

**Demiryollarında Gerilimsiz Ray Sıcaklığı Belirleme: Makine Öğrenmesi ve Güncel Meteorolojik Verilerle Türkiye İçin Geliştirilen Yeni Bir Yöntem**Ferhat ÇEÇEN^{ORCID}*Süleyman Demirel Üniversitesi, Göller Bölgesi Teknokent Koordinatörlüğü, Isparta, Türkiye**cecenferhat@sdu.edu.tr**(Alınış/Received: 26.11.2024, Kabul/Accepted: 24.12.2024, Yayımlama/Published: 31.01.2025)*

Öz: Çağımızda, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin artan etkileri, konvansiyonel Gerilimsiz Ray Sıcaklığı (SFT) belirleme yöntemlerinin revize edilmesini gündeme getirmiştir. Bu çalışma, Türkiye'nin iklim koşullarına uygun, yeni bir SFT belirleme metodu sunmaktadır. Bu bağlamda çalışma kapsamında, Türkiye'nin 81 iline ait güncel meteorolojik veriler, Scipy.optimize modülünde yer alan SLSQP (Sequential Least Squares Programming, Ardışık En Küçük Kareler Programlaması) algoritması kullanılarak analiz edilmiştir. Her il için optimum SFT değerleri hesaplanmış ve bu değerlerin olası en yüksek ray sıcaklıklarıyla ilişkisi, Sklearn kütüphanesinin LinearRegression sınıfı kullanılarak oluşturulan bir makine öğrenmesi modeliyle incelenmiştir. Bu şekilde, ülke genelinde uygulanabilecek yeni bir SFT bağıntısı geliştirilmiştir. Sonuçlar, mevcut (konvansiyonel) yöntemle SFT belirlenmesi yapıldığı takdirde, 81 ilin 43'ünde kritik ray sıcaklıklarının aşıldığını ve bu aşım miktarının (ΔT) 48 °C'ye kadar ulaştığını göstermektedir. Bu durum, işlem kapasitesinde düşümlere ve mali kayıplara yol açabilecektir. Önerilen yöntemle hesaplanan SFT değerleri ise yalnızca bir ilde hız kısıtlaması gerektirmekte ve diğer 80 ilde ΔT değerlerini 36 °C'nin altında tutmaktadır. Sonuç olarak, bu yeni SFT bağıntısının, rayların termal burkulması (flambaj) riskini daha verimli yönetmek adına sektöre katkı sağlaması beklenmektedir.

Anahtar kelimeler: Gerilimsiz Ray Sıcaklığı, Demiryolu Ray Termal Burkulması, Flambaj, İklim Değişikliği

Determining Stress-Free Temperature in Railways: A New Method Developed for Türkiye Using Machine Learning and Current Meteorological Data

Abstract: In our era, the increasing effects of global warming and climate change have highlighted the need to revise the conventional Stress-Free Temperature (SFT) determination methods. This study proposes a novel SFT determination method tailored to the climatic conditions of Türkiye. In this context, current meteorological data from the Türkiye's 81 provinces were analyzed using the Sequential Least Squares Programming (SLSQP) algorithm available in Python's Scipy.optimize module. Optimal SFT values were calculated for each province and the relationship between these values and potential maximum rail temperatures was investigated using linear regression and machine learning based models. As a result, a new nationally applicable SFT correlation was developed. The results indicate that when using the existing (conventional) method for SFT determination, critical rail temperatures are exceeded in 43 out of 81 provinces, with the magnitude of this exceedance (ΔT) reaching up to 48°C. Such conditions can lead to reduced operational capacity and financial losses. In contrast, the SFT values calculated using the proposed method require speed restrictions in only one province and maintain ΔT values below 36 °C in the remaining 80 provinces. In conclusion, this new SFT correlation is expected to contribute to the sector by enabling more efficient management of the risk of thermal buckling in rails.

Keywords: Stress-Free Temperature, Railway Rail Thermal Buckling, Sun Kink, Climate Change

1. Giriş

İklim değişikliğinin etkisini giderek artırdığı çağımızda, raylı ulaşım sistemleri, birçok ulusal ve uluslararası birlik ve kuruluşça desteklenen ve dünya genelinde yaygınlaşan çevreci bir ulaşım modu halindedir. Ancak raylı ulaşım sistemlerinin küresel ısınma ve iklim değişikliğine karşı bazı

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, "Demiryollarında gerilimsiz ray sıcaklığı belirleme: makine öğrenmesi ve güncel meteorolojik verilerle türkiye için geliştirilen yeni bir yöntem," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 96-110, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1591710

zayıf yönleri de bulunmaktadır. Son yıllarda küresel anlamda daha sık görülmeye başlayan Rayların Termal Burkulması (RTB) (İngilizce: Rail Thermal Buckling) veya diğer bir tabirle flambaj (Fransızca: Flambage des Rails) hadiseleri bu zayıflıkla ilgilidir. Bu çalışmada söz konusu geometrik bozulmaların kısaca RTB olarak tabir edilmesi tercih edilmiştir.

Demiryollarında meydana gelen RTB hadiselerinin teknik arka planı kısaca incelenecek olursa; konvansiyonel balastlı demiryolu hatlarında kullanılan en önemli üstyapı elemanlarından biri raylardır. Çeşitli kimyasal içeriklere sahip çelik hammaddelerden imal edilen bu rayların termal genleşme katsayıları (α) oldukça yüksektir (yaklaşık $11,5 \times 10^{-6} \text{ mm} / (\text{mm } ^\circ\text{C})$) [1]. Buna göre, örnek bir hesaplama yürütülecek olursa; Denklem 1'deki termal boyut değişim eşitliği [2] kullanılarak, $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 12 metre uzunluğundaki bir rayın sıcaklığı, kış aylarında $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düştüğünde ($\Delta T = -40 \text{ }^\circ\text{C}$) veya bunun tam tersi olarak yaz aylarında $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye yükseldiğinde ($\Delta T = +40 \text{ }^\circ\text{C}$), $\pm 5,52 \text{ mm}$ 'lik bir termal boy değişimi oluşacağı hesaplanabilir. Yani yaz aylarında bu düzeyde genleşme ($+5,52 \text{ mm}$), kış aylarında bu miktarda kısalma ($-5,52 \text{ mm}$) isteği ortaya çıkacaktır.

