



R350HT Ray Termit Kaynağı Kusur Oluşumunun Araştırılması

Adem ARI^{*1}, Bilge DEMİR², Attila KESKİN³

¹ Ankara Bilim Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, İnsansız Hava Aracı Teknolojisi ve Operatörlüğü Bölümü, Ankara, Türkiye

² Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

³ TCDD Datem İşletme Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

*adem.ari@ankarabilim.edu.tr

(Alınış/Received: 15.11.2023, Kabul/Accepted: 29.12.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Çalışmamızda kullanılan R350HT mantarı sertleştirilmiş 60E1 profil 120 cm uzunluğundaki raylara Sow5 termit kitleriyle yapılan kaynağa uygulanan eğme testleri başarılı olduğu için diğer testlere geçilmiş, Skv elite yöntemiyle yapılan kaynaklar eğme testinden geçemediği için bu yöntemle yapılan kaynaklar başarısız sayılmış, diğer testler uygulanmamıştır. Kırılan kaynaklı raylar üzerinde birtakım testler uygulanıp, daha önceki yapılan çalışmalardan da faydalanarak kırılmaya yol açan kusurların oluşumuna neden olan parametreler hakkındaki gri alanlar netleştirilmek amacıyla araştırılmıştır. Alüminotermite kaynak parametrelerinin kaynak kusurunun üzerindeki etkisini incelemek için, daha önce geliştirilmiş kaynak kusuru oluşum şeması, bir dizi ısı transferi simülasyonundan oluşan bir ısı transfer modeli kullanılmıştır. Ray termit kaynak uygulamaları için, büzülme boşluğu oluşumunun önüne geçilebileceği ancak nüfuziyet azlığı (soğuk bindirme) ve merkez hattı kusurlarının meydana gelme olasılığının yüksek olduğu kanaatine varılmıştır. Bu çalışmayla ön ısıtma süresinin veya sıvı sıcaklığının artırılmasının, soğuk bindirme ve merkez hattı kusurlarının gelişimini baskımlarken aynı zamanda ray mantarında yan etki olarak mikro gözeneklilik kusuruna yol açma ihtimalini artırma eğiliminde olduğu görülmüştür. Farklı bir yaklaşımla, ön ısıtma süresini veya sıvı sıcaklığını arttırmak yerine, standartlarda belirtilen 25 mm'lik kaynak aralığının artırılmasıyla (35-38mm) aynı etkinin elde edilebileceği bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: R350HT alüminotermite kaynağı, Mikro yapı, Termit kusurları, Mikro gözeneklilik

Investigation of R350HT Rail Termite Welding Defect Formation

Abstract: Since the bending tests applied to the welds made with Sow5 termit kits on the R350HT head hardened 60E1 profile 120 cm long rails used in our study were successful, other tests were started. Since the welds made with Skv elite method failed the bending test, the welds made with this method were considered unsuccessful and other tests were not applied. A number of tests were performed on the broken welded rails and the gray areas about the parameters that cause the formation of defects leading to fracture were investigated in order to clarify the gray areas by making use of previous studies. A previously developed weld defect formation scheme, a heat transfer model consisting of a series of heat transfer simulations, was used to study the influence of the alüminotermite welding parameters on the weld defect. It was concluded that for rail termit welding applications, shrinkage cavity formation can be avoided, but the probability of occurrence of under penetration (cold lap) and centerline defects is high. This study showed that increasing the preheating time or liquid temperature tends to suppress the development of cold lap and centerline defects, while at the same time increasing the probability of causing microporosity defects in the rail head as a side effect. With a different approach, it has been found that the same effect can be achieved by increasing the welding spacing of 25 mm specified in the standards (35-38mm), instead of increasing the preheating time or liquid temperature.

Key words: R350HT aluminotermite welding, Microstructure, Termit defects, Micro cleanliness

Atıf için/Cite as: A. Arı, B. Demir, A. Keskin, "R350HT ray termit kaynağı kusur oluşumunun araştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 197-213, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1391129

1. Giriş

Termit kaynağı, metal oksit tozu ile alüminyum tozu arasında oluşan alüminotermik reaksiyon sonucu, ergitilen metalin kaynak edilecek parçaların alın yüzeylerine dökülerek birleştirilmesini sağlayan bir döküm ergitme esaslı kaynak yöntemidir. Yıllar yılı termit kaynaklarının kalitesini artırmaya yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda esas olarak alaşım sertleştirmesine [1], kaynak sonrası meydana gelen ısıl işlemlere [2, 3], kaynak sırasında uygulanan prosedürlere [4-6] ve kaynak sonrasında oluşan kaynağın uç geometrisine [7, 8] odaklanılmıştır. Alüminotermik kaynaklarının yorulma performansına etki eden gözenekliliğin rolünü araştırmak için birkaç çalışma da yapılmıştır [9, 10]. Kaynak kusurlarının termit ray kaynaklarının servis performansını kontrol ettiği bilinen bir gerçek olmasına rağmen, termit kaynak kusurlarının oluşum mekanizmalarını anlamak içinde çok az araştırma yapılmıştır. Termit kaynaklarında kaynak parametrelerinin kaynak hatası gelişimi üzerindeki etkisine ilişkin daha önce ülkemizde yapılmış Türkçe bir araştırma bulunmamaktadır [11]. Yurt dışında ise yok denecek kadar azdır. Bu makalenin amacı, termit kaynaklarını ve ayrı bir makalede tanıtılan bir ısı transferi modelini kullanarak, kaynak kusur oluşumu ile termit kaynağının mevcut termal şartları arasındaki korelasyonları kurmaktır [12]. Kaynak parametrelerinin etkisinin genel olarak anlaşılmasını sağlamak için bu çalışmanın sonuçları, kaynak parametrelerinin seçimine rehberlik etmek amacıyla kusur oluşum aşamaları şeklinde özetlenmiştir.

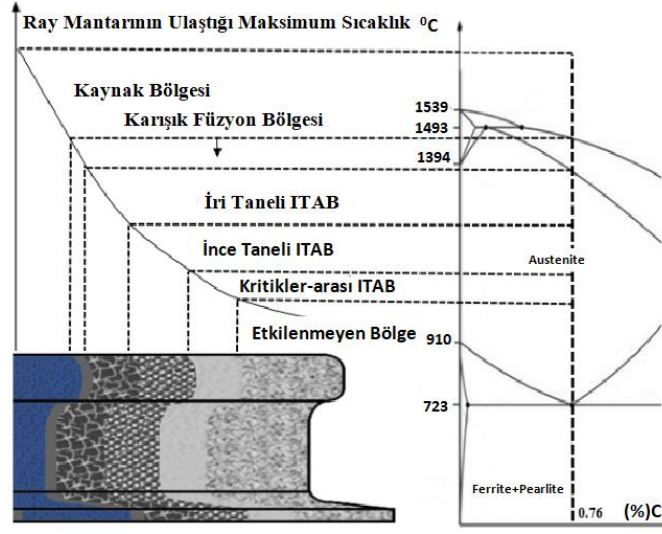
2. Kaynak Parametrelerinin Kusur Oluşumu Üzerindeki Etkisi

Yerel gerilimin artması ve dolayısıyla kaynak yorulma ömrünün azalmasıyla kaynak kusurları, kaynak yorulma ömrü üzerinde benzer bir etkiye sahip olsa da kaynak sırasındaki meydana geliş nedenleri oldukça farklı olabilir. Bazı kaynak kusurları, termit kaynak metalindeki cüruf gibi yabancı cisimlerden veya kaynak kalıbı ile ray yüzeyi arasındaki uygun olmayan eşleşmeden kaynaklanır. Bu kaynak hataları kaynak sırasındaki termal koşullara bağlı değildir ve bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Schroeder ve Poirier [4], Cyre [7] ve Ross [8] tarafından yapılan önceki araştırmalar bu kusurların oluşumu hakkında fikir vermektedir. Bu makale, oluşum mekanizmaları güçlü bir termal temellere sahip olan dört kaynak kusuru olan;

1. Yetersiz nüfuziyet (Soğuk bindirme)
2. Büzülme boşluğu
3. Kaçık merkez hattı kusur kümesi
4. Mikro gözeneklilik ve porozite 'ye

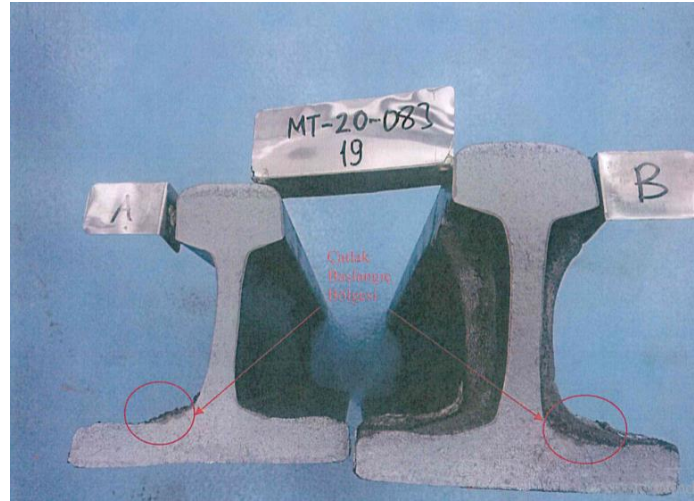
yoğunlaşmaktadır. Hem simüle edilen termit kaynakları hem de termal analizler kullanılarak bu kaynak kusurlarının oluşum koşulları belirlenecek ve kaynak parametrelerinin oluşumuna ne derece etkisi olduğu analiz edilecektir.

