



Raylı Sistem Araçlarında Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Kaynak İşleminde Sıcaklık Dağılımının İki Boyutlu Sayısal Simülasyonu

Osman ÜNAL^{*1}, Nuri AKKAS¹, Ahmet Taner SARIHAN²

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Sakarya, Türkiye

² TÜRASAS Genel Müdürlüğü, Vagon Gövde Şube.Müd., Sakarya, Türkiye

*osman92unal@gmail.com

(Alınış/Received: 07.06.2022, Kabul/Accepted: 29.06.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

Öz: Bu çalışmada, raylı sistem araç gövdelerinde kullanılan EN AW 6005A T6 alaşımlı profillerin gaz altı kaynağı yapılırken meydana gelen ısı akışının iki boyutlu sayısal bir simülatörü geliştirilmiştir. İş parçası üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı, düzgün olmayan hareketli ısı kaynakları ve taşınımla ısı transferi terimini içeren geçici ısı iletimi probleminin sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözümlenmesiyle elde edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, kaynak işlemindeki erimiş havuzun düşük sıcaklık bölgesinde sıvı metalin erken katılaşmasını önleyecek optimum sıcaklık dağılımını, geliştirilen simülasyon sayesinde araştırabilmektir. Önerilen iki boyutlu simülatör sayesinde, optimum sıcaklık dağılımını elde etmek için yapılacak olan deneylerin sayısı azaltılarak işletme maliyetleri düşürülebilecektir. Geliştirilen simülatörün en belirgin avantajları, zaman adımı boyutlarını, ızgara boyutlarını, toplam simülasyon süresini, kaynakların güç büyüklüklerini, elektrotlar arasındaki mesafeyi, kaynakların hızını değiştirebilmektir. Ayrıca bu simülatör, farklı malzemelerde tek telli kaynak ve tandem kaynak işlemleri için de kullanılabilir. İkinci olarak, sayısal sonuçları doğrulamak için Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayi A.Ş' de (TURASAS) Fluke Thermal Imager kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizden elde edilen maksimum sıcaklığın, deneysel sonucun maksimum sıcaklığından sadece %1 farklı olduğu görülmüştür. Bu sonuç, önerilen iki boyutlu simülatörün, deneysel çalışma ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Son olarak, geliştirilmiş iki boyutlu sayısal simülatör ile ilgili tüm Matlab kodları, bu çalışmanın üç boyutlu sayısal simülasyonu üzerinde çalışmak isteyen diğer araştırmacıların çalışmalarını kolaylaştırmak için makalenin sonuna eklenmiştir.

Anahtar kelimeler: İki boyutlu sayısal simülatör, Sonlu farklar yöntemi, Alüminyum tandem kaynak

Two-Dimensional Numerical Simulation of Temperature Distribution in Welding Process of Aluminum Alloys Used in Rail Vehicles

Abstract: In this study, a two-dimensional numerical simulator of the heat flow occurring during gas metal arc welding of EN AW 6005A T6 alloy profiles used in rail system vehicle bodies has been developed. The temperature distribution on the work piece is obtained by solving the problem of transient heat conduction, which includes the term of non-uniform moving heat sources and convection heat transfer, using the finite difference method. The aim of this study is to investigate the optimum temperature distribution that will prevent premature solidification of the liquid metal in the low temperature region of the molten pool in the welding process, by means of the developed simulation. Due to the proposed two-dimensional simulator, operating costs can be reduced by reducing the number of experiments to be carried out to obtain the optimum temperature distribution. The most obvious advantages of the developed simulator are being able to change the time step sizes, grid sizes, total simulation time, power sizes of the welds, distance between the electrodes, and speed of the welds. In addition, this simulator can be used for single-wire and tandem welding operations in different materials. Secondly, the experimental studies were carried out using Fluke Thermal Imager in Turkey Rail System Vehicles Industry Inc. (TURASAS) to verify the numerical results. The maximum temperature obtained from the numerical analysis was found to differ only 1% from the maximum temperature of the experimental result. This result shows that the proposed two-dimensional simulator is compatible with the experimental work. Finally, all Matlab codes related to the developed two-dimensional numerical

Atıf için/Cite as: O. Unal, N. Akkas, A.T. Sarihan, "Raylı sistem araçlarında kullanılan alüminyum alaşımlarının kaynak işleminde sıcaklık dağılımının iki boyutlu sayısal simülasyonu" *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 91-101, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1127197

simulator are included at the end of the article to facilitate the work of other researchers' work who wants to work on the three-dimensional numerical simulation of this study.