$$\Delta L = L_0 \times \alpha \times \Delta T \quad (1)$$

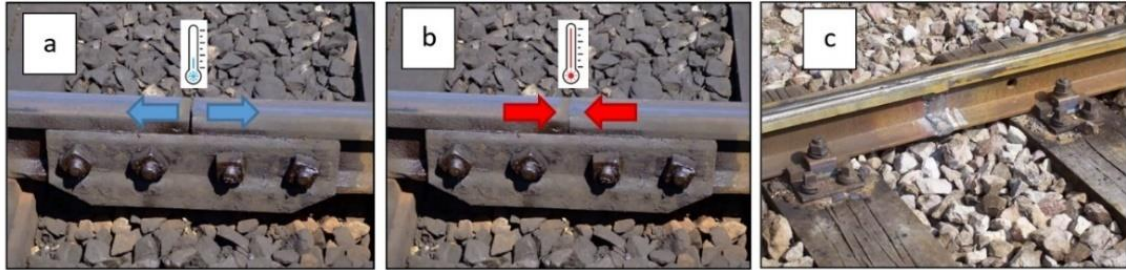
ΔL : Termal uzama/kısalma

L_0 : Referans sıcaklıktaki boy (mm)

α : Termal genleşme katsayısı ($\text{mm} / (\text{mm } ^\circ\text{C})$)

ΔT : Referans sıcaklık ile hesaplama yapılacak sıcaklık arasındaki fark ($^\circ\text{C}$)

Geçmişte, konvansiyonel cebire ve bulonlardan müteşekkil ray bağlantı sistemleri (Şekil 1.a-b) [3] yaygın iken, cebire delikleri bulon çaplarından bir miktar geniş tutularak bu termal boy değişimlerine kısmen veya tamamen müsaade edilmiş oluyordu. Ancak çağımızda bu bağlantı biçimi, birçok dezavantajı nedeniyle terk edilmektedir [4]. Günümüzde modern demiryollarında kullanılan en yaygın ray birleşim metodu, Şekil 1.c'de görülen kaynaklı ray birleşim metodudur. Ancak bu metod, termal uzama ve kısalma açısından herhangi bir esneklik sağlamamaktadır. Bu durum nedeniyle demiryolundaki o anki ray sıcaklığı, gerilimsiz ray sıcaklığı (Stress-Free Temperature, SFT) veya Nötr Ray Sıcaklığı (Rail Neutral Temperature, RNT) olarak tabir edilen spesifik bir ray sıcaklığı değerinin (örneğin geçmişte kaynak işlemi yapıldığı zamanda rayların sahip olduğu sıcaklığın) üzerine çıktığında, raylar genişlemek istemekte, ama uzayacağı bir alan bulunmadığından, basınç kuvvetleri meydana gelmektedir. Öte taraftan, SFT değerinin altına düştüğünde, raylar büzülme istemekte, ancak kaynaklı birleşimde böyle bir hareket kabiliyeti bulunmadığından, çekme kuvvetleri meydana gelmektedir [3].



Şekil 1. Ray bağlantı örnekleri: a) Termal büzülme için izin veren konvansiyonel cebireli ray bağlantı örneği, b) Termal genleşmeye izin veren aynı cebireli ray bağlantı örneği, c) Termal büzülme veya genleşmeye izin vermeyen kaynaklı ray bağlantı örneği [3]

Bu ön bilgiler akabinde, önceki hesaplamalar devam ettirilirse; Denklem 2 [5] kullanılarak, ilk durumda (SFT değerinde) örneğin $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ve 12 metre uzunluğundaki bir rayın sıcaklığı $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düştüğünde ($\Delta T = -40 \text{ }^\circ\text{C}$) veya bunun tam tersi olarak $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye yükseldiğinde ($\Delta T = +40 \text{ }^\circ\text{C}$), raylarda yaklaşık $\pm 96,6 \text{ MPa}$ gerilme meydana geleceği hesaplanabilir.

$$\sigma = E \times \alpha \times \Delta T \quad (2)$$

- σ : Gerilme (MPa)
 E : Elastisite modülü (ray çeliği için yaklaşık 210 GPa)
 α : Termal genişleme katsayısı (mm / (mm °C))
 ΔT : Referans sıcaklık ile hesaplama yapılacak sıcaklık arasındaki fark (°C)

Söz konusu $\pm 96,6$ MPa gerilme, ülkemizde en yaygın kullanılan ray tipi olan UIC 60 E1/2 sınıfı rayların enkesit alanı olan 7670 mm^2 alan [6] ile çarpıldığında, yani Denklem 3'e [5] göre; $740,9 \text{ kN}$ 'luk (yaklaşık $75,5$ ton) bir kuvvete (basınç/çekme) denk gelmektedir.

$$F = \sigma \times A \quad (3)$$

- F : Kuvvet (kN)
 σ : Gerilme (MPa)
 A : Alan (mm^2)

Görüldüğü üzere demiryolu raylarında termal değişimler altında oldukça yüksek çekme/basınç kuvvetleri meydana gelebilmektedir. Hesaplanan gerilme, üretim kaynaklı artık gerilmeler (residual stresses) ve servis yükleriyle birleşip milyonlarca kez tekrar edince, rayların ve özellikle kaynak birleşim noktalarının yorulma limitlerini aşabilmektedir. Demiryolu kuruluşları, özellikle çekme gerilmelerinin arttığı kış aylarında, ray/kaynak kırılmaları ile karşı karşıya kalabilmektedir. Şekil 2.a'da, ülkemizde 27 Ocak 2008'de, Kütahya il sınırı içerisinde meydana gelen ve "ray birleşim bölgesinde kırılmayla" ilişkilendirilen bir kazaya ait fotoğraf sunulmaktadır [7]. Kış aylarında meydana gelen çekme gerilmeleri, yaz aylarında bu kez basınç gerilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Raylar enkesit alanlarına nispeten çok daha uzun bir boya sahip olduğundan, inşaat mühendisliğinde "narin" olarak nitelendirilen, yani boyuna istikamette kolayca "burkulabilecek" yapı elemanlarıdır. Özellikle bazı hat kesimlerinde, örneğin balast omuz desteğinin zayıfladığı bölgelerde ve/veya ahşap travers kullanılan kesimlerde ve/veya zayıf kaynak birleşimlerinde, bu narin raylar kolayca burkulabilmektedir. Bu bozulmalar, günümüzde, uzun/sonsuz kaynaklı ray birleşimleri ve iklim değişikliği nedeniyle geçmişe nazaran daha sık karşılaşılan bir sorun haline gelmiştir [4]. Bu risk nedeniyle özellikle sıcak yaz aylarında sıklıkla hız kısıtlamalarına (tekayyüdat) başvurulmaktadır. Şekil 2.b'de Kahramanmaraş'ta Ağustos 2018'de meydana gelen termal burkulma hadiselerine dair örnek bir görsel sunulmaktadır [8].



