

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ AA 2024-T3 ALÜMİNYUM PLAKALARIN ISI VE AKIŞ ANALİZİ

Atilla Savaş

Yrd. Doç. Dr.,

Piri Reis Üniversitesi,

Mühendislik Fakültesi,

Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul

atillasavas2028@gmail.com

ÖZ

Bu çalışmada, AA 2024-T3 alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynaklı bağlantılarının (alın kaynağı) ısı transferi ve CFD analizi yardımıyla modellenmesi anlatılmaktadır. Isı transferi ve CFD kısmı aynı anda çözülmektedir. Sıcaklık dağılımı literatürde mevcut deneylerden yararlanılarak doğrulanmıştır. Deneysel ve model sıcaklık değerleri arasındaki ortalama hata değeri yüzde 5'i geçmemektedir. Tüm plakadaki sıcaklık dağılımı sadece bir kaynak koşulu için, metal akış sahaları ise değişik kaynak koşulları için gösterilmiştir. Kaynak mühendisi bu modelle, meydana gelen ısı miktarını, sıcaklık dağılımını ve takım etrafındaki metal akışını pahalı deneyler yapmadan tahmin edebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Isı transferi analizi, CFD analizi, Sonlu Elemanlar Metodu (SEM), Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK), alüminyum alaşımı

HEAT TRANSFER AND CFD ANALYSIS OF FRICTION STIR WELDED (FSW) AA 2024-T3 ALUMINUM ALLOY PLATES

ABSTRACT

This paper describes modeling three-dimensional heat transfer and CFD analysis of friction stir welded (FSW) of AA 2024-T3 aluminum alloy. Heat transfer and non-Newtonian flow equations were solved simultaneously. The results from the benchmark experiments found in the literature were used as validation purposes. Mean error between the experimental and the model temperatures don't exceed 5 per cent. The heat generated by the shoulder and the flow fields of the plasticized aluminum for different welding conditions are depicted. Welding engineer can predict the heat energy and the metal flow around the tool at any welding conditions without making expensive experiments.

Keywords: Heat Transfer analysis, CFD analysis, Finite Elements Method (FEM), Friction Stir Welding (FSW), aluminum alloy

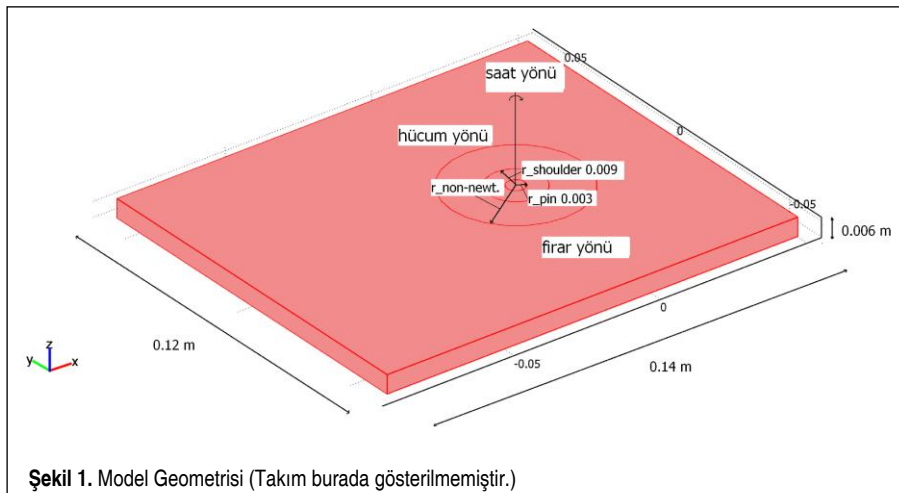
Geliş tarihi : 05.03.2015

Kabul tarihi : 07.12.2015

Savaş, A. 2015. "Sürtünme Karıştırma Kaynağıyla Birleştirilmiş AA 2024-T3 Alüminyum Plakaların Isı ve Akış Analizi," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 671, s. 59-64.

