

SOĞUTUCU PLAKALARDA YÜZEY GEOMETRİSİNİN VE KANATÇIK SAYISININ ISI İLETİMİNE ETKİSİNİN SONLU ELEMAN ANALİZİ İLE ARAŞTIRILMASI

Bekir YALÇIN *

Özet

Ürün geliştirme ve iyileştirmede, Bilgisayar Destekli Mühendislik (BDM) sürekli prototip üretimini azaltıp, ürün maliyetini azaltmakla birlikte ürün kalitesini arttırmaktadır. Genellikle, BDM uygulamaları, tasarımı yapılan ürünün analizi ve simülasyonu şeklinde yapılmaktadır. Örneğin, BDM ile otomobil, elektronik, imalat ve enerji sektörlerinde, soğutma amaçlı kullanılan düz yüzeye sahip plakalar tasarlanıp imal edilmektedir.

Bu çalışmada, literatürden farklı olarak plaka kanatçığı yüzey geometrisinin, kanatçık sayısının/kalınlığının ve malzeme tipinin ısı transferi üzerine etkisi sonlu eleman modelleme (FEM) ile karakterize edilmiştir. Plaka malzemesi olarak alüminyum ve bakırın seçildiği çalışmada, üç farklı kanatçık sayısı (4, 6, 8 kanatçık) ve yüzey geometrisine (düz ve dalgalı) sahip soğutucu plakaların ısı transfer performanslarının analizi için sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve plakalar üç farklı sıcaklığa (50 °C, 150 °C, 250 °C) maruz bırakılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda, plakalarda oluşan sıcaklık farkı (ΔT) ve ısı transfer hızı değerleri elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Sonuç olarak, bu analiz ve simülasyon çalışmasıyla elektronik aygıtların, imalat ve enerji sistemlerinin, otomobil sektörü parçalarının plaka ile soğutulması uygulamalarına bilgiler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Soğutucu Plaka, Kanatçık, Sonlu Eleman Modelleme, Isı Geçişi.

AN INVESTIGATION FOR EFFECT OF FIN FACE GEOMETRY AND NUMBER OF FIN ON HEAT TRANSFER OF THE COOLER PLATE WITH FINITE ELEMENT ANALYSIS

Abstract

In product development and improvement, Computer Aided Engineering (CAE) provides decreasing of the continuously prototype manufacture and product costs and increasing the product quality. Generally, CAE applications are carried out with analysis and simulations of prototype design. Foreexample, cooler plates used in automobile, electronic, manufacturing and energy sectors are manufactured after analyzed by FEM

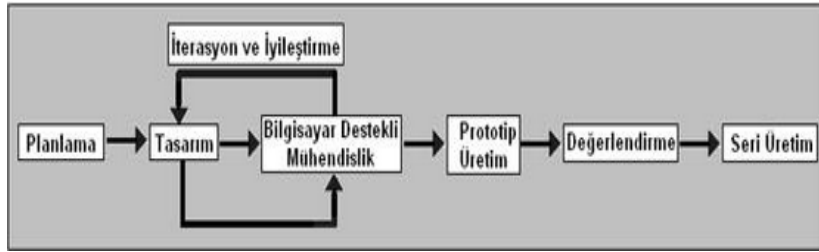
In this study, as different from literature, the effect of fin face geometry, number of fin and its thickness, material type of plate on heat transfer are characterized by finite element modelling (FEM). Aluminum and copper plate materials are chosen in FEM and finite element model was set to analyze heat transfer performances of cooler plate with different three fin number (4, 6, 8 number of fin), different two fin face geometry (straight and waved), then FE model was solved by exposing three different temperatures (50 °C, 150 °C, 250 °C) to cooler plate. The heat transfer rate and temperature gradient (Δt) values on cooler plate were obtained by FEM analyses. As a result, some information are obtained for cooler plate applications of electronic devices, manufacturing and energy systems and automobile parts.

Keywords: Cooler Plate, Fin, Finite Element Modelling, Heat Transfer.

* Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye
E-posta: bekiryalcin@sdu.edu.tr

1. GİRİŞ

Günümüz mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemlere, çoğu zaman kolayca anlaşılıp doğrudan çözüm getirmek zordur. Dolayısıyla, mühendislik hesaplamalarda ve uygulamalarda karşılaşılan bir problem, bilinen ve anlaşılması kolay alt problemlere ayrılarak çözümü yapılabilir. Fiziksel problemin tipine bağlı olarak, problem parametreleri (field variables) fiziksel yerdeğiştirme, basınç, gerilme, sürtünme, ısı transferi ve akışkan hızı gibi değişkenlerden oluşabilir. Bazen de, tüm bu değişkenlerin ikisinin veya çoğunun bir arada olduğu karmaşık problemlerin mevcut olduğu uygulamalara rastlanılmaktadır (Lazoğlu vd., 2006; Anca vd., 2011). Bu bağlamda, karmaşık yüklere maruz kalan endüstriyel parçaların imalatında, ilk evre olan prototip tasarım ve tasarımın analizi hem üretim zamanı ve maliyetini azalttığı hem de kaliteyi arttırdığı bilinmektedir. Şekil 1’de yeni bir mühendislik tasarım ile ilgili akış diyagramı verilmiştir. Ürün geliştirmede ve iyileştirmede bilgisayar destekli mühendislik/analiz önemli bir unsurdur.



Şekil 1. Modern ürün geliştirme süreci (Anonim Figs, 2014)

Bilgisayar Destekli Mühendislik (BDM) bir ürünün geliştirilmesi sürecinde sürekli prototip üretimini azaltarak ürün başına maliyet, ağırlık, ürünün pazara girme süresi, ürün ömrü ve güvenilirlik gibi parametreleri eniyilemeyi sağlayabildiği bilinmektedir. Bununla birlikte, BDM uygulamalarının en başında tasarımı yapılan prototipin analizi ve simülasyonu gelmektedir. Mühendislik problemlerin analizinde kullanılan yöntemlerden birisi de, sonlu elemanlar metodudur (FEM). FEM analiz metodu, inşaat ve uçak konstrüksiyonları, ısı iletimi ve mekanik tasarım uygulamalarında, hidrolik ve nükleer problemlerin çözümünde, biyomedikal, manyostatik ve akışkan problemlerin statik ve dinamik olarak çözümünde yaygınca kullanılmaktadır (Singiresu, 2004).

FE metodu kapsamında, ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve elatisite problemlerinin çözümünde yaygın kullanılan analiz metotları analitik ve nümerik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sonlu elemanlar metodu nümerik metot altında incelenmekte olup (Singiresu, 2004) karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle çözümü elde etme yöntemidir. Topçu ve Taşgetiren (1998)’ e göre, FE yönteminin üç temel niteliği vardır: Karmaşık olan çözüm bölgesinin sonlu elemanlar olarak adlandırılan alt bölgelere ayrılması, her elemandaki sürekli fonksiyonların cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak kabul edilebildiği, problemin çözümü için her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli düğüm noktalarındaki değerlerin elde edilmesinin yeterli olmasıdır. Statik problemler esas alınarak, FEM yöntemiyle sürekli bir problemin çözümü; ilk olarak yapının oluşturulması ve bu yapının elemanlara bölünmesi, uygun interpolasyon seçimi, eleman katılık matrisi ve yük vektörlerinin türetilmesi, tüm denge denklemlerini elde etmek için element eşitliklerinin birleştirilmesi, nodal yer değıştirmeler için çözümlenmelerin yapılması ve nihayetinde element gerilme ve gerilmelerin

hesaplanması ile yapılmaktadır. Örneğin, belli bir kalınlığa sahip plakadan giren ısı miktarı (Singiresu, 2004);

$$q_x = -k.A.\frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Bu denklemde, k plaka malzemesinin ısı iletim katsayısı, A ısının geçiş yaptığı dik kesit alan, $\frac{\partial T}{\partial x}$ ise aksel yönde sıcaklığın değişim oranıdır. Diğer yandan, plakadan çıkan ısı miktarı,

$$q_x + dx = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx = -k.A.\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-k.A.\frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \quad (2)$$

