

Çarpan jetle ısı transferinde geometrik parametrelerin sayısal optimizasyonu: Yanıt yüzey yöntemi

Numerical optimization of geometric parameters in impinging jet heat transfer: Response surface methodology

Ahmet Numan ÖZAKIN^{1,a}, Faruk YEŞİLDAL^{*1,b}

¹Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum

• Geliş tarihi / Received: 20.11.2021

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 23.12.2021

• Kabul tarihi / Accepted: 01.01.2022

Öz

Bu çalışmada çarpan jet ile soğutmada parametrelerin etkisini belirlemek için Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) ile sayısal optimizasyon yapılmıştır. Nozul sayısı, kanat uzunluğu, kanat geometrisi ve nozul-yüzey mesafesi (H) faktörlerinin etkisi araştırılmıştır. Yanıt değişkeni olarak sıcaklık farkı alınmıştır. Sonuçta en etkin parametre kanat uzunluğu olarak elde edilmiştir. Optimum sonuçlar; nozul sayısı için 5, kanat uzunluğu için 1.5 cm, kanat geometrisi olarak silindir ve H için 2 cm olarak elde edilmiştir. Ayrıca, yanıt değişkeni olan sıcaklık farkı için bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çarpan jet, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Yanıt yüzey yöntemi

Abstract

In this study, numerical optimization was carried out with the Response Surface Method (RSM) to determine the effect of parameters in impinging jet cooling. The effects of nozzle number, fin height, fin geometry and nozzle to surface distance (H) were investigated. The temperature difference was taken as the response variable. As a result, the most effective parameter was obtained as the fin height. Optimal results; 5 for the number of nozzles, 1.5 cm for the fin height, the cylinder fin geometry and 2 cm for H distance. In addition, a mathematical model has been developed for the temperature difference determined as the response variable.

Keywords: Impinging jet, Computational fluid dynamic, Response surface method

^a Faruk YEŞİLDAL; fyesildal@atauni.edu.tr, Tel: (0442) 231 45 01, orcid.org/0000-0002-7307-3556

^b orcid.org/0000-0002-2083-8703

1. Giriş

1. Introduction

Isıyı hedef yüzeyden etkili bir şekilde uzaklaştırmak için çarpan jetler sıklıkla uygulanan bir termal yönetim tekniğidir. Küçük bir alanda çok yüksek ısı akısının üretildiği cihazların sıcaklığını kontrol etmek için kullanılan bir yöntemdir. Çarpan jetler, pasif kendinden uyarımlı jetler, aktif uyarıcı jetler ve hibrit uyarımlı jetler gibi farklı tekniklerle elde edilebilir. Kendinden tahrikli jetlerin aktif yöntemleri dairesel, dönen ve süpüren jetleri içerirken, pasif olanlar darbeleri ve sentetik jetleri içerir (Maghrabie, 2021). Çarpan jet teknikleri, gaz türbini kanatlarının soğutulması (Al-Hadhrami vd., 2011), farklı metallerin ısıl işlemi, dokunun dondurulması için kriyocerrahi, cam (Monnoyer &Lochegnies, 2008) ve metal işleme, tekstil ve kağıt kurutma, elektronik elemanların ve merkezi işlemci ünitesinin soğutulması, güneş enerjisi ve fotovoltaik sistemlerin soğutulması dahil olmak üzere çeşitli mühendislik uygulamaları için uygun hale getiren yüksek oranda ısı transferi sağlamak için kullanılabilir (Maghrabie, 2021). Endüstriyel uygulamalarda, çarpan jetler kullanılarak ısı ve kütle transferi önemli ölçüde artırılabilir.

Çarpan jet ile ısı transferi; jet geometrisi, yönlendirme, nozul-yüzey mesafesi, kanatçık geometrisi, nozul dizilişi, jet çıkışının sınırlandırılması, nozul içine yerleştirilen türbülötörler gibi geometrik parametrelerin yanında debi, hız ve basınç gibi operasyonel parametrelere de bağlıdır.

Mikroçiplerin çarpan jet ile soğutulmasına yönelik nümerik bir çalışma yürüten araştırmacılar, üç tarafı kapalı ve bir tarafı açık dikdörtgen kesitli kanallardaki sur ve dikdörtgen desende 1000 W/m^2 sabit ısı akılı bakır plakalı yüzeyleri tek bir hava jeti akışı ile soğutmuşlardır (Karabulut & Alnak, 2020). Sonuçta $Re=4000$ ve $H/D_n=4$ için dikdörtgen desenli yüzeylerde sur desenli yüzeylere göre %31.45 daha yüksek ortalama Nu sayısı elde ettiler.

Düşük Reynolds Sayısı rejiminde (< 1000) çoklu çarpan jet sisteminin ısı transferi ve basınç özelliklerinin incelendiği çalışmada, 841 çarpan jetten oluşan bir sıralı konfigürasyonda, farklı jet-plaka mesafeleri ve Reynolds sayılarında çalışmalar yürütülmüştür. Deneysel araştırmayı, jet çarpmasının fiziğini ve böyle bir sistem içindeki bitişik jetler arasındaki etkileşimi incelemek için sayısal bir araştırma ile de desteklenmiştir. CFD simülasyonlarının, ısı transfer katsayısını yaklaşık

%10 ve basınç düşüşünü yaklaşık %20 oranında fazla tahmin ettiği belirtilmiştir (Rao vd., 2009).

Başka bir çalışmada (Buzzard vd., 2017) özel pürüzlülük modellerinin çarpan jet dizisi soğutmasının etkinliğini ve yüzey ısı transferini artırma seviyelerini iyileştirmek için hedef yüzeyler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunun için çarpan jetle soğutma artırımı için yüzey pürüzlülüğünün çeşitli boyutları, dağılımları, şekilleri ve modelleri kullanılmıştır. Farklı Re sayılarında (900, 1500, 5000 ve 11000) deneyleri dikdörtgen şeklinde farklı boyutlarda pürüzlülükler için yürütülmüştür. Lokal ve genel çarpan jet performanslarının, pürüzlülük elemanlarının modeline, dağılımına, düzenine, yüksekliğine ve ayrıca jet Reynolds sayısına bağlı olduğu belirtilmiştir. Sonuçta hem laminer hem de türbülanslı jet Reynolds sayıları için, dikdörtgen küçük pürüzlülük durumlarında genellikle artan küçük pürüzlülük yüksekliği ile çizgi ortalamalı ve uzamsal ortalamalı Nusselt sayısında bir artış gösterdiği belirtilmiştir.

Jet geometrisinin etkisinin incelendiği başka bir çalışmada yazarlar (Caliskan vd., 2014) ısı transfer karakteristiklerini deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Eliptik ve dikdörtgen çarpan jet dizilerini incelediler. Hız ölçümlerini Laser-Doppler Anemometresi ile, sıcaklık ölçümlerini ise kızılötesi kamera ile aldılar. Deneyleri farklı en/boy oranları (0.5, 1, 2), nozul-yüzey mesafeleri (2...10) ve Re sayılarında (2000...10000) yürüttüler. Çarpma bölgesinde Nusselt sayılarını eliptik jetler için dairesel jetten daha yüksek elde ettiler. Bunun büyük sürüklenme hızından ve eliptik jetin büyük ölçekli uyumlu yapısından kaynaklanabileceğini iddia ettiler. En iyi ısı transfer performansını eliptik jet düzenlemeleri ile elde ettiler. Ortalama Nusselt sayısı korelasyonlarını eliptik ve dikdörtgen jet geometrileri için elde ettiler. Ayrıca simülasyonla tüm jet geometrileri için hız dağılımlarını elde ettiler. Eksenel, radyal hız dağılımları ve türbülans kinetik enerjisi dağılımlarını hesapladılar. Sonuçları Nu-x/d grafikleri halinde sundular.