1. GİRİŞ

Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) The Welding Institute tarafından 1991 yılında geliştirilmiştir [1]. Bu yöntem, ergitme kaynağıyla kolayca kaynak edilemeyen alüminyum alaşımlarının kaynağı için uygundur. Birçok araştırmacı bu kaynak yöntemini hem sayısal hem de deneysel olarak çalışmıştır. Bazı araştırmacılar CFD analizi kullanmaya odaklanmışlardır. Bu yöntemde kaynak edilen plakaların sıcaklık dağılımı ve kaynak takımı etrafındaki metal akış sahası elde edilebilmektedir. SKK sürecinin CFD analizi sayesinde pahalı deneylerden kaçınılabilmektedir. Seidel ve Reynolds'un çalışmasında, AA 6061-T6 alüminyum alaşımı incelenmiştir [2]. Bu çalışmada, kaynak hızı ve takım dönüş hızı değiştirilerek parametrik incelemeler yapılmıştır. Değişik kaynak enerjileri ve takımda meydana gelen kuvvet ve torklar takımın bir dönüşteki ilerlemesine göre gösterilmiştir. Çalışmanın sonunda, takım omzuna ve vida dişine sahip takım ucunu içeren 3-Boyutlu bir modelin SKK kaynak parametrelerini daha gerçekçi tahmin edebileceği değerlendirilmiştir. Colgrove ve Shercliff'in çalışmasında, AA 7075-T6 alüminyum alaşımı incelenmiştir. Viskozite denklemini tanımlarken, ark sinüs hiperbolik kuralı kullanılmıştır. Model, Fluent yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur [3]. Colgrove ve Shercliff'in bir başka çalışmasında, vida dişine sahip kaynak takımı ucu etrafındaki metal akışı incelenmiştir. Akış sahasının çözümü için Fluent yazılımı kullanılmıştır. Alüminyum alaşımları AA 5083 ve 7075-T6 kullanılmıştır [4]. Colgrove, AA 7449 alüminyum alaşımının kaynağında ortaya çıkan sıcaklık dağılımını Comsol yazılımı kullanarak ortaya çıkarmıştır. 2.5 boyutlu bu modelde 3 boyutlu sıcaklık dağılımı 2 boyutlu metal akış sahasına transfer edilmiştir [5]. Long ve Reynolds, AA 6061 alüminyum alaşımını Fluent yazılımıyla modellemiştir. 2-boyutlu bir çalışma yapmışlardır. Kaynak takımı etrafında çok ince bir ağ kullanarak takımdaki torku hesaplayabilmişlerdir [6]. Schmidt ve Hattel, Comsol yazılımını kullanarak AA 7075-T6 alüminyum alaşımını incelemiştir. Kullandıkları viskozite yaklaşımı, üstel fonksiyon akma direnci yaklaşımıdır. Newtonyen olmayan metal akışını bu şekilde simüle etmişlerdir. Kaynaklı plakalardaki sıcaklık dağılımını bulmak için TPM (Thermal Pseudo Mechanical) yöntemini kullanmışlardır [7]. Atharifar ve arkadaşları, Fluent yazılımı yardımıyla AA 6061 alüminyum alaşımını incelemiştir. Newtonyen olmayan viskozite denklemini Fluent yazılımı kütüphanesinden Carreau yaklaşımıyla çözmüşlerdir. Bu sayede hesaplamalar daha kısa sürmüştür. Takım torku ve kuvvetlerini hesaplamışlar ve deneylerle uyum içinde olduğunu görmüşlerdir [8]. Hilgert ve arkadaşları,



Şekil 1. Model Geometrisi (Takım burada gösterilmemiştir.)

BTFWS takımının etrafındaki metal akışını incelemiştir. Bu çalışmada, alüminyum viskozitesi yüksek kesme kuvvetine maruz kaldığında, viskozitesi azalan bir Newtonyen olmayan sıvı malzeme gibi değerlendirilmiştir. 4 mm'lik AA 2024-T3 alüminyum plakalar Comsol yardımıyla incelenmiştir. Hesaplanmış ve ölçülmüş tork değerleri birbirine yakındır [9]. Hilgert ve arkadaşlarının bir başka çalışmasında, Comsol ve Matlab beraber kullanılmıştır. TPM (Thermal Pseudo Mechanical) yöntemi yardımıyla sıcaklık dağılımı tespit edilmiştir [10]. Roy ve arkadaşları, AA 6061 alüminyum alaşımının metal akış sahasını incelemiştir. Modeli oluştururken Comsol yazılımı kullanmışlar ve viskozite denklemini Carreau yöntemiyle çözmüşlerdir. Kaynak takımı etrafındaki hız ve viskozite dağılımını incelemiştir. Modelin doğrulanması deneysel sıcaklık dağılımıyla model sıcaklık dağılımının karşılaştırılması yapılmıştır [11].