Sonlu elemanlar yönteminde, ısı geçisine maruz kalan herhangi bir alan (domain) veya hacim, düğüm noktaları ile bağlanmış elementlere bölünür. Bu domain için, iletkenlik bilgileri kullanılarak global sonlu eleman eşitlikleri yazılabilir. Global eşitliklerin çözümü ise nodlardaki sıcaklıkları vermektedir. Sonlu elemandaki sıcaklık dağılım değeri aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir (Nikoshkov, 2010);

$$T = [N].\{T\}, \quad (3)$$

$$[N_i] = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ \dots \dots \dots],$$

$$\{T_i\} = \{T_1 \ T_2 \ T_3 \ \dots \dots \dots\}.$$

Eşitlik 3' ün differansiyeli, sıcaklık gradyanı interpolasyon eşitliğini vermektedir (6).

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial z} \end{bmatrix} \cdot \{T\} = [B] \cdot \{T\} \quad (4)$$

Burada, T nodlardaki sıcaklık, $[N]_i$ şekil fonksiyonunun matrisi, $\{T\}$ nodal sıcaklıkların vektörü ve $[B]$ sıcak-gradyan interpolasyonunun matrisidir. Eşitlik 4' den türetilen sonlu eleman global eşitlikleriyle (Shubha vd., 2014; Shen vd., 1997; Durunay, 2005) ısı transferi çözümünün zaman alıcı ve karmaşıklığından dolayı (Sen vd., 1997; Durunay, 2005; Quadir vd., 2002), bu eşitliklere dayalı ANSYS, ABAQUS gibi sonlu eleman analiz programları geliştirilmiş ve bu analiz programları kullanılarak, mekanik, ısıl, akışkan ve diğer mühendislik analizlerin yapıldığı literatürde pek çok yayın mevcuttur. Örneğin, Jeffers (2013), ABAQUS programını kullanarak non-üniform ısıtılmış plakanın ısı transfer modellemesini gerçekleştirmiş ve analizleri sonucu üniform olmayan bir şekilde ısıtılmış plakaların sıcaklık dağılımlarını tahmin etmede yeni bir ısı transferi elementi formül etmişlerdir. Diğer bir çalışmada (Cerit ve Çoban, 2014), dizel motorda kullanılan seramik kaplı alüminyum alaşımı pistonun sıcaklık ve ısıl gerilmelerini, ANSYS programını kullanarak sonlu eleman analizi yapmışlardır. Yaptıkları analizlerde, kaplanmış yüzeyde oluşan normal gerilmelerin kaplama kalınlığındaki artışla azaldığı ve ısıl gerilmelerin kaplama kalınlığının bir fonksiyonu olduğu sonucuna varmışlardır. Bir araştırmada da (Mohsin vd., 2012), metal enjeksiyon kalıplanmış bakırın, boyutsal değişiminin sonlu eleman sinter analizini ANSYS yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, sinter sonrası parçaların boyutlarındaki değişimin ANSYS nümerik tahminleri ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlar ve analiz sonuçlarının gerçek ölçümlere çok yakın olduğunu ifade etmektedirler. Chen ve diğerleri (2013), iş parçası ve kesici takım ucundaki mikro kesme sıcaklıklarının sonlu eleman analizi ve ölçümlerini içeren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneysel olarak sıcaklık ölçümleri ve sonlu eleman sıcaklık tahmini sonuçlarına göre, takım ucundaki ölçülen ve analiz edilen sonuçlar arasında %10 sapma ve iş parçasında ise %20 sapma tespit etmişlerdir. Benzer olarak, Yang ve diğerleri (2011), frezeleme sıcaklığı üzerine kesme kenar radyüsünün etkisini sonlu eleman simülasyonunu kullanarak tahmin etmişlerdir. Ayrıca, B2212 süper iletken olarak kullanılan gümüş üzerine yapılan ZrO₂ seramik film kaplamanın ANSYS ile yapılan ısıl analizi

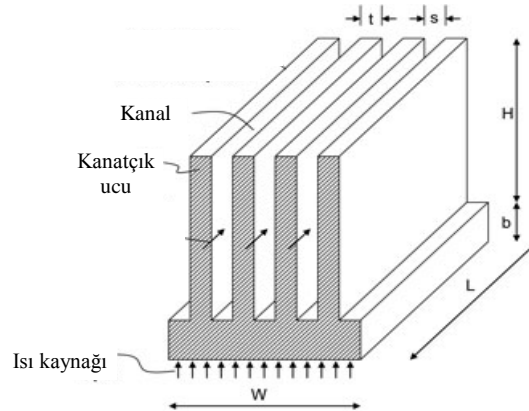
çalışmasında (Çelik vd., 2003), plakaların yüzeylerinde genellikle çekme gerilmesi olduğu, kaplama kalınlığının artmasıyla kayma gerilmelerinin arttığı, özellikle 1 micron kalınlığındaki kaplamalarda yapılan analizlerde en düşük kayma gerilmesi, 8 mikron kalınlığındaki kaplamalarda ise maksimum kayma gerilmesi elde etmişlerdir.

Bu çalışmada, soğutma, otomobil, elektronik aygıt ve imalat (döküm) sektörlerinde yaygınca kullanılan soğutucu plakaların ısı transferi sonlu eleman analizi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, bakır ve alüminyum plaka malzemesi seçilmiş olup, kanatçık sayısının/kalınlığının, düz ve dalgalı kanatçık yüzey geometrisinin plaka ısı transferine etkisi sonlu eleman analizi yapılarak belirlenmeye çalışılmış ve yorumlanmıştır.

2. Yöntem

2.1. Soğutucu Plaka

Elektronik, otomobil ve imalat (döküm) sektöründe, ısı kaynağından bir sistemi soğutma amaçlı kullanılan plakalar, genellikle ekstrüzyon yöntemiyle düz yüzeye sahip olarak imal edilmektedir (Şekil 2). Ayrıca, soğutucu plakalar ısı kaynağının şiddetine göre birden çok kanatçıklı olarak Al ve Bakır alaşımlarından imal edilmektedirler. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak soğutucu plaka malzemesinin, plaka kanatçık kalınlıklarının, kanatçık sayısının ve yüzey geometrisinin ısı transferine etkisi FEM analizleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 2’de görüleceği üzere, üreticilerden alınan bilgiye göre soğutucu plaka ısı kaynağının üzerine W yüzeyinden montajlanmakta olup, t plaka kanatçık kalınlığını, s plakalar arası boşluğu, H plakaların yüksekliğini, b taban kalınlığını, L plaka uzunluğunu ve r ise dalgalı yüzeydeki radyüsü ifade etmektedir. Temsili plakaların, L ve H değerleri sabit (Tablo 1), kanatçık boyutları (W, t ve s) ve sayısı (4, 6 ve 8 kanatçıklı), yüzey geometrisi (düz ve dalgalı) değiştirilerek, SolidWorks’te üç boyutlu olarak modellenmiş ve ANSYS programına aktarılmıştır. Plaka boyutları Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Düz yüzeye sahip plakanın geometrik tanımlanması