Şekil 2. a) Ray birleşim bölgesindeki kırılmayla ilişkilendirilen tren kazalarına dair örnek bir görsel [7]
b) Termal burkulma hadiselerine dair örnek bir görsel [8]

Sonuç olarak, kaynaklı raylı ulaşım sistemleri termal etkilere karşı hassastır ve SFT değerleri, hattın servis ömrü boyunca sergileyeceği davranış açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu kritik değer gerekenden düşük olursa, RTB riski, aksi durumda ise ray/kaynak kırılmaları artmaktadır. Bu yüzden demiryolu mühendisleri, değişen iklim koşullarına karşı daha iyi mücadele edebilmek için SFT değerini, optimum bir düzeyde belirlemeye çalışmaktadır. Yani raylar birbirine kaynatılırken, rayların sıcaklığının belirleyecekleri SFT değerinin belirli bir toleransla artırılıp azaltıldığı bir aralıkta (örneğin $\text{SFT} \pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$) bulunmasına özenle dikkat edilmektedir. Demiryolu

hatlarının bu şekilde inşası sonrasında ise servis ömrü boyunca, ray sıcaklıkları sürekli takip edilmekte ve eğer bu SFT değerinin belirli bir miktar üzerine çıkmışsa, yani Demiryolu Mühendisliği literatüründe Kritik Ray Sıcaklığı (Critical Rail Temperature, CRT) adı verilen limitlere erişilmişse, aşım miktarına (ΔT) bağlı olarak çeşitli aksiyonlar uygulanmaktadır [4]. Söz konusu aşım miktarı ile ilgili olarak literatürde farklı kıstaslar verilmekte olup, örnek bir uygulama [9] Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Demiryolu hat kondisyonuna bağlı olarak aksiyon limitleri [9]

Demiryolu hat kondisyonu / Aksiyon türü ve limiti	İyi (ideal durumda)	Kötü (yetersiz balast omuz desteği vb.)
CRT _{alarm}	SFT+32 °C	SFT+10 °C
CRT _{50/100}	SFT+37 °C	SFT+13 °C
CRT ₃₀	SFT+42 °C	SFT+15 °C

Tablo 1’de örneği verilen bu uygulamada, ray sıcaklığı CRT_{alarm} seviyesine ulaştığında alarm verilerek ray sıcaklığı yakın takibe alınmakta, CRT_{50/100} seviyesinde hat işletim prosedürüne bağlı olarak 50 veya 100 km/sa’lik tekayyüdat uygulanmakta, CRT₃₀ limiti üzerinde ise zorunlu görülen seferler 30 km/sa’lik düşük bir hızla gerçekleştirilmektedir [9]. Tablo 1 incelendiğinde, CRT limitleri belirlenirken; hat durumunun ve SFT değerinin baz alındığı görülmektedir. Günümüzde gerek hat durumuna ilişkin bakım prosedürleri açısından gerekse SFT değerleri belirlenirken ülkelerin ve demiryolu kuruluşlarının farklı uygulamaları söz konusudur. Bu bağlamda iki farklı örnek verilecek olursa; ülkemizdeki (TCDD tarafından uygulanan) yaygın SFT hesaplama metodu Denklem 4’te [3, 10], Amerika’da AREMA doğrultusunda AMTRAK vb. kuruluşlarca izlenen SFT belirleme metodu ise Denklem 5’te [3, 11] verilmiştir.

$$SFT_{conv} = [(T_{railmax} + T_{railmin}) / 2] + 5 \quad (4)$$

$$SFT_{arema} = (2 \times T_{railmax} + T_{railmin}) / 3 \quad (5)$$

SFT_{conv} : Gerilimsiz ray sıcaklığı (°C) (ülkemizde yaygın kullanılan metotla hesaplanan)

SFT_{arema} : Gerilimsiz ray sıcaklığı (°C) (Amerika’da yaygın kullanılan metotla hesaplanan)

T_{railmax} : Analiz edilen dönemde kaydedilen/hesapla belirlenen en yüksek ray sıcaklığı (°C)

T_{railmin} : Analiz edilen dönemde kaydedilen/hesapla belirlenen en düşük ray sıcaklığı (°C)

Demiryolu sektörünün yukarıda kısaca özetlenen “RTB risk yönetimi” konusundaki ihtiyaçlarını karşılamak üzere, günümüze kadar birçok SFT hesaplama yöntemi ve CRT takip sistemi geliştirilmiştir ve geliştirilmeye devam etmektedir. Bu bağlamda, yukarıda verilen örneklerdeki her iki yaklaşım da "geçmiş yıllarda" ve "ülkemiz dışında" geliştirilmiş ampirik bağıntılardır. Ancak, ülkeler veya bölgeler arasındaki farklılıklar ve değişen iklim koşulları nedeniyle, RTB risk yönetimi açısından, örneğin tekayyüdatların sayısının ve süresinin kısıtlanması ya da meydana gelen RTB hadiselerinin azaltılması gibi konularda "evrensel" bir çözüm sunmalarının mümkün olmadığı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte ülkemizde bu bağlamda erişilebilen literatürde herhangi bir akademik çalışma tespit edilememiştir. Bu önemli literatür boşluğunun doldurulmasına katkıda bulunmak amacıyla hazırlanan bu çalışmada, ülkemize özel optimum bir SFT belirleme metodu geliştirilmeye çalışılmıştır.

2. Metot

Bu çalışma kapsamında, ülkemizdeki 81 ilde ölçülen en yüksek (T_{airmax}) ve en düşük (T_{airmin}) hava sıcaklığı değerlerinin belirlenmesi için Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nün (MGM) güncel veri tabanı (1930-2023) kullanılmıştır [12]. Ülkemizde halihazırda “ray sıcaklıkları” ile ilgili bu denli geniş bir veri tabanı mevcut olmadığından, MGM’den elde edilen bu “hava sıcaklığı” değerleri kullanılarak, en yüksek (T_{railmax}) ve en düşük (T_{airmin}) ray sıcaklığı değerleri hesaplama yapılarak,

tahmini olarak belirlenmiştir. Hesaplamalar yapılırken literatür doğrultusunda en düşük ray sıcaklığı, en düşük hava sıcaklığı ile eşit ($T_{\text{railmin}}=T_{\text{airmin}}$), en yüksek ray sıcaklığı ise en yüksek hava sıcaklığının 1,5 katı ($T_{\text{railmax}}=1,5 \times T_{\text{airmax}}$) olarak kabul edilmiştir [3]. Bu şekilde, 81 il için belirlenen olası en yüksek ve en düşük ray sıcaklıkları kullanılarak ve Denklem 4'teki ülkemizde yaygın kullanılan konvansiyonel hesap metodu doğrultusunda, her bir il için SFT_{conv} değerleri belirlenmiş ve Tablo 2-4'te sunulmuştur. Bu tablolarda ayrıca söz konusu SFT_{conv} değerleri ile T_{railmax} arasındaki mutlak fark da (ΔT_{conv}) hesaplanmış ve RTB riskinin seviyesini gösteren bir parametre olarak ayrı bir sütun halinde sunulmuştur. Nitekim giriş bölümünde sunulan Denklem 1-3 doğrultusunda işlem yapıldığında, söz konusu fark (ΔT) arttıkça meydana gelen termal gerilmeler (basınç kuvvetleri) artmakta ve RTB riski de yükselmektedir. Tablo 1'de geçen 81 ilin sıralaması, alfabetik metotla değil, söz konusu fark düzeyi (ΔT_{conv}) esas alınarak en yüksekten en düşüğe doğru uygulanmış, hat kondisyonunun tüm şehirlerde ideal ve eşdeğer durumda olduğu varsayılmıştır. Ayrıca -il sınırları içerisinde demiryolu geçmese de- Türkiye'deki 81 ilin tamamı için hesaplama yapılmıştır. Nitekim ülkemiz demiryolu ağı giderek artmaktadır ve SFT değerlerinin ülke genelindeki dağılımının gözlemlenip analizi için herhangi bir ilimiz analiz dışında tutulmamıştır.