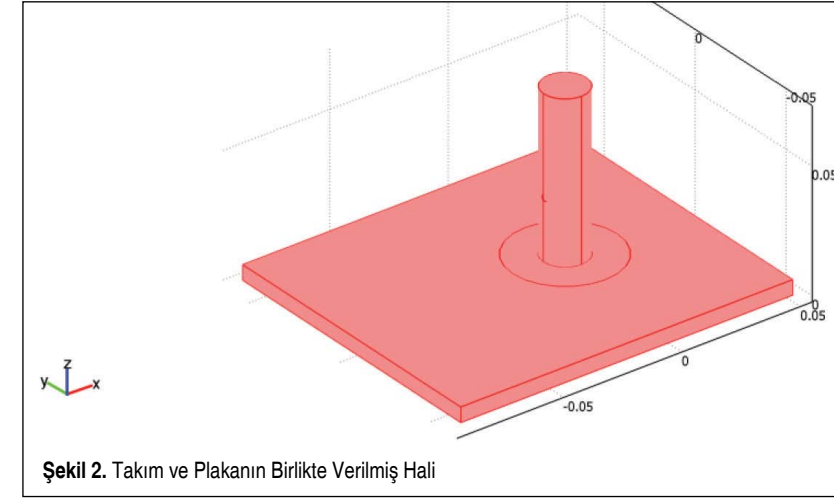
Mevcut çalışmada, AA 2024-T3 alüminyum plakalarda SKK sonucunda meydana gelen metal akış problemi Comsol 3.5a yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Bu model, ısı transferi ve CFD analizi kısımlarını eş zamanlı olarak çözmektedir.

2. SAYISAL MODELLEME

Model geometrisi, 3-boyutlu olup, 140x120x6 mm ölçülerindeki plakadan ve bir kaynak takımından oluşmaktadır (Şekil 1). Kaynak takımı omuz yarıçapı 9 mm, takım uç yarıçapı 3 mm'dir. Takım ucu yüksekliği ve uzunluğu sırasıyla, 5.3 mm ve 65 mm olarak alınmıştır (Şekil 2). Kartezyen koordinat sisteminin merkezi takım eksenini üzerinde ve plakanın alt kısmındadır. Plaka malzemesi olarak AA 2024-T3, takım malzemesi olarak ise yüksek hız çeliği seçilmiştir.

2.1 AA 2024-T3 ve Takım Malzemesinin Özellikleri

AA 2024-T3 alüminyum alaşımının sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik, özgül ısı ve yoğunluk değerleri Tutum ve arkadaşlarının çalışmasından alınmıştır (Tablo 1) [12]. Takım malzemesinin



Şekil 2. Takım ve Plakanın Birlikte Verilmiş Hali

sinin sabit değerleri ise sırasıyla şöyledir: 42 W/(mK), 500 J/(kgK), 7800 kg/m³.

Tablo 1. AA 2024-T3 Alüminyum Alaşımının Sıcaklığa Bağlı Olarak Değişen Termo-Fiziksel ve Mekanik Özellikleri [12]

T [C]	k [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg .K]	σ _y [MPa]	σ _y [MPa] (yeni)
20	100	2780	929	306	306
100	121	2767	969	261	261
200	136	2749	1022	152	152
300	137	2729	1075	57	57
400	124	2709	1128	13	20
500	98	2689	1181	5	5

2.2 Yönetici Denklemler

2.2.1 Isı Geçişi

Enerji denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + Q = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

Burada ρ(kg/m³), yoğunluğu; Cp (J/(kgK)), ısı kapasiteyi; u (m/s) ise hız vektörünü göstermektedir. Denklem sol tarafında kütlele akışla ısı geçişi kısmı, sağ tarafında ise iletimle ısı geçişi kısmı görülmektedir. Q (W/m³) ise üretilen ısıyı temsil etmektedir. Işınlama ısı geçişi bu çalışmada ihmal edilmiştir. Bu alanda önemli çalışmaları olan Colgrove ve arkadaşları [4] ile Schmidt ve Hattel [7] oluşturdukları modellerde ışınlama ısı geçişini ihmal etmişlerdir.

2.2.2 Akış Denklemleri

Süreklilik denklemi ve momentum denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \eta (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] \quad (3)$$

Burada p (Pascal), basıncı; η (Pa.s) ise dinamik viskoziteyi vermektedir.

Viskozite, ark sinüs hiperbolik kuralına göre Denklem 4'te belirtilen şekilde hesaplanmaktadır. Bu denklem, Hilgert ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadan alınmıştır [9].

Burada n bir üstel sayıdır. γ (1/s), kayma gerinimini temsil eder. ve A değerleri sabit değerlerdir. Q, aktivasyon enerjisini gösterir. R, evrensel gaz sabitidir. Bu değerler de Hilgert ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadan alınmıştır [9] ve Tablo 2'de verilmiştir.

$$\eta = \frac{1}{\alpha \dot{\gamma} \sqrt{3}} \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\gamma} \exp(Q / (RT))}{\sqrt{3} A} \right)^{1/n} \quad (4)$$

Tablo 2. AA 2024-T3 Alüminyum Alaşımının Viskozite Denklemindeki Sabitleri [9]

n	α [1/Pa]	A [1/s]	Q [J/mol]	R [J/(mol.K)]
4.27	1.6×10 ⁻⁸	3.25216×10 ⁸	1.488 ×10 ⁵	8.31451

