

EŞ-EKSENLİ YİVLİ ISI DEĞİŞTİRİCİ ÜZERİNDE ÖNCÜL VE GERİ ETKİLERİN TEPKİ YÜZEYİ YÖNTEMİ VE STOKASTİK OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI İLE ANALİZİ

Analysis of Backward and Forward Effects on Grooved Co-Axial Heat Exchanger by Response Surface Methodology and Stochastic Optimization Algorithms

Şahin GÜNGÖR

Levent AYDIN

Ziya Haktan KARADENİZ

ÖZET

Boru içi akış problemi hakkında araştırmalar yapan literatür çalışmaları, yivli boru geometrilerinin yivsiz borulara göre daha yüksek ısı verime sahip olduğu sonucunu ortaya koymuştur. Dikdörtgen, trapez ve dairesel gibi birçok farklı şekil ve boyutlar ile yapılan deneysel ve numerik çalışmalar neticesinde dairesel yiv geometrilerine sahip borularda ısı transfer katsayısının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Boru içi akış problemini ele alan çalışmalar sabit kesitli yiv geometrileri ile ilgilenmiş ve yerel etkiler göz ardı edilip toplam ısı transferi incelenmiştir. Bu çalışmada, dairesel yivli ısı değiştirici modelinde yiv yarıçapı ve yivler arası mesafedeki değişimlerin yerel ısı transfer katsayısına etkisi hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile incelenmiş ve ısı transferi açısından optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Hesaplama hacmi, her biri beş adet yivden meydana gelen üç yiv bölgesi oluşturularak, akış yönünde değişken yiv yarıçaplarının ısı transferi katsayısına etkisi araştırılmıştır. Hesaplama hacminin ağ yapısı, ağdan bağımsızlık çalışmaları yapılarak en uygun ağı belirlemesi neticesinde oluşturulmuştur. Yivli duvar sıcaklıkları 350 K olarak kabul edilmiş ve oda sıcaklığında ısı değiştiriciye giren havanın farklı Reynolds sayılarında ($1200 < Re < 24000$) ve farklı yiv boyutlarında yerel ısı transfer katsayısına etkileri incelenmiştir. Yiv yarıçapları her bir yiv bölgesi için 2 mm ile 6 mm arasında üretilebilirlik kriteri göz önünde bulundurularak 0.2 mm artış hassasiyeti ile değiştirilmiş ve HAD analizleri parametrik ölçü tanımlamaları sayesinde farklı yiv senaryoları için tekrarlanmıştır. Bu noktada senaryo sayısını azaltmak ve mühendislik probleminin fenomenini doğru tanımlayabilmek adına farklı deney tasarımı (DOE) araçları kullanılmış, sonuçlar tepki yüzeyi yöntemi ile incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca, Mathematica programında çok değişkenli ve lineer olmayan regresyon modelleri ile yapılan çalışmalar sonucunda optimizasyon problemlerine ait bir hedef fonksiyonu oluşturulmuş, yiv bölgelerindeki yarıçapların tasarım değişkeni, ısı transfer katsayılarının sistem çıktıları olduğu bir kod yazılmış ve üretilebilirlik kısıtlarını da içeren optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, yiv bölgelerindeki yerel ısı transferi katsayılarının maksimum olduğu senaryoların ara yiv yarıçapı değerlerinde elde edildiği ve öncül-geri etkilerin yerel ısı transferi çalışmalarının kaçınılmaz bir parçası olduğu tespitleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tepki Yüzeyi Yöntemi, Stokastik Optimizasyon, Geri ve Öncül Etkiler, Isı Değiştirici.

ABSTRACT

In the literature, it is proved that grooved pipe models are thermally more efficient than the smooth pipe model. Some kinds of groove geometries (rectangular, trapezoidal, circular etc.) were compared both experimentally and numerically, eventually circular grooved pipe model gave the best results by means of heat transfer coefficient. Studies dealing with the internal flow were concerned with constant-section groove geometries and total heat transfer was investigated whereas local effects were ignored. In this study, the effects of variations in groove radius and the gap between adjacent grooves on local heat transfer coefficients were investigated by computational fluid dynamics (CFD) method and optimization studies were also performed in terms of heat transfer. The grooved section consists of three sub-sections to see the effects of groove dimension in stream-wise flow direction. Each section includes five grooves with constant radius in each one. We vary the radius of circular

grooves parametrically in each section to optimize the local groove radius throughout the pipe. We couple the fluid flow ($1200 < Re < 24000$) with energy equations, and the grooved sections are set as heated wall at constant temperature of 350 K. The optimal mesh has been selected by performing mesh independence study and finer mesh has been used in heated wall section. The radii of grooves are varied from 2 to 6 mm with an increment of 0.2 mm considering the manufacturability of the pipe, to do so we use the design of experiments (DOE). All DOE tools in ANSYS software are examined and compared with full factorial results. After DOE process, local heat transfer coefficient values of all groove parts are examined by response surface methodology (RSM). In addition, in the Mathematica program, an objective function which describes the problem is formed by studies with multiple nonlinear regression models. An optimization code has been performed as the radii of the grooved sections are design variable, the local heat transfer coefficients are the system outputs and the manufacturability limits are constraints. We observed and detected that the scenarios in which the local heat transfer coefficients in the grooved sections are maximum has been obtained at the intermediate groove radii values, therefore, backward-forward effects are an inevitable part of the local heat transfer studies.

Key Words: Response Surface Method, Stochastic Optimization, Backward and Forward Effect, Heat Exchanger.

1. GİRİŞ