Tablo 2. İllerdeki termal parametrelere bağlı olarak hesaplanan SFT ve fark (ΔT) değerleri-1

Şehir	T_{airmax}	T_{airmin}	T_{railmax}	T_{railmin}	SFT_{conv}	ΔT_{conv}	SFT_{new}	ΔT_{new}
Ağrı	39,9	-45,6	59,9	-45,6	12,1	47,7	19,4	40,4
Batman	48,8	-24,0	73,2	-24,0	29,6	43,6	37,5	35,7
Muş	41,6	-34,4	62,4	-34,4	19,0	43,4	26,2	36,2
Bolu	42,8	-31,5	64,2	-31,5	21,4	42,9	28,7	35,5
Tunceli	43,5	-30,3	65,3	-30,3	22,5	42,8	29,9	35,4
Sivas	40,0	-34,4	60,0	-34,4	17,8	42,2	24,8	35,2
Kayseri	40,7	-32,5	61,1	-32,5	19,3	41,8	26,4	34,7
Diyarbakır	46,2	-24,2	69,3	-24,2	27,6	41,8	35,1	34,2
Iğdır	42,0	-30,3	63,0	-30,3	21,4	41,7	28,5	34,5
Kars	37,1	-37,0	55,7	-37,0	14,3	41,3	21,1	34,6
Ardahan	35,0	-39,8	52,5	-39,8	11,4	41,2	17,9	34,6
Erzincan	40,6	-31,2	60,9	-31,2	19,9	41,1	26,9	34,0
Erzurum	36,5	-37,2	54,8	-37,2	13,8	41,0	20,4	34,3
Çorum	42,6	-27,2	63,9	-27,2	23,4	40,6	30,5	33,4
Eskişehir	41,6	-28,6	62,4	-28,6	21,9	40,5	29,0	33,4
Tokat	45,0	-23,4	67,5	-23,4	27,1	40,5	34,5	33,0
Kastamonu	42,2	-26,9	63,3	-26,9	23,2	40,1	30,3	33,0
Aksaray	40,8	-29,0	61,2	-29,0	21,1	40,1	28,1	33,1
Kütahya	41,4	-28,1	62,1	-28,1	22,0	40,1	29,1	33,0
Karaman	41,4	-28,0	62,1	-28,0	22,1	40,1	29,1	33,0
Konya	40,9	-28,2	61,4	-28,2	21,6	39,8	28,6	32,8
Bayburt	38,4	-31,3	57,6	-31,3	18,2	39,5	24,9	32,7
Kırşehir	40,5	-28,0	60,8	-28,0	21,4	39,4	28,3	32,4
Çankırı	42,4	-25,0	63,6	-25,0	24,3	39,3	31,4	32,2
Amasya	45,0	-21,0	67,5	-21,0	28,3	39,3	35,6	31,9
Siirt	46,0	-19,3	69,0	-19,3	29,9	39,2	37,3	31,7
Bingöl	42,0	-25,1	63,0	-25,1	24,0	39,1	31,0	32,0
Gümüşhane	41,1	-25,7	61,7	-25,7	23,0	38,7	29,9	31,7
Afyonkarahisar	39,8	-27,0	59,7	-27,0	21,4	38,4	28,2	31,5
Ankara	41,0	-24,9	61,5	-24,9	23,3	38,2	30,2	31,3

Tablo 3. İllerdeki termal parametrelere bağlı olarak hesaplanan SFT ve fark (ΔT) değerleri-2

Şehir	T _{airmax}	T _{airmin}	T _{railmax}	T _{railmin}	SFT _{conv}	ΔT_{conv}	SFT _{new}	ΔT_{new}
Malatya	42,7	-22,2	64,1	-22,2	25,9	38,1	33,0	31,0
Bursa	43,8	-20,5	65,7	-20,5	27,6	38,1	34,8	30,9
Elâziğ	42,4	-22,6	63,6	-22,6	25,5	38,1	32,6	31,0
Manisa	45,5	-17,5	68,3	-17,5	30,4	37,9	37,7	30,5
Edirne	44,1	-19,5	66,2	-19,5	28,3	37,8	35,5	30,6
Kırıkkale	42,0	-22,4	63,0	-22,4	25,3	37,7	32,3	30,7
Niğde	39,7	-25,6	59,6	-25,6	22,0	37,6	28,8	30,8
Van	37,5	-28,7	56,3	-28,7	18,8	37,5	25,4	30,9
Kocaeli	44,1	-18,0	66,2	-18,0	29,1	37,1	36,2	29,9
Düzce	42,4	-20,5	63,6	-20,5	26,6	37,1	33,6	30,0
Balıkesir	43,2	-18,8	64,8	-18,8	28,0	36,8	35,1	29,7
Gaziantep	44,0	-17,5	66,0	-17,5	29,3	36,8	36,4	29,6
Kilis	47,6	-12,0	71,4	-12,0	34,7	36,7	42,2	29,2
Nevşehir	39,5	-23,6	59,3	-23,6	22,8	36,4	29,5	29,7
Bartın	42,8	-18,6	64,2	-18,6	27,8	36,4	34,8	29,4
Uşak	41,9	-19,9	62,9	-19,9	26,5	36,4	33,4	29,4
Şanlıurfa	46,8	-12,4	70,2	-12,4	33,9	36,3	41,3	28,9
Yozgat	38,8	-24,4	58,2	-24,4	21,9	36,3	28,5	29,7
Adıyaman	45,3	-14,4	68,0	-14,4	31,8	36,2	39,0	28,9
Hakkâri	38,8	-23,4	58,2	-23,4	22,4	35,8	29,0	29,2
Isparta	40,3	-21,0	60,5	-21,0	24,7	35,7	31,5	29,0
Artvin	43,0	-16,1	64,5	-16,1	29,2	35,3	36,2	28,3
Sakarya	44,0	-14,5	66,0	-14,5	30,8	35,3	37,8	28,2
Kahramanmaraş	47,2	-9,6	70,8	-9,6	35,6	35,2	43,0	27,8
Hatay	45,2	-11,8	67,8	-11,8	33,0	34,8	40,2	27,6
Kırklareli	42,5	-15,8	63,8	-15,8	29,0	34,8	35,9	27,9
Burdur	41,6	-16,7	62,4	-16,7	27,9	34,6	34,7	27,7
Aydın	45,1	-11,0	67,7	-11,0	33,3	34,3	40,5	27,2
Denizli	44,4	-11,4	66,6	-11,4	32,6	34,0	39,7	26,9
Mardin	42,5	-14,0	63,8	-14,0	29,9	33,9	36,8	27,0
Bilecik	41,0	-16,0	61,5	-16,0	27,8	33,8	34,5	27,0
Karabük	43,7	-11,8	65,6	-11,8	31,9	33,7	38,9	26,7
Osmaniye	45,6	-8,5	68,4	-8,5	35,0	33,5	42,1	26,3
Adana	45,7	-8,1	68,6	-8,1	35,2	33,3	42,4	26,2
Bitlis	34,6	-24,1	51,9	-24,1	18,9	33,0	25,0	26,9
Muğla	42,1	-12,6	63,2	-12,6	30,3	32,9	37,1	26,1
Şırnak	40,4	-14,5	60,6	-14,5	28,1	32,6	34,7	25,9
Yalova	42,1	-11,0	63,2	-11,0	31,1	32,1	37,8	25,3
Tekirdağ	40,2	-13,5	60,3	-13,5	28,4	31,9	35,0	25,3
İzmir	43,2	-8,2	64,8	-8,2	33,3	31,5	40,1	24,7
Antalya	45,0	-4,6	67,5	-4,6	36,5	31,1	43,4	24,1
Çanakkale	39,7	-11,5	59,6	-11,5	29,0	30,5	35,5	24,1
İstanbul	40,6	-9,0	60,9	-9,0	31,0	30,0	37,5	23,4
Mersin	41,5	-6,6	62,3	-6,6	32,8	29,4	39,4	22,8
Zonguldak	40,5	-8,0	60,8	-8,0	31,4	29,4	37,9	22,9