Türbülans, jetten jete ve jetten duvara etkileşimler, bu etkileşimlerin ısı ve kütle transferleri üzerindeki dolaylı etkileri nedeniyle dönel akışların dinamikleri bazı avantajları ve dezavantajları ile farklıdır. Bu konuda birçok araştırma yapılmıştır.

Düz ve girdap jetlerin kademeli bir kombinasyonunun incelendiği bu çalışmada araştırmacılar (Wannassi & Monnoyer, 2015) akış ayrıntılarına erişmek ve karmaşık akış yapılarının yanı sıra soğutma havasının yaşadığı besleme ve

egzoz fazları arasındaki güçlü bağlantıyı göstermek için akış ve ısı transfer özelliklerini rapor ettiler. Girdap çoklu jetlerin termo-akışkan dinamiğinin anlaşılmasına olanak sağlamak için, belirli bir jet-jet mesafesi, $s/D = 5$ ve nozul-plaka mesafesi $H/D = 4$ için sayısal ve deneysel çalışma yürüttüler. Jetleri kademeli bir dizi olarak düzenlediler. Girdap jet düzenliğini kanatçık tipi bir jeneratörden elde ettiler. Farklı kanat yönleri ile farklı girdap yoğunluklarına sahip jetler elde ettiler. Dönel çarpan jetlerle elde edilen sonuçları aynı deneysel koşullarda dairesel çarpan jetlerle karşılaştırdılar. Hem sayısal hem de deneysel analiz ile hücre topolojisini ve çarpma ortaya çıkan akışı gösterdiler. Her jetin, çarpma plakası üzerinde bağımsız bir soğutma alanına sahip olduğu sonucuna vardılar. Isı transfer hızının ve homojenliğin dönme üzerindeki bağımlılığını da açıkladılar. Sonuçta girdap hareketinin karıştırmayı nozul çıkışından kısa bir mesafede etkileyebileceğini, ancak yoğunluğunu hızla kaybettiğini ve bunun da duvar girişimine katkıyı sınırladığını belirttiler. Nuntadusit ve arkadaşları (Nuntadusit vd., 2012) 3×3 sıralı düzenlemeye sahip birden çok dönel çarpan jetin (M-SIJ) yüzeyler üzerindeki akış ve ısı transfer özelliklerini rapor ettiler. Deneyleri $L/D = 4$ sabit nozul yüzey mesafesinde ve farklı nozullar arası mesafelerde ($S/D=2, 4, 6, 8$) yürüttüler. Nozullarda girdap sayısı 0.4 olan bükülmüş bantlardan oluşan dönel jetler kullandılar. Sonuçları $Nu-S/D$ ve $Nu-X/D$ grafikleri halinde sundular. Sonuçta maksimum Nu sayısını $S/D=4$ için elde ettiler. Bu çalışmada yazarlar (Ianiro & Cardone, 2012) sarmal sayısının, çarpan helezonik girdap hava jetinin düz bir levha üzerindeki duvar ısı transferi dağılımı üzerindeki etkisini deneysel olarak analiz ettiler. Sıcaklık ölçümlerini sabit Re sayısında (28000) 5 farklı girdap sayısı (0, 0.2, 0.4, 0.6 ve 0.8) ve 5 farklı nozul-plaka mesafesi (2,4,6,8 ve 10) için termal kamera (FLIR SC6000 LW) ve ısıtılmış ince folyo yüzeyden aldılar. Dönel çarpan jetlerle elde edilen sonuçları, aynı test koşullarında dairesel bir çarpma jeti ile elde edilenlerle karşılaştırdılar. Isı transfer hızının ve homojenliğinin girdap sayısına bağımlılığını da açıkladılar. Sonuçta çok kanallı jetin, dairesel çarpma jetine göre ısı transferinde genel bir artışa neden olduğunu, girdap hareketinin hızı azalttığını ve ısı transferinin homojenliğini arttırdığını belirttiler. Dönel çarpan jetlerle ilgili bir başka çalışmada araştırmacılar araştırmacılar (Ahmed vd., 2015), dönmenin sıkıştırılmaz, türbülanslı, dönen bir çarpan hava jeti için çarpma yüzey basıncı üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırdılar. Hız bileşenlerini ölçmek için hotwire anemometresi kullandılar. Çarpma yüzeyindeki statik basınçları ölçmek için çarpma plakasına

gömme montajlı basınç musluklarına sahip bir dijital mikromanometre (TSI, model: 5815) kullandılar. Girdap sayısının (S), nozul-plaka mesafesinin (H) ve Reynolds sayısının (Re) basınç dağılımına etkisini incelediler. Herhangi bir S için, basınç dağılımının düşük girdap sayıları için ($S = 0.3$ 'e kadar) Re 'den bağımsız olduğunu gösterdiler.

Bu çalışmada (Yakut vd., 2016) OHS-2 olarak adlandırılan altıgen kanatlı soğutucunun çarpan hava jeti ısı ve akış özelliklerini deneysel olarak belirlediler. Ansys-Fluent ile sayısal olarak analiz ettiler. Nozul çapı, iki farklı Y/d mesafesi, 6 farklı akış hızı ve 3 farklı kanat yüksekliği için altıgen kanatçıklarda deneysel ve sayısal çalışma yürüttüler. Sonuçları $Nu-Re$ ve $Cp_{x,y}-l/(l_0/2)$ varyasyonları halinde sundular ve karşılaştırdılar. En yüksek Nusselt sayısını ve en yüksek basınç katsayısını 100 mm kanat yüksekliği ve $Y/d = 1$ için elde ettiler. Son olarak, çarpan jet ısı transferinin deneysel ve sayısal sonuçlarından ısı transferi korelasyonları ürettiler.

Bir dizi çarpan jet üzerinde yürütülen sayısal çalışmada araştırmacılar (Penumadu & Rao, 2017) Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS), kararsız Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (URANS) ve çoklu çarpan jet dizisinde akış fiziğinin daha iyi anlaşılması için Büyük Eddy Simülasyonu (LES) yaklaşımlarını kullandılar. Simülasyonlar sonucunda, sistemdeki büyük basınç kaybının, meme girişindeki büzülme etkisinden ve viskoz kayıplardan kaynaklandığını gösterdiler.

Bir başka sayısal çalışmada araştırmacılar (Ortega-Casanova & Granados-Ortiz, 2014) çarpan jetler ve üniform olmayan ısıtılmış plakalar arasındaki ısı transferini plakalar boyunca yüzey değişimlerinin (çukurlar ve tümsekler) etkisi altında iyileştirip iyileştiremeyeceğini analiz ettiler. Jet çıkışından bilinen bir H mesafesinde bulunan düz olmayan bir plaka üzerine iki farklı tipte eksenel simetrik türbülanslı jet çarpmasının sayısal simülasyonlarını yaptılar. Çalışmayı farklı plakalar, nozul-yüzey mesafeleri ve Reynolds sayılarında yürüttüler. Tüm plakada ısı transferinin artırılması gerektiğinde, toplam ısı transfer katsayısının düz bir plakanınkinden daha büyük veya en azından onunki kadar yüksek olduğunu ve çarpma plakalarının kullanılması gerektiğini tavsiye ettiler.