Nüfuziyet azlığı çoğunlukla ray tabanındaki kaynak uçlarında bulunabilir ve kaynak metali ile ray uçlarının yüzeyi arasındaki yetersiz erimeden kaynaklanır. Erimiş kaynak metali malzemesi, kalıbın üzerindeki potada yaklaşık 2050°C'lik bir sıcaklığa sahiptir, ancak kalıbın kanallarından aşağıya ve daha sonra kaynak aralığına doğru akarken hala akışkan haldeyken bir yandan da soğumaya devam eder. Şekil 1 [13], demir-karbon faz diyagramı ile birleştirilmiş bir termit kaynaklı rayın simetrik olan iki parçasından biri olan sağ taraftaki ana bölgeleri şematik olarak göstermektedir. Soğuk bindirme kusurunun olası ciddi sonucu, yorulma döngüsüne tabi tutulmuş bir termit kaynağındaki soğuk bindirme kusurunun sebep olduğu yorulma mikro çatlağından kaynaklanmaktadır. Kaynak kalıbı ile ray yüzeyi arasındaki uygun olmayan eşleşmenin neden olduğu yetersiz kaynaşmanın aksine, kaynak kalıbının ray yüzeyine uygun şekilde takıldığı yerlerde bile soğuk bindirme kusurları meydana gelebilir. Katılma sırasında soğuk bindirme kusuru daha net olarak belirginleşir.



Şekil 1. Demir-karbon faz diyagramı ile birleştirilmiş bir termit kaynağının ana bölgeleri

Termit kaynak düzeninin yandan görünümü, ray ucunun kalıp bileziğinin ötesine geçtiğini ve kaynak kalıbının içine doğru çıktığını göstermektedir. Ray ucunun bu kısmına 'çıkıntı' adı verilir ve kaynak boşluğuna sıvı çelik verildiğinde erimiş metale maruz kalır. Şekil 2'de 5.000.000 çevrim uygulanan ve 2.088.826 çevrimde soğuk bindirme kusurunun sebep olduğu çatlak nedeniyle kırılmış termit kaynaklı ray görülmektedir.



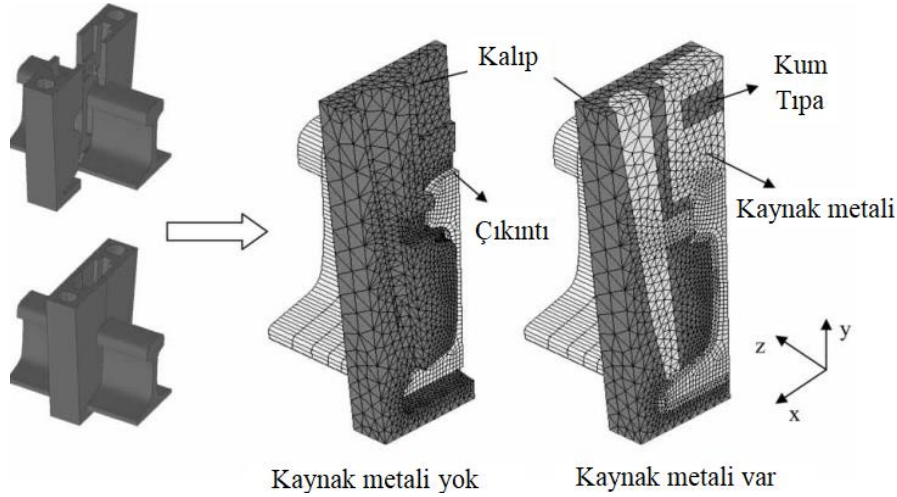
Şekil 2. Ray tabanındaki soğuk bindirme kusuru ve bunun neden olduğu çatlak başlangıcı

Sıvı metalle karşılaştıktan sonra belirli bir hacimdeki ray ucu erir ve katı-sıvı ara yüzü rayın içine doğru en sıcak bölge olan orta kısımdan hareket eder. Sıvı metalin nüfuz ettiği ray ucunun derinliği 'geri erime' olarak tanımlanır. Geri erime derinliği dışarı çıkma derinliğinden daha küçükse, ray tabanının altında küçük üçgen şekilli bir sıvı metal oluşur. Sıvı metalin bu kısmı güçlü kalıp soğutmasına maruz kalır ve ısı gradyanının yönü esas olarak kaynak metalinden kalıba doğrudur. Böylece sıvı metalin çıkıntılı yüzeye nüfuzu düşen ısı nedeniyle minimum düzeyde olur ve kaynak ucu alanı döküldükten sonra hızla katılaşır. Çıkıntı yüzeyinde herhangi bir katılaşma varsa, yetersiz bir kaynaşma yani soğuk bindirme meydana gelebilir. Buna karşılık, eğer geri erime dışarı çıkmadan daha derinse, ısı gradyanının yönü esas olarak rayın merkezinden raya doğru olacağı için yetersiz füzyon meydana gelmez. Bu mekanizmaya dayanarak, geri erime derinliği, yetersiz nüfuziyet oluşumunun olasılığını karakterize etmek için bir parametre olarak kullanılabilir. Soğuk bindirme oluşması için varsayılan koşul, düşen sıvı sıcaklığının neden

olduğu geri erime derinliğinin dışarı çıkma derinliğinden daha az olduğu durumlarda gerçekleştiği şeklindedir.

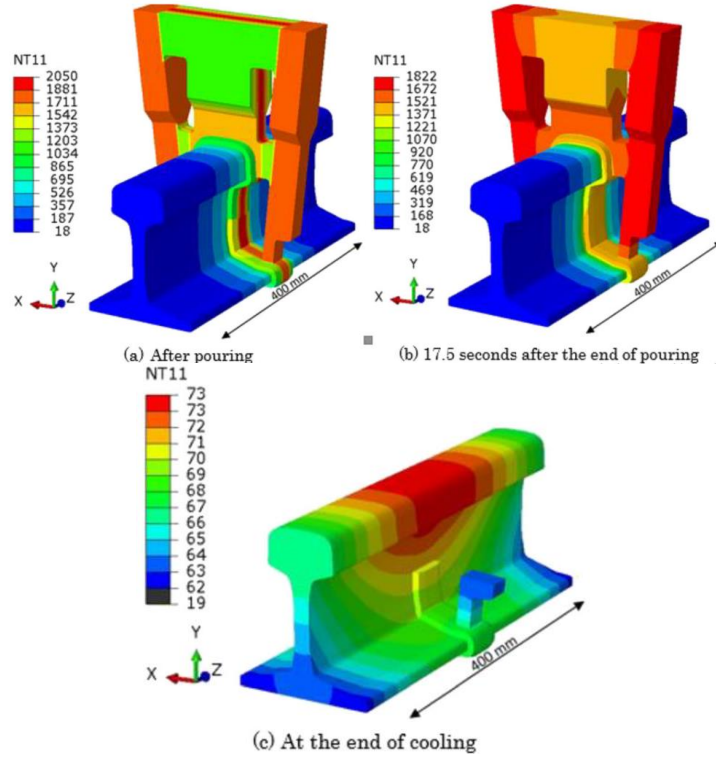
3. Kaynak Koşullarının Nüfuziyet Azlığı Oluşumu Üzerindeki Etkisi

Uzunlamasına ve enine merkezi düzlemlerdeki ayna simetrisi nedeniyle, Şekil 3'te görüldüğü gibi kaynağın yalnızca dörtte birinin modellenmesi yeterli olmuştur [12]. Modelde simüle edilen kaynak metal miktarı, kaynak boşluğunun hacmidir. Isı transfer modelinin geometrisi, SkV standart termit kaynağına ve R350HT 60E1 profil raya dayanmaktadır. Isı transferi simülasyonları için ray çeliği (7,87 g/cm³) ve kum kalıbı (1,6 g/cm³) için sabit yoğunluklar varsayılmıştır. Bu çalışmada 25, 38 ve 50 mm olmak üzere üç kaynak aralığı boyutu kullanılmıştır. Kaynak kalıbı genişliği, 25 mm kaynak aralığı için 39,4 mm, 38 mm kaynak aralığı için 52,1 mm ve 50 mm kaynak aralığı için 64,8 mm'dir. Dökümden ray mantarı yüzeyinin 10 mm altındaki kaynak merkezinin katılaşmasına kadar geçen süre olarak tanımlanan katılaşma süresi, söz konusu termit kaynağında termal koşulların gelişme hızının bir göstergesidir.



Şekil 3. Simülasyonlarda kullanılan kaynak metelli ve kaynak metalsiz model

Referans [12]'deki laboratuvar termit kaynaklarından elde edilen ortalama ısı girişi profili, ön ısıtma aşaması sırasında ray ucuna uygulanmıştır. En yüksek sıvı sıcaklığı her zaman ray mantarında, en düşük sıvı sıcaklığı ise ray tabanında bulunmuştur. Ray tabanındaki daha düşük sıvı sıcaklığı, besleme yolu boyunca sıvı metal ile kalıp duvarı arasındaki ısı alışverişine bağlanabilir. Sonuç olarak sıvı metalde dökme sonrasında ray tabanından ray mantarına doğru artan bir sıcaklık gradyanı oluşur. Şekil'4 te gösterilen bu simülasyon seti için ön ısıtmanın sonu ile katılaşmanın başlangıcı arasındaki süre olan 60 saniyelik bir işlem süresi ve kaynak havuzunda homojen bir sıvı sıcaklığı dağılımı varsayılmıştır [14]. Bu simülasyonlarda incelenen kaynak parametreleri ve bunların aralıkları Tablo 1'de özetlenmiştir.