Tablo 4. İllerdeki termal parametrelere bağlı olarak hesaplanan SFT ve fark (ΔT) değerleri-3

Şehir	T _{airmax}	T _{airmin}	T _{railmax}	T _{railmin}	SFT _{conv}	ΔT_{conv}	SFT _{new}	ΔT_{new}
Samsun	39,0	-9,8	58,5	-9,8	29,4	29,2	35,7	22,8
Sinop	39,3	-8,4	59,0	-8,4	30,3	28,7	36,6	22,3
Giresun	37,3	-9,8	56,0	-9,8	28,1	27,9	34,2	21,8
Trabzon	38,2	-7,4	57,3	-7,4	30,0	27,4	36,1	21,2
Rize	38,2	-7,0	57,3	-7,0	30,2	27,2	36,3	21,0
Ordu	37,3	-7,2	56,0	-7,2	29,4	26,6	35,4	20,5

Bu çalışma kapsamında, güncel meteorolojik veriler ve modern teknolojik imkanlar da kullanılarak, ülkemizin iklimsel yapısına uygun yeni bir SFT belirleme metodu geliştirmek amacıyla Tablo 2-4'te yer alan ray sıcaklığı bilgileri 'veri seti' olarak kullanılmış ve Python programlama dili aracılığıyla Jupyter Notebook'ta analiz edilmiştir. Jupyter Notebook, veri analizi ve bilimsel hesaplamalar için kullanılan, Python gibi programlama dillerini destekleyen interaktif bir geliştirme ortamıdır. Bu kapsamda ilk olarak, her bir şehir için optimum SFT değerleri belirlenmiştir. Bu süreçte, SFT değeri ile en yüksek ray sıcaklığı arasındaki farkın (ΔT_{new}) en fazla 37 °C olmasına, en düşük ray sıcaklığı ile SFT değeri arasındaki farkın ise en fazla 52 °C olmasına özel dikkat gösterilmiş ve buna uygun ön koşullar tanımlanmıştır. Söz konusu 37 °C'lik fark belirlenirken Tablo 1'deki CRT_{50/100} limiti esas alınmıştır. 52 °C'lik fark belirlenirken ise halihazırda TCDD tarafından Sivas ili için kullanılan SFT_{conv} değeri ile yıl içerisinde beklenen en düşük ray sıcaklığı arasındaki mutlak fark değeri baz alınmıştır. Her ne kadar Tunceli, Bolu, Muş, Batman ve Ağrı için yapılan hesaplamalarda 58 °C'ye varan daha yüksek farklılıklar söz konusu olsa da, RTB riski yönetilirken aşırı çekme gerilmelerini ve dolayısıyla kış aylarında ray/kaynak kırılmalarını önlemek adına Sivas ilindeki yıllardır süregelen tecrübeye dayalı 52 °C'lik değer kullanılmasının daha güvenilir tarafta kalacağı düşünülmüştür. Ayrıca bu 52 °C'lik limit uygulandığında, RTB riskini kolayca yönetmek adına gerekli 37 °C'lik diğer limitin Türkiye'nin 81 ilinden 80'inde sağlandığı görülerek bu limit değerlerinin yeterli olduğu tahkik edilmiştir.

Söz konusu limit değerleri belirlendikten sonra, Pandas ile aktarılan veri seti, Scipy.optimize kütüphanesi kullanılarak SLSQP (Sequential Least Squares Programming, Ardışık En Küçük Kareler Programlaması) yöntemiyle analiz edilmiştir. Pandas, veri manipülasyonu ve analizi için kullanılan, özellikle tablo benzeri veri yapılarıyla çalışmayı kolaylaştıran güçlü bir Python kütüphanesidir. SLSQP, belirli kısıtlar altında bir fonksiyonun en düşük veya en yüksek değerini bulmakta (kısıtlı optimizasyon problemlerinde) yararlanılan yaygın bir yöntemdir. Bununla birlikte, SFT belirleme amacıyla literatürde ilk olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Kullanım amacı özetlenecek olursa; daha önce belirtilen 37 ve 52 °C'lik kısıtlar ve SFT değeri ile en yüksek ray sıcaklığı değeri arasındaki farkın (ΔT_{new}) en düşük seviyede olması şartlarını sağlayan optimum SFT değerlerinin belirlenmesidir.