Keywords: Two-dimensional numerical simulator, Finite difference method, Aluminium tandem welding

1. Giriş

Raylı sistemler güvenli ulaşım, çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet üstünlüğü gibi konularda diğer ulaşım sistemlerine göre daha avantajlı olması nedeniyle tüm dünyada yeniden önem kazanmıştır [1]. Toplu taşıma araçları içinde yoğun olarak tercih edilen demiryolu araçları üretiminde alüminyum alaşımları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Araç üretiminde kullanılan başlıca imalat yöntemlerinden olan kaynak prosesinde, ısıdan etkilenen bölgenin kontrolü ve çarpılma etkisinin azaltılması gerekmektedir. Bu amaçla tek tel beslemeli gazaltı kaynak yöntemi geliştirilerek, çift tel beslemeli tandem kaynağı kullanılmaya başlanmıştır. Tandem kaynağı, birçok araştırmacının ortaya koyduğu gibi, kaynak verimliliğini artırmaktadır [2],[3]. Çift telli kaynak, tek telli kaynağa göre daha yüksek yığıma hızına ve üretim verimliliğine sahip olduğundan, ağır sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Çift telli kaynak prosesinde, yüksek kaynak hızı ve yığıma hızı elde edilebilmektedir. Yığıma oranı, tandem kaynak prosesinde, konvansiyonel gaz altı kaynağına oranla alüminyum kaynağında bir buçuk katına, çelik kaynağında ise iki katına çıkarılabilir [5],[6]. Tandem kaynağı, tek tel yaklaşımına kıyasla kalın alüminyum plakalar için gerekli kaynak paso sayısını yarıya düşürebilir [7]. Tek telli kaynak işlemlerinde, kaynak banyosunun dar olması nedeniyle erken katılma ve daha fazla yüzeysel kusur oluşmaktadır [8]. Çift telli kaynak kullanılarak kök nüfuziyetsizliği ve ergime yetersizliği gibi kaynak kusurları önlenir [9]. Bu çalışmada, kaynak işleminin basitleştirilmiş bir formunun iki boyutlu sayısal çözümü kullanılarak tek telli ve çift telli kaynağın sıcaklık dağılımı karşılaştırılmıştır. Tek telli ve çift telli kaynak proseslerinin sayısal çözümlerini ifade etmek için, düzgün olmayan hareketli ısı kaynağı ve taşınım ile ısı transferi terimini içeren geçici ısı iletim denklemi kullanılmıştır. Geçici ısı iletim denklemindeki çok boyutlu ölçekleme, taşınım ile ısı transfer faktörü terimi ve homojen olmayan ısı kaynakları nedeniyle literatürde bu karmaşık problem için analitik bir çözüm bulunmamaktadır. Bu karmaşık problemi simüle etmek için sayısal bir çözüm geliştirilmiştir [10]. Kısmi diferansiyel denklemlerini sayısal olarak çözenin en önemli ve etkin tekniklerinden biri sonlu farklar yöntemidir [11]. Bu çalışmada geliştirilen sayısal çözüm sonlu farklar yöntemine dayandırılmaktadır. Sonlu farklar yöntemi, türevlerin yaklaşık değerlerini hesaplamak için kullanılır [12]. Denklem 1., çift telli kaynak işleminin basitleştirilmiş bir formu için kısmi diferansiyel denklemi göstermektedir.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q - \frac{hP(T-T_{\infty})}{A} \quad (1)$$

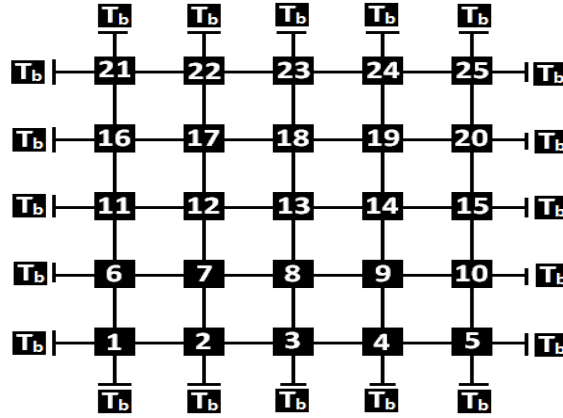
Denklem 1' de; sol taraftaki terim birikim terimi, sağ taraftaki ilk terim iletim terimi, sağ taraftaki ikinci terim ısı kaynağı terimi ve sağ taraftaki son terim ise konveksiyon terimidir [13]. Bu çalışmanın temel amacı, tek telli ve çift telli kaynak işlemleri için Denklem 1'in sayısal çözümünü elde etmektir. Yüksek hızlı tek telli kaynak işlemlerinde, erimiş havuzun düşük sıcaklık bölgesinde sıvı metalin erken katılması nedeniyle kaynak görünümü kusurları gözlenmektedir [8]. Çift telli kaynak kullanılarak alttan kesme ve tümsek kaynak kusurları önlenmektedir [9]. Bu çalışmada, tek telli ve çift telli kaynağın sıcaklık dağılımını karşılaştırmak için kaynak işleminin basitleştirilmiş bir formunun sayısal çözümü geliştirilmiştir. Geliştirilen sayısal model sayesinde, çok fazla deney yapılmadan alüminyum kaynak işleminde istenilen ısı girdisinin belirlenmesi sağlanabilecektir. Kaynak işleminde doğru ısı girdisinin bulunması kaynak kusurlarını azaltacaktır.