Şekil 4. (a) Döküm başladığında hesaplanan sıcaklık dağılımı, (b) dökümden 17,5 saniye sonra ve (c) dökümden birkaç dakika sonra

Ray taban yüzeyinin 1 mm altındaki katılaşma izotermi farklı zamanlarda çizilmiştir. Orijinal ray ucundan en uzaktaki izotermal hat, füzyon hattı olarak kabul edilmiştir. Geri erime derinliği (d), füzyon hattından orijinal ray ucuna kadar ölçülmüş ve bu dışarı çıkma derinliği, soğuk bindirme oluşumunu önlemek için kritik geri erime derinliği (d_c) olarak kabul edilmiştir.

Tablo 1. Soğuk bindirme oluşumu için dikkate alınan kaynak parametreleri

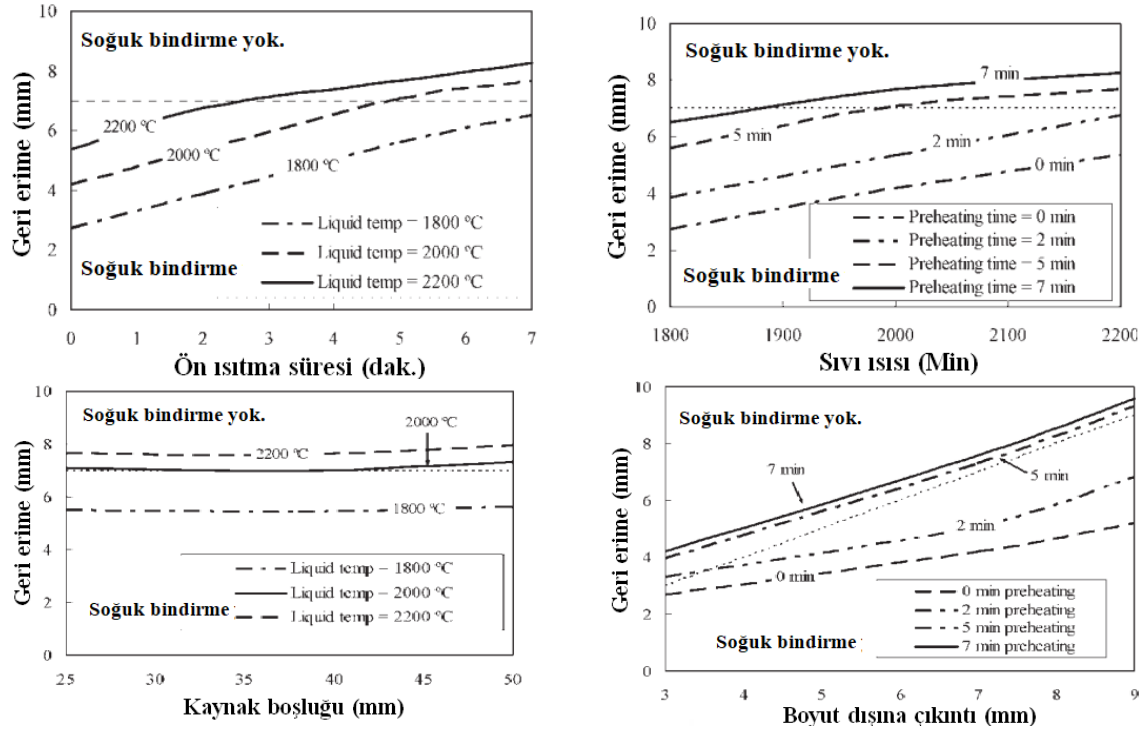
Kaynak Parametreleri	Aralık
Sıvı sıcaklığı (0C)	1800–2200
Ön ısıtma süresi (dak)	0–7
Kaynak aralığı (mm)	25–50
Çıkıntı mesafesi (mm)	3–9

3.1. Ön ısıtma süresi ve sıvı sıcaklığının etkisi

Şekil 5a, 25 mm kaynak aralığı ve 7 mm çıkıntı için simülasyon sonuçlarını göstermektedir. d_c'nin kritik değeri şekilde yatay kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Bu çizginin üzerinde, sıvı sıcaklığı soğuk bindirme oluşumunu önleyecektir. Bunun altında bir ısıda yetersiz nüfuziyet oluşması muhtemeldir. Şekil 5a'da, ön ısıtma süresindeki artışla birlikte geri erime derinliğinin arttığı görülebilmektedir. 2200⁰C ve 2000⁰C sıvı sıcaklıkları için kritik ön ısıtma süreleri sırasıyla 2,5 ve 4,7 dakikadır. 1800⁰C sıvı sıcaklığı için kritik ön ısıtma süresi 7 dakikanın üzerindedir. Benzer şekilde, sıvı sıcaklığındaki bir artış aynı zamanda ray taban ucunun erimesini de artırabilir ve dolayısıyla soğuk bindirme oluşumu olasılığını azaltabilir. Şekil 5a, eğer sıvı sıcaklığı arttırılırsa, yeterli bir geri erime sağlamak için daha kısa bir ön ısıtma süresine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Şekil 5b ayrıca sıvı sıcaklığının kritik değerlerini göstermektedir. 5 ve 7 dakikalık ön ısıtma için sıvı sıcaklıklarına ilişkin minimum gereksinimler sırasıyla 1980⁰C ve 1880⁰C'dir. 0-2 dakikalık ön ısıtma için minimum sıvı sıcaklıkları 2200⁰C'den büyük olmalıdır.

3.2. Kaynak aralığının fazla çıkıntı oluşumuna etkisi

Geri erime derinliği kaynak aralığı genişliğine göre önemli ölçüde değişmez. Şekil 5c'de geri erime derinliğinin kaynak aralığına göre değişimi minimum düzeydedir. Yalnızca yüksek sıvı sıcaklığı için ray ucundaki erimede hafif bir artış görülebilir. Geri erimenin kaynak aralığına olan bu oldukça zayıf bağımlılığı, erimiş ray ucunun gizli ısı emiliminden kaynaklanmaktadır. Erime bölgesinin konumu, erime bölgesine giren ve çıkan ısı transferi arasındaki denge ile belirlenir. Kısa bir süre içinde daha geniş bir kaynak aralığı raydaki sıcaklık gradyanını önemli ölçüde değiştiremez.



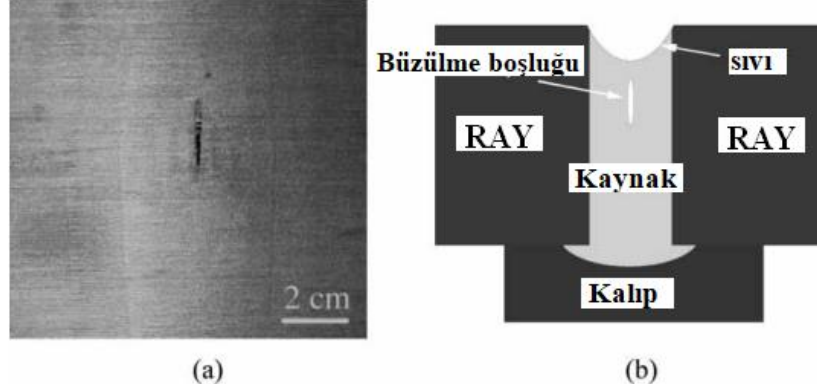
Şekil 5. Kaynak parametrelerinin geri erime derinliği (a) ön ısıtma süresi, (b) sıvı sıcaklığı, (c) kaynak aralığı ve (d) çıkıntı boyutu, üzerindeki etkisi

Bu nedenle kaynak aralığının soğuk bindirme oluşumu üzerinde zayıf bir etkisi vardır. Kaynak aralığının yanı sıra termit kaynağı sırasında değiştirilebilecek bir diğer geometrik parametre de çıkıntıdır. Dışarıya çıkıntının artırılmasıyla daha fazla ray yüzeyi alanı sıvı metale maruz kalır; bu nedenle geri erime derinliği artar. Ancak geri erime derinliğindeki (d) bu artış, soğuk bindirme oluşumunu engellemez çünkü kritik geri erime derinliği (d_c) de artar. Şekil 5d, dışarıya çıkıntı ile d_c artış oranının d 'yi aştığını göstermektedir. Bu, çıkıntı boyutunun artırılmasıyla üretilen daha büyük geri erime derinliğinin, soğuk bindirme oluşumunu hiçbir şekilde engellemediği anlamına gelir. Tersine, daha küçük bir çıkıntı, yetersiz nüfuziyet den kaçınmak için daha uygundur. Dışarıya çıkıntı boyutunun azaltılmasıyla, soğuma oluşumunu önlemek için hem ön ısıtma süresi hem de sıvı sıcaklığına ilişkin minimum gereksinimler büyük ölçüde azaltılabilir.