Tablo 1. Soğutucu plakalara ait boyutlar

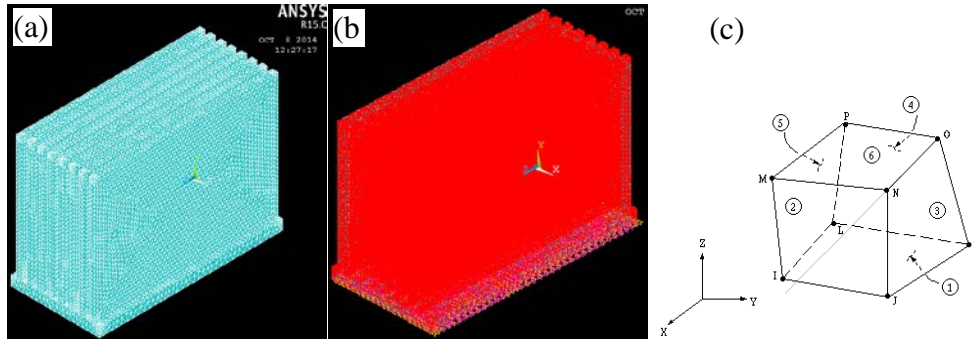
	4 kanatçıklı soğutucu	6 kanatçıklı soğutucu	8 kanatçıklı soğutucu
W	72 mm	72 mm	72 mm
L	150	150	150
H	100	100	100
t	8 mm	5.538 mm	4.235 mm
s	8 mm	5.538 mm	4.235 mm
b	8 mm	8 mm	8 mm
r			

2.2. Sonlu Eleman Modelleme

Soğutucu plakalar, Solidworks' te üç boyutlu olarak modellenerek ANSYS programına (Şekil 3a) aktarılmıştır. FE model üzerinde analiz öncesi gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra, eleman tipinin belirlenmesi, sınır şartlarının ve ısıl yüklemenin girilmesi için literatür araştırması yapılmıştır. Yapılan bir çalışmada (Jumbo vd., 2010), özellikle termal analizlerde üç boyutlu modellemelerin daha güvenilir sonuç verdiği rapor edilmektedir. 3D ısıl analizlerde doğru sonuç alabilmek adına, özellikle element tipinin belirlenmesi için literatür (Sen ve Alda, 2011) araştırması yapılmıştır. Şen ve Alda (2011), 3D ısıl analizler için 8 node sahip SOLİD 45 element tipini tavsiye etmiştir. Bununla birlikte, ANSYS help dosyalarında (Anonim, ANSYS help dosyaları), 3D termal analizler için yeni geliştirilmiş olan SOLİD 70 element tipinin SOLİD 45 element ile eşdeğer olduğu, 3D ısıl iletkenlik kapasitesine, 8 node ve tek serbestlik derecesine sahip olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca, SOLİD 70 element tipinin 3D statik ve dinamik ısıl analizlerde oldukça elverişli olduğu görülmektedir. Bu çalışmada da, Şekil 3b' de görülen SOLİD 70 termal eleman tipi kullanılmıştır. FE modelde kullanılan ve Al, Bakır plakalar için tanımlanan bazı mekanik ve termal özellikler (Öztürk, 2008) Tablo 2' de verilmiştir. Daha sonra, meshlenen domainlerde her iki model için benzer element sayısı ve element büyüklüğü sağlanmaya çalışılmıştır. Plaka, gerçek sistemde montajlama şekline uygun olarak W yüzeyinden tüm yönlerde mesnetlenmiş ve plakanın ısı kaynağına oturan yüzey alanına (W), 50 °C, 150 °C ve 250 °C olmak üzere üç farklı sıcaklık uygulanmıştır. Dış ortam sıcaklığı 25 °C kabul edilen çalışmada, ısıl yükleme ve sınır şartları, plakanın sisteme montaj edilme şekli referans alınarak girildikten sonra, FE model çözümlenmiş ve her iki plaka için de ısı transferi, sıcaklık farkı ve transfer hızı değerleri elde edilmiştir. Analizlerde, soğutucu akışkan stabil hava (25 °C) olarak kabul edilmiş ve ısı transferi sonuçlarının iyi değerlendirilmesi için ısıl gerilmeler makaleye dahil edilmemiştir. Analiz sonuçları, Şekil 4-11' de verilmiş ve yorumlanmıştır.

Tablo 2. Plaka malzemelerinin sonlu eleman modellemesinde kullanılan bazı değerler

Özellikler	Alüminyum plaka	Bakır plaka
Isıl iletkenlik katsayısı (k), W/mK	173	386
Isıl genişleme katsayısı (α), 1/K	$2.52 \cdot 10^{-5}$	$1.66 \cdot 10^{-5}$
Özgül ısı kapasitesi (C), j/kgK	960	377
Yoğunluk (ρ), kg/m ³	2810	8800
Elastisite Modülü (E), GPa	72	110
Poisson oranı (ν)	0.33	0,29

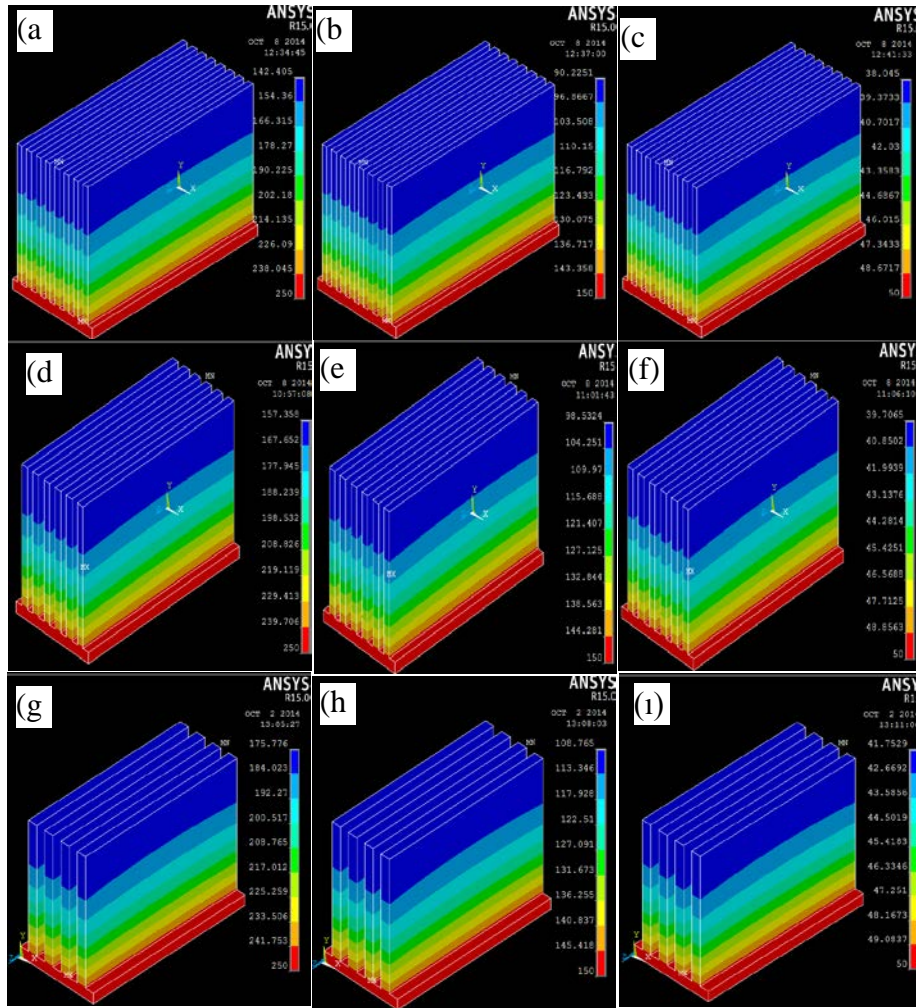


Şekil 3. a) Sonlu eleman model ve mesh yapısı, b) mesnet durumu ve ısının nodlara iletimi c) modellemelerde kullanılan 8 node sahip SOLİD 70 eleman eleman tipi [19]