Bu çalışmada Diop ve arkadaşları verimli bir soğutma sağlamak için uygun hızda ve yeterli çarpışma mesafelerinde hava jet akışı ile ısı transferini geliştirmeyi amaçladılar. Çalışmada H/D mesafesinin ve hızın farklı değerleri için

deneyleri yürüttüler. Yüksek hızlı kamera ile akışı görüntülediler. Sonuçta, $X/D = 4, 7$ ve 9 çarpma mesafelerinde, 15 m/s hızında diğer değerlere göre en yüksek ısı transfer katsayısının elde edildiğini

gösterdiler (Diop vd., 2021). Tablo 1’de çarpan jet çalışmaları ve incelenen parametreler detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Çarpan jet ile ilgili bazı çalışmalar
Table 1. Some studies in impinging jet

İncelenen parametreler	Geometri	Bulgular	Yazar
- Nozul-yüzey mesafesi - Jet genişliği - Reynolds sayısı	Düz plaka	Durma noktası civarında maksimum Nusselt sayıları elde edilmiştir.	(Ashforth-Frost vd., 1997)
- Jet en boy oranı - Reynolds sayısı - Nozul-yüzey mesafesi	Eliptik-Dikdörtgen	Çarpma bölgelerindeki eliptik jetler için Nusselt sayılarını dairesel jetlerden daha büyük elde ettiler.	(Caliskan vd., 2014)
- H/W oranı - Jet hızının salınım genliği ve frekansı	Paralel sonsuz levha	Levhalar arası mesafenin artmasıyla, durma noktası Nusselt sayısının azaldığını, ancak H/W oranının 2’den büyük değerlerinde Nusselt sayısındaki değişimin çok az olduğunu gösterdiler.	(Demircan & Türkoğlu, 2010)
- Reynolds sayısı - Salınım genliği - Salınım frekansı	Paralel sonsuz levha	Artan Reynolds sayısı ile levha üzerindeki ısı transferinde artış gözlemlenildi. Bunun yanında salınım frekansı ve genliğinin artması ile durma noktası Nusselt sayısının arttığını belirttiler.	(Demircan & Türkoğlu, 2007)
- Reynolds sayısı - H/D_h oranı - Akış yönlendiriciler	Silindirik, kare ve üçgen	Çarpan jet ile farklı geometride akış yönlendiricilerin birlikte kullanıldığı durumda ısı transferinde akış yönlendirici kullanılmaması durumuna göre %28’e kadar bir artış olduğunu gösterdiler.	(Kilic & Baskaya, 2017)
- h/d oranı - Reynolds sayısı - Türbülans şiddeti - Re sayısı - Jet dönme yoğunluğu - Türbülans şiddeti - Jet yüzey mesafesi	Cr-Ni paslanmaz sac kanal ısıtılmış katı yüzey	Durma noktası Nusselt sayısı ile ortalama Nusselt sayısı arasındaki farkın düşük olduğunu belirttiler. Boyutsuz parametrelerin bir fonksiyonu olarak hem ortalama Nusselt sayısı hem de durma noktası Nusselt sayısı için sayısal çalışmada korelasyon elde etmişlerdir.	(Çelik & Haydar, 2010) (Ortega-Casanova, 2012)

Çarpan jetlerle ilgili birçok optimizasyon çalışması vardır. Araştırmacılar (Barbosa vd., 2021) yürüttükleri parametrik çalışmada bir yüzeye çarpan çoklu hava jetleri üzerinde deneysel bir çalışma yapmak için Taguchi yöntemine dayalı bir Varyans Analizi (ANOVA) uyguladılar. Çalışmada jet-jet aralığı (S), jet deseni, nozul-plaka mesafesi (H), Reynolds sayısı ve hedef plaka geometrisi parametrelerini incelediler. Deneyleri hedef plaka sabit ve hareketli iken yaptılar ve her iki durumda elde edilen sonuçları karşılaştırdılar. Sonuçlar, çoklu çarpan jet konfigürasyonunda ısı transferinin, kademeli bir konfigürasyon için $S = 3D$, $H = 2D$ ve hem sabit hem de hareketli plakalar için daha yüksek bir Reynolds sayısı ile arttığını gösterdiler. Farklı bir kurutma optimizasyon çalışmasında araştırmacılar (Wang vd., 2016) bir hava jetli darbeli kurutucuda (AJID) soya küspesinin (Okara) kurutma sürecini optimize etmek için Yanıt Yüzey metodolojisini ve sentetik değerlendirme yöntemini uyguladılar.

Optimizasyonda işlem faktörleri olarak hava sıcaklığı ($50-70$ °C), hava hızı ($1.3-2.3$ m/s) ve numune yükleme yoğunluğunu ($3-4$ kg/m²) dikkate aldılar. Kurutma hızı, renk, tripsin inhibitör aktivitesi, soya izoflavon içeriği ve antioksidan aktiviteyi kalite parametreleri olarak değerlendirdiler. Bu sayısal optimizasyon çalışmasında araştırmacılar (Lam & Prakash, 2017) farklı Reynolds sayısı (Re), Hız Oranı (VR) ve Kanal Yüksekliği (H/L) değerleri için bir dizi hava jeti ile çarpmalı soğutma sisteminde akışkan akışı, ısı transferi ve entropi üretimini incelediler. Jet (hem birincil hem de ikincil) ve ortam sıvısının arayüzü boyunca, kesme kuvvetlerinin kararsızlaştırıcı etkisinin, momentum difüzyonunun dengeleyici etkisinin üstesinden geldiğini gözlemlediler. Son olarak, çarpan jet soğutma sisteminin optimum konfigürasyonlarını elde etmek için Çok Amaçlı Genetik Algoritma (MOGA) uyguladılar. Yüzey ortalamalı Nusselt sayısını (\overline{Nu}_{ov}) ve küresel toplam entropi üretimini

($S_{tot,\Omega}$) performans parametresi olarak belirlediler. Araştırmacılar (Yildizeli & Cadirci, 2020) pnömomatik taşıma sistemlerinde çoklu çarpan jet parametrelerinin optimizasyonu için genetik algoritma ile sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Optimizasyon sürecinin, temassız taşıma sisteminin genel performansını iyileştirmek için yararlı bir araç olduğunu belirttiler.

Çoklu çarpan jet, soğutma ve ısıtma performansını etkileyen çeşitli operasyonel ve geometrik parametreleri içeren karmaşık bir ısı transfer sürecidir. Bu çalışmada çarpan hava jeti ile ısı transferini etkilediği bilinen bazı önemli parametrelerin tekli, üçlü ve beşli çarpan jet nozul konfigürasyonları; farklı kanatçık yüksekliklerinde kare, silindir ve altıgen profilli kanatçıklı yüzeyler için optimizasyonu amaçlanmıştır. Bunun için Yanıt Yüzey Yöntemi ile Yüz Merkezli Merkezi Kompozit Tasarım yöntemi uygulanmıştır. Minitab 18 Programı ile oluşturulan 31 farklı analiz Fluent ile sayısal olarak yapılmıştır.

