla ölçülen sıcaklık değerinin, yansıyan sıcaklık değerinden etkilenme düzeyi azalmaktadır. Dolayısıyla, farklı renklerdeki izole bantlar, üzerine yapıştırıldığı ray ile aynı sıcaklığa eriştiğinde, aynı dalga boyunda kızılötesi ışın yaymakta ve termal kamerada uygulanan renk paletinde aynı renkle kodlanmaktadır (Şekil 8, 9).

3.3. Ray gövdesinin emisyon katsayısının belirlenmesi

Bu bölüm kapsamında TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası iltisak hattında (S49 tipi raylar kullanılan) ve Sivas-Kayseri demiryolu hattında (UIC 60 E1 tipi raylar kullanılan) termal görüntüler alınmıştır. Bu görüntüler alınırken, HTC-2 tipi termo-higrometrenin hârici termokupl sensörü, önceki bölümde emisyon katsayısı belirlenen siyah izole bantla ray gövde yüzeylerine yapıştırılmış, bu şekilde alınan termal görüntüler FLIR Tools yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu suretle, bir yandan dijital sensörle temaslı sıcaklık okunurken, bir yandan da termal görüntüdeki iki farklı analiz alanındaki sıcaklık, senkronize bir şekilde kaydedilebilmiştir. Bu iki analiz alanından ilki, termokupl sensörünün ray yüzeyine yapıştırılmasında kullanılan ve emisyon katsayısı önceki bölümde belirlenen izole bantın üzerinde (Bx1) belirlenmiştir. Diğeri ise sensörün hemen yakınındaki (aynı hizadaki) çıplak ray gövdesi üzerinde (Bx2) işaretlenmiştir. Analizler esnasında FLIR Tools yazılımına girilen parametreler ise şu şekildedir:

- İzole bant üzerindeki alan (Bx1) için tanımlanan emisyon katsayısı: 0,95,
- Yansıyan sıcaklık: 27,0 °C (ortam hava sıcaklığı ile aynı değer kullanılmıştır),
- Ölçüm mesafesi: 2,0 m,
- Hava sıcaklığı: 27,0 °C (Termo-higrometrenin dâhili sensörüyle tespit edilmiştir),
- Nem: %25 (Termo-higrometrenin dâhili nem sensörüyle tespit edilmiştir).

Bu doğrultuda, termal kamera ile farklı açılardan ölçülen ve yukarıdaki analiz ayarları kullanılarak elde edilen termal görüntüler Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. Ray gövdesi emisyon katsayısının belirlenmesi için alınan termal görüntüler (Ağustos 2023)

Görüldüğü üzere, izole bant üzerinden ölçülen sıcaklık değerleri (Bx1 için) 47,1, 47,7 ve 47,1 °C olarak değişmektedir. Bu değerler, Şekil 6'daki termo-higrometre ile ölçülen (ekrandan görülen) 47,5 °C değeri ile büyük oranda örtüşmektedir. Dolayısıyla önceki bölümde, siyah izole bant için belirlenen 0,95'lik emisyon katsayısının doğruluğu tekrar teyit edilmiş olmaktadır. Geriye kalan bilinmeyen, ray gövdesinin emisyon katsayısıdır. Bu amaçla, önceki bölümlerdeki gibi geriye dönük çözümleme analizi yürütülmüş ve Şekil 10'daki termal görüntülerdeki Bx2 alanları için FLIR Tools yazılımı tarafından belirlenen sıcaklık değerlerinin, termo-higrometre ile ölçülen sıcaklık değeri ile örtüşmesini sağlayan emisyon katsayısı belirlenmiştir. Belirlenen değer 0,95 olup, korozyon tabakası ile kaplı ray gövdesinin, izole bantlar ile yaklaşık eşit bir emisyon katsayısı olduğu anlaşılmıştır. Tespit edilen bu değer, çeşitli kaynaklarda, yüksek derecede korozyona uğramış demir/çelik malzemeler için verilen 0,96'lık emisyon katsayısı ile benzerdir [18]. Bu

katsayı ile Bx2 alanları için belirlenen sıcaklık değerleri, Şekil 10'dan görüldüğü üzere 47,0, 47,8 ve 47,1 °C olarak sonuçlanmaktadır. Bu değerlerin ortalaması 47,3 °C olup, termo-higrometre ile ölçülen 47,5 °C değeri ile büyük oranda örtüşmektedir. Dolayısıyla ivedilik arz eden saha ölçümlerinde, yansıyan sıcaklık olarak ortam sıcaklığının kullanılması ve ray gövdesi emisyon katsayısı olarak 0,95 değerinin kullanılması, ayrıca çeşitli açılardan birkaç ölçüm alınarak ortalamasının kullanılması, gerçek değerlerle yüksek oranda örtüşen sonuçlar sağlamaktadır.