4. Büzülme Boşluğu Oluşum Aşamaları

Büzülme boşluğu başka bir ciddi kaynak kusurudur ve sıklıkla termit kaynaklarının ray boyun bölgesinde bulunur. Şekil 6, ray boyun alanında bir büzülme boşluğunu ve onun oluşum mekanizmasını göstermektedir. Isıl genişleme ve faz dönüşümleri nedeniyle kaynak metalinin hacmi soğuma sırasında sürekli değişir. Sıvı metalin termal genişleme katsayısı katı metalinkinden

önemli ölçüde yüksektir. Bu nedenle, soğuma sırasında kaynak metalinin hacim azalması, yüksek sıcaklık bölgesinde, düşük sıcaklık bölgesine göre daha fazladır. Katılma noktasında mikro yapı değişikliği nedeniyle kaynak metalinde küçük bir ek hacim daralması da meydana gelir. Hem faz dönüşümünün hem de sıcaklığın azalmasının neden olduğu hacim küçülmesi, kaynak metali içinde bir büzülme kuvvetine yol açar. Katılmanın son aşamasında, Şekil 6b’de görüldüğü gibi sıvı metalin etrafı zaten katılmış malzeme ile çevrelenirse, hacim azalmasını telafi etmek için bu bölgeye hiçbir ilave sıvı akmayacaktır.



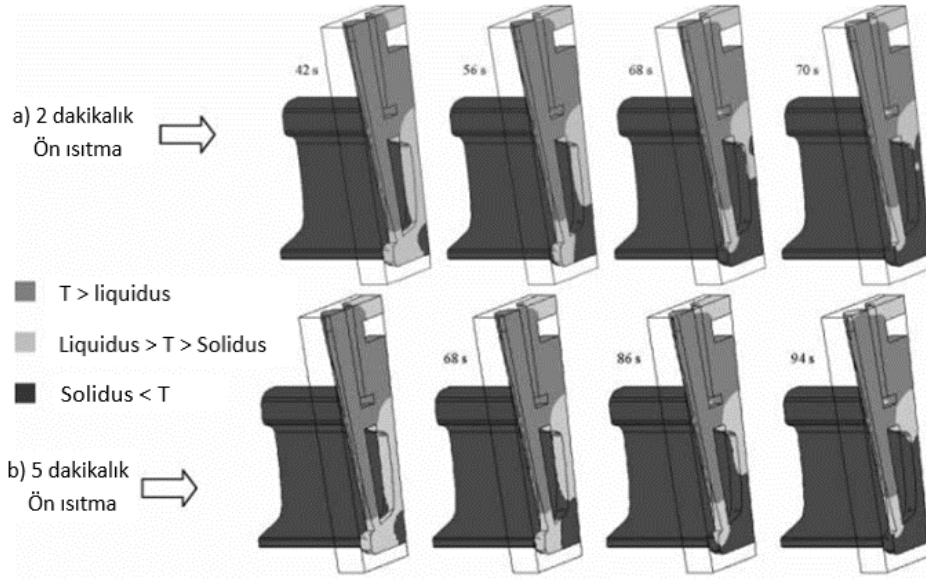
Şekil 6. (a) R350HT termit kaynağının ray ayağındaki büzülme boşluğu ve (b) büzülme boşluğu oluşumunun şematik gösterimi

Sonuç olarak, çekme kuvveti kaynakta bir büzülme boşluğunun oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle, katılmanın son aşamasında izole edilmiş bir sıvı bölgesinin gelişimi, büzülme boşluğu oluşumu için kritik koşuldur.

Üç kaynak parametresinin etkisini incelemek için bir dizi termal simülasyon gerçekleştirilmiştir:

4. Ön ısıtma süresi,
5. Ortalama sıvı sıcaklığı ve
6. Kaynak aralığı.

Bu simülasyonlarda, çıkıntı boyutu 7 mm olarak sabitlenmiş ve yukarı doğru sıvı sıcaklığı profilleri, ray tabanından ray mantarına doğru sıvı sıcaklığı artışı olduğu varsayılmıştır. Diğer tüm kaynak parametreleri bölüm 2,1’de belirtilenlerle aynıdır. Katılma sırasında ray boyun bölgesinde izole edilmiş bir sıvı bölgesinin varlığı, bir büzülme boşluğunun oluşup oluşmayacağını belirlemek için kullanılmıştır. Şekil 7, 2050⁰C’de aynı ortalama sıvı sıcaklığına ve 25 mm kaynak aralığına sahip iki simülasyonu göstermektedir; sadece ön ısıtma süresi farklıdır. Kaynak metalinde üç sıcaklık bölgesi ($T < \text{katılma}$, $\text{katılma} < T < \text{sıvılaştırma}$, $T > \text{sıvılaştırma}$) farklı tonlarla ayırt edilir. Katılma sırasında katı-sıvı ara yüzü ray ucundan kaynak merkezine ve ray tabanından ray mantarına doğru hareket eder. Sıvı izotermal yüzeyi kaynak bölümünden ilk önce geçer, katılma izotermal yüzeyi ise geride kalır. Şekil 7’ a için ön ısıtma süresi 2 dakikadır. Sağlam yüzey kaynak kesitini geçtiğinde ray boynunda hafif gölgeli nokta olarak görülen izole edilmiş bir sıvı bölgesi belirir.



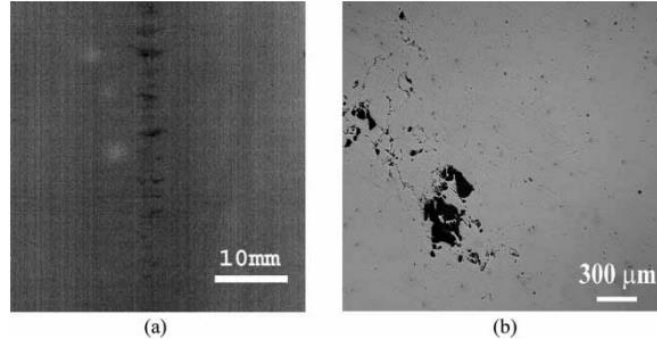
Şekil 7. Ön ısıtma süresinin büzülme boşluğu oluşumu üzerindeki etkisi (ortalama sıvı sıcaklığı = 2050°C, kaynak aralığı = 25 mm)

Ray boynunda izole edilmiş sıvı bölgesi (hafif gölgeli nokta) görünür. Ön ısıtma süresi Şekil 7b'deki gibi 5 dakikaya çıkarılırsa, simülasyon sonucunda izole edilen sıvı bölge kaybolur. Bu karşılaştırma, ön ısıtma süresindeki artışın termit kaynaklarında büzülme boşluğunun gelişmesini engellemeye yardımcı olduğunu göstermektedir. Benzer simülasyonlar 1900°C ila 2150°C arasındaki farklı sıvı sıcaklıklarında gerçekleştirilirken diğer tüm kaynak parametreleri sabit tutulmuştur. Sonuçlar, 1900°C den daha düşük sıvı sıcaklığının sıvı besleme yolunun çok daha çabuk kapanmasına neden olduğunu ve 5 dakikalık ön ısıtma süresi durumunda izole bir sıvı bölgesinin ortaya çıktığını göstermektedir. Ancak 2150°C den daha yüksek bir sıvı sıcaklığı için, ön ısıtma yapılsa bile izole edilmiş bir sıvı bölgesi bulunmaz. Dolayısıyla sıvı sıcaklığının artırılması büzülme boşluğu oluşumunun önlenmesine de yardımcı olabilir. Kaynak aralığının izole bir sıvı bölgesinin oluşumu üzerindeki etkisi sıvı sıcaklığına benzerdir. 38 veya 50 mm den daha büyük bir kaynak aralığı ile 2050°C sıvı sıcaklığına yönelik simülasyonlarda izole edilmiş sıvı bölgesi bulunmaz ve ön ısıtma yapılmaz. 1900°C sıvı sıcaklığı ile yapılan simülasyonlarda, kaynak aralığı 38 mm ise izole bir sıvı bölgesi mevcut olup, kaynak aralığı 50 mm'ye çıkarıldığında kaybolmaktadır. Daha büyük bir kaynak aralığının, büzülme boşluğunun gelişimini ortadan kaldırmaya yardımcı olduğu ve ön ısıtma süresi ve ortalama sıvı sıcaklığına ilişkin minimum gereksinimleri önemli ölçüde azaltabileceği düşünülmektedir. Kaynak koşullarının büzülme boşluğu oluşumu üzerindeki etkisini özetlemek gerekirse, daha yüksek bir sıvı sıcaklığı, daha uzun bir ön ısıtma süresi ve daha geniş bir kaynak aralığı, katılma bölgesinin dikey hareketini destekleyebilir ve kaynak merkezinde katılma bölgesinin yatay hareketini baskılayabilir; bu nedenle termit kaynaklarında büzülme boşluklarının gelişmesini önlemeye yardımcı olabilir.

5. Merkez Hattı Kusuru Oluşum Basamakları

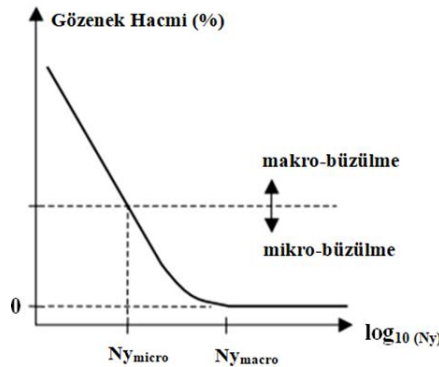
Kaynak kusurları, termit kaynaklarının radyografilerinde kaynak merkez hattı ile Şekil 8a'da görülebilir. Bu kusurlu bölgenin Şekil 8b'de görülen optik mikrogramında bu merkez hattı kusurlarının, daha önce tartışılan gözle görülen büzülme boşluğundan çok daha küçük olan büzülme tipi kusurların, birikmesi olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda merkez hattı kusurunun ray boynunda daha belirgin olduğu ve ray tabanında daha hafif olduğu da görülmüştür. Fiziki termit kaynaklarında ray mantarı bölgesinde merkez hattı kusuruna rastlanmamıştır.