1.1. Yanıt yüzey yöntemi (YYY) ve deney planı

1.1.1. Response surface methodology and experimental plan

YYY, tüm bağımsız değişkenleri bütünleştiren ve sonunda bir çıktının teorik değerini verebilecek bir denklem kümesi bulmak için deneyden gelen veri girişini kullanan uygun deney tasarımı geliştirir. Çıktılar, iyi tasarlanmış regresyon deneyleri ve matematiksel modelden elde edilen sonuçlar ile elde edilir (Gelis & Akyurek, 2021).

YYY, incelenen ilgili alanın hesaplama sonuçlarında parametrelerin optimal durumunu elde etmek için kullanılır ve ayrıca belirtilen parametreler arasındaki etkileşimi de içerir. Bu parametreler üç seviyede seçilir. Tablo 2’de nümerik analizi yapılacak parametreler ve seviyeleri verilmiştir. Çalışmada silindir, altıgen ve kare olmak üzere üç farklı kanat geometrisi; 0,5, 1 ve 1,5 cm kanat uzunluğu; 1,3 ve 5 nozul sayısı ile 2,4 ve 6 H mesafesi belirlenmiştir.

Tablo 1. Parametreler ve seviyeleri
Table 2. Parameters and their levels

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Nozul sayısı	1	3	5
Kanat uzunluğu (cm)	0.5	1	1.5
Kanat geometrisi	Silindir	Altıgen	Kare
H mesafesi (cm)	2	4	6

Tablo 2 de görüldüğü gibi her bir parametre 3 farklı düzeyde incelenmiştir. Konvansiyonel deney tasarım yöntemlerinden tam faktöriyel tasarım ile $4^3 = 64$ analiz yapmak yerine, parametreler arasındaki kompozit etkilerin de incelenebildiği Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) kullanılarak sadece 31 analiz yapılmıştır (Tablo 3). Sıralı deneyler gerektiğinde Merkezi Kompozit Tasarım’ın kullanımı yararlıdır.

Operasyonel ve geometrik faktörlerin optimizasyonu ile ısı transferini maksimize etmek için RSM’yi kullandık. Bu çalışmada çeşitli deneysel faktörlerin sıcaklık farkı üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Sıcaklık farkı kararlı halde yüzey sıcaklığı ile akışkan sıcaklığı arasındaki farktır.

CFD analizlerinden elde edilen sıcaklık farkı verileri, deney planında Minitab 18 programında analiz edilmiştir. İkinci dereceden yanıt yüzeyi (YY) modeli Tablo 3’te çizelgelenen deney tasarımının her faktör düzeyindeki kombinasyonu için ölçülen yoğunluk (yanıt) için varyans analizi (ANOVA) kullanılarak değerlendirilmiştir.

1.2. HAD prosedürü

1.2.1. CFD procedure

Farklı parametrelerin (nozul sayısı, kanatçık uzunluğu, kanatçık geometrisi ve nozul-yüzey mesafesi) ısı transfer karakteristiklerine olan etkisini incelemek amacıyla yapılan sayısal çözümlerinde hava sıcaklığı sabit 293.15 K ve hızı ise farklı nozul geometrilerinde eşit debi sağlamak amacıyla nozul girişinde sabit 10 m/s olarak tanımlanmıştır. Soğutulması gereken eleman olarak 40x40x3 mm boyutlarına sahip alüminyum levha kullanılmıştır. Alüminyum levha üzerine 5 mm, 10 mm ve 15 mm yüksekliklere sahip kare, altıgen ve silindirik kanatçıklar yerleştirilmiştir. Kanatçıklar levha üzerinde eşit sayıda 25’er adet ve farklı kanatçık geometrileri için eşit yüzey alanı oluşturacak şekilde 5 mm, 10 mm ve 15 mm yüksekliklere sahip ve sırasıyla 2600 mm², 3600 mm² ve 4600 mm² olarak belirlenmiştir. HAD analizleri için oluşturulan kontrol hacimleri Şekil 1’de görülmektedir.

Tablo 3. YYY deney planı
Table 3. RSM experimental layout

Deney No	Parametreler			Tepki Değişkeni	
	Nozul sayısı	Kanat uzunluğu	Kanat geometrisi	H mesafesi ΔT	
1	1	1.5	Kare	4	6.76
2	1	1	Altıgen	3	8.35
3	5	0.5	Kare	2	8.49
4	1	1.5	Kare	2	7.31
5	1	1.5	Silindir	2	6.44
6	3	1	Altıgen	3	8.15
7	5	1.5	Silindir	4	7.49
8	3	1	Altıgen	3	8.15
9	3	1	Silindir	3	6.78
10	5	0.5	Silindir	2	7.80
11	1	1.5	Silindir	4	6.81
12	3	1	Altıgen	4	8.64
13	1	0.5	Silindir	2	6.60
14	5	1.5	Kare	2	2.80
15	3	1	Altıgen	3	8.15
16	5	1	Altıgen	3	8.55
17	5	0.5	Silindir	4	9.28
18	3	1.5	Altıgen	3	7.75
19	5	1.5	Kare	4	8.38
20	3	1	Altıgen	3	8.15
21	3	0.5	Altıgen	3	9.48
22	5	1.5	Silindir	2	6.66
23	5	0.5	Kare	4	11.34
24	3	1	Altıgen	3	8.15
25	5	1	Altıgen	3	8.15
26	1	0.5	Kare	4	10.10
27	3	1	Altıgen	2	7.67
28	3	1	Altıgen	3	8.15
29	3	1	Kare	3	8.42
30	1	0.5	Kare	2	9.37
31	1	0.5	Silindir	4	6.76

Kontrol hacimleri oluşturularak gereken tanımlamalar yapıldıktan sonra ilgili kontrol hacimleri için mesh hücreleri oluşturulmuştur. Çalışmada öncelikle 500.000 civarında mesh yapısı oluşturularak “Orthogonal Quality” %90 civarına ulaştığı noktada tekli, üçlü ve beşli nozullara sahip kontrol hacimleri için sırasıyla 950.000, 1.000.000 ve 1.055.000 civarında mesh oluşturulmuştur. Ulaşılan bu mesh sayılarından sonra mesh geometrilerinin belirli kısımlarda küçültülerek mesh sayısında yapılabilecek artışın sonuçlarda değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür. Şekil 2’de oluşturulan mesh yapısı görülmektedir.

Bu çalışmada alüminyum levhanın alt kısmından sürekli 1000 W/m² ısı akısı tanımlanarak ve türbülans modeli olarak “k-ε RNG” modeli ile “Enhanced Wall Functions” şartları kullanılmıştır. HAD analizleri aşağıda maddeler halinde belirtilen kabuller ve sınır şartlarında gerçekleştirilmiştir.

- Akışkan olarak özellikleri zaman ve konumla değişmeyen (Ma<0,3) hava kullanılmıştır.

- Kontrol hacmine giren ve çıkan hava debisi süreklidir.
- Kontrol hacmi kararlıdır.
- Yer çekimi göz ardı edilmiştir.