3. FEM Analiz Sonuçları

3.1. Soğutucu plakaların ısı transferi çözümlenmeleri

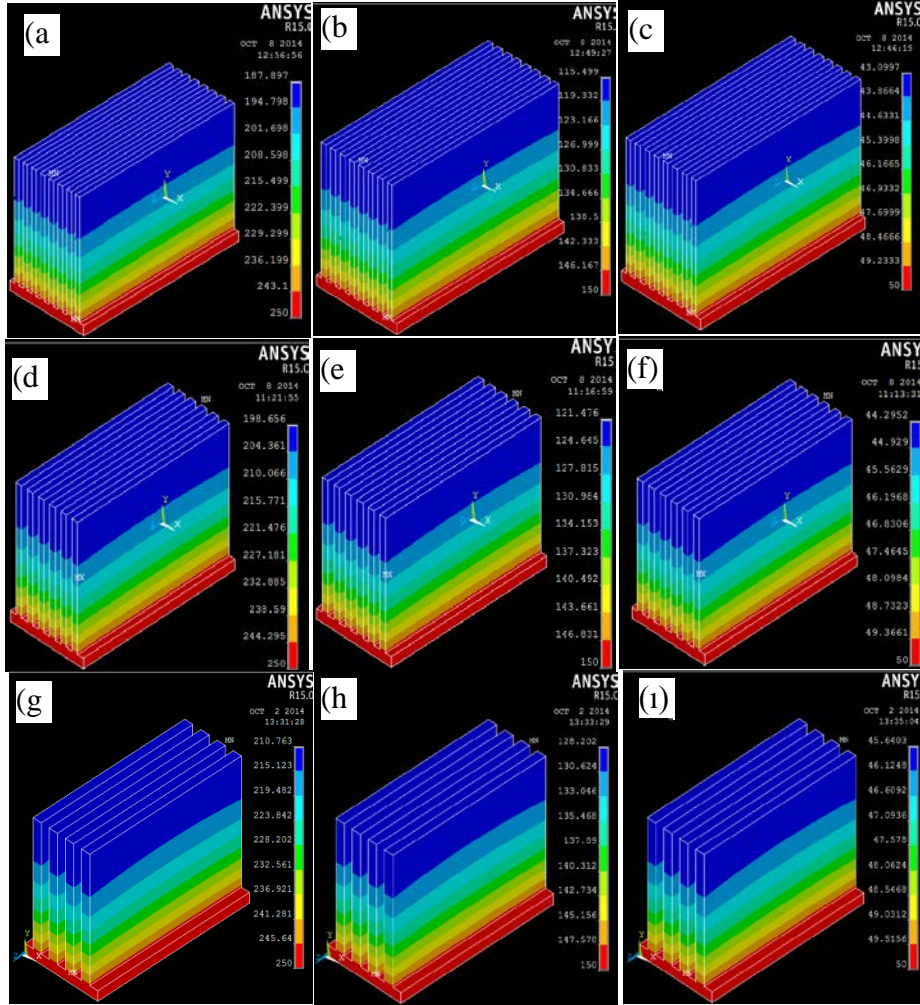
Şekil 4’ de, düz geometriye, farklı kanatçık sayısı ve kalınlığına sahip alüminyum soğutucu plakaya 350 °C, 150°C, 50 °C olmak üzere üç farklı sıcaklık uygulanmış durumda ısı transferi analizleri verilmiştir. Buna göre, 8 kanatçıklı plakaların uç bölgelerinde sıcaklıklar, 350 °C yükleme durumunda sıcaklık 142.4 °C, 150°C yükleme durumunda 90.22 °C, 50 °C yükleme durumunda 38.04 °C elde edilmiştir. Bu bağlamda, düz geometriye ve 8 mm kanatçık (4 kanatçıklı) kalınlığına sahip alüminyum plaka, 250 °C ve 150 °C yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı sıcaklık, uç bölgelerde ortalama olarak % 28 mertebesinde düşürürken, düşük ısıl yüklemelerde (50 °C) sıcaklık düşüş oranı %16 elde edilmiştir. Yani, plaka kanatçık sayısı arttıkça ısı iletimi artmış, plakalar arası mesafe arttıkça ısı iletimi azalmıştır.



Şekil 4. Farklı kanatçık sayısı ve kalınlığına sahip alüminyum plakaların 350 °C (a,d, g), 150°C (b,e,h), 50 °C (c, f, i) sıcaklıklarda ısı iletimi FEM analiz sonuçları

Analiz sonuçlarına göre (Şekil 4), yüksek sıcaklıklara maruz kalan plakalarda sıcaklık farkı (ΔT) değerinin daha da yüksek olduğu görülmüştür. Özellikle, 250 °C sıcaklıklara maruz kalan 8 kanatçıklı düz plakalarda ΔT 107.6 °C iken, 150 °C ısıl yüklemelerde ΔT 59.78 °C ve 50 °C ısıl yüklemelerde bu değer 11.96 °C elde edilmiştir. Plaka sayısı azaldıkça, ΔT değerinin azaldığı Şekil 4’ de görülmektedir. Örneğin, 250 °C ve 150 °C ısıl yüklemelerde, sekiz kanatçıklı plakada ΔT değerleri dört kanatçıklı plakaya göre %31 daha fazla, altı kanatçıklı plakaya göre ΔT değerleri %13.9 daha fazla elde edilmiştir. ΔT sıcaklık farkı değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 6’ da

verilmiştir. Şekil 5’ de bakırdan imal edilmiş düz yüzeye sahip soğutucu plakaların ısı transferi analizleri verilmiştir.



Şekil 5. Farklı kanatçık sayısı ve kalınlığa sahip bakır plakaların 350 °C (a,d, g), 150°C (b,e,h), 50 °C (c, f, i) sıcaklıklarda ısı iletimi FEM analiz sonuçları

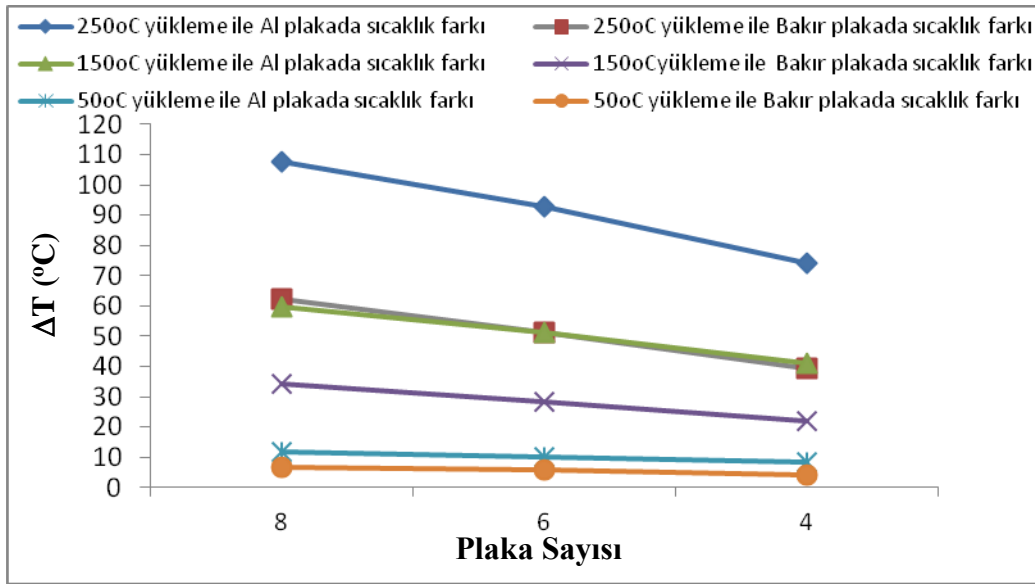
Şekil 5a,d,g incelendiğinde, 8 kanatçıga sahip düz geometriye sahip ve 250 °C, 150 °C ve 50 °C sıcaklıklara maruz kalan bakır plakaların uçlarındaki sıcaklık değerleri sırasıyla 187.89 °C, 115.49 °C ve 43.09 °C olarak elde edildiği görülmektedir. 6 kanatçıklı plakanın uç sıcaklık değerleri 198.65 °C, 121.47 °C ve 44.29 °C elde edilirken, 4 kanatçıklı bakır plakada uç sıcaklık değerleri 210,76 °C , 128,2 °C ve 45.64 °C olarak elde edilmiştir. Bu bağlamda, plaka sayısı arttıkça sıcaklık farkı Δt artmıştır. Örneğin, 250 °C, 150 °C ve 50 °C ısı yüklemesi durumunda, kanatçık sayısının 4’den 6’ya çıkmasıyla, Δt değerlerinde %23.5 artış görülmüştür. Kanatçık sayısının 4’den 8’ e çıkarılmasıyla, 250 °C, 150 °C ve 50 °C ısı yüklemesi durumunda Δt değerlerinde % 36.8 artış görülmektedir.