2. Metot

Bu bölüm EN AW 6005A T6 alüminyum alaşımlı profil kaynağının sıcaklık dağılımını elde etmek için sayısal çözümü ve deneysel çalışmayı içermektedir. İlk olarak kaynak prosesinin sıcaklık dağılımını simüle etmek için sayısal bir çözüm geliştirilecektir. İkinci olarak, sayısal çözüm deneysel çalışma ile doğrulanacaktır.

2.1. Sayısal çalışma

Bu bölümde Denklem 1'in sayısal çözümü için yirmi beş düğüm (veya nokta) olduğu varsayılmaktadır. Sayısal hesaplamayı daha kolay ifade edebilmek için her satırda ve sütunda beş düğüm olduğu varsayılmaktadır. Şekil 1, iki boyutlu sayısal çözüm için uzay ayrıklaştırmasının ve sınır koşulunun şemasını göstermektedir. Bulduğu konumdan dolayı herbir nokta için sınır koşulları farklı olacağından, herbir nokta için geliştirilen denklem de farklı olacaktır. Farklı sayılardaki düğüm sayıları için tüm durumları genelleştiren bir denklem sisteminin türetilmesi gerekmektedir. Bunun sağlanabilmesi için aşağıda yer alan tüm denklemler ayrıntılı bir şekilde yazılmıştır.



Şekil 1. İki boyutlu sayısal simülasyon için uzay ayrıklaştırması ve sınır koşulu

Denklem 2, satır numarası $r=1$ ve sütun numarası $c=1$ (düğüm 1) için örtük zaman ayrıklaştırması (implicit time discretization) [14] ve ikinci türev uzayı ayrıklaştırma tekniği kullanılarak Denklem 1'in sayısal çözümünü gösterir.

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_{r+1,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_b^{n+1}}{\Delta r/2}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_{r,c+1}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_b^{n+1}}{\Delta c/2}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (2)$$

$r=1$ ve $1 < c < cn$ ($cn=5$, son sütun sayısı) için ayrıklaştırılmış denklem (2, 3 ve 4 düğümleri için) (Denklem 3):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_{r+1,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_b^{n+1}}{\Delta r/2}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_{r,c+1}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (3)$$

$r=1$ ve $c=cn$ (5. düğüm için) için ayrıklaştırılmış denklem (Denklem 4):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_{r+1,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_b^{n+1}}{\Delta r/2}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_b^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c/2} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (4)$$

$1 < r < rn$ ($rn=5$, son satır sayısı) ve $c=1$ (6, 11 ve 16 düğümleri için) için ayrıklaştırılmış denklem (Denklem 5):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_{r+1,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r-1,c}^{n+1}}{\Delta r}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_{r,c+1}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c/2}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (5)$$

$1 < r < rn$ ve $1 < c < cn$ için ayrılaştırılmış denklem (7, 8, 9, 12, 13, 14, 17, 18 ve 19 iç düğümleri için) (Denklem 6):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_{r+1,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r-1,c}^{n+1}}{\Delta r}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_{r,c+1}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (6)$$

$1 < r < rn$ ve $c = cn$ (10, 15 ve 20 düğümleri için) için ayrılaştırılmış denklem (Denklem 7):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_{r+1,c}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r-1,c}^{n+1}}{\Delta r}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_b^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c/2} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (7)$$

$r = rn$ ve $c = 1$ için ayrılaştırılmış denklem (düğüm 21 için) (Denklem 8):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_b^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r/2} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r-1,c}^{n+1}}{\Delta r}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_{r,c+1}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_b^{n+1}}{\Delta c/2}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (8)$$

$r = rn$ ve $1 < c < cn$ için ayrılaştırılmış denklem (22, 23 ve 24 düğümleri için) (Denklem 9):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_b^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r/2} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r-1,c}^{n+1}}{\Delta r}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_{r,c+1}^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (9)$$