Analizlerin ikinci aşamasında, güncel meteorolojik veriler kullanılarak yıllık olarak güncellenebilecek bir ampirik bağıntı oluşturulması hedeflenmiştir. Bu bağıntı, programlama bilgisi gerektirmeden SFT belirleme yapmaya olanak tanıyacaktır ve bu amaçla ikinci bir Jupyter Notebook dosyası hazırlanmıştır. Bu dosyada, Tablo 2-4'teki ray sıcaklığı verileri ile optimum SFT değerleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Bu kapsamda, Sklearn kütüphanesinin LinearRegression sınıfı kullanılarak bir lineer regresyon modeli oluşturulması ve veri setine ait matrisler arasındaki ilişkiyi öğrenmesi için tipik bir model oluşturulmuş ve eğitilmiştir (machine learning, makine öğrenmesi). Sklearn kütüphanesi, makine öğrenmesi algoritmalarının etkili ve esnek bir şekilde uygulanmasına olanak tanıyan, açık kaynaklı ve geniş bir kullanıcı topluluğuna sahip bir Python kütüphanesidir. LinearRegression sınıfı ise, doğrusal regresyon modelleri oluşturmak ve eğitmek için ideal bir araçtır. Bu nedenle hem güvenilirliği hem de kolay uygulanabilirliği nedeniyle tercih edilmiştir. Bu süreç, makine öğrenmesinin temel

prensiplerinden biri olan denetimli öğrenmenin (supervised learning) kapsamında değerlendirilmekte olup, model, geçmiş verilerle eğitilerek, bu verilerdeki örüntüleri öğrenmekte ve gelecekteki verileri tahminde kullanılabilir hale gelmektedir. Model eğitimi tamamlandıktan sonra ampirik denklemde kullanılacak katsayılar (coefficients) ve sabit terim (intercept) belirlenmiştir. Bu katsayılar ve sabit terim kullanılarak SFT_{new} değişkeninin, en yüksek ve en düşük ray sıcaklığı değişkenlerine göre bir lineer denklem formu oluşturulmuştur. Neticede, Denklem 6'da sunulan ampirik bağıntı elde edilmiş ve bu denklem kullanılarak hesaplanan SFT_{new} değerleri ve olası en yüksek ray sıcaklığı ile farklılıkları (ΔT_{new}) Tablo 2-4'te sunulmuştur.

$$SFT_{new} = 0,585 \times T_{railmax} + 0,4766 \times T_{railmin} + 6,1295 \quad (6)$$

SFT_{new} : Çalışma kapsamında geliştirilen yeni gerilimsiz ray sıcaklığı değeri (°C)

$T_{railmax}$: Analiz edilen dönemde kaydedilen/hesapla belirlenen en yüksek ray sıcaklığı (°C)

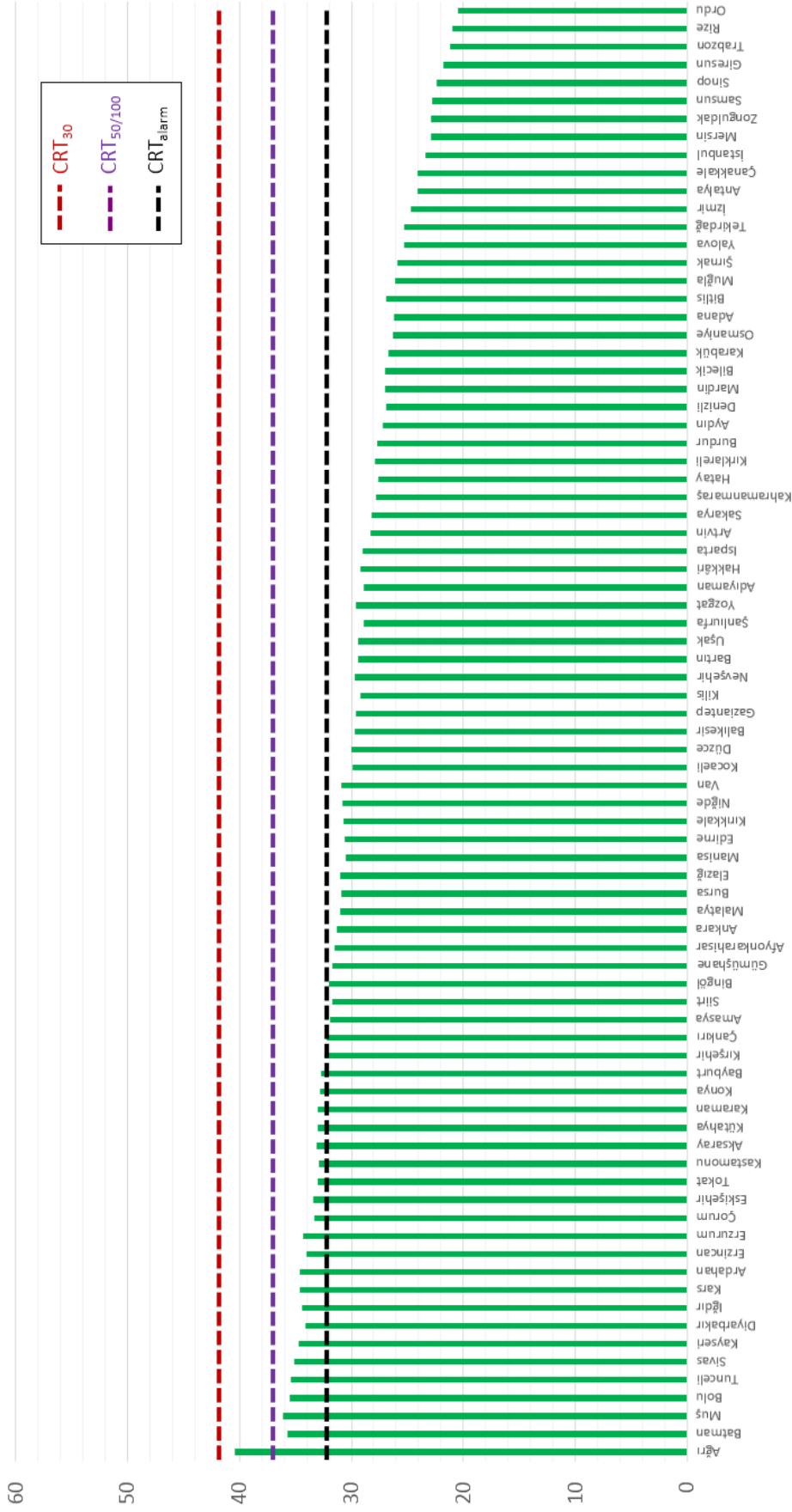
$T_{railmin}$: Analiz edilen dönemde kaydedilen/hesapla belirlenen en düşük ray sıcaklığı (°C)

3. Bulgular

Önceki bölümde, bu çalışma hazırlanırken MGM tarafından yayımlanan en güncel veriler (1930-2023) kullanılarak, ülkemizdeki her bir şehir için konvansiyonel metotla ve ülkemiz iklimsel koşullarına uygun olarak yeni geliştirilen ampirik bağıntıyla SFT değerleri (SFT_{conv} ve SFT_{new}) hesaplanmıştır. Ayrıca, bu SFT değerleri ile olası en yüksek ray sıcaklıkları arasındaki farklılıklar (ΔT_{conv} ve ΔT_{new}) da sunulmuştur. Bu bölümde ise konu daha detaylı analiz edilmiş ve öncelikle Şekil 3'te, ülkemizde halen yaygın olarak kullanılan konvansiyonel SFT belirleme metoduyla belirlenen SFT_{conv} değerleri ile güncel MGM verileri doğrultusunda hesaplanan en yüksek ray sıcaklıkları arasındaki farklar (ΔT_{conv}), iller bazında sütun grafikler halinde sunulmuştur.