Büzülme boşluğuna benzer şekilde, merkez hattı kusur kümesinin oluşumu hacimsel küçülmeden ve katılma sırasında yumuşak bölgedeki sıvı basıncı düşüşünden kaynaklanır.



Şekil 8. (a) X-ışını radyografi görüntüsü ve (b) kaynak merkez hattı boyunca kusur kümesinin optik mikrogramı

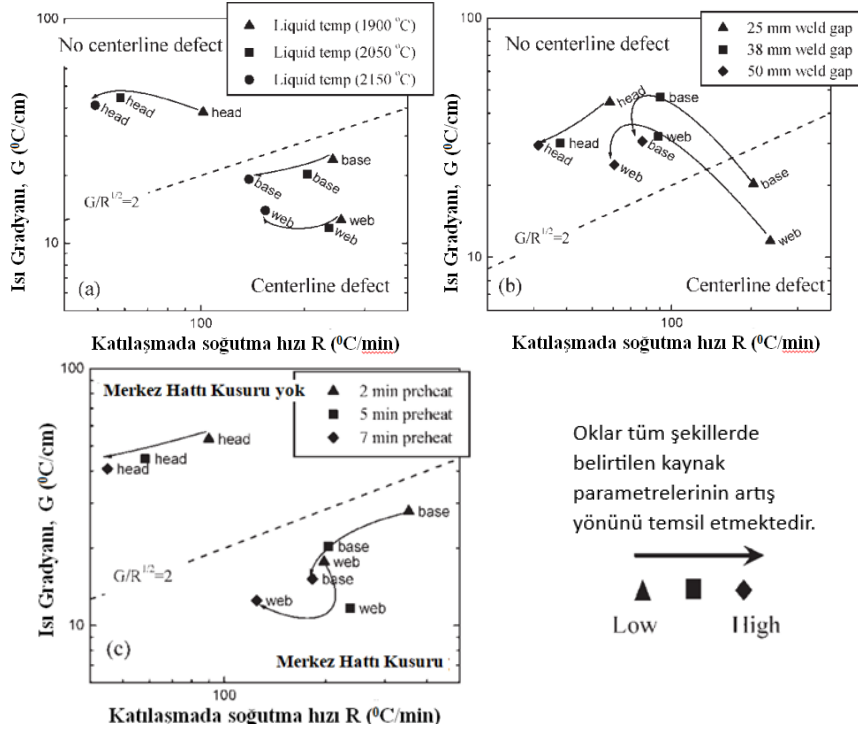
Bununla birlikte, büzülme boşluğu oluşumunun aksine, merkez hattı kusurunun oluşması için katılma sırasında gözle görülebilir izole edilmiş sıvı bölgesine gerek yoktur. Katılma sırasında gaz oluşumunun yardımıyla dendrit yapısı boyunca sıvı akışının neden olduğu basınç düşüşü, merkez hattı kusur kümesinin artmasına neden olacaktır [15]. Dökümhane pratiğinde, yerel sıcaklık gradyanının (G), soğuma hızının (R) ve katılma hızının (V) bu tür kusurların oluşmasında önemli olduğu uzun zamandır bilinmektedir [16]. Bu termal parametreleri merkez hattı kusur oluşumuyla ilişkilendirmek için birçok çalışma yapılmıştır [17-19]. Elde edilen korelasyonlar çoğunlukla ampiriktir ve farklı materyallerde çeşitli derecelerde başarıya sahiptir. Bunlar arasında, Niyama'nın değiştirilmiş sıcaklık gradyanı kriteri, çelik dökümler için, özellikle de döküm merkez hattı ile büzülme gözeneklerinin tahmin edilmesi açısından kanıtlanmıştır [20]. Döküm simülasyon yazılım paketlerinin ortak çıktısı olarak yerel bir termal parametre olan Niyama kriteri, çelik dökümlerdeki büzülme gözeneklilik kusurlarını tahmin etmek için sıklıkla kullanılır. Ampirik bir kriter olarak, Niyama'nın değiştirilmiş sıcaklık gradyanının kritik değeri malzemeye duyarlıdır ve termit çeliği için belirlenmesi gerekir. Döküm simülasyon sonuçlarından boyutsuz bir Niyama kriter değeri elde edildikten sonra, karşılık gelen büzülme gözenek hacmi oranı, yalnızca katı kısım-sıcaklık eğrisi ve alaşımın toplam katılma büzülmesi bilinen belirlenebilir. Niyama'nın analizinin grafiksel gösterimi Şekil 9'da verilmiştir [21]; Sabit G/pR değerleri, $G/\sqrt{R} = 2^\circ\text{C}^{1/2} \text{ min}^{1/2} \text{ cm}$ çizgisi kusur olmadığı ve kusurlu bölgenin ortasından geçer, bu nedenle termit kaynaklarında merkez hattı kusurunun oluşumunu belirlemek için kritik değer olarak seçilir.



Şekil 9. Büzülme gözeneklilik hacmi ile Niyama kriteri arasındaki ilişki

5.1. Kaynak koşullarının merkez hattı kusur oluşumu üzerindeki etkisi

Kaynak parametrelerinin merkez hattı kusur oluşumu üzerindeki etkisini incelemek amacıyla üç kaynak parametresi, sıvı sıcaklığı, kaynak aralığı ve ön ısıtma süresi üzerinde durulmuştur. Sıcaklık gradyanı ve soğuma hızı, katılma sıcaklığında değerlendirilmiştir. Hesaplanan G (sıcaklık gradyanı) ve R (soğuma hızı), Şekil 10'da gösterilmektedir ve merkez hattı kusur bölgesi, merkez hattı arızası olmayan bölgeden $G/R^{1/2} = 2$ ($^{\circ}\text{C}^{1/2} \text{ min}^{1/2} \text{ cm}$) düz çizgisiyle ayrılmıştır. Şekil 10'daki oklar belirtilen kaynak parametrelerinin artış yönünü temsil etmektedir. Ortalama sıvı sıcaklığının etkisini gösteren Şekil 10a incelendiğinde sıvı sıcaklığının merkez hattı kusuru oluşumu üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Sıvı sıcaklığının artmasıyla R azalır ve G aynı kalır. Bu nedenle Niyama'nın parametresi ($G/R^{1/2}$) temelde değişmez. Kaynak durumu, sıvı sıcaklığının artmasıyla birlikte sabit $G/R^{1/2}$ çizgisine neredeyse paralel olarak hareket eder. Benzer şekilde ön ısıtma süresindeki artışın da Şekil 10c'de görüldüğü gibi parametre üzerinde güçlü bir etkisi yoktur. Merkez hattı kusur oluşumu için en etkili kaynak parametresi Şekil 10b'de görüldüğü gibi kaynak aralığıdır. Kaynak aralığının 25 mm'den 38 mm'ye çıkarılmasıyla R azalır ancak aynı zamanda ray tabanındaki ve gövdedeki G önemli ölçüde artar. Kaynak aralığındaki 38 mm'den 50 mm'ye daha fazla bir artış, merkez hattı kusur oluşumunun önlenmesi açısından ek bir fayda sağlamaz.



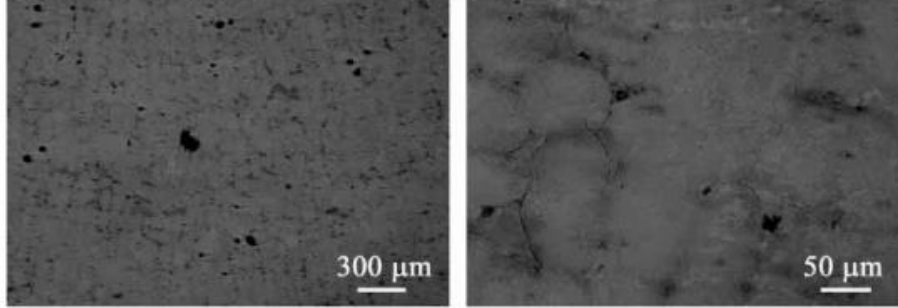
Şekil 10. Kaynak parametrelerinin merkez hattı kusur oluşumu üzerindeki etkisi (a) sıvı sıcaklığının etkisi, (b) kaynak aralığının etkisi ve (c) ön ısıtma süresinin etkisi

6. Dağıtılmış Mikro Gözeneklilik

Dağıtılmış mikro gözeneklilik, kaynak metalinde sıklıkla gözlemlenen, eşit şekilde dağılmış küçük gözenekleri ifade eder. Mikro gözeneklerin boyutu birkaç mikrondan neredeyse yüz mikrona kadar değişir. Hem küresel hem de düzensiz şekilli mikro gözenekler bulunabilir ve bunlar genellikle Şekil 11'de gösterildiği gibi interdendrit bölgelerde bulunur. Mikro gözenekliliğin oluşumu hem soğutma sırasında gaz oluşumunu hem de katılma ve sıvılaştırma arasındaki sıcaklık olan yumuşak bölge içindeki sıvı basıncı düşüşünü içerir. Hidrojen içeren Al-