Şekil 6’ ya göre, 250 °C sıcaklığa maruz kalan alüminyum plaka, yüksek sıcaklık farkı (Δt) oluşturmasına rağmen bakır plakanın bünyesinde daha düşük ısıyı tutarak (heat sink) daha fazla ısıyı dış ortama transfer ettiği anlaşılmaktadır. Alüminyum düz kanatçıklı soğutucu plaka, 250 °C sıcaklığa maruz bırakıldığında, bünyesinde yaklaşık 110 °C sıcaklık elde edilmiş, bakır plaka ise yaklaşık 60 °C sıcaklıkta edildiğinden daha iyi soğutma gerçekleştirebileceği yorumlanmıştır. 150°C sıcaklığa maruz bırakılan düz kanatçık

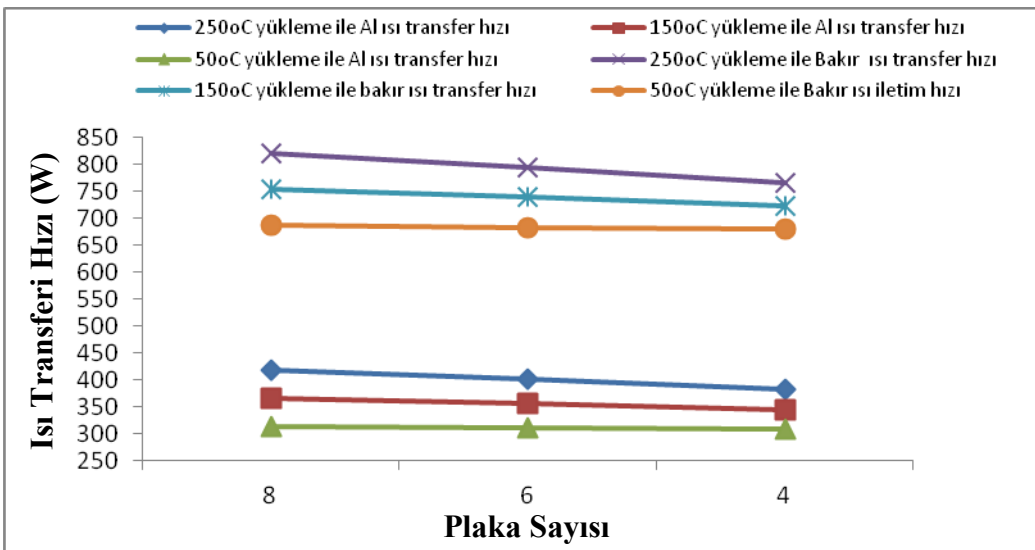
geometrisine sahip alüminyum plaka bünyesinde yaklaşık 60°C sıcaklık görülürken, bakır plakada bu değer yaklaşık 35°C elde edilmiştir. 50°C sıcaklık yüklemesinde ise, alüminyum plaka bakır plakaya (bünyesinde 5 °C sıcaklık tutmakta) göre yaklaşık 9°C sıcaklığı bünyesinde tutarak daha fazla ısı direnci karakteristiği göstermiştir. Her iki malzeme için de, plaka sayısı arttıkça Δt değerleri artmıştır (Şekil 6). FEM analizleri ile elde edilen Δt değerleri kullanılarak, Eşitlik 5 ile plakaların ısı transfer hızı hesaplanmış ve performansları yorumlanmıştır:

$$\frac{Q}{\Delta t} = -k \cdot \frac{A \cdot \Delta T}{\Delta x} \quad (5)$$

Eşitlik 5' de, $\frac{Q}{\Delta t}$ ısı transfer hızı, k ısı iletim katsayısı, A ısının uygulandığı kesit alan ΔT sıcaklık farkı ve Δx ise plaka kalınlığı olarak tanımlanır. Bu eşitliğe göre, düz geometriye sahip Al ve bakır plakalar için ısı iletim hızı değerleri hesaplanmış ve Şekil 7' de verilmiştir.

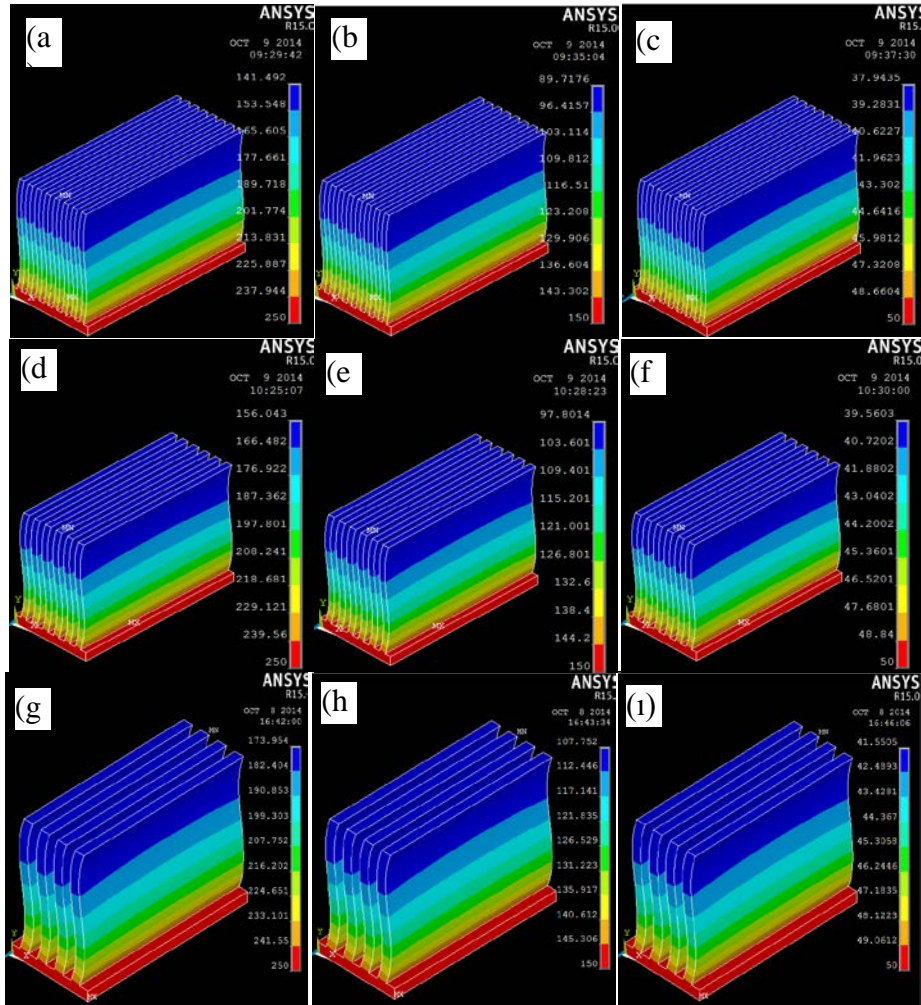


Şekil 6. Düz geometrik yüzeye sahip Bakır ve Alüminyum plakaların kanatçık sayısına bağlı olarak ısı transferi değerleri