Yukarıda belirtilen kabullerle birlikte HAD analizlerinde aşağıda verilen korunum denklemleri kullanılmıştır. Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

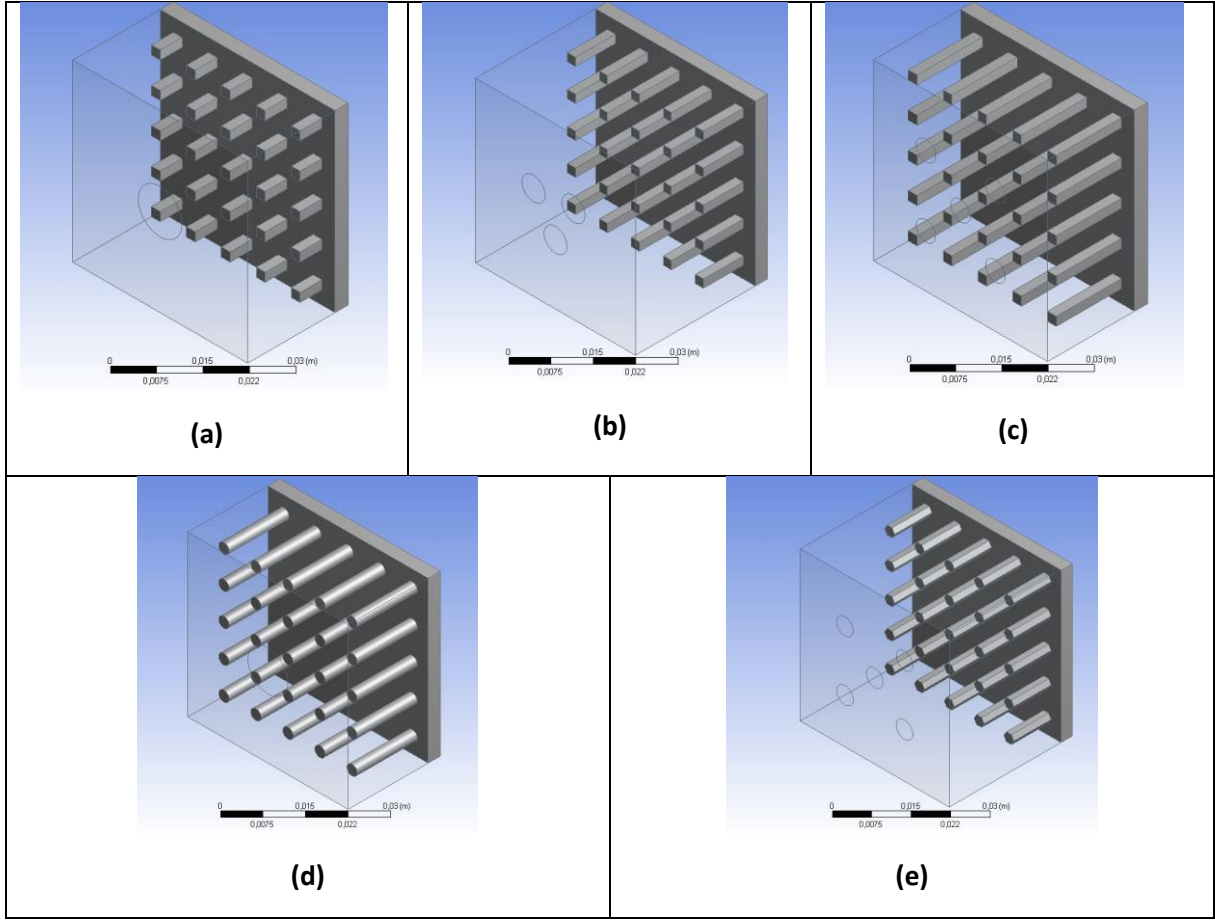
Momentumun korunumu denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot (\rho \vec{v}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \rho + \rho \vec{v} \cdot \vec{v} = 0 \quad (2)$$

enerji denklemi;

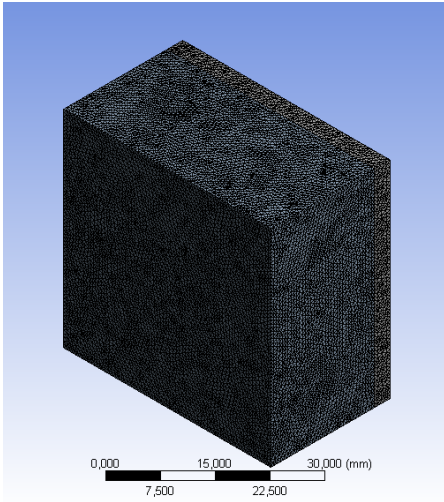
$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + \Phi \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 1. Farklı geometriler ve nozul sayıları için kontrol hacimleri (a) tekli nozul-kare, (b) üçlü nozul-kare, (c) beşli nozul-kare, (d) tekli nozul-silindirik, (e) beşli nozul-altıgen

Figure 1. Control volumes for different geometries and number of nozzles (a) single nozzle-square, (b) triple nozzle-square, (c) quintuple nozzle-square, (d) single nozzle-cylindrical, (e) quintuple nozzle-hexagonal



Şekil 2. İlgili kontrol hacimleri için oluşturulan mesh görünümü

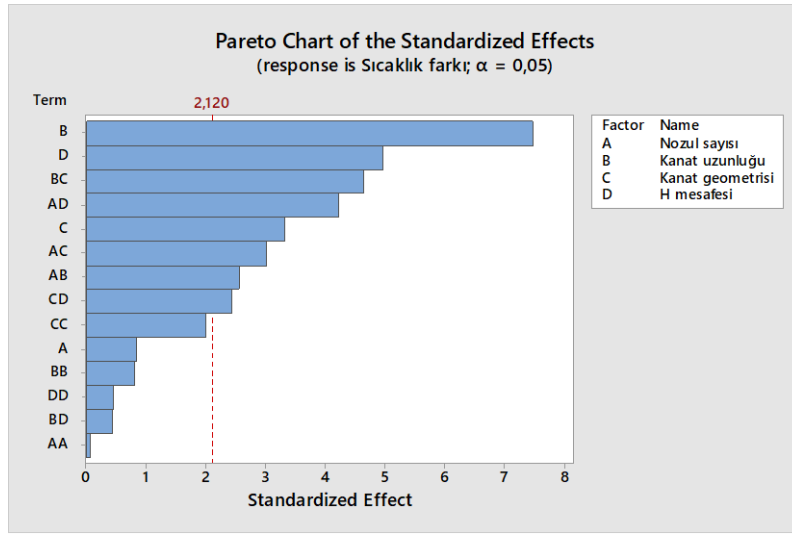
Figure 2. Mesh view generated for control volumes