Cu alaşımındaki dendritler arası gözenekliliğin kapsamlı bir analizinde Poirier ve ark. [22] interdendrit gözeneginin oluşum koşulunun şu şekilde olduğunu göstermiştir:

$$P_G - P_L = 4Y/(F_1\lambda_1^3) \quad (1)$$



Şekil 11. Dendrit bölgelerindeki küresel ve düzensiz şekilli mikro gözenekler

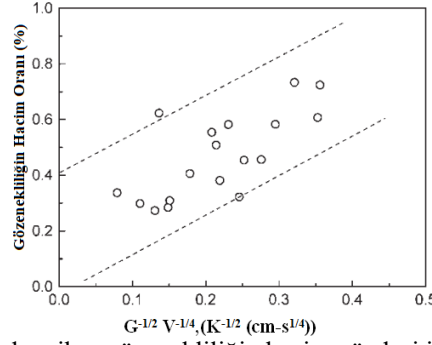
Burada P_G gözenek içindeki gaz basıncıdır, P_L yumuşak bölge içindeki sıvı basıncıdır, Y gaz ve sıvı arasındaki yüzey gerilimidir, f_L interdendrit sıvının hacim oranıdır ve λ_1 birincil dendrit kol aralığıdır. Dendrit kol mesafesi ne kadar büyük olursa dendritler arası gözeneklerin gelişmesinin o kadar kolay olacağı görülebilir. Poirier, gaz fazının sıvı ve katı fazın aşırı doymuş gazını içerdiğini varsayarak, dendritler arası gözeneklerin hacim oranının ötektik sıcaklıkta gözenekler içindeki gaz basıncının (P_G^E) azalan bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir [22].

$$\text{Vol\%} = \left\{ 1 + \left(\frac{1-f_E}{\rho_s} + \frac{f_E}{\rho_{LE}} \right) \frac{MP_G^E}{RT_E\Phi} \right\}^{-1} \quad (2)$$

Burada f_E ötektik sıcaklık aralığıdır, ρ_s ve ρ_{LE} ötektik sıcaklıkta katı ve sıvı ötektiğın kütle yoğunluğu, M gazın moleküler ağırlığı, R gaz sabiti, T_E ötektik sıcaklık ve f ötektik sıcaklıkta alaşımdaki gaz fazının fraksiyonudur. Dendritler arası gözenekleri oluşturmak için gerekli gaz basıncı dendrit kol aralığı ile azaldıkça, gözeneklerin hacim yüzdesi dendrit kol aralığı ile artar, yani dendrit kol aralığı ne kadar büyükse, gözeneklilik oranı o kadar yüksek olur. Mikro gözeneklilik ve termit kaynak durumu arasında bir korelasyon elde etmek için dendrit kol mesafesinin katılma durumuna bağlı olması gerekir. Kurz ve Fisher'e göre [23], birincil dendrit kol mesafesi artan sıcaklık gradyanı ve katılma hızı (V) ile azalır ve şu şekilde tanımlanabilir:

$$\lambda_1 \propto G^{-0,5} V^{-0,25} \quad (3)$$

Bu nedenle, mikro gözenekliliğın hacim oranı, termit kaynaklarının katılma sırasındaki termal durumu ile ilişkilendirilebilir. Bu analizin ışığında mikro gözenekliliğın hacim oranı ile termal koşullar arasındaki ilişki, sonuç olarak, aynı konumlarda ölçülen mikro gözenekliliğın hacim oranları, Şekil 12'de gösterildiği gibi mikro gözeneklilik içeriğinin dendrit kolu aralığı ile artan eğilimi açıktır. Bununla birlikte, sıcaklık gradyanındaki ve katılma oranındaki azalmayla birlikte termit kaynaklarında daha fazla dağıtılmış mikro gözenekliliğın beklendiği sonucuna varılabilir.



Şekil 12. Termit kaynaklarında mikro gözenekliliğin hacim yüzdesi ile termal parametre $G^{-0.5}V^{-0.25}$

Termit kaynaklarında kullanılan kaynak koşulu aralığı içinde, $G^{-0.5}V^{-0.25}$ parametresi ile gözenekliliğin hacim farklılıklarının artan eğilimi doğrusaldır ve Şekil 12'deki verilere uygun bir eğri, termit kaynaklarında mikro gözenekliliğin öneminin tahmin edilmesine ait ilişkiyi sağlamaktadır

7. Kaynak Hata Oluşum İhtimalleri

Termit ray kaynaklarının kalitesini artırmak için, kaynak kusurlarının oluşumunu ve sıklığını en aza indirecek şekilde kaynak parametrelerinin optimize edilmesi gerekir. Kaynak kusurlarının oluşmasına neden olan kaynak parametrelerinin değerlerini gösteren genel bilgilerin olması faydalı olacaktır. Bu bölümde, bu çalışmada ele alınan çeşitli kaynak kusurları için kritik koşullar irdelenmiştir. Bunlara dayanarak ray termit kaynaklarının güvenilirliğini artıracak yöntemler önerilecektir.

7.1. Dikkate alınan kaynak parametreleri ve kaynak hataları

Kaynak hatası gelişimi üzerinde etkili olan ve uygulamada kontrol edilebilen yalnızca üç kaynak parametresi vardır

- Kaynak aralığı
- Sıvı sıcaklığı
- Ön ısıtma süresi.

Bu bölümdeki tüm hesaplamalar için 7 mm'lik çıkıntı boyutu ve 60 saniyelik döküm süresi göz önünde tutulmuştur. Önceki bölümlerde ele alınan dört kaynak hatası burada da ele alınmaktadır:

- Ray tabanındaki soğuk bindirme,
- Ray boynundaki büzülme boşluğu,
- Ray tabanı ve boynundaki merkez hattı kusur kümesi
- Ray mantarındaki mikro gözeneklilik

Her ne kadar mikro gözeneklilik ray mantarı dışındaki yerlerde de oluşabilse de, bu mikro süreksizliklerin varlığı, Carpenter ve arkadaşları ile Barsom tarafından gösterildiği gibi yorulma çatlakları büyümesini önemli ölçüde etkilememektedir [24,25]. Yalnızca ray mantarı gibi daha ciddi kaynak kusurlarının bulunmadığı alanda mikro gözenekler kritik yorulma çatlaklarını artırır [18]. Bu nedenle sadece ray mantarındaki mikro gözenekler dikkate alınmalıdır.

7.2. Kaynak kusuru oluşum basamakları

Yukarıdaki analizlere dayanarak, aşağıdaki parametreler ve bunlara ait değerlerden, kaynak kusurlarının oluşumunu veya önemini anlatmak için faydalanılmıştır.

Soğuk bindirme oluşumu: Geri erime derinliği, soğuk bindirme oluşumunu tanımlamak için kullanılır. Geri erime derinliği, <7 mm olduğunda, soğuk bindirme oluştuğu varsayılmıştır.

Büzülme boşluğu oluşumu: Katılma sırasında izole bir sıvı bölgenin varlığı, büzülme boşluğu oluşumunun bir belirtisi olarak kabul edilir. Birbirini takip eden iki termit arasındaki kaynak parametresi değerinin sadece bir kaynak değeri değiştirilerek büzülme boşluğu oluşumu için kritik koşul olduğu varsayılmaktadır.

Merkez hattı kusur oluşumu: Niyama'nın değiştirilmiş sıcaklık gradyanı ($G/R^{1/2}$), merkez hat kusur oluşumunu açıklamak için kullanılmıştır. Yerel termal gradyan olarak tanımlanan Niyama kriteri, soğutma hızının kareköküne bölünür. $G/\sqrt{R} = 2$ 'nin ($^{\circ}\text{C}^{1/2} \text{ min}^{1/2}/\text{cm}$) merkez hat kusurunun oluşması için kritik koşul olduğu varsayılır.

Mikro gözeneklilik oluşum sıklığı: Termit ray kaynaklarında mikro gözeneklilik kaçınılmaz bir sonuçtur. Böylece mikro gözeneklilik oluşumuna ilişkin kriteri belirlemek yerine, mikro gözenekliliğin yoğunluğu göz önünde tutulduğunda, kaynak parametreleri ile mikro gözenekliliğin oluşum sıklığı arasında bir korelasyon ilişkisi olduğu sonucuna varılabilir. Ray boynu ile ray tabanı arasında, merkez hattı kusurunun ray boynunda meydana gelme olasılığı daha yüksektir. Ara sıvı sıcaklığı veya ön ısıtma süresi ile ray boynundaki merkez hat kusuru oluşumunu önlemek daha kolaydır.