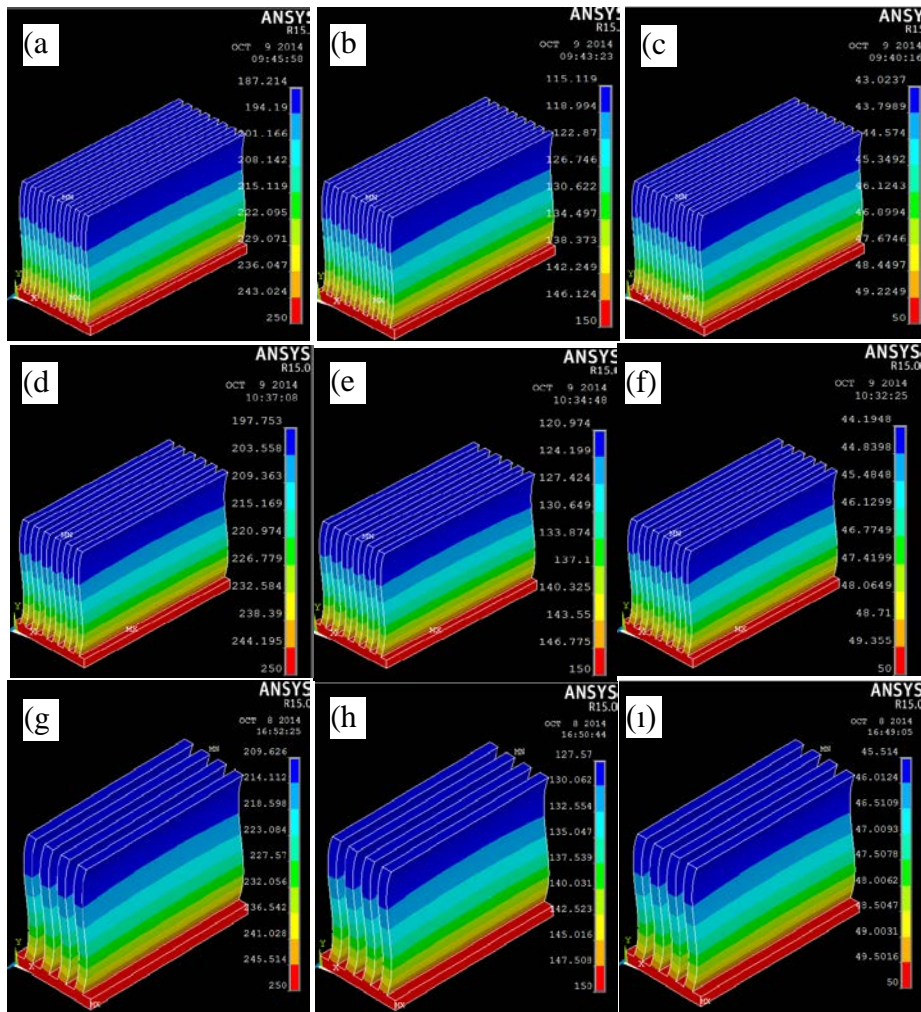
Şekil 7. Düz geometrik yüzeye sahip Bakır ve Alüminyum plakaların kanatçık sayısına bağlı olarak ısı transferi hızı değerleri

Şekil 7’ de, 250 °C, 150 °C ve 50 °C ısı yüklemeye bakır plakanın ısı transfer hız değerleri alüminyum plakaya göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir. 6 kanatçıklı düz yüzeyli alüminyum plakada 150 °C ısı yüklemeye durumunda 356.43 W ısı transfer hızı elde edilirken, bakır plakada bu değer 739.11 W, 50 °C ısı yüklemeye durumunda Al plakada 311.22 W, bakır plakada ise 683.2 W elde edilmiştir. 4 kanatçıklı alüminyum plakaya 250 °C ısı yüklemeye durumunda 381.42 W, bakır plakada bu değer 765.35 W, 150 °C ısı yüklemeye durumunda Al plakada 345.2 W, bakır plakada 722.62 W, 50 °C ısı yüklemeye durumunda Al plakada 308.97 W, bakır plakada ise 679.89 W elde edilmiştir. Bu değerlere göre, kanatçık sayısının artmasıyla ısı transfer hızı artmıştır. Örneğin, Al plakada 250 °C ısı yüklemeye durumunda kanatçık sayısının 4’ den 8’ e artırılmasıyla ısı transfer hızı %8.85, bakır plakada ise % 6.82 artış gözlemlenmiştir. 150 °C ısı yüklemeye durumunda ise, kanatçık sayısının 4’ den sekiz’ e artırılmasıyla alüminyum plakanın ısı transfer hızı %5.4, bakır plakada % 4.11 artış görülmüştür. Düşük sıcaklıkta (50 °C) ise kanatçık sayısının 4’ den 8’e artmasıyla, alüminyum plakanın ısı transfer hızı %1.5, bakır plakanın ise %1.02 mertebesinde artmıştır. Dolayısıyla, kanatçık sayısının veya kanatçık kalınlığının ısı transfer hızına etkisi Al plakada daha fazla görülmüştür. Buradan, bakır plakanın yüksek maliyetinden dolayı, Al plakaya yüksek sayıda kanatçık imal ederek (haddelene yöntemi ile) plakanın ısıtma ya da soğutma performansının artırılmasıyla tercih edilebilir kanaati oluşmuştur.



Şekil 8. Dalgalı yüzeye, farklı kanatçık sayısı ve kalınlığına sahip alüminyum plakaların 350 °C (a,d, g), 150°C (b,e,h), 50 °C (c, f, i) sıcaklıklarda ısı iletimi FEM sonuçları