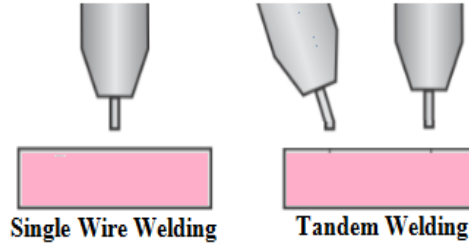
$r = rn$ ve $c = cn$ için ayrılaştırılmış denklem (son düğüm 25 için) (Denklem 10):

$$\rho c \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c}^n}{\Delta t} = k \frac{\frac{T_b^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta r/2} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r-1,c}^{n+1}}{\Delta r}}{\Delta r} + k \frac{\frac{T_b^{n+1} - T_{r,c}^{n+1}}{\Delta c/2} - \frac{T_{r,c}^{n+1} - T_{r,c-1}^{n+1}}{\Delta c}}{\Delta c} + q_{r,c}^{n+1} - \frac{h \times 2(dc+dr)(T_{r,c}^{n+1} - T_{\infty})}{dc \times dr} \quad (10)$$

Yukarıda yer alan denklemlerdeki T^{n+1} değerleri her bir nokta için bir sonraki zaman adımında yer alan bilinmeyen sıcaklık değerleridir. T^n değerleri ise bir önceki zaman adımındaki bilinen sıcaklık değerleridir. P perimetre alanını, c özgül ısı kapasitesini, h konvektif ısı transfer katsayısını, k termal iletkenliği, q ısı kaynağını, ρ yoğunluğu, Δt zaman adımlarını, Δr satır boyunca konum aralığını, Δc sütun boyunca konum aralığını ifade etmektedir. Bu denklem sisteminin çözümü ile ilerleyen her bir zaman adımındaki bilinmeyen sıcaklık değerleri her bir nokta için bulunur. Denklem 1'in örtük (implicit) [15] sayısal çözümünü elde etmek için, her zaman adımı için Denklem 2' den Denklem 10' a kadar tüm bilinmeyenler ve katsayılar matris formuna getirilmeli ve matris çözümü [16] hesaplanmalıdır (matris çözümü hakkında daha ayrıntılı bilgi almak için Ekler kısmına bakınız). Kaynak işleminin sıcaklık dağılımı bu matris çözümü ile belirlenir.

2.2. Deneysel çalışma

Tek tel kaynağı, en çok kullanılan ark kaynağı işlemlerinden biridir. Daha küçük çaplı bir tel, daha yüksek akım yoğunluğu nedeniyle aynı akımda daha yüksek yığıma sağlar. Küçültülmüş tel çapı, hem derinlemesine nüfuz eden hem de nispeten ince olan bir kaynak dikişi ile sonuçlanır. Yüksek performans/kaynak hızı ve iki iş parçası arasındaki geniş kaynak boşluklarını doldurma yeteneği, tek telli kaynağa göre tandem kaynağının avantajlarından biridir [17]. Şekil 2, tek telli kaynak ve tandem kaynak işlemlerini şematik biçimde göstermektedir.



Şekil 2. Tek tel ve tandem kaynak işlemlerinin şematik görünümü

Tandem kaynağı, iki farklı kaynak sisteminin senkronize edilmesini içeren bir işlemdir. Birbirine bağlı olmayan tel elektrotlar, bir gaz nozülü ve izole edilmiş kontak uçları olan ayrı tel besleyiciler aracılığıyla bir torç hortum paketiyle beslenir. Kaynak havuzunu oluşturmak için iki ark birleşir. Her iki tel elektrodu senkronize etmek için bir Twin Controller kullanılabilir. Kaynak her iki yönde de yapılabilir. Bu yaklaşım çok daha kararlıdır ve ince saclarda son derece yüksek kaynak hızlarına imkan verir. Kalın saclar için bu yaklaşım, önemli ölçüde daha büyük bir kaynak dikişi hacmine izin vererek yüksek yağma hızı sunar.

Bu çalışmadaki tüm deneyler Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayi A.Ş. (TÜRASAŞ)' de yapılmış olup, sistem Milli Elektrikli Tren Seti Alüminyum alaşımlı gövde imalatında kullanılmaktadır. Kaynak deneyi için 600 mm x 80 mm x 3 mm boyutlarında EN AW 6005A T6 alüminyum alaşımlı sac kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin yoğunluğu 2,70 g/cm³, çekme mukavemeti 300 MPa, Young modülü 68 GPa, akma mukavemeti 250 MPa ve termal genleşme değeri 23 µm/m-K'dir. Kaynak operasyonu sırasında kullanılan malzemenin bileşimi Tablo 1' de verilmiştir [18].