2. Bulgular ve tartışma

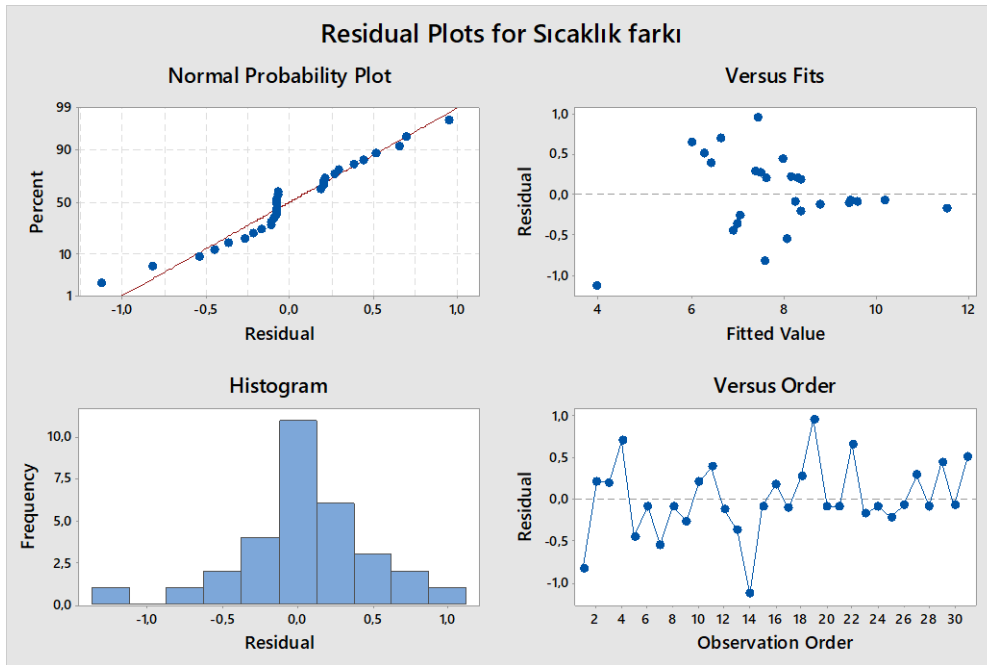
2. Results and discussion

Pareto grafiği (Şekil 3) etkilerin göreceli büyüklüğünü ve ana, kare ve etkileşim etkilerinin istatistiksel önemini karşılaştırmak için kullanılır. Etkiler, azalan mutlak değer sırasına göre çizilir. Grafikteki referans çizgisi, hangi etkilerin önemli olduğunu gösterir. Bu referans çizgisinin ötesine geçen herhangi bir etki istatistiksel olarak önemlidir.

Şekil 3'teki Pareto grafiği sonuçlarına göre, sırasıyla; kanat uzunluğu (B), H mesafesi (D), kanat uzunluğu ve kanat geometrisinin bileşik etkisi (BC), nozul sayısı ve H mesafesinin bileşik etkisi (AD), kanat geometrisi (C), nozul sayısı ve kanat geometrisinin bileşik etkisi (AC), nozul sayısı ve kanat uzunluğunun bileşik etkisi (AB) ve kanat geometrisi ve H mesafesinin bileşik etkisinin (CD) istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Kanat uzunluğunun en büyük etkiye sahip olduğu, kanat geometrisi ve H mesafesinin ise en düşük etkiye sahip olduğu görülmektedir.



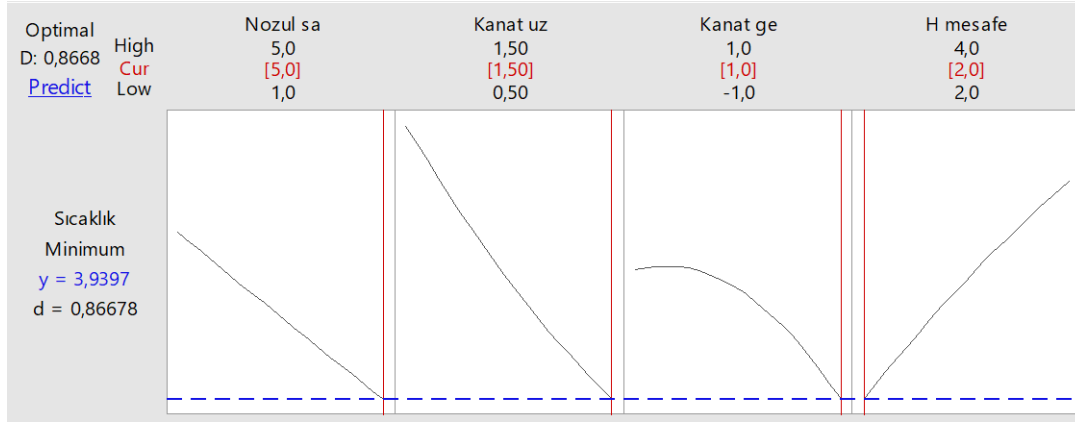
Şekil 3. Pareto grafiği
Figure 3. Pareto chart



Şekil 4. Kalıntı grafiği
Figure 4. Residual plots

Normal olasılık grafiğindeki ortogonal çizgi, modelden alınan değerlerin ve sayısal analiz sonuçlarının örtüştüğü noktaları temsil eder. Bu çizgiden uzaklaşmak, model ile sayısal analiz arasında bir fark olduğu anlamına gelir. Minimum sıcaklık farkı için oluşturulan modelin verdiği sonuçlar ile sayısal analiz sonuçlarının iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir (Şekil 4). Kalıntılara karşı gözlem sırasını gösteren grafiğe göre, deney planında 31 deney için model ile deney arasındaki

farkı gösteren artık değerler gösterilmiştir. Pozitif bir artık değer, model tarafından verilen değer deneyde elde edilen değerden daha küçük olduğunu gösterir. Artık değer negatifse, modele göre değer ve sayısal analiz değerinin birbirine yakın olduğu anlamına gelir. Grafikten görüldüğü gibi artıkların pozitif veya negatif olması modelin parametrelerle ilişkisinin güçlü olduğunu ve sayısal analiz değerlerinin birbirine yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Optimizasyon grafiği
Figure 5. Optimization plot

Çalışmada dikkate alınan üç faktöre dayalı olarak optimize edilmiş sıcaklık farkını belirlemek için model D-optimalite kriterini kullanmıştır. Şekil 5'te gösterildiği gibi, 3.9397 °C'lik bir sıcaklık farkı ile en yüksek optimizasyon sonucu olarak 0.8669'lık bir D-optimalitesi elde edilmiştir. Optimum değerler ise Tablo 4'te verilmiştir. D değeri, maksimum hedef fonksiyon değeri anlamına gelir. Hedef fonksiyonunun optimum değerinin modelden elde edilebilecek maksimum değere oranını temsil eder. Ayrıca Şekil 5, parametreler ile optimal olarak hesaplanan değerlerin kesişimini göstermektedir (Yesildal vd., 2021).

Tablo 4. Optimum değerler
Table 4. Optimum values

Parametre	Optimum değer
Nozul sayısı (N)	5
Kanat uzunluğu (h _k)	1,5 cm
Kanat geometrisi (KG)	Silindir
H mesafesi	2 cm

RSM kullanılarak deneysel parametrelerin amaç fonksiyonu üzerindeki etkileri belirlenebilir ve elde edilen matematiksel model aracılığıyla performans özellikleri arasında ilişkiler kurulabilir. Analiz sonucunda bir matematiksel model elde edilmiştir. Daha önce nozul sayısı (N), kanat uzunluğu (h_k), kanat geometrisi (KG) ve H sıcaklık farkını etkileyen parametreler olarak belirlenmişti. Yanıt

modeli oluşturmak için gerekli veriler Yüz Merkezli Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) ile elde edilmiş ve sistemden alınan doğrulama test verileri RSM ile elde edilen matematiksel model kullanılarak karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki denklem (Denklem 4), sıcaklık farkı (ΔT) için geliştirilmiş ikinci dereceden polinom modelini göstermektedir.