2.3. Sınır Koşulları

2.3.1 Isı Transferi

Omuz Tarafından Üretilen Isı

Omuz tarafından üretilen ısı Denklem 5'te verilmiştir [7]. Sıcaklığa bağlı akma dayanımı değerleri Tutum ve arkadaşlarının çalışmasından alınmıştır [12].

$$q_{\text{shoulder}} = \omega r \sigma(T) / \sqrt{3} \quad (5)$$

Burada ω (rad/s), takım dönüş hızını; r (m), takım ekseninden radyal mesafeyi; σ(T) ise (Pa) sıcaklığa bağlı akma dayanımını göstermektedir. Akma dayanımı değerleri Tutum ve arkadaşlarının çalışmasından alınmış ve deneysel sonuçlara benzer sıcaklık dağılımı elde etmek için ufak değişiklikler yapılmıştır (Tablo 1). Enerji denklemi (Denklem 1) çözülmüş omuz tarafından üretilen ısı, sadece omuz üzerinde oluşan yüzey ısı olarak tanımlanmış olup, sisteme giren başka ısı mevcut değildir.

Kütlele Akışla Isı Geçişi Katsayıları

Plakaların altında 700 W/(m²K), üstünde ise 10 W/(m²K) olarak alınmıştır. Alüminyum plakaların altındaki destek plakası modele dahil edilmediğinden, suni olarak arttırılmış kütlele akışla ısı geçişi katsayısı kullanılmıştır. Bu sayede deneysel sıcaklıklara yaklaşılmaktadır. Plakanın üstünde, doğal kütlele akışla ısı geçişi katsayısı olarak 10 W/(m²K) kullanılmıştır.

Diğer Sınır Koşulları

Ortam sıcaklığı 300 K olarak alınmıştır. Plakanın kenarları yalıtılmış kabul edilmiştir. Takımın en tepesindeki kütleli akışla ısı geçişi katsayısı 10000 W/(m²K) olarak alınmış ve bu değer sayesinde üretilen ısının %10-20'ler seviyesinde takıma ve oradan da freze tezgahına geçtiği hesaplanmıştır. Takımın (65 mm uzunluğundaki) yanal yüzeyleri ısı olarak yalıtılmış kabul edilmiştir.

2.3.2 Newtonyen Olmayan Akış

Omuz ve Uç Üzerindeki Hız Sınır Koşulları

Kartezyen koordinat sistemindeki omuz ve uç üzerindeki hız sınır koşulları aşağıda verilmiştir.

$$u = y\omega \quad (6)$$

$$v = -x\omega \quad (7)$$

$$w = 0 \quad (8)$$

2.4 Sayısal Prosedür

Kaba ağırlı model yakınsamamaktadır ve gerçek dışı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, takım etrafındaki maksimum ağ boyutu 0.9 mm olarak alınmıştır. Hesaplama alanına bu değerlerin uygulanmasıyla 80000 serbestiyet derecesi elde edilmiştir. Buradaki serbestiyet derecesi bağımsız değişkenlerle (sıcaklık, x, y ve z yönündeki metal akış hızları) düğüm noktası sayısının çarpılmasıyla elde edilen sayıdır. Yakınsama kriteri olarak göreceli hata 1×10^{-5} olarak alınmıştır. 1.73 GHz Intel core i7 işlemcili ve 4 GB RAM'li bir PC ile bir kaynak koşulu için hesaplama yaklaşık 10 dakika sürmektedir.

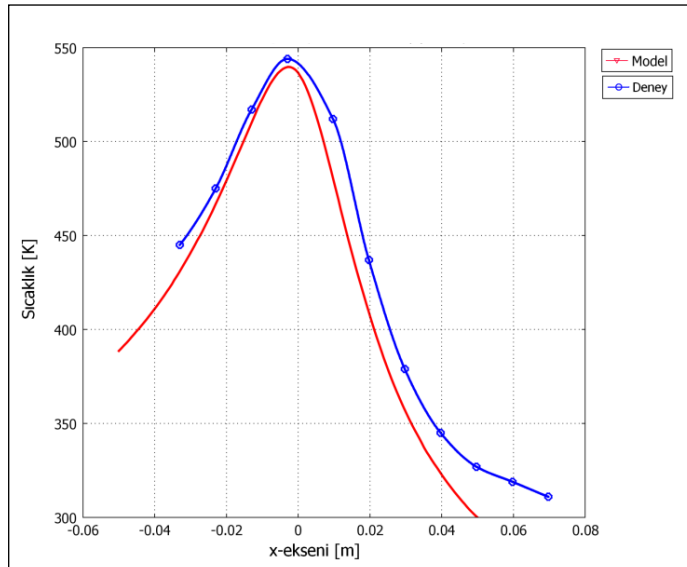
Euleryen ve kararlı halde bir model oluşturulmuştur. Bu yaklaşımda, kaynak takımı sabit tutulmakta ve plakalar kaynak yönünün aksi istikametinde hareket ettirilmektedir. Kaynak takımının dönüşü ise bitişik alüminyum levhada hız sınırı koşulu olarak uygulanmaktadır (Denklemler 6-8). Reynolds sayısı çok düşük olduğu için metal akışı laminar olarak ele alınmıştır. Enerji denklemi TPM (Thermal Pseudo Mechanical) yöntemi kullanılarak çözülmüştür [7].