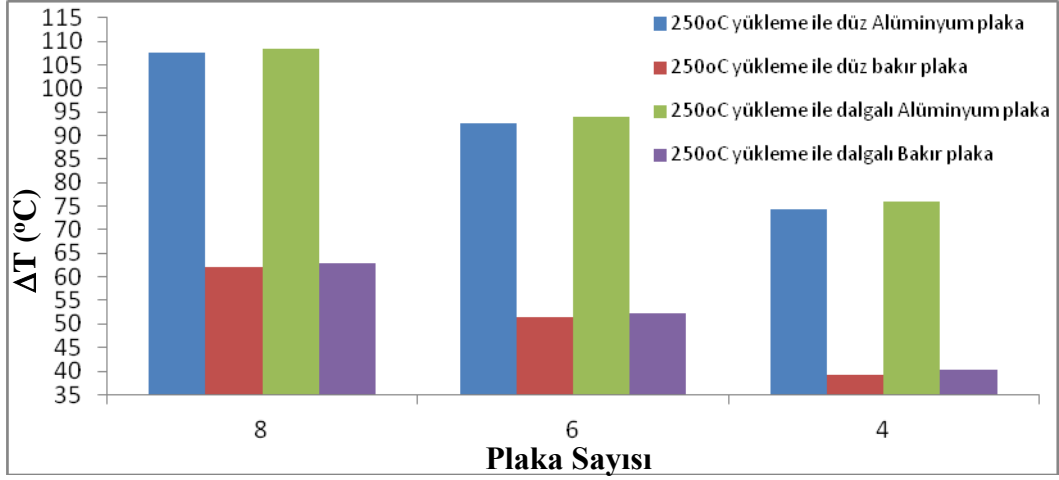
Şekil 8’ de görüleceği üzere, dalgalı yüzeye ve farklı kanatçı sayısına sahip alüminyum plaka üç farklı ısıl yüklemeye maruz bırakılmış ve kanatçıkların uçlarından transfer edilen sıcaklık sonlu eleman metoduyla analiz edilmiştir. Buna göre, 8 kanatçıklı alüminyum plaka, 250°C ısıl yüklemeye kanatçık uçlarındaki sıcaklık 141.492 °C, 150 °C ısıl yüklemeye uç bölgedeki sıcaklık 89.71 °C, 50 °C ısıl yüklemeye ise kanatçık uç sıcaklığı 37.94 °C elde edilmiştir. Benzer olarak, 4 ve 6 kanatçıga sahip plakalar da, 250 °C ısıl yüklemeye kanatçık uç sıcaklığı sırasıyla 156.04 °C ve 173.95 °C olduğu Şekil 7d,g’ de görülmektedir. Kanatçık sayısının artmasıyla dalgalı yüzey geometrisine sahip alüminyum plakaların bünyesindeki sıcaklık farkı (Δt) artmıştır. Örneğin, 8 kanatçıklı dalgalı yüzeye sahip Al plakada, 250 °C ısıl yüklemeye Δt 108.51 °C, 150 °C ısıl yüklemeye Δt 60.29 °C ve 50 °C ısıl yüklemeye Δt 12,06 °C elde edilmiştir. Kanatçık sayısının 8’ den 4’ e düşmesiyle, 250 °C ısıl yüklemeye durumunda Δt 76.05 °C’ ye, 150 °C ısıl yüklemeye Δt 42.15 °C’ ye ve 50 °C ısıl yüklemeye Δt 8.45 °C düştüğü Şekil 9g,h,ı’ da görülmektedir. Bu durum, Şekil 10’ da Al ve bakır plaka için karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 9. Dalgalı yüzeye, farklı kanatçık sayısı ve kalınlığa sahip bakır plakaların 350 °C (a,d, g), 150°C (b,e,h), 50 °C (c, f, ı) sıcaklıklarda ısı iletimi FEM sonuçları

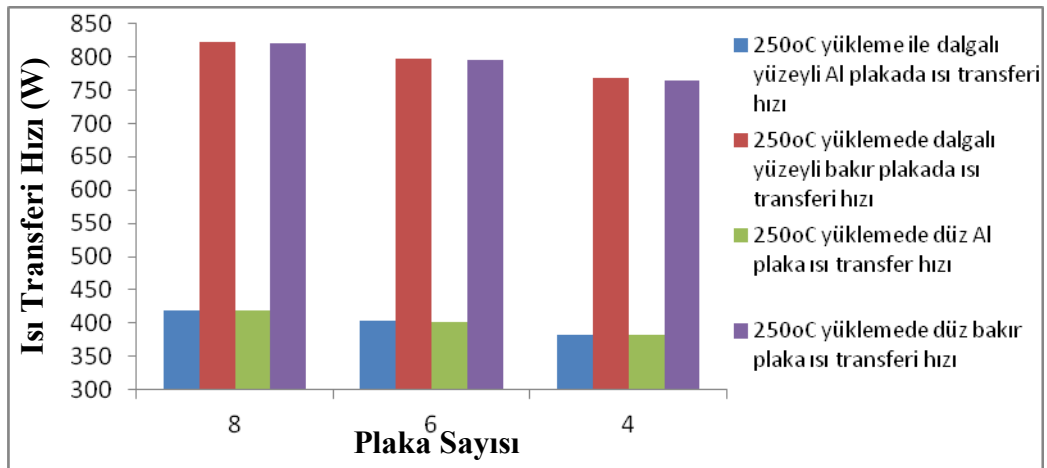
Şekil 9’ da, dalgalı yüzeye sahip bakır plakaların farklı sıcaklıklar altında FEM ısı transferi analizleri verilmiştir. Buna göre, sekiz kanatçıklı bakır plaka 250 °C ısıl yüklemeye kanatçık uç sıcaklığı 187.21 °C, altı kanatçıklı plaka uç sıcaklığı 197.75 °C, dört kanatçıklı plaka uç sıcaklığı ise 209.62 °C elde edilmiştir. İmalat zorluğu da dikkate alınarak düşük seviyede yüzeye dalgalılık verilen bakır ve Al plakalarda sıcaklık farkı değerleri düz kanatçıklara göre

yaklaşık 0.7-1.3 °C daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum, Şekil 10' da 250 °C yükleme durumu için verilmiştir.



Şekil 10. 250 °C ısı yüklemesi durumunda plaka yüzeyinde oluşturulan dalgalı yüzeyin Δt değerlerine etkisi

Şekil 10' da, plakanın ekstrüzyon yöntemiyle imalat kolaylığı bakımından yüzeye düşük seviyede verilen dalgalılığın, 250 °C yükleme durumunda Δt üzerine etkisi görülmektedir. 250 °C yükleme ile düz Al plaka uç sıcaklığı 142.405 °C iken, dalgalı Al plakada uç sıcaklığı 141.492 °C elde edilmiştir. Yani, bu çalışmada kanatçığa verilen düşük seviyedeki yüzey dalgalılığı, Δt ' yi yaklaşık 1°C mertebesinde arttırmıştır. Nihayetinde, plaka sayısının artırılması, plaka kalınlığının azalması ve yüzey dalgalılığının artmasıyla her iki plaka malzemesinin Δt değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Al-Hagag ve diğerleri (Anonim, 2014) farklı plaka malzemeleri için yaptıkları çalışmada, kanatçık sayısının artmasıyla ısı iletme kabiliyetinin arttığını ortaya koymuşlardır. Bu sayede, Al plakaların daha üstün soğutma kabiliyetine sahip olabileceğini rapor etmektedirler. Bir diğer çalışmada ise, plakaların termal özelliklerinden ziyade performanslarının kanatçık kalınlığı ve kanatçıklar arası mesafe ile optimizasyon yapılabileceğini ifade etmektedirler (Culham vd., 2001).



Şekil 11. 250 °C ısı yüklemesi durumunda plaka yüzeyinde oluşturulan dalgalı yüzeyin ısı transferi hızına etkisi

Şekil 11’de düşük seviyede kanatçık yüzey dalgasının ısı transferi hızına etkisi verilmiştir. 250°C ısı yüklemesi durumunda Al düz plakada, kanatçık sayısının 4’ den 8’ e çıkarılmasıyla ısı transferi hızı % 8.76 artış, düz bakır plakada ise % 6.8 artış görülmüştür. Bununla birlikte, aynı yüklemesi koşulunda dalgalı Al plakada kanatçık sayısının 4’ den 8’ e çıkarılmasıyla ısı transfer hızı % 8.84 artarken, bakır plakada artış oranı % 6.91 olarak elde edilmiştir. Örneğin, 8 adet düz kanatçıklı Al plakada ısı transferi hızı 418.06 W elde edilirken, dalgalı kanatçıklı Al plakada 419.06 W elde edilmiştir. Aynı yüklemesi koşulunda 6 kanatçıklı düz Al plakada ısı transfer hızı 401.64 W, dalgalı Al plakada bu değer 403.08 W olarak elde edilmiştir. 250 °C ısı yüklemesi koşulunda, 8 kanatçıklı düz bakır plakada ısı transfer hızı 821.38 W, 6 kanatçıklı düz bakır plakada 795.02 W, dört kanatçıklı düz bakır plakada 765.35 W elde edilirken; 8, 6 ve 4 kanatçıklı dalgalı yüzeye sahip bakır plakalarda ısı transferi hızları sırasıyla 823.05 W, 797.23W ve 768.14W elde edilmiştir. Yapılan tüm analiz sonuçları ile, literatüre benzer olarak (Öztürk, 2008; Culham vd., 2001) bakıra göre daha ekonomik ve şekillendirilebilirliği kolay olan Al plakanın ısı transferi performansının kanatçık sayısının artırılması, kanatçık kalınlığının azaltılması ve yüzey geometrisinin değiştirilmesi ile geliştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