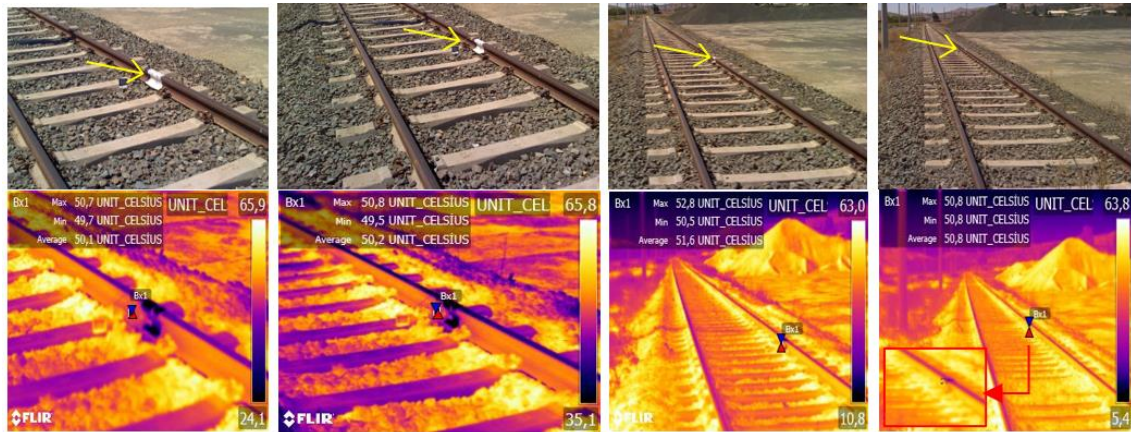
Bu bölümün son aşamasında, önerilen ölçüm-analiz prosedürünün, farklı iklim koşullarında (kış aylarında) da geçerli olup olmadığı kontrol edilmiştir. Şekil 11'de analiz sonuçları sunulmuş olup, ray sıcaklığı termo-higrometrenin hârici sensörü ile 5,0 °C olarak ölçüldüğünde, termal analiz sonuçlarının ortalama 4,5 °C olarak sonuçlandığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla, önerilen ölçüm ve analiz metodunun, kış aylarında da kullanılabileceği tespit edilmiştir.



Şekil 11. Önerilen ölçüm ve analiz prosedürünün ilave kontrolü için alınan termal görüntüler (Ocak 2024)

3.4. Ölçüm mesafesinin sonuçlara etkisi

Saha ölçümlerinde pratiklik sağlayacak bir diğer husus, uzak mesafelerden ölçüm alınabilmesidir (manuel veya bilgisayar kontrollü). Bu amaçla; S49 tipi (UIC 60 E1/E2 tipi raylardan daha küçük boyutlu) raylar kullanılan bir demiryolu hattında, 2 metre mesafeden termo-higrometre doğrulamalı sıcaklık ölçümü yapılmış ve ray gövdesinin 50,3 °C sıcaklığa sahip olduğu belirlenmiştir (yansıyan sıcaklık=ortam sıcaklığı=28,0 °C, ray gövdesi emisyon katsayısı: 0,95). Bu lokasyondan, sırasıyla yaklaşık 5, 10, 15 ve 20 metre mesafeden dijital ve termal görüntüler alınıp, aynı ayarlar kullanılarak elde edilen termal analiz sonuçları Şekil 12'de sunulmuştur.



Şekil 12. Ray gövdesi sıcaklığının sırasıyla yaklaşık 5, 10, 15 ve 20 metre mesafeden ölçüm sonuçları

Analiz sonuçlarına göre; 5, 10 ve 15 metrelik mesafelerde, analiz alanı (Bx kodu ile verilen dikdörtgen alanların ortalama) sıcaklığı, birçok termal dedektör piksel ile belirlenirken, 20 metre mesafede tek bir (termal dedektör) pikselin söz konusu olduğu görülmüş ve bu mesafeden sonra ölçüm alınmamıştır. Çünkü bir sonraki mesafede alınacak ölçüm, ray gövdesi hariç diğer nesnelere de içine almaktadır. Analizler sonucunda belirlenen sıcaklık değerleri mesafeye göre