Alüminyum alaşımının malzeme özellikleri ve Newtonyen olmayan akış denklemindeki viskozite kaynak takım etrafındaki akış sahasına doğrudan etki etmektedir. Mevcut modelde termomekanik olarak etkilenmiş bölgenin dışında çok küçük kayma gerinimleri gözleneceğinden ark sinüs hiperbolik viskozite denklemi kullanılmıştır. Model Comsol 3.5a yazılımıyla ısı geçişi ve kimya mühendisliği (Newtonyen olmayan akış) modülleri kullanılarak oluşturulmuştur [13].

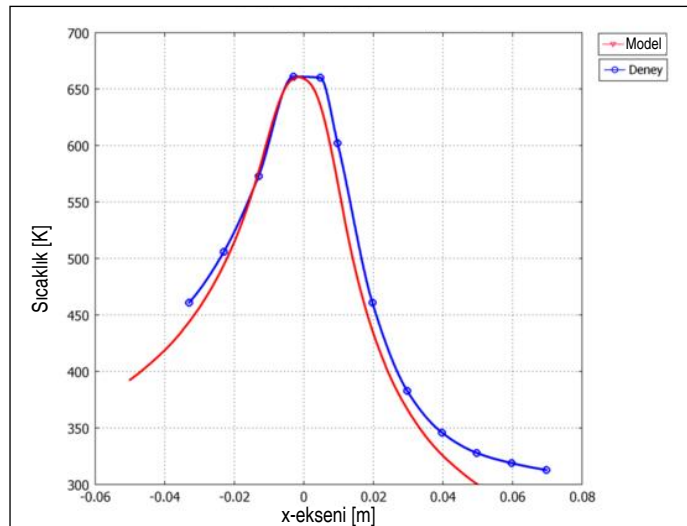
3. DOĞRULAMA

Sayısal modelin doğrulaması Cambridge Üniversitesi'nde gerçekleştirilen deneyler kullanılarak yapılmıştır [14]. Deneyde, kaynak hızı 1.333 m/s, takım dönüş hızı 600 rpm olarak uy-

gulanmıştır. FSW-T1 deneyinin (ölçüm kanalı 6 ve 7) verileri kaynak takımının pozisyonunu ve ona karşılık gelen sıcaklık olarak ilgili internet sayfasında verilmiştir. Ölçüm kanalı 6 için kullanılan ısı çifti kaynak hattından 15 mm mesafede hücum tarafında ve plakanın üst tarafına yerleştirilmiştir. Ölçüm kanalı 7 için kullanılan ısı çifti ise kaynak hattından 4 mm mesafede firar tarafında ve plakanın alt tarafına yerleştirilmiştir (Şekil 1). Deneyden alınan kaynak takımı pozisyonları modelle karşılaştırıldığında anlamlı olacak şekilde düzenlenmiştir. Bu düzenleme, kaynak pozisyonuna karşılık gelen sıcaklık değerini değiştirmeden yapılmıştır. Model ile deneyin karşılaştırılmasının yapıldığı şekiller incelendiğinde (Şekil 3 ve 4), çok yüksek bir benzerlik tespit edilmiştir. Şekil 3'te, x-ekseni boyunca 9 noktadan yapılan ortalama hata oranı hesaplamasında % 4.38 gibi bir değer elde edilmiştir. Şekil 4'te, x-ekseni



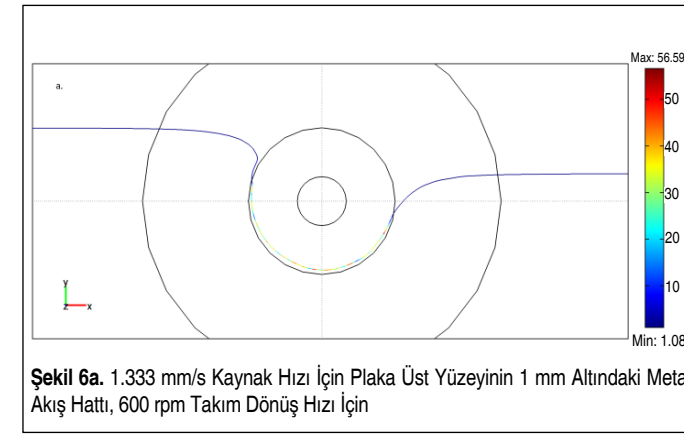
Şekil 3. Model ve Deneysel Sıcaklık Dağılımlarının Karşılaştırılması (Ölçüm Kanalı 6)