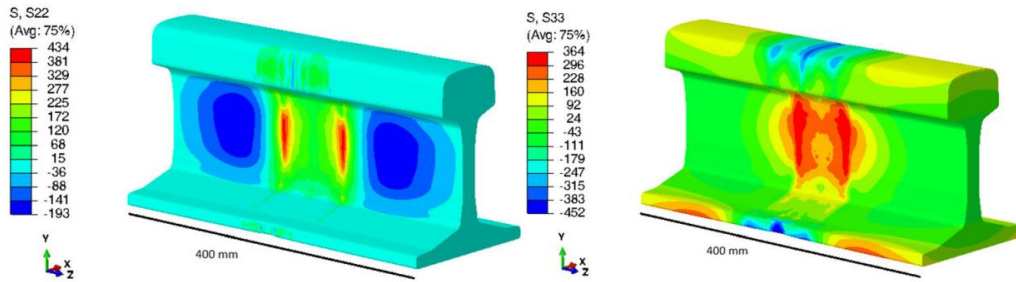
8. Tartışma

8.1. Kusur oluşum sınırları

Soğuk bindirme kusurlarının çok çeşitli kaynak parametreleri için oluşabileceği görülmektedir; ancak termit kaynaklarında soğuk bindirme kusurları çok sık görülmez. Bu çelişkinin iki nedeni olabilir. Birincisi, soğuk bindirme kusuru, kaynak kalıbı ile ray yüzeyi arasındaki hatalı eşleşmenin neden olduğu yetersiz bir füzyon hatası olan 'çıkıntı' kusuruna benzer [8]. Pratikte soğuk bindirme ile çıkıntı kusurunu birbirinden ayırmak zordur. İkincisi, analizde soğuk bindirme oluşumunun tahmini başlangıcı, kaynak aralığı genişliğinin tam olarak iki ray ucu arasındaki mesafe olduğu varsayılır. Sabit kaynak kalıbı ray genişliği göz önüne alındığında, çıkıntının boyutu kesindir. Ancak fiziki termit kaynaklarında kaynak aralığı, iki ray ucu arasına standart termit kaynağı için 25 mm olan sağlam bir ölçü mastarı yerleştirilerek hazırlanır. Kaynak aralığının ölçü bloğunun genişliğinden daha küçük olması mümkün değildir; bunun yerine gerçek kaynak aralığının daha büyük olması mümkündür. Sonuç olarak, çıkıntı mesafesi normalde 7 mm'den küçük olabilir ve dolayısıyla soğuk bindirme oluşumu minimize edilmiş olur. Ray ucunun yalnızca 5 veya 6 mm'lik yatay erimesine ihtiyaç duyulursa, soğuk bindirme oluşum bölgesinin sınırı, kusur oluşum haritasında önemli ölçüde sola doğru hareket edecektir. Bu nedenle, 7 mm'lik çıkıntı mesafesi varsayımı kullanılarak elde edilen bu termit kaynaklarda, soğuk bindirme oluşum olasılığı yüksek görülebilir. Kaynak parametresi alanından geçerken kullanılan artışlar ne kadar küçük tutulursa, kaynak hatası oluşum bölgeleri o kadar doğru bir şekilde belirlenebilir. Bu özellikle büzülme boşluğunun kritik durumu için geçerlidir. Bu büyük artışlar büzülme boşluğu oluşum bölgesinin hassasiyetini etkileyebilir. Bir büzülme boşluğunun ne zaman oluşabileceğini doğru bir şekilde belirlemek için, kaynak değişkenlerinin daha hassas artışlarını kullanan çok daha fazla kaynağa ihtiyaç vardır. Aslında, mikro gözenekliliğin hacim oranı, birincil dendrit kol aralığının karmaşık bir fonksiyonudur ve daha büyük dendrit kol aralığında doygun hale gelir [22]. Bir fiziki termit kaynağındaki gözenekliliğin gerçek hacim yüzdesi farklı olabilir.

8.2. Termit kaynaklarında kaynak kusurlarının bastırılması

Kusur alanları arasında, soğuk bindirme kusuru ve büzülme boşluğu benzer bir şekilde sahiptir. Sıvı sıcaklığının, ön ısıtma süresinin ve kaynak aralığının artırılması, soğuk bindirme ve büzülme boşluğunun ortadan kaldırılmasına yardımcı olabilir. Nüfuziyet azlığının ortadan kaldırılması için sıvı sıcaklığının ve ön ısıtma süresinin artırılması daha etkilidir. Buna karşılık, sıvı sıcaklığının ve kaynak aralığının artırılması, büzülme boşluğunun ortadan kaldırılmasında daha etkilidir. Büzülme boşluğu oluşumunun görülme ihtimali, tüm kaynaklarda soğuk bindirme kusurundan daha azdır. Böylece, soğuk bindirmeyi ortadan kaldıracak bir kaynak koşuluyla büzülme boşluklarının oluşması da önlenir, ancak soğuk bindirme kusurlarından kurtulmak kaynak parametrelerinde daha büyük bir artış gerektirecektir. Ray ucunun çıkıntısı standart termit kaynağı için <math>< 7\text{ mm}</math>’den daha küçükse, soğuk bindirmenin ortadan kaldırılması için kritik koşullar büzülme boşluğunun giderilmesinden çok farklı olmayabilir. Aşağıdaki şekil 13’te kaynaktan hemen sonra enine ve boyuna oluşan ray ve kaynak metalinde oluşan gerilmeler görülmektedir. Boyunda hem dikey hem de uzunlamasına yönde büyük çekme gerilmeleri oluşur. 12 dakika ila 18 dakika arasındaki sıvıdan katı faza dönüşümlerindeki hacim değişiklikleri küçük gerilim değişimleri olarak gösterilirken, östenitten perlitte son faz dönüşümü hem dikey (S22) hem de boylamsal yönde daha büyük bir gerilim düşüşü sağlayacaktır [14]. Ayrıca östenitten perlitte son faz dönüşümünün 700°C sıcaklıkta başlayıp 660°C ’de bittiği gerçeği hatırdan çıkarılmamalıdır.



Şekil 13. Geleneksel UIC60 ray profili için ATW işleminden sonra hesaplanan dikey (S22), boylamasına (S33) artık gerilim alanı (MPa)

Merkez hattı kusur oluşumunun bastırılmasına yönelik kaynak koşulları daha karmaşıktır. Ray boynu için merkez hattı hatası, kaynak parametrelerinin orta aralığında meydana gelmez ancak ray tabanı için, merkez hattı kusurunun oluşumu çoğu zaman kaynak aralığından güçlü bir şekilde etkilenirken, sıvı sıcaklığından ve ön ısıtma süresinden daha zayıf bir şekilde etkilenebilir. Ray boynundaki merkez hattı kusur oluşumunun sınırı, ray tabanına göre daha büyük bir kaynak aralığında meydana gelir. Bu nedenle, ray boynundaki merkez hattı kusurunu ortadan kaldırmak için kaynak aralığı arttırılırsa ray tabanındaki herhangi bir merkez hattı kusurunun da önlenmesi mümkün olacaktır [26]. Ön ısıtma süresinde ve sıvı sıcaklığındaki küçük bir artış, ray boynunda merkez hattı kusurunun oluşmasını azaltacaktır; ön ısıtma süresinde ve sıvı sıcaklığındaki limitlerin üzerinde yapılan daha fazla artış, merkez hattı kusurunun oluşma eğilimini arttıracaktır. Bu geçiş noktası sıvı sıcaklığı için 2050°C , ön ısıtma süresi için 5 dakikadır. Ön ısıtma süresindeki ve sıvı sıcaklığındaki artışlar, sıvı sıcaklığı çok yüksek olmadığı sürece ray tabanındaki merkez hattı kusur oluşumunu önemli ölçüde etkilemeyecektir. Termit kaynaklarında mikro gözenekliliğin oluşması, dikkate alınan kaynak parametreleri aralıklarında kaçınılmazdır. Mikro gözeneklilik içeriğinin kaynak parametrelerine bağımlılığı, soğuk bindirme ve büzülme boşluğunun oluşma koşullarının tersidir. Sıvı sıcaklığı ne kadar yüksekse ve kaynak aralığı ne kadar genişse, mikro gözenekliliğin hacim yüzdesi de o kadar yüksek olur. Dolayısıyla, soğuk bindirme kusurlarının, büzülme boşluklarının ve merkez hattı kusurlarının ortadan kaldırılması, yan etki olarak mikro gözeneklilik içeriğinin arttırılması pahasına sağlanacaktır. Neyse ki bu artış önemli değildir. Termit kaynaklarındaki mikro gözeneklilik göz ardı edilirse, termit kaynaklarının kaynak kusurları, soğuk bindirme, büzülme boşluğu ve merkez hattı kusurları olmadan üretilmesi

mümkündür. Mevcut standart termit kaynak koşulları 25 mm kaynak aralığı, 5 dk ön ısıtma süresi ve 2050°C ortalama sıvı sıcaklığıdır. Böyle bir 'kusursuz' termit kaynağı üretmek için bile mikro gözeneklilik hala mevcut olacaktır, ön ısıtma süresi değiştirilmeden tutulmalı ve sıvı sıcaklığı 2100°C'ye ve kaynak aralığı 35 mm'ye yükseltilmelidir veya sıvı sıcaklığı değiştirilmeden ön ısıtma süresi 6,25 dakikaya ve kaynak aralığı 38 mm'ye çıkarılmalıdır. Her iki durumda da kaynak aralığı önemli ölçüde artar ve sıvı sıcaklığının veya ön ısıtma süresinin değiştirilmesi tek başına pek önemli sonuçlar veremez.

9. Sonuçlar

1. Mevcut standart ray termit kaynağı uygulamasıyla büzülme boşlukları önenebilir, ancak soğuk bindirme ve merkez hattı kusurunun oluşması görülebilir. Ön ısıtma süresinin ve sıvı sıcaklığının artmasıyla, soğuk bindirme ve merkez hattı kusurunun oluşma olasılığı azaltılabilir.

2. Termit kaynaklarında mikro gözeneklilik kusuru giderilemez. Soğuk bindirme ve merkez hattı kusurlarını önlemek için uygun olan kaynak koşulları oranında ön ısıtma süresinin ve sıvı sıcaklığının artırılmasının yan etkisi olarak daha büyük oranlarda mikro gözenekliliğe yol açması kaçınılmazdır.