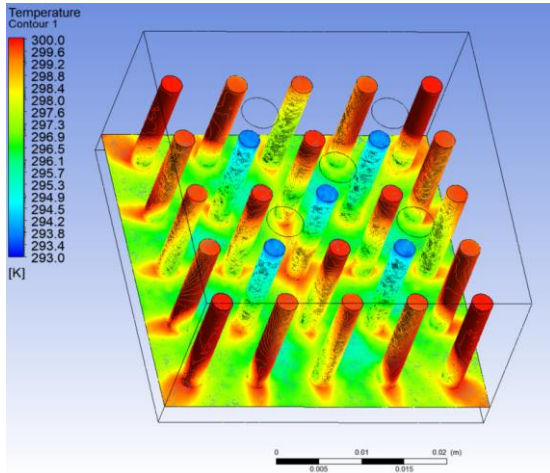
$$\Delta T = 9.86 - 0.53N - 3.67h_k + 1.429KG + 0.62H + 0.0046N * N + 1.17h_k * h_k - 0.722KG * KG - 0.166H * H - 0.379N * h_k - 0.2238N * KG + 0.3128N * h_k - 1.375h_k * KG + 0.126h_k * H + 0.36KG * H \quad (4)$$

Bir Yanıt Yüzey modeli, incelenen parametreler ile yanıt değişkeni arasındaki işlevsel ilişkiyi tanımlar ve yeterince iyi tanımlayamadığında bir uyumsuzluk meydana gelebilir. Uyumsuzluk testi, seçilen modelin gözlemlenen verileri açıklamak için yeterli olup olmadığını belirlemek için tasarlanmıştır. Oluşturulan model ile deneysel verilerin etkileşimini belirlemek için P değeri önem düzeyi ile karşılaştırılır. Bu çalışmada, α = 0,05 anlamlılık düzeyi tercih edilmiştir. Model için 0,05'ten küçük ilişkili P değerleri model terimlerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu, 0,05'ten büyük P değerleri ise model terimlerinin önemsiz etkileri olduğunu gösterir. Tepki değişkenimiz sıcaklık farkı için ANOVA tablosu Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Tepki değişkeni (ΔT) için ANOVA tablosu
Table 5. ANOVA table for response variable (ΔT)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	57.0489	4.0749	11.62	0.000
Linear	4	32.3694	8.0924	23.07	0.000
A	1	0.2488	0.2488	0.71	0.412
B	1	19.6460	19.6460	56.02	0.000
C	1	3.8716	3.8716	11.04	0.004
D	1	8.6030	8.6030	24.53	0.000
Square	4	3.1145	0.7786	2.22	0.113
A*A	1	0.0012	0.0012	0.00	0.955
B*B	1	0.2301	0.2301	0.66	0.430
C*C	1	1.3972	1.3972	3.98	0.063
D*D	1	0.0736	0.0736	0.21	0.653
2-Way Interaction	6	21.4737	3.5789	10.20	0.000
A*B	1	2.2945	2.2945	6.54	0.021
A*C	1	3.2068	3.2068	9.14	0.008
A*D	1	6.2638	6.2638	17.86	0.001
B*C	1	7.5666	7.5666	21.57	0.000
B*D	1	0.0634	0.0634	0.18	0.676
C*D	1	2.0786	2.0786	5.93	0.027
Error	16	5.6116	0.3507		
Lack-of-Fit	10	5.5320	0.5532	41.70	0.000
Pure Error	6	0.0796	0.0133		
Total	30	62.6606			

Yanıt yüzey yöntemi ile elde edilen optimum soğutma parametreleri kullanılarak HAD analizlerinde elde edilen görüntüler Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7 ile verilmiştir.

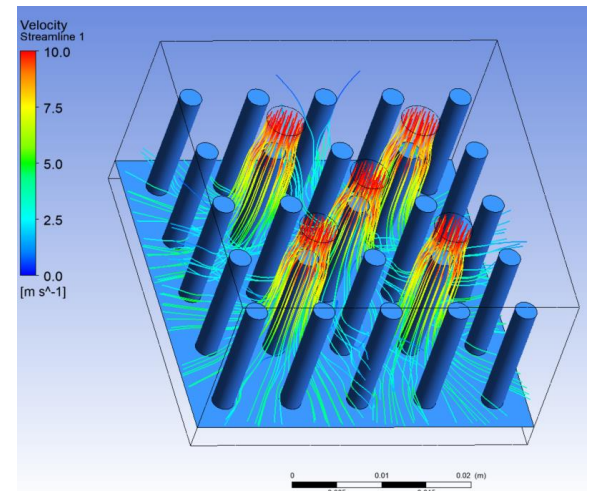


Şekil 6. Optimum parametreler kullanılarak elde edilen sıcaklık dağılımı

Figure 6. Temperature distribution obtained using optimum parameters

Şekil 6 incelendiğinde nozulların hemen alt kısmında kalan kanatçıkların diğer kanatçıklara kıyasla daha fazla sıcaklık gradyeni oluşturduğu görülmektedir. Akışın tek bir nozul yerine eşdeğer beş eş nozuldan verilmesi soğutma performansını artırmaktadır. Soğutulan alüminyum levha üzerindeki sıcaklık dağılımı incelendiğinde ise

kanatçıklar sebebiyle akışın ulaşamayıp ölü nokta oluşturduğu kısımlarda sıcaklık daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Bu durum Şekil 6 incelendiğinde daha net bir şekilde görülmektedir. Şekil 6'da kanatçıkların oluşturduğu ölü bölgeler Şekil 5'te daha yüksek sıcaklık olarak ortaya çıkmıştır. Benzer şekilde geometride orta kısımda bulunan nozulun altındaki kanatçık etrafında diğer kanatçıklara nispeten daha yüksek sıcaklık görülmektedir. Bu gradyen oluşumunun sebebi diğer dört nozulun sebep olduğu akışın ortadaki nozul ile karışarak olumsuz etki göstermesidir.



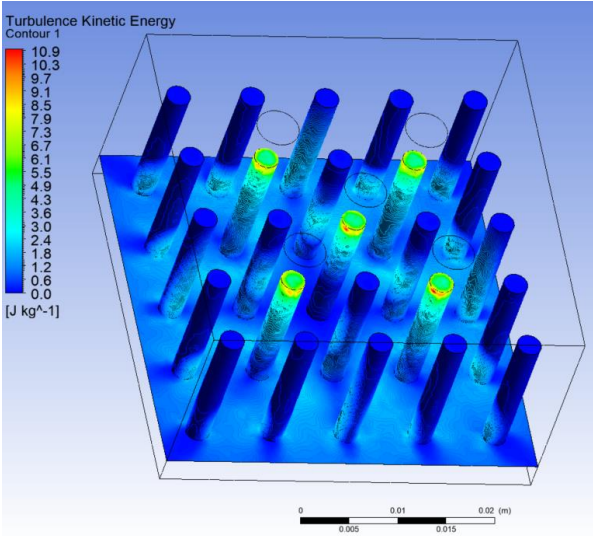
Şekil 7. Optimum parametreler kullanılarak elde edilen akım iplikçikleri

Figure 7. Streamlines obtained using optimum parameters

Türbülans kinetik enerjisi, türbülanslı akıştaki girdaplarla ilişkili birim kütle başına ortalama kinetik enerjidir. Hızın farklı yönlerde oluşturduğu dalgalanmalarla karakterize edilen bu enerji sayısal analizlerde k-ε türbülans modeline göre hesaplanmıştır. Türbülans kinetik enerjisi (TKE) üç koordinattaki hız bileşenlerinin varyanslarının toplamının yarısıdır.

$$TKE = \frac{1}{2} [\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2}] \quad (5)$$

Şekil 8'de görülen türbülans kinetik enerji gradyeni incelendiğinde nozulların hemen altlarında bulunan kanatçıklar üzerinde daha fazla bir kinetik enerji değişimi görülmektedir. Bu kinetik enerji gradyenleri ortadaki nozulun çarptığı kanatçığın ve diğer kanatçıkların belirli kısımlarında daha fazladır. Bu kinetik enerji gradyen yığılmasının sebebi nozulların birbirlerini etkilemesidir. Bahsi geçen enerji yığılmasının önüne geçebilmek için nozullar birbirlerinden daha uzak olarak konumlandırılabilir. Ancak bu durumun ısı transfer karakteristiğine nasıl bir etki oluşturacağını belirlemek için farklı deneyler yapılması gerekmektedir.