Şekil 3. Konvansiyonel metotla belirlenen SFT_{comv} değerleri ile olası en yüksek ray sıcaklığı arasındaki farkların (ΔT_{comv}) iller bazında değişimi ve kritik ray sıcaklık limitleriyle karşılaştırılması



Şekil 5. Yeni metotla belirlenen SFT_{new} değerleri ile olası en yüksek ray sıcaklığı arasındaki farkların (ΔT_{new}) iller bazında değişimi ve kritik ray sıcaklık limitleriyle karşılaştırılması



Şekil 6. Yeni önerilen SFT belirleme yaklaşımı ile Türkiye Demiryolu Termal Burkulma Riski Haritası

4. Sonuç

Gerilimsiz ray sıcaklığı (SFT), raylı ulaşım sistemlerinin servis ömrü süresince sergileyeceği performans açısından kritik rol oynamaktadır. SFT değeri, gerekenden düşük belirlendiğinde yüksek basınç kuvvetleri nedeniyle demiryolu raylarında termal burkulma (RTB) veya diğer bir tabirle flambaj riski artmaktadır. Bu parametrenin gerekenden yüksek belirlenmesi halinde ise çekme kuvvetleri artarak ray veya kaynak kırılması hadiseleri ile karşılaşılabilir. Bu yüzden SFT değerlerinin optimum bir düzeyde belirlenmesi büyük bir öneme sahiptir. Günümüzde SFT değerleri belirlenirken ülkelerin ve demiryolu kuruluşlarının farklı uygulamaları söz konusudur. İklimsel faktörlerin farklı coğrafyalarda oldukça değişiklik gösterebilmesi nedeniyle herhangi bir ülke için geliştirilen bir metot başka bir ülke için geçerli olmayabilmektedir. Ayrıca çağımızda etkisini artıran iklim değişikliği ve küresel ısınma nedeniyle geçmişte geliştirilmiş bağıntıların lokal ve güncel veriler ışığında revize edilmesine de ihtiyaç duyulmaktadır. Ülkemizde bu alandaki bilimsel çalışmaların sınırlı olduğu göz önünde bulundurularak, makine öğrenmesi destekli modern algoritmalar ve güncel meteorolojik veriler kullanılarak yeni bir SFT belirleme yöntemi geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bazı önemli çıkarımlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- SFT değeri ile olası en yüksek ray sıcaklığı arasındaki fark, bir diğer tabirle aşım miktarı (ΔT), RTB riskinin seviyesini gösteren en önemli parametrelerden biridir. Bu bağlamda en düşük ΔT değerleri görülen ve halihazırda (2024) demiryolu hattı geçen 3 il Samsun, Zonguldak ve Mersin'dir. En yüksek ΔT değerleri görülen ve halihazırda (2024) demiryolu hattı geçen 3 ilimiz ise Batman, Muş ve Sivas'tır. Ülkemizde hâlihazırda yaygın olarak kullanılan konvansiyonel SFT belirleme metodu ile belirlenen SFT_{conv} değerleri için 81 il bazında hesaplanan bu aşım miktarlarının (ΔT_{conv}) 27 °C ile 48 °C arasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Dolayısıyla TCDD'nin ülke genelinde tek bir SFT değeri kullanmak yerine, şehirler bazında farklı farklı SFT değerleri kullanmasının oldukça doğru bir yaklaşım olduğu değerlendirilmektedir.
- Konvansiyonel metottaki aşım miktarları (ΔT_{conv}) toplu olarak değerlendirildiğinde, ülkemizdeki 81 ilden 70'inde CRT_{alarm} seviyesi olan 32 °C'nin aşıldığı, 43 ilde $CRT_{50/100}$ limit değeri olan 37 °C'nin aşıldığı, 6 ilimizde ise CRT_{30} limit değeri olan 42 °C'nin de aşılarak 48 °C'ye ulaşan ve neticede hat işletim prosedürlerine bağlı olarak 30-100 km/sa'lik hız sınırlamaları (tekayyüdat) gerektiren aşımın söz konusu olduğu görülmüştür.

Burada belirtilen CRT limit değerleri, hat kondisyonunun tamamen ideal durumda olduğu durum için geçerlidir. Yani konvansiyonel SFT belirleme uygulamasında -hat kondisyonu tamamen ideal durumda olsa dahi- birçok ilimizde sıkça tekayyüdat uygulanması gerekebilecektir. Bu durum ise yük/yolcu tren seferlerinin aksaması ve finansal kaybın artması anlamına gelmektedir.

- c. Konvansiyonel SFT belirleme metodunun bu dezavantajının kök-nedeni araştırıldığında, söz konusu metotta, olası en yüksek ve en düşük ray sıcaklıklarının aritmetik ortalamalarının alındığı, yani basınç ve çekme gerilmelerinin bir nevi dengelenmeye çalışıldığı görülmektedir. Bu yaklaşım, ülkemizde ılıman iklimlerin etkin olduğu kıyı kesimlerinde çoğunlukla problem oluşturmaya da özellikle karasal iklimin etkin olduğu iç kesimlerdeki illerimizde, yüksek aşım miktarlarına (ΔT_{conv}) sebebiyet verebilmektedir.
- d. Bu çalışma kapsamında geliştirilen yeni SFT belirleme metoduyla belirlenen SFT_{new} değerleri ile güncel MGM verileri doğrultusunda hesaplanan en yüksek ray sıcaklıkları arasındaki farklar (ΔT_{new}) incelendiğinde ise; ülkemizdeki 81 ilden 29'unda CRT_{alarm} seviyesi olan $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yi aşan ray sıcaklıklarının söz konusu olduğu belirlenmiştir. Ancak CRT_{30} limitini aşması beklenen hiçbir il bulunmadığı, yani 30 km/sa 'lik tekayyüdat gerektiren ray sıcaklıklarının söz konusu olmadığı görülmüştür.
- e. Yeni yaklaşımda, ülkemizdeki 81 ilden yalnız 1'inde, hat işletim prosedürlerine bağlı olarak 50 veya 100 km/sa 'lik tekayyüdat gerektiren, yani $CRT_{50/100}$ limit değerini aşan ray sıcaklıklarının söz konusu olduğu belirlenmiştir. Bir diğer ifadeyle yalnızca Ağrı ilinde, gelecekte demiryolu inşa edilmesi halinde, $CRT_{50/100}$ limitini aşan ancak CRT_{30} limitinin altında kalan aşım söz konusu olabilecektir. Neticede RTB risk yönetiminin konvansiyonel metoda göre daha kolay ve ekonomik olması beklenmektedir.
- f. Yeni önerilen SFT belirleme metodunun bu önemli avantajının kök-nedeni, söz konusu metotta kullanılan ampirik bağıntının elde edilmesi için hazırlanan Python kod dizininde, konvansiyonel uygulamanın aritmetik ortalama almaya dayalı mantalitesinin yerine, ülkemizdeki 81 ilin meteorolojik verilerini kapsayan, demiryolu hattının çekme gerilmesi kapasitesinden en yüksek düzeyde yararlanan ve RTB hadiselerine neden olan basınç gerilmelerini en düşük seviyeye indirgeyen, yani kısaca "aritmetik ortalama" almaktansa "optimum" bir çözüm sağlamaya endekslı bir algoritma kullanılmasıdır.