3. Standart kaynak aralığı boyutunun artırılması, nüfuziyet azlığının sonucu görülen soğuk bindirme ve merkez hattı hatası oluşumunun önlenmesine yardımcı olur. Aslında termit kaynaklardaki soğuk bindirme ve merkez hattı kusurlarını ortadan kaldırmak için mevcut standart olan 25 mm'lik kaynak aralığının artırılması gerekmektedir. Ön ısıtma süresini veya sıvı sıcaklığını ayrı ayrı artırmak, kaynak aralığını artırmak kadar etkili değildir. Mevcut standart termit kaynak işlemiyle, ön ısıtma süresindeki 2-3 saniyelik bir artışla birlikte 38 mm'lik bir kaynak aralığı, büyük kaynak kusurlarından arınmış termit kaynakları elde etmek için en pratik yaklaşım olacaktır. Bundan sonraki çalışmalarda, bu sonuçlar ışığında uygun ortamlar hazırlanarak fiziki termit kaynakları yapılabilir, standart kaynak aralığı bu makaledeki aralıklarla değiştirilerek sonuçların örtüşüp örtüşmediği kontrol edilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, TCDD Demiryolu Teknoloji ve Araştırma Merkezinin (DATEM) katkıları ile yapılmıştır. Bu çalışmanın yapılması için resmi izin ve desteklerinden dolayı DATEM Araç Teknolojileri Müdürü ve DEMUHDER Başkanı Sayın Çetin TEKİN'e Laboratuvar ve deney çalışmalarında bize verdikleri destekten dolayı teşekkür ederiz. Ayrıca, TCDD Ankara Demiryolu Eğitim ve Sınav Merkezi Müdürü, Sayın Dursun YAVUZ'a ve Eğitim Dairesi Başkanlığı Ölçme ve değerlendirme Şube Müdürü Sayın Hakan KARLIDAĞ'a teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] L.C. Schroeder, ve D.R. Poirier, "Mekanik birinci sınıf alaşım raylardaki termit kaynaklarının özellikleri." *Malzeme Bilim. Müh.*, 1984, 63, 1 –21.
- [2] B. Demir, K.B. Ali, H. Gürün, M. Acarer, "An investigation of the shearing performance and sheared surface characterization of Ultra-Strength DP Steel-Al Explosive Welded Plate Composite", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023.
- [3] I. Nenad, M. T. Jovanovic, M. Todorovic, M. Trtanj, ve P. Saponjic, "Raylarda kaynak sonrası ısıtma işlemi görmüş termit kaynağının mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonu," *Malzeme. Charact.*, 1999, 43, 243.
- [4] L.C. Schroeder, ve D. R. Poirier, "Thermite demiryolu kaynakları, süreç, mekanik ve metalurjik özellikler ve olası iyileştirmeler," *Demiryolu Ray Kaynağı Bildirileri, Memphis*, 29 –30 Kasım 1983, s. 21

- [5] A. Arı, B. Demir ve A. Keskin, "Alimünotermite kaynağıyla birleştirilmiş, mantarı Sertleştirilmiş "R350HT" rayın boyuna sertlik taramasının incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sayı. 18, ss. 50-58, Tem. 2023, doi: 10.47072 / demiryolu.
- [6] J.A. Gianetto, E. Es-Sadiqi, K.J. Sawley, M.A. Joos, ve D.W. Blowatt, "EMS'nin demiryolu termit kaynak yapısı ve özellikleri üzerindeki etkisi." *39. Mekanik İşleme ve Çelik İşleme Konferansı Uluslararası Demiryolu Çelikleri Sempozyumu Bildirileri, Indianapolis, IN, 21 Ekim 1997*, s. 1091.
- [7] J. P. Cyre, "Termit ray kaynaklarının yorulma direncini geliştirmeye yönelik konseptler." Yüksek Lisans Tezi, Illinois Üniversitesi, Urbana-Champaign, 2002.
- [8] E. T. Ross, "Geliştirilmiş termit ray kaynağına ilişkin istatistiksel bir çalışma." Yüksek Lisans Tezi, Illinois Üniversitesi, Urbana Champaign, 2004
- [9] J.A. Oderio, "Termit kaynaklı demiryolu raylarındaki detay kırılmasının metalurjik bir çalışması." Yüksek Lisans Tezi, Illinois Üniversitesi, Urbana-Champaign, 1992.
- [10] G.T. Fry, F.V. Lawrence ve A.R. Robinson, "Termit ray kaynaklarında yorulma kusuru çekirdeklenmesine yönelik model. Yorgunluk Fraksiyonu." *Müh. Malzeme. Yapı.*, 1996, 19(6) 655
- [11] A. Arı, "Alüminotermite kaynağıyla birleştirilmiş mantarı sertleştirilmiş 'R350HT' rayın mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi" PhD Thesis 2021 Ankara
- [12] Y. Chen, F.V. Lawrence, C.P.L. Barkan, ve J.A. Dantzig, "Ray termit kaynaklarında kaynak hatası oluşumu." Proc. IMechE, Bölüm F: *J. Rail ve Rapid Transit*, 2006, 220(F4), 373 –384.
- [13] Y. Liu et al., "Mechanical Properties and Microstructural Analysis of Rail Thermite Welding Joints," 2018 *International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, Singapore, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIRT.2018.8641675.
- [14] B. Lennart Josefson, R. Bisschop, M. Messaadi, J. Hantusch. "Residual stresses in thermite welded rails: significance of additional forging." Received: 6 December 2019 /Accepted: 27 April 2020
- [15] K. Kubo, ve R. D. Pehlke, "Katılarda gözeneklilik oluşumunun matematiksel modellenmesi." *Metal. Trans. B*, 1985, 16B, 359
- [16] T. Overfelt, "Katılarda modellenmesinin üretimdeki önemi". *J. Metals*, 1992, 44(6), 17.
- [17] W. S. Pellini, "Yükseltici yeterliliğini ve besleme aralığını belirleyen faktörler." *Trans. Am. Foundry Soc.*, 1953, 61, 61.
- [18] E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa, ve S. Saito, "Sıcaklık gradyanı hesaplamalarından büyük çelik dökümlerdeki büzülme tahmin etme". *AFS Uluslararası Döküm Metalleri J.*, 1981, 6, 16
- [19] G. K. Sigworth, ve C. Wang, "Katılarda sırasında gözeneklilik oluşumunun mekanizmaları: teorik bir analiz." *Metal. Trans. B*, 1993, 24B, 349.
- [20] E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa, ve S. Saito, "Büzülme tahmini yöntemi ve bunun çelik döküm uygulamasına uygulanması." *AFS Uluslararası Döküm Metalleri J.*, 1982, 7(9), 52.
- [21] K.D. Carlson, C. Beckermann "Use of the Niyama criterion to predict shrinkage-related leaks in high-nickel steel and nickel-based alloy castings." In: *Proceedings of the 62nd SFSA Technical and Operating Conference. Steel Founders' Society of America*, 2008
- [22] D.R. Poirier, K. Yeum, ve A.L. Maples, "Alüminyum açısından zengin Al-Cu alaşımlarında mikro gözeneklilik oluşumu için termodinamik bir tahmin." *Metal. Trans. A*, 1987, 18A, 1979..
- [23] W. Kurz, D. J. Fisher, "Katılarda Temelleri", 1986 (*Trans Tech Yayınları*, İsviçre).
- [24] G.F. Carpenter, R.K. Steele, ve M.J. Markase, "Dahil edilen içeriğin ray çeliklerinin yorulma performansı üzerindeki etkisi." *Raylı Çelikler Sempozyumu Bildirileri, Montreal, Quebec, Kanada, 26 –27 Ekim 1992*, s. 49 –56.
- [25] J.M. Barsom, ve E.J. Imhof, "Karbon çelik rayların yorulma ve kırılma davranışı. Ray çeliklerinin geliştirilmesi, işlenmesi ve kullanımı" (Eds D. H. Stone ve G. G. Knupp), 1978, s. 387 (*Amerikan Test ve Malzeme Derneği, Philadelphia*) ASTM STP 644.
- [26] Ö. Akbayır, "Dünyada ve Türkiye'de demiryolu kazaları nedeniyle meydana gelen ölüm oranlarının karşılaştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, Sayı 5, 2017

Özgeçmiş**Adem ARI**

1969 yılında doğmuştur. Lisans eğitimini Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliğinde, Yüksek Lisans eğitimini Karabük Üniversitesinde tamamlamış, halen bu üniversitede Doktora eğitimine devam etmektedir. Ankara Bilim Üniversitesi İHA Teknolojisi ve Operatörlüğü Bölümünde Öğretim Görevlisidir. Kompozit Malzemeler, Makine Elemanları, Mukavemet, Hidrolik ve Pnömatik İlgili alanlarına giren araştırma konulardır.

E-Posta: adem.ari@ankarabilim.edu.tr

**Bilge DEMİR**

1970 yılında doğmuştur. Lisans ve Doktora eğitimini Gazi Üniversitesinde tamamlamıştır. Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konstrüksiyon ve İmalat Teknolojisi bölümünde öğretim üyesidir. İlgili alanına giren araştırma konuları Üretim ve Kaynak Teknolojileri, Toz teknolojisi, Kompozit malzemeler ve Malzeme Tasarım ve Davranışlarıdır.

E-Posta: bdemir@karabuk.edu.tr

**Atilla KESKİN**

1967 Yılında doğmuş Lisans ve Yüksek Lisans Eğitimi Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme ve Metalürji Mühendisliğinde tamamlamış, Türkiye ve Ortadoğu Anma İdaresi Enstitüsünde de Kamu Yönetiminde Yüksek Lisans yapmış ve halen TCDD DATEM İşletme Müdürlüğü'nde çalışmaktadır. İlgili alanları demiryolu malzemelerinin kırılma analizi, tahribatsız muayenesi, araştırma ve testleridir.

E-Posta: atilakeskin@hotmail.com; atilakeskin@tcdd.gov.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Adem ARI: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım. Bilge DEMİR: Kontrol. Atilla KESKİN: Görselleştirme, İnceleme.