Tablo 1. EN AW 6005A T6 alüminyum alaşımlı malzemenin bileşimi

Si	Mn	Fe	Cu	Mg	Ti	Cr	Zn	Al
%0,40	%0,05	%0,175	%0,05	%0,675	%0,05	%0,05	%0,05	%98,5

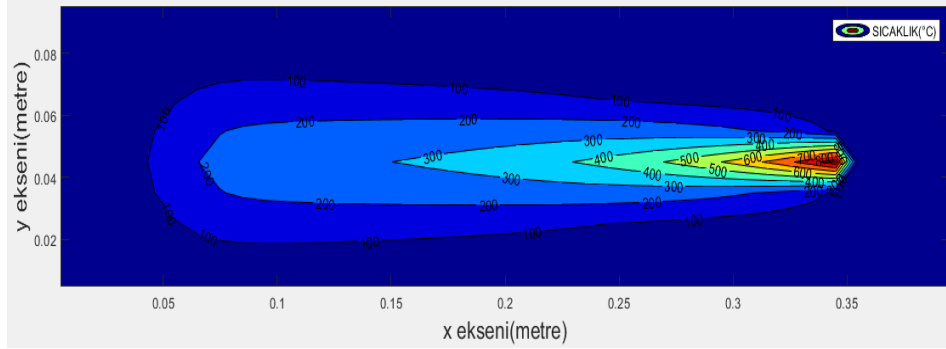
Bu araştırmada tek telli ve tandem kaynak yöntemlerinde 5356 AlMg5 tipi elektrotlar kullanılmıştır. Kaynak akımı 186 A ve kaynak voltajı 21,8 V'tur. Kaynak teli besleme hızı 10,4 m/dk'dır. Bu çalışmada, iş parçasına ısı girdisini azaltabilmek kaynak hızı artırıldığından, kaynak teli besleme hızı da artırıldı. Buna bağlı olarak, akım ve voltaj değerleri kaynak makinesi tarafından otomatik olarak belirlendi. TÜRASAŞ'ta yapılan tandem kaynak işlemi Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. TÜRASAŞ'ta yapılan tandem kaynak işlemi

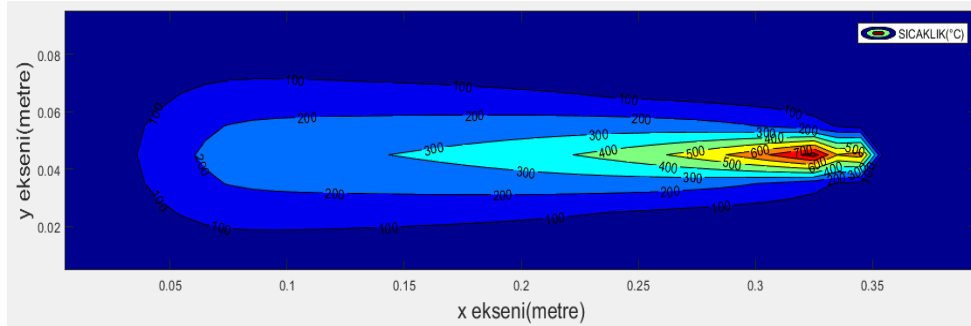
3. Bulgular

Üniform olmayan hareketli ısı kaynağı ve konvektif ısı transferi terimi ile geçici ısı iletimi probleminin iki boyutlu sayısal simülasyonu, istenilen zaman adımı boyutları, farklı düğüm (yada nokta) sayısı, tek ve tandem kaynak işlemleri için geliştirilmiştir (bkz. Ekler) . Şekil 4, 400 düğüm ($m=10$ ve $cn=40$) kullanan Denklem 1'in sayısal çözümünü göstermektedir. Tek telli kaynak işlemi için ortam sıcaklığının 20°C olduğu, tek hareketli ısı kaynağının olduğu, sol ve sağ sınır koşullarının 20°C olduğu varsayılmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi, kaynak sonrası sıcaklık alüminyumun erime noktasının (660°C) hemen altına düşer [19] ve sıvı metalin erken katılaşması nedeniyle kaynak görünümü bozukluklarına yol açabilir.



Şekil 4. Tek telli kaynak için iki boyutlu simülasyon

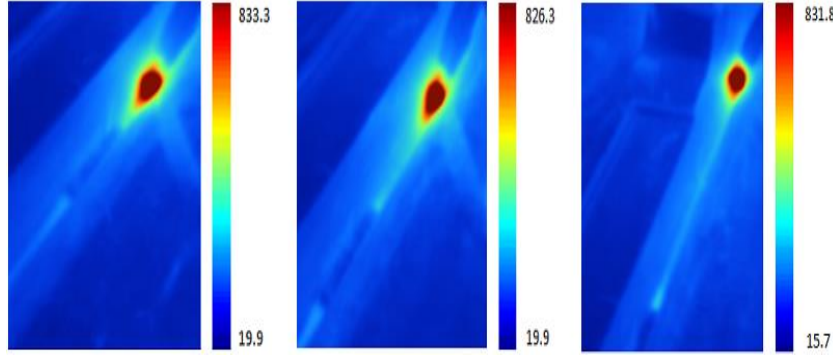
Şekil 5, üniform olmayan hareketli 2 ısı kaynağı ve taşınım ile ısı transferi terimi ile geçici ısı iletimi probleminin sayısal çözümünü göstermektedir. Şekil 5'te farklı güçte iki elektrot bulunmaktadır. Şekil 5'te yer alan ikinci elektrot, iş parçasına daha homojen bir ısı girdisinin sağlanması için kullanılmaktadır [9]. Zayıf penetrasyon, gözeneklilik, kök nüfuziyetsizliği vb. gibi kaynak görünümü kusurları, tandem kaynak işlemi kullanılarak engellenebilir [2]. Düşük sıcaklık bölgesinde sıvı metalin katılaşması için toplam süre ikinci elektrot kullanılarak uzatılabilir. Kaynak ilerleme yönü referans alındığında arkada kalan elektrot, sıvı metalin aniden soğumasını önler. Bu sayede ani ısı değişiminin sebep olduğu, kaynak görünümü kusurları önlenir [8].