sıralanırsa; 50,1 °C, 50,2 °C, 51,6 °C ve 50,8 °C olarak sonuçlanmıştır. Buna göre kullanılan termal kamera ve analiz ayarları ile her iki yönde (20 metre x 2 yön) toplamda 40 metrelik bir hat kesiminin ray sıcaklığı, hareket etmeksizin, oldukça hassas bir şekilde tespit edilebilmektedir. Görüldüğü üzere, ölçüm mesafesi arttıkça, ölçüm açısı ve dolayısıyla yansıyan sıcaklık değeri değişmesine rağmen, bu şekilde hassas sonuçlar alınabilmektedir. Bu durum, önerilen pratik yöntemin saha ölçüm ve analizlerine uygunluğunu göstermektedir. Şunu belirtmek gerekir ki, termal kameralarda kullanılan lensler, teleskobik lenslerle değiştirilerek ve/veya piksel çözünürlüğü artırılarak, hat geometrisinin ve arazi topolojisinin elverdiği nispette, yüzlerce metre uzaktaki ray sıcaklığı, hassas bir şekilde belirlenebilir. Ancak bu bölümde araştırılmak istenen, FLIR E60 gibi düşük maliyetli, ortalama teknik karakteristiklere sahip bir termal kamera ve cihaz üzerindeki genel kullanım amaçlı lens (25° x 19°) değiştirilmeksizin, ne kadar uzaktaki ray sıcaklığının doğru bir şekilde okunabileceğinin, gerçek saha koşullarında belirlenmesidir.

4. Sonuç

Demiryollarında ray sıcaklığı ölçümü, geçmişten günümüze önemini koruyan bir konudur. Çağımızda ray sıcaklığı ölçümü için artık anlık-sürekli veri sağlayan yeni nesil teknolojilerin kullanılması gerekmekte, birçok ülkede bu alanda önemli yatırımlar yapılmaktadır. Ancak söz konusu cihazların demiryolu güzergâhı boyunca nerelere konumlandırılacağı belirlenmesinde pratik yöntemlere ihtiyaç vardır. Bu bağlamda termal kameraların önemli bir potansiyel avantajı söz konusudur. Ancak literatürde, termal kameraların ray sıcaklığı ölçümünde hangi prosedürlerle kullanılabilmesine dair çalışmalar oldukça yetersizdir. Bu çalışmanın amacı, termal kameralarla ray sıcaklığı ölçüm prosedürlerinin ortaya konulması ve mevcut mekanik/dijital termometrelerle ray sıcaklığı ölçümü uygulamalarından çok daha fazla bilgiyi, yüksek hassasiyetle ve daha kısa zamanda elde edebilecek pratik yöntemler ortaya konulmasıdır. Çalışma kapsamında, TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası iltisak hattında ve Sivas-Kayseri demiryolu hattında termal analizler yürütülmüştür. Bu bağlamda, literatürde bir ilk olarak, alüminyum folyo ile ray yüzeyinden yansıyan sıcaklık değerleri, izole bantlar ile de ray emisyon katsayıları belirlenmesi yapılmıştır. Yürütülen ölçüm ve analizler neticesinde; ivedilik gerektiren saha ölçümlerinde, ray gövdesinden termal görüntü alınması ve analizlerinde yansıyan sıcaklık değeri olarak ortam hava sıcaklığı değerinin, ray gövdesi emisyon katsayısı olarak ise (korozyon tabakası ile kaplı ise) 0,95 değerinin kullanılmasının gerçek değerler ile örtüşen sonuçlar sağlayabildiği belirlenmiştir. Bu kameralar, görevliler tarafından yaya turnelerde veya dronlarla kullanılabilmesi gibi, yüksek bir noktadan geniş bir hat kesiminin termal kontrolü için de kullanılabilir. Hatta, bazı ülkelerde, ölçüm trenlerine dahi monte edilmiş durumdadır. Gelecekte çalışmaların bu yönde ilerletilmesi ve geliştirilen metodolojiyle seyir halinde ölçümler gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmalardaki katkılarından dolayı TCDD 4. Bölge Müdür Yrd. Sn. Suat OCAK'a, Yol Bak. Onr. Şefi ve Müh. Sn. Erdal MELEMEZ'e, Yol Servis Müd. Müh. Sn. Ahmet ELMA ve Ali PAMUKÇU'ya, TCDD Sivas Beton Trv. Fab. Müd. Yrd. Sn. Fatih ÖZALTIN'a ve Bak. Onr. Grup Müd. Sn. Ahmet DOĞAN'a teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynakça

- [1] N T. C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, Türkiye. Raylı Sistemler Teknolojisi: Demiryolu İnşaatı. (2011). Accessed: 10.01.2024. [Online]. Available: https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Demir%20Yolu%20%C4%B0n%C5%9Faat%C4%B1.pdf
- [2] E. Ferranti, L. Chapman, C. Lowe, S. McCulloch, D. Jaroszweski, A. Quinn, "Heat-related failures on southeast England's railway network: Insights and implications for heat risk management," *Wea. Climate Soc.*, vol. 8, pp. 177–191, 2016, doi: <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-15-0068.1>