4. Sonuçlar

Sonuç olarak, bakır ve alüminyum soğutucu plakaların ısı transferi performansına kanatçık sayısının, plaka malzemesinin ve yüzey dalgalılığın etkisi sonlu eleman analizleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Analizler sonucunda aşağıdaki bulgular çıkartılmıştır:

- Kanatçık sayısının artması ve kanatçık kalınlığının azaltılmasıyla plakalardaki sıcaklık farkı değerleri artmış ve buna bağlı olarak ısı transferi hızları da artmıştır. Örneğin, 250 °C sıcaklığa maruz kalan Al düz plakada, kanatçık sayısının 4’ den 8’ e çıkarılmasıyla Δt yaklaşık %30 oranında artarken, bakır plakada Δt artış oranı % 36 elde edilmiştir
- 250°C ısı yüklemesi durumunda, Al düz plakada kanatçık sayısının 4’ den 8’ e çıkarılmasıyla ısı transferi hızı % 8.76, düz bakır plakada ise % 6.8 artış görülmüştür. Bununla birlikte, aynı yüklemesi koşulunda dalgalı Al plakada kanatçık sayısının 4’ den 8’ e çıkarılmasıyla ısı transfer hızı % 8.84 artarken, bakır plakada artış oranı % 6.91 olarak elde edilmiştir.
- Bakır plakanın ısı transferi hızının daha iyi olduğu görülmüştür. Örneğin, 250°C ısı yüklemesi 8 kanatçıklı düz bakır ve düz Al plakalarda sırasıyla 821.38 W ve 418.06 W ısı transferi hızı elde edilirken, dalgalı bakır ve dalgalı Al plakalarda 823.05 W ve 149.06W elde edilmiştir.
- Çalışmaya özgü oluşturulan düşük seviyede yüzey dalgalılığın, bütün koşullarda ΔT değerlerini 0.7-1.3°C metebesinde arttırmıştır. Yüzey dalgalılığın, ΔT ’ ye benzer oranda ısı transferi hızını etkilediği görülmüştür.
- Sonuç olarak, bakıra göre daha ekonomik ve şekillendirilebilirliği kolay olan Al plakanın ısı transferi performansının kanatçık sayısının artırılması, kanatçık kalınlığının azaltılması ve yüzey geometrisinin değiştirilmesi ile geliştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Kaynaklar

1. Lazoglu, I., Buyukhatipoglu, K., Kratz, H., Klocke, F., 2006. Forces and Temperature in Hard Turning. *Machining Science and Technology*, Cilt: 10, 157-179.
2. Anca, A., Cardon, A., Risso, J., Fachinotti, V.D., 2011. Finite Element Modeling of Welding Processes. *Applied Mathematical Modelling*, Cilt:35, 688–707.
3. Anonim: <http://www.figesc.com.tr/dergi/makaleler/aselsan-urun-gelistirme.php> (Erişim tarihi:17.10.2014)

4. Singiresu, S.R. 2004. The Finite Elements Methods in Engineering, Fourth edition, Elsevier Science & Technology Books, Miami.
5. Topçu, M., Taşgetiren, S., 1998. Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu. Pamukkale Üniv. Mühendislik Fakültesi Yayını, Denizli, Türkiye.
6. Nikoshkov, G.P., 2010. Programing Finite Element in Java, Springer, 16, Chapter 2, Newyork.
7. Shubha V., Kulkarni, V. S., 2014. Thermal Stress Analysis of Rectangular Plate due to Convection using Finite Element Method. International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), Cilt: 3, Sayı:7, 111-117.
8. Shen, Q., Lee, T.C., Lau, W.S., 1997. A Finite Element Analysis of Temperature Distributions in Spade Drilling. Journal of Materials Processing Technology, Cilt: 66, No: 1, 12- 122.
9. Durunay, M., 2005. Kompozit Bir Plakanın Farklı Ortamlarda Soğutulmasında Sıcaklık Dağılımının Sayısal Analizi. Science and Eng. J. of Fırat Univ., Cilt: 17, No: 4, 709-720.
10. Quadir, G.A., Krishnan, G.M., Seetharamu, K.N., 2002. Modeling of Wire-on-Tube Heat Exchangers Using Finite Element Method. Finite Elements in Analysis and Design, Cilt: 38, 417-434.
11. Jeffers, A.E., 2013. Heat Transfer Element for Modeling the Thermal Response of Non-Uniformly Heated Plates. Finite Elements in Analysis and Design, Cilt: 63, 62-68.
12. Cerit, M., Coban, M., 2014. Temperature and Thermal Stress Analyses of a Ceramic-Coated Aluminum Alloy Piston Used in a Diesel Engine. International Journal of Thermal Sciences, Cilt: 77, 11-18.
13. Mohsin, I.U., Lager, D., Hohenauer, W., Gierl, C., Danninger, H., 2012. Finite Element Sintering Analysis of Metal Injection Molded Copper Brown Body Using Thermo-Physical Data and Kinetics. Computational Materials Science, Cilt: 53, 6-11.
14. Chen, G., Ren, G., Zhang, P., Cui, K., Li, Y., 2013. Measurement and Finite Element Simulation of Micro-Cutting Temperatures of Tool Tip And Workpiece. International Journal Of Machinetools&Manufacture, 75, 16-26.
15. Yang, K., Liang, K.N., Zheng, K.N. Zheng, Q.S., Chen, W.O., 2011. Tool Edge Radius Effect on Cutting Temperature in Micro-End-Milling Process, Int. J. of Advanced Manufacturing Technology, 52, 905-912.
16. Çelik, E., Islamoglu, Y., Akin, Y., Hascicek, Y.S., 2003. Thermal analysis of high temperature ZrO₂ insulation ceramic coatings on Ag tapes used as sheath of Bi-2212 superconducting materials using finite element method. Materials and Design, 24, 543-546.
17. Jumbo, F.S., Ashcroft, L.A., Crocombe, A.D. and Wahab, M.M.A.,2010. Thermal Residual Stress Analysis of Epoxy Bi-Material Laminates and Bonded Joints. Int. J. of Adhesion and Adhesives, 30, 523-538.
18. Sen, F. and Alda, K., 2011. Effects of Using Different Metal Materials on Stresses in Metal-Composite Hybrid Joints, Çankaya University, Journal of Science and Engineering, Cilt: 8, No: 1, 1-13.
19. Anonim: http://www.ansys.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-70.htm (Erişim tarihi: 25/09/2014)
20. Öztürk, H., 2008. Analysis and Design for Aluminum Forging Process, The Degree Of Master of Science Mechanical Engineering, METU, pp. 189, Ankara.
21. <http://www.uobabylon.edu.iq/uobColeges/fileshare/articles/opt,final2.pdf> (Erişim tarihi: 17.10.2014)
22. Culham, J.R., IEEE, M. and Muzychka, Y.S., 2001. Optimization of Plate Fin Heat Sinks Using Entropy Generation Minimization, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Sayı: 24, No: 2, 159-165.