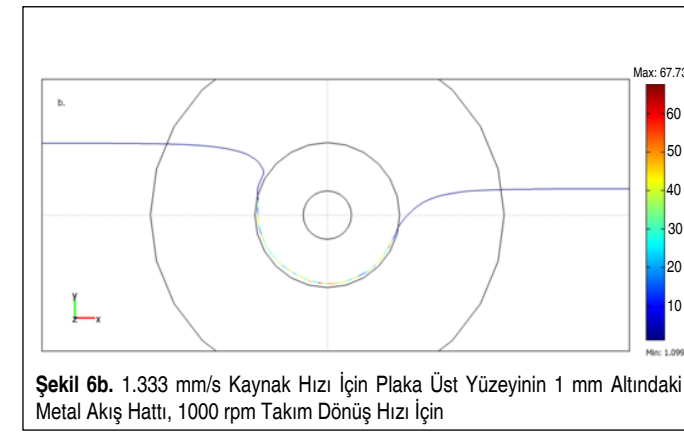
Şekil 4. Model ve Deneysel Sıcaklık Dağılımlarının Karşılaştırılması (Ölçüm Kanalı 7)



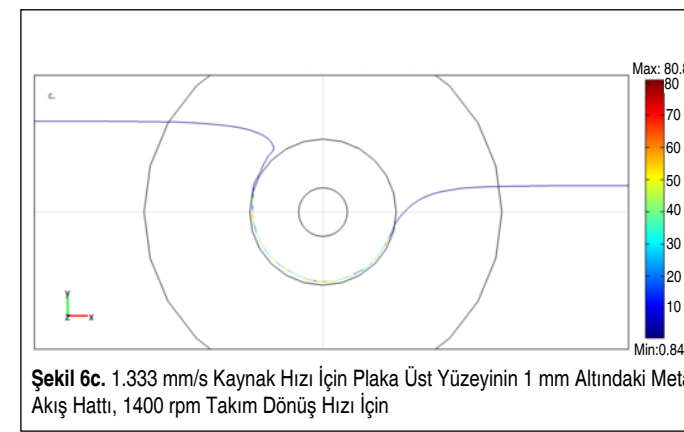
Şekil 5. Tüm Plaka ve Takım Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı



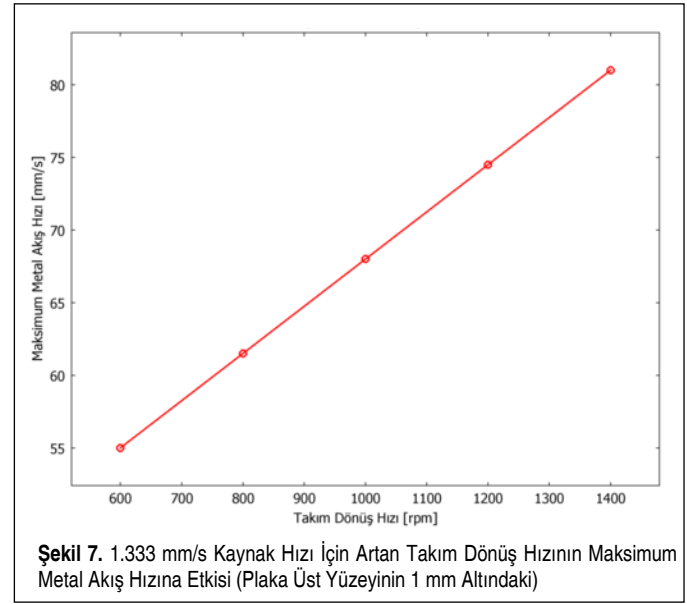
Şekil 6a. 1.333 mm/s Kaynak Hızı İçin Plaka Üst Yüzeyinin 1 mm Altındaki Metal Akış Hattı, 600 rpm Takım Dönüş Hızı İçin



Şekil 6b. 1.333 mm/s Kaynak Hızı İçin Plaka Üst Yüzeyinin 1 mm Altındaki Metal Akış Hattı, 1000 rpm Takım Dönüş Hızı İçin



Şekil 6c. 1.333 mm/s Kaynak Hızı İçin Plaka Üst Yüzeyinin 1 mm Altındaki Metal Akış Hattı, 1400 rpm Takım Dönüş Hızı İçin