Şekil 5. Tandem kaynağı için iki boyutlu simülasyon

Deneyel olarak elde edilen alüminyum kaynak işleminin sıcaklık dağılımı Şekil 6'da gösterilmektedir. Şekil 6'da yer alan görüntüleri elde etmek için, Fluke Thermal Imager kullanılmıştır. Bu kamera, iş parçası üzerindeki sıcaklık dağılımını iki boyutlu olarak gösterebilmektedir. Şekil 6'da üç deneysel sonuç gösterilmiştir. Bu üç deneysel sonuç, deneysel hataları azaltmak için kullanılmıştır. Daha güvenilir bir doğrulama yapabilmek için üç deneyden elde edilen verilerin ortalaması alınarak, sayısal analizden elde edilen sonuç ile kıyaslanmıştır. Bu çalışmada, sayısal sonuçları doğrulamak için maksimum sıcaklık kullanılmıştır. Sayısal sonucun maksimum sıcaklığı $838,64^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçlarının maksimum

sıcaklıkları 833,33 °C, 826,31 °C ve 831,82 °C'dir. Deney sonuçlarının ortalama sıcaklığı 830,49 °C olarak belirlenmiştir. Sayısal sonuç, deneysel verilerle oldukça yakından eşleşmektedir. Elde edilen veriler, sayısal yöntemin sonuçlarının deneysel çalışmanın bulgularıyla doğrulandığını açıkça göstermektedir.



Şekil 6. Alüminyum kaynak işleminin sıcaklık dağılımları (°C)