- [3] PEBS News Hour, “Heat Wave Causes Kinks in Rail Tracks,” 2010. [Online]. Available: <https://www.pbs.org/newshour/world/heat-wave-causes-kinks-in-rail-tracks>
- [4] K. Dobney, “Quantifying the effects of an increasingly warmer climate with a view to improving the resilience of Great Britain's railway network: Is a new stressing regime the answer?,” PhD Thesis, University of Birmingham, Department of Engineering, School of Civil Engineering, 2010
- [5] Transportation Safety Board of Canada, “Railway Investigation Report R02M0050,” 2002. [Online]. Available: <https://www.bst.gc.ca/eng/rapports-reports/rail/2002/r02m0050/r02m0050.html>
- [6] CNN Türk, “Sıcaktan tren rayları bile genleşti!,” 2010. [Online]. Available: <https://www.cnnturk.com/turkiye/sicaktan-tren-raylari-bile-genlesti-11-12-2018?page=1>
- [7] I. V. Sanchis, R. I. Franco, P. M. Fernandez, P. S. Zuriaga, J. B. F. Torres, “Risk of increasing temperature due to climate change on highspeed rail network in Spain,” *Transportation Research Part D*, vol. 82, ID: 102312, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102312>
- [8] Climate Central, “Derailments May Increase as 'Sun Kinks' Buckle Tracks,” 2014. [Online]. Available: <https://www.climatecentral.org/news/climate-change-warp-railroad-tracks-sun-kinks-17470>
- [9] K. Dobney, C. J. Baker, L. Chapman, A. D. Quinn, “The future cost to the United Kingdom’s railway network of heat-related delays and buckles caused by the predicted increase in high summer temperatures owing to climate change,” *Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 224 (1), pp. 25-34, 2009, doi: <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT292>
- [10] T. C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, Türkiye. Raylı Sistemler Teknolojisi: UKR (Uzun Kaynaklı Ray). (2013). Accessed: 10.01.2024. [Online]. Available: [https://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/UKR%20\(Uzun%20Kaynaklı%20C4%B1%20Ray\).pdf](https://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/UKR%20(Uzun%20Kaynaklı%20C4%B1%20Ray).pdf)
- [11] B. Işık, A. Cebeci, “Eddy-current fren sisteminin Türkiye’deki yüksek hızlı demiryolu hatları ile uyumunun analizi,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 11, pp. 86-97, Ocak 2020.
- [12] AMTRAK, “Weather & Rail Temperature Monitoring System,” [Online]. Available: <https://railtemp.amtrak.com/index.jsp> [Accessed 10.01.2024]
- [13] Railway Gazette International, “Northern Intelligent Train rail infrastructure monitoring demonstrator,” 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=wErsctKhcAs> [Accessed 10.01.2024]
- [14] N. Mirkovic, L. Brajovic, Z. Popovic, G. Todorovic, L. Lazarevic, M. Petrovic, “Determination of temperature stresses in CWR based on measured rail surface temperatures,” *Construction and Building Materials*, vol. 284, ID: 122713
- [15] A. Berg., K. Öfjall, J. Ahlberg, M. Felsberg, “Detecting rails and obstacles using a train-mounted thermal camera,” *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9127, 2015
- [16] O. Yaman, M. Karaköse, “Complex fuzzy automata based fault detection approach using thermal images in railways,” in *International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*, Malatya, Turkey, 28-30 September 2018, pp. 1-5
- [17] K. Stypułkowski, P. Gołda, K. Lewczuk, J. Tomaszewska, “Monitoring system for railway infrastructure elements based on thermal imaging analysis,” *Sensors*, vol. 21, ID: 3819, 2021
- [18] FILIR, Online documentation for FLIR Ex series, Reference documentation, Thermography (English), Accessed: 10.01.2024. [Online]. Available: https://support.flir.com/DSDownload/Assets/T810442-en-US_A4.pdf [Online]:

Özgeçmiş



Ferhat ÇEÇEN

TCDD’de geçen 16 yıllık hizmeti akabinde, Süleyman Demirel Üniversitesinde Dr. Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Demiryolu termal analizleri ve milli demiryolu traversleri geliştirilmesi konulu araştırmaları devam etmektedir.
E-Posta: cecenferhat@sdu.edu.tr

**Bekir AKTAŞ**

Doktora Eđitimini Süleyman Demirel Üniversitesi'nde tamamlayan yazar, Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalında öğretim üyesidir. Ulaştırma alanında yerli ve yabancı dergilerde yayımlanan birçok makalesi ve patentleri bulunmaktadır.

E-Posta: baktas@erciyes.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayım etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Ferhat ÇEÇEN: Metodoloji, Ölçüm, Görselleştirme, Yazılım, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Bekir AKTAŞ: Kavramsallaştırma, Yönetme, Doğrulama, Kaynak ve cihaz sağlama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.