Şekil 7. 1.333 mm/s Kaynak Hızı İçin Artan Takım Dönüş Hızının Maksimum Metal Akış Hızına Etkisi (Plaka Üst Yüzeyinin 1 mm Altındaki)

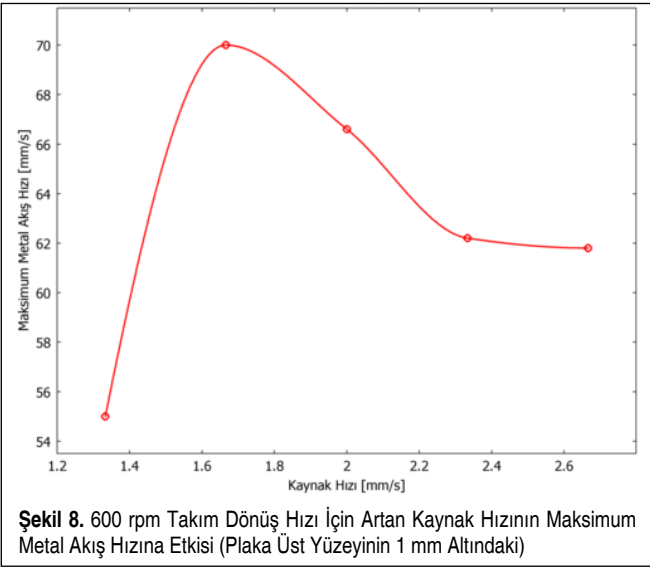
boyunca 10 noktada yapılan karşılaştırmada % 4.12 gibi bir ortalama hata oranı hesaplanmıştır. Ortalama hata oranı hesabında, deneysel sıcaklık ve model sıcaklığı arasındaki farkın deneysel sıcaklığa bölünmesiyle ortaya çıkan 9 veya 10 değerlerin ortalaması alınmıştır. Yüzde 5'ten küçük sıcaklık farkı göz önüne alındığında, bu modelin sıcaklık dağılımını doğruya yakın bir şekilde tahmin edebileceği doğrulanabilmektedir. Şekil 5'te, takım ve plaka üzerindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir (kaynak hızı 1.333 mm/s, takım dönüş hızı 600 rpm).

4. DEĞERLENDİRME

Değişik kaynak koşullarında metal akış sahasının nasıl etkilendiğine dair inceleme bu bölümde yer almaktadır. Şekil 6'da (a, b, c) 600 rpm takım dönüş hızında ve 1.333 mm/s kaynak hızında plakanın üst yüzeyinden 1 mm aşağısından ve x=10 mm, y=0 koordinatından geçen akış hattı görülmektedir. Takımın artan dönüş hızının akış hattına etkisini göstermek için Şekil 7 incelenebilir. Takımın artan dönüş hızı akış hattındaki maksimum metal hızını 81 mm/s'ye kadar çıkarmaktadır. Maksimum metal hızı 600 rpm'de 55 mm/s olmaktadır. Kaynak hızının artırılmasıyla akış hattının nasıl etkileneceğini Şekil 8'de görebilirsiniz. En yüksek metal hızı 1.666 mm/s kaynak hızında elde edilmektedir. 1.666 mm/s kaynak hızından daha yüksek hızlarda akış hattında elde edilen en yüksek hızın daha düşük olması şöyle yorumlanmalıdır. Akış hattını asıl etkileyen parametre takım dönüş hızıdır. Bu parametre 600 rpm'de sabit tutulduğundan, akış hattı üzerinde baskın bir etkisi olmayan kaynak hızının etkileri de değişken olmaktadır. Burada vurgulanması gereken önemli bir husus da şudur. Metal akış hatları x=0.01 m, y=0 ve z=0.005 noktasında başlatıldığı için kaynak hızlarının etkisi değişken olabilmektedir.

5. SONUÇ

SKK takımının etrafındaki metal akışını simüle etmek için



Şekil 8. 600 rpm Takım Dönüş Hızı İçin Artan Kaynak Hızının Maksimum Metal Akış Hızına Etkisi (Plaka Üst Yüzeyinin 1 mm Altındaki)

Euleryen bir CFD modeli oluşturulmuştur. Süreklilik, enerji ve momentum denklemlerindeki zamana bağlı terimler çıkarılarak kararlı haldeki çözüm bulunmuştur. Işınmı nedeniyle meydana gelen ısı geçişi ihmal edilmiştir. Reynolds sayısı küçük olduğundan metal akışı laminer olarak kabul edilmiştir. Kaynak takımı etrafındaki maksimum ağ boyutu 0.9 mm olarak alınmıştır. Modelin doğrulanması literatürde bulunan deneylerden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak takım hızını arttırmak, takım etrafındaki metal akışını arttırmaktadır. Kaynak hızını arttırmamanın metal akışına etkisi en fazla 1.666 mm/s kaynak hızında gözlenmektedir.