4. Sonuç

Bu çalışma, üç farklı ısı transferi probleminin (üniform olmayan hareketli ısı kaynağı, taşınım ve ısı transferi ve geçici ısı iletimi) birleştirilmesiyle elde edilen kısmi diferansiyel denklemi kullanarak tandem kaynak işleminin matematiksel modelinin oluşturulabileceğini önermektedir. Önerilen matematiksel modelin iki boyutlu sayısal çözümünün sonlu farklar yöntemi ile elde edilmesi ve sayısal çözümün deneysel verilerle doğrulanması, bu çalışmayı özgün kılan değerdir. İkinci olarak, bu iki boyutlu sayısal simülasyon kullanılarak erimiş havuzun düşük sıcaklık bölgesinin sıcaklık dağılımını araştırmak için tek ve çift telli kaynak işlemleri karşılaştırılmıştır. Düşük sıcaklık bölgesinde sıcaklığın hızlı düşmesinin ikinci elektrot kullanılarak önenebildiği ve kontrol edilebildiği gözlemlenmiştir. Üçüncü olarak, alüminyum kaynak işleminin deneysel sıcaklık dağılımlarını elde etmek için Fluke Thermal Imager kullanılmıştır. Deneysel hataları azaltmak ve sayısal analiz ile daha güvenilir bir kıyaslama yapabilmek için üç termal görüntü çekilmiştir. Sayısal sonuçları deneysel testlerle doğrulamak için maksimum sıcaklık dikkate alınmıştır. Sayısal simülasyon kullanılarak sayısal sonucun maksimum sıcaklığı 838,65 °C olarak belirlenmiştir. Üç deney sonucunun ortalama sıcaklığı 830,49 °C olarak belirlenmiştir. Yüzde 1 hata ile sayısal sonucun deneysel sonuca oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Geliştirilen simülasyon sayesinde farklı malzemeler ve farklı ilerleme hızlarındaki kaynak işlemleri için optimum ısı girdisi voltaj ve akım değerleri değiştirilerek bilgisayar ortamında belirlenebilecek ve deney sayıları azaltılarak işletme maliyetleri düşürülebilecektir. Son olarak, sayısal simülasyon ile ilgili tüm MATLAB kodları ve Google Drive linki çalışmanın sonuna dahil edilmiştir. Çalışmanın sonuna eklenen iki boyutlu simülasyonun kodları ve makale içerisine detayları ile yazılan denklemler, sıcaklık dağılımının üç boyutlu sayısal simülasyonu üzerine çalışmak isteyen diğer araştırmacılara katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışma kapsamında Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayi A.Ş.'ye (TÜRASAŞ) göstermiş oldukları yardım ve desteklerinden dolayı teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] A. Aktaş , Ö. Akbayır ve K. Aksay , "Türkiye Demiryolu Araçları, Tramvaylar ve Komponentleri Sektörünün Uluslararası Rekabet Gücü Analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, sayı. 15, ss. 60-74, Oca. 2022, doi:10.47072/demiryolu.944301
- [2] D. Chen, M. Chen, and C. Wu. "Effects of phase difference on the behavior of arc and weld pool in tandem P-GMAW," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 225, pp. 45-55, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.05.022
- [3] L. Zhang. "Investigation of arc behaviour and metal transfer in cross arc welding," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 37, pp. 124-129, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.11.018
- [4] H. Zargari. "Visualizing the vibration effect on the tandem-pulsed gas metal arc welding in the presence of surface tension active elements," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 161, pp.1-14, Nov. 2020 . doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120310
- [5] T. Ueyama. "Effects of torch configuration and welding current on weld bead formation in high speed tandem pulsed gas metal arc welding of steel sheets." *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 10, pp. 750-759, July 2005, doi: 10.1179/174329305X68750
- [6] K. Lee, C. Kim, and D. Kim. "High deposition rate pulse gas metal arc welding for Al 5083 thick plate." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 227, pp. 848-854, Apr. 2013, doi: 10.1177/0954405413476860
- [7] C. Kim. "High-deposition-rate position welding of Al 5083 alloy for spherical-type liquefied natural gas tank." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 230, pp. 818-824, May 2015, doi: 10.1177/0954405414563553
- [8] G. Qin, C. Feng, and H. Ma. "Suppression mechanism of weld appearance defects in tandem TIG welding by numerical modeling." *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 14, pp. 160-173, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.06.042
- [9] G. Qin, X. Meng, and B. Fu. "High speed tandem gas tungsten arc welding process of thin stainless steel plate." *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 220, pp. 58-64, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.01.011
- [10] C. Li, and A. Chen. "Numerical methods for fractional partial differential equations." *International Journal of Computer Mathematics* vol. 95, pp. 1048-1099, Jan. 2018, doi: 10.1080/00207160.2017.1343941
- [11] D. Fernández, J. Hicken, and D. Zingg. "Review of summation-by-parts operators with simultaneous approximation terms for the numerical solution of partial differential equations." *Computers & Fluids* vol. 95, pp. 171-196, May 2014, doi: 10.1016/j.compfluid.2014.02.016
- [12] D. Hawken, J. J. Gottlieb, and J. S. Hansen. "Review of some adaptive node-movement techniques in finite-element and finite-difference solutions of partial differential equations." *Journal of Computational Physics*, vol. 95, pp. 254-302, Aug 1991, doi: 10.1016/0021-9991(91)90277-R
- [13] Z. Wang. "A perspective on high-order methods in computational fluid dynamics." *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, vol. 59, pp. 1-6, Jan. 2016, doi: 10.1007/s11433-015-5706-3
- [14] Z. Torabi. "Stable time integration suppresses unphysical oscillations in the bidomain model." *Frontiers in Physics*, vol. 2, pp. 40-49, Nov. 2014, doi: 10.3389/fphy.2014.00040
- [15] C. Lubich, and A. Ostermann. "Linearly implicit time discretization of non-linear parabolic equations." *IMA journal of numerical analysis*, vol. 15, pp. 555-583, Nov. 1995, doi: 10.1093/imanum/15.4.555
- [16] G. Golub. "Numerical methods for solving linear least squares problems." *Numerische Mathematik* vol. 7, pp. 206-216, May 1965, doi: 10.1007/BF01436075
- [17] J. Tušek, I. Umek, and B. Bajcer. "Weld-cost saving accomplished by replacing single-wire submerged arc welding with triple-wire welding." *Science and Technology of Welding and Joining* vol. 10, pp.15-22, Jan. 2005, doi: 10.1179/174329305X24299
- [18] T. Bajor. "The analysis of the extrusion process of al 6005 alloy section." *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, vol. 56, pp. 637-642, Nov 2021, doi: 10.1007/s00170-011-3609-7
- [19] G. Kanel. "Dynamic yield and tensile strength of aluminum single crystals at temperatures up to the melting point." *Journal of Applied Physics*, vol. 90, pp.136-143, July 2001, doi: 10.1063/1.1374478

Özgeçmiş**Osman ÜNAL**

1992 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini İTÜ Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği'nde tamamlamıştır. İlgi alanına giren araştırma konuları Sayısal Analiz ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğidir.