Şekil 8. Optimum parametreler kullanılarak elde edilen Türbülans Kinetik Enerji gradyeni
Figure 8. Turbulent kinetic energy gradient obtained using optimum parameters

3. Tartışma ve sonuçlar

3. Discussion and conclusions

Bu çalışmada çarpan jet ile metal soğutmada etkin parametrelerin optimum değerlerini belirlemek ve matematiksel model oluşturmak için Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kullanılmıştır. Hedef fonksiyon olarak (yanıt değişkeni) sıcaklık farkı alınmıştır.

Sonuçta en etkin parametre kanat uzunluğu olarak elde edilmiştir. Kanat geometrisi ve H mesafesinin bileşik etkisinin (CD) minimum etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Optimum sonuçlar; 5 nozul sayısı, 1.5 cm kanat uzunluğu, silindir kanat geometrisi ve 2 cm H mesafesi olarak elde edilmiştir. İlâveten bağımsız parametrelerle temsil edilen matematiksel bir model sunulmuştur.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu çalışmada, birinci yazar Ahmet Numan Özakın HAD modellemesi, analizi ve yorumlarını yapmıştır. İkinci yazar Faruk Yeşildal ise Yanıt yüzey yöntemi ve optimizasyon analizi ve grafiklerin yorumlanması ile ağırlıklı olarak ilgilenmiştir. Yazarlar makalenin diğer kısımlarına da eşit katkı sunmuşlardır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Ahmed, Z. U., Al-Abdeli, Y. M., & Guzzomi, F. G. (2015). Impingement pressure characteristics of swirling and non-swirling turbulent jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 722-732. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusc.2015.07.017>
- Al-Hadhrani, L. M., Shaahid, S., & Al-Mubarak, A. A. (2011). Jet impingement cooling in gas turbines for improving thermal efficiency and power density. *Advances in Gas Turbine Technology*, 191-210. <https://doi.org/10.5772/22020>
- Ashforth-Frost, S., Jambunathan, K., & Whitney, C. (1997). Velocity and turbulence characteristics of a semiconfined orthogonally impinging slot jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 14(1), 60-67. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(96\)00112-4](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(96)00112-4)
- Barbosa, F. V., Sousa, S. D., Teixeira, S. F., & Teixeira, J. C. (2021). Application of taguchi method for the analysis of a multiple air jet impingement system with and without target plate motion.

- International Journal of Heat and Mass Transfer*, 176, 121504. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121504>
- Buzzard, W. C., Ren, Z., Ligrani, P. M., Nakamata, C., & Ueguchi, S. (2017). Influences of target surface small-scale rectangle roughness on impingement jet array heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 110, 805-816. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.061>
- Caliskan, S., Baskaya, S., & Calisir, T. (2014). Experimental and numerical investigation of geometry effects on multiple impinging air jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75, 685-703. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.005>
- Çelik, N., & Haydar, E. (2010). Çarpan dairesel bir jette çarpma bölgesi türbülans şiddetinin ısı transferine etkisi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 30(1), 91-98.
- Demircan, T., & Türkoğlu, H. (2007). Bir yüzeye çarpan osilasyonlu iki boyutlu dikdörtgen hava jetinin sayısal olarak incelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 27(1), 39-50.
- Demircan, T., & Türkoğlu, H. (2010). Çarpan osilasyonlu jetlerde osilasyon karakteristiklerinin ve çarpma mesafesinin akış ve ısı transferine etkilerinin sayısal olarak incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(4).
- Diop, S. N., Dieng, B., & Senaha, I. (2021). A study on heat transfer characteristics by impinging jet with several velocities distribution. *Case Studies in Thermal Engineering*, 101111. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101111>
- Gelis, K., & Akyurek, E. F. (2021). Entropy generation of different panel radiator types: Design of experiments using response surface methodology (RSM). *Journal of Building Engineering*, 41, 102369. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102369>
- Ianiro, A., & Cardone, G. (2012). Heat transfer rate and uniformity in multichannel swirling impinging jets. *Applied Thermal Engineering*, 49, 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.018>
- Karabulut, K., & Alnak, D. E. (2020). Değişik şekilde tasarlanan ısıtılmış yüzeylerin hava jeti çarpmalı soğutulmasının araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 88-98. <https://doi.org/10.5505/pajes.2019.58812>
- Kilic, M., & Baskaya, S. (2017). Farklı geometride akış yönlendiriciler ve çarpan jet kullanarak yüksek ısı akılı bir yüzeyden olan ısı transferinin iyileştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(4), 693-707.
- Lam, P. A. K., & Prakash, K. A. (2017). A numerical investigation and design optimization of impingement cooling system with an array of air jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 880-900. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.017>
- Maghrabie, H. M. (2021). Heat transfer intensification of jet impingement using exciting jets-A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110684. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110684>
- Monnoyer, F., & Lochegnies, D. (2008). Heat transfer and flow characteristics of the cooling system of an industrial glass tempering unit. *Applied Thermal Engineering*, 28(17-18), 2167-2177. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.014>
- Nuntadusit, C., Wae-Hayee, M., Bunyajitradulya, A., & Eiamsa-Ard, S. (2012). Heat transfer enhancement by multiple swirling impinging jets with twisted-tape swirl generators. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(1), 102-107. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.10.003>
- Ortega-Casanova, J. (2012). CFD and correlations of the heat transfer from a wall at constant temperature to an impinging swirling jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(21-22), 5836-5845. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.079>
- Ortega-Casanova, J., & Granados-Ortiz, F. (2014). Numerical simulation of the heat transfer from a heated plate with surface variations to an impinging jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 76, 128-143. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.022>
- Penumadu, P. S., & Rao, A. G. (2017). Numerical investigations of heat transfer and pressure drop characteristics in multiple jet impingement system. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1511-1524. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.057>
- Rao, G. A., Levy, Y., & Kitron-Belinkov, M. (2009). Heat transfer characteristics of a multiple jet impingement system. In 48th Israeli Aerospace Conference (pp. 5-7), Tel-Aviv.

- Wang, G., Deng, Y., Xu, X., He, X., Zhao, Y., Zou, Y., . . . Yue, J. (2016). Optimization of air jet impingement drying of okara using response surface methodology. *Food control*, 59, 743-749. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.06.047>
- Wannassi, M., & Monnoyer, F. (2015). Fluid flow and convective heat transfer of combined swirling and straight impinging jet arrays. *Applied Thermal Engineering*, 78, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.043>
- Yakut, R., Yakut, K., Yeşildal, F., & Karabey, A. (2016). Experimental and numerical investigations of impingement air jet for a heat sink. *Procedia Engineering*, 157, 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.331>
- Yesildal, F., Ozakin, A. N., & Yakut, K. (2021). Optimization of operational parameters for a photovoltaic panel cooled by spray cooling. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.04.002>
- Yildizeli, A., & Cadirci, S. (2020). Multi-objective optimization of multiple impinging jet system through genetic algorithm. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 158, 119978. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119978>