Bu çalışmanın hazırlandığı 2024 yılı itibariyle ülkemizdeki 45 ilden demiryolu geçerken 36 ilden henüz geçmemekteydi. Ancak çalışmada, -il sınırları içerisinde demiryolu bulunmasa da-Türkiye'deki 81 ilin tamamı için analiz yapılmıştır. Nitekim ülkemizdeki raylı ulaşım ağı her yıl giderek artmakta ve bu çevreci ulaşım biçiminin yakın gelecekte daha da yaygınlaşması beklenmektedir. Ayrıca SFT değerlerinin ülke genelindeki dağılımının gözlemlenip analizinin yapılabilmesi de düşünülerek, analiz sürecinde herhangi bir ilimiz kapsam dışında tutulmamıştır. Bununla birlikte yürütülen çalışmanın bazı kısıtları da mevcut olup, aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- i. Çalışma esnasında hat elemanlarının ve kondisyonunun tüm şehirlerde ideal ve eşdeğer durumda olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla yürütülen RTB risk analizleri, olası en yüksek ray sıcaklığı değerleri ile SFT değerleri arasındaki farkların seviyesine, yani aşım miktarlarına (ΔT) endekslidir ve çeşitli hat parametrelerinin (üstyapı modeli, balast karakteristikleri vb.) RTB riskine etkileri "kapsam dışında" tutulmuştur.
- ii. Çalışma kapsamında kullanılan ray sıcaklığı verileri, MGM tarafından yayımlanan 1930-2023 yılları hava sıcaklığı verileri baz alınarak, literatürdeki ampirik bağıntılarla tahmini olarak belirlenmiştir. Daha kesin sonuçlar sağlayan yerinde ölçüm metodları, elimizde henüz bu denli geniş bir veri tabanı mevcut olmadığı için kullanılamamıştır.
- iii. Çalışma kapsamında kullanılan CRT aksiyon limitleri (CRT_{alarm} , $CRT_{50/100}$ ve CRT_{30}) ile ray/kaynak kırılması açısından izin verilebilir çekme gerilmesi oluşturan ray sıcaklığı ($SFT-52\text{ }^{\circ}\text{C}$) geçmiş tecrübeler ve literatür bilgilerine dayanmaktadır. Bu konuda

laboratuvar ortamında veya pilot uygulamalarla araştırma yürütülmesi söz konusu limit değerlerinin daha rasyonel bir şekilde belirlenmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, ülkemizde geliştirilen bu ilk SFT belirleme metodu, halihazırda ülkemizde ve dünyada kullanılmakta olan konvansiyonel metotlara kıyasla önemli geliştirmeler içermektedir. Bununla birlikte çalışmada sunulan bilgilerin bir kısmı, teorik ve temsili esaslara dayalıdır ve deneysel çalışmalar ve pilot uygulamalarla desteklenmesi gerekmekte olup, ilerleyen çalışmalarda araştırmaların bu yönde ilerletilmesi önerilmektedir.

Kaynakça

- [1] A. Miri, D. P. Thambiratnam, T. Chan, "Thermal challenges of replacing jointed rails with CWR on steel railway bridges," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 181, no. 106627, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106627>
- [2] G. Isgro, C. J. Kleverlaan, H. Wang, A. J. Feilzer, "Thermal dimensional behavior of dental ceramics." *Biomaterials*, vol. 25 (12), pp. 2447-2453, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2003.09.027>
- [3] M. Saltan, F. Çeçen, Ö. F. Acar, "Rail thermal buckling risk management: comparative analysis of stress-free temperature determination in the USA and Türkiye," in *ICivilTech*, Isparta, Türkiye, 2024, pp. 68
- [4] F. Çeçen, B. Aktaş, "Ray sıcaklığı takip sistemleri (RSTS) için en uygun yerlerin belirlenmesinde termal kameralardan yararlanılması: hızlı analiz metotları geliştirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 20, pp. 141-154, Temmuz 2024, doi: <https://doi.org/10.47072/demiryolu.1474099>
- [5] Anonymous, The Indira Gandhi National Open University (IGNOU): unit 2: thermal stresses, Accessed: 19.08.2024. [Online]. Available: <https://www.egyankosh.ac.in/bitstream/123456789/31825/1/Unit-2.pdf>
- [6] Anonymous, Dlubal: cross-section properties: UIC 60, Accessed: 19.08.2024. [Online]. Available: <https://www.dlubal.com/en/cross-section-properties/uic-60-din-en-13674-1>
- [7] BBC.com, Türkiye'de son 15 yılın ölümlü tren kazaları, Accessed: 19.08.2024. [Online]. Available: <https://shorturl.at/mHP8U>
- [8] CNN.com, Sıcaktan tren rayları bile genleşti!, Accessed: 19.08.2024. [Online]. Available: <https://www.cnn.com/turkiye/sicaktan-tren-raylari-bile-genlesti-11-12-2018?page=3>
- [9] Baker C. J. K., 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] MEB (Milli Eğitim Bakanlığı). UKR (Uzun kaynaklı ray), 2013. Accessed: 19.08.2024. [Online]. Available: [http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/UKR%20\(Uzun%20Kaynaklı%20C4%B1%20Ray\).pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/UKR%20(Uzun%20Kaynaklı%20C4%B1%20Ray).pdf)
- [11] AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association), *Manual for Railway Engineering*, Chapter 5: Track, Part 5: Track Maintenance, (2005). Accessed: 19.11.2024. [Online]. Available: <https://railtec.illinois.edu/wp/wp-content/uploads/AREMA-Chapter-5-2007.pdf>
- [12] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Resmi İklim İstatistikleri, Accessed: 19.11.2024. [Online]. Available: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m>

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

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Çalışmada içerisinde sunulan bilgilerin bir kısmı, teorik ve temsili esaslara dayalıdır ve deneysel çalışmalar ve pilot uygulamalarla desteklenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla çalışmanın herhangi bir hukuki metinde veya bilirkişi raporunda doğrudan mesnet teşkil etmesinin uygun olmadığı ve bağlayıcı nitelik taşımadığı değerlendirilmektedir.