E-Posta: osman92unal@gmail.com

**Nuri AKKAŞ**

Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Makine Mühendisliği bölümünde doçent olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları kaynaklı imalattır.

E-Posta: nuriakkas@subu.edu.tr

**Ahmet Taner SARIHAN**

1980 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini İTÜ Makina Mühendisliği'nde tamamlamıştır. ODTÜ'de Uluslararası kaynak Mühendisliği diplomasını almıştır. TÜRASAS Genel Müdürlüğü Sakarya Bölge Müdürlüğünde çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları demiryolu araç tasarım ve kaynaklı imalattır.

E-Posta: ahmettaner.sarihan@turasas.gov.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.

Ekler

```
tic; clc; clearvars;
tt=3;%Total simulation time(second)
dt=0.1;%Time interval(second)
thickness=0.003;%(meter)
rn=10;%Row number
dr=0.01;%Row interval(meter)
R=dr/2:dr:rn*dr-dr/2;%Row distance
cnlnn=40;%Column number
dc=0.01;%Column interval(meter)
C=dc/2:dc:cnlnn*dc-dc/2;%Column distance
k=167;%Thermal conductivity: W/(m.K) = W/(m.)
rc=2.7*10^6*0.9;%g/m3 * J/(g.K) = J/(m3.K)= J/(m3.°C)
h=10;%Convective heat transfer coefficient: W/(m2.K) = W/(m2.°C)
H=h*2*(dr+dc)/dr/dc;
Te=20;%Ambient(environment) temperature(°C)
Tp(1:rn,1:cnlnn)=20;%Initial condition(°C)
Tb=20;%Boundary condition(°C)
Corrn=1.28;
VI=21.8*186*Corrn;%Volt*Amper
E1=VI/thickness/dr/dc;%Heat generation(W/m3)
E2=E1/2;%Heat generation(W/m3)
%Numerical Solution
A=zeros(rn*cnlnn,rn*cnlnn); B=zeros(rn*cnlnn,1);
for t=1:tt/dt%Time iteration
q=zeros(rn,cnlnn);
q(rn/2,cnlnn/10-1+t)=E2; q(rn/2,cnlnn/10+2-1+t)=E1;
for r=1:rn
```

```

for c=1:cnl1nn
if r==1 && c==1
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-3*k/dr^2-3*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+cnl1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dr^2-2*Tb*k/dc^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif r==1 && 1<c && c<cnl1nn
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-3*k/dr^2-2*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+cnl1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-1)=k/dc^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dr^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif r==1 && c==cnl1nn
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-3*k/dr^2-3*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+cnl1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dr^2-2*Tb*k/dc^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif 1<r && r<rn && c==1
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-2*k/dr^2-3*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+cnl1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dc^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif 1<r && r<rn && 1<c && c<cnl1nn
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-2*k/dr^2-2*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+cnl1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-1)=k/dc^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif 1<r && r<rn && c==cnl1nn
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-2*k/dr^2-3*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+cnl1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dc^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif r==rn && c==1
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-3*k/dr^2-3*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dr^2-2*Tb*k/dc^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif r==rn && 1<c && c<cnl1nn
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-3*k/dr^2-2*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-1)=k/dc^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c+1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dr^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
elseif r==rn && c==cnl1nn
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c)=-3*k/dr^2-3*k/dc^2-H-rc/dt;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-cn1nn)=k/dr^2;
A((r-1)*cnl1nn+c, (r-1)*cnl1nn+c-1)=k/dc^2;
B((r-1)*cnl1nn+c, 1)=-2*Tb*k/dr^2-2*Tb*k/dc^2-q(r, c)-H*Te-rc*Tp(r, c)/dt;
end
end
end
T=sparse(A)\sparse(B);
i=1;
Tn=zeros(rn,cnl1nn);
for a=1:rn
for b=1:cnl1nn
Tn(a,b)=T(i);
i=i+1;
end
end
end
Tp=Tn;
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 1 1]);
[X,Y]=meshgrid(C,R);
contourf(X,Y,Tn, 'ShowText', 'on')
colormap(jet)
axis equal
xlabel('Column(meter)', 'fontsize', 16)
ylabel('Row(meter)', 'fontsize', 16)
legend('Temperature(°C)')
title(sprintf('2D Sim: time=%1.1f second', t*dt), 'fontsize', 16)

```

```
pause (0.001)  
end  
toc
```

Matlab dosyalarına ulaşmak için lütfen aşağıdaki Google Drive bağlantısını kullanınız:
<https://drive.google.com/drive/folders/1kAzkMeu3HxIBFbwmskgWlwGqJjCUXKUn?usp=sharing>