Zaman alıcı ve pahalıya mal olacak deneyleri yapmaktan kurtaran bu modelleme imkânı kaynak tasarımcısına birçok kolaylıklar sağlayacaktır.

KISALTMALAR ve SEMBOLLER

BTFWS	Bobinli Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Bobin Tool Friction Stir Welding)
CFD	Sayısal Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW, Friction Stir Welding)
TMAZ	Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (Thermo Mechanically Affected Zone)
TPM Yöntemi	Isıl Sahte Mekanik Yöntemi (Thermal Pseudo Mechanical Method)
C_p	Özgül ısı (J/kg.K)
k	Isıl iletkenlik (W/m.K)
n	Üs değeri
r	Kaynak takımı ekseninden hesaplanan mesafe (m)
r_{omuz}	Omuz yarıçapı (m)
q_{omuz}	Omuz tarafından üretilen yüzey ısısı (W/m ²)
$q_{uç}$	Uç tarafından üretilen yüzey ısısı (W/m ²)

u_{kaynak}	Kaynak hızı (m/s)
γ'	Kayma gerinimi değişimi (1/s)
η	Dinamik viskozite (Pa.s)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
$\sigma(T)$	Sıcaklığa göre değişen akma gerilimi (Pa)
ω	Dönme hızı (rad/s)

KAYNAKÇA

1. Thomas, M. W., Nicholas, J., Needham, J. C., Murch, M. G., Templesmith, P., Dawes, C. J. 1991-1995. "Friction Stir Butt Welding," GB Patent Application no. 9125978-8, 1991; US Patent no. 5460317, 1995.
2. Seidel, T. U., Reynolds, A. P. 2003. "Two-Dimensional Friction Stir Welding Process Model Based on Fluid Mechanics," Sci. Technol. Weld. Join., vol. 8 (3), p. 175–183.
3. Colegrove, P. A., Shercliff, H. R. 2004. "Two-dimensional CFD Modelling of Flow Round Profiled FSW Tooling," Sci. Technol. Weld. Join. vol. 9 (6), p. 483–492, doi: <http://dx.doi.org/10.1179/136217104225021832>, son erişim: 14.12.2015.
4. Colegrove, P. A., Shercliff, H. R. 2005. "3-Dimensional CFD Modelling of Flow Round a Threaded Friction Stir Welding Tool Profile," Journal of Mater. Processing Tech, vol. 169, p. 320–327. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.03.015.
5. Colegrove, P. A. 2006. "Modeling the Heat Generation, Temperature and Microstructure of Friction Stir Welding Using Comsol Multiphysics," Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference, (CD-ROM), 22 October 2006, Birmingham.
6. Long, T., Reynolds, A. P. 2006. "Parametric Studies of Friction Stir Welding by Commercial Fluid Dynamics Simulation," Sci. Technol. Weld. Join., vol. 11 (2), p. 200–208.
7. Schmidt, H. B., Hattel, J. H. 2008. "Thermal Modelling of Friction Stir Welding," Scripta Mater., vol. 58, p. 332–337.
8. Atharifar, H., Lin, D., Kovacevic, R. 2009. "Numerical and Experimental Investigations on the Loads Carried by the Tool during Friction Stir Welding," J. Mater. Eng. Perform. vol. 18 (4), p. 339–350. doi: 10.1007/s11665-008-9298-1.
9. Hilgert, J., Huetsch, L. L., dos Santos, J. F., Huber, N. 2010. "Material Flow around a Bobbin Tool for Friction Stir Welding," Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, 22 June 2010, Paris (CD-ROM).
10. Hilgert, J., Huetsch, L. L., dos Santos, J. F., Huber, N. 2011. "Thermal Models for Bobbin Tool Friction Stir Welding," Journal of Mater. Processing Tech. vol. 211, p. 197–204. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.09.006.
11. Roy, B. S., Saha, S. C., Barma, J. D. 2012. "3-D Modeling & Numerical Simulation of Friction Stir Welding Process," Adv. Mater. Rsrch., vol. 488-489, p. 1189–1193.
12. Tutum, C. C., Deb, K., Hattel, J. H. 2013. "Multi-Criteria Optimization in Friction Stir Welding Using a Thermal Model with Prescribed Material Flow," Materials and Manufacturing Processes vol. 28: 816-822. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2012.736654>, son erişim tarihi: 14.12.2013
13. <http://www.comsol.com/products/3.5/>, son erişim tarihi: 01.03.2013.
14. http://www-materials.eng.cam.ac.uk/FSW_Benchmark/, son erişim tarihi: 01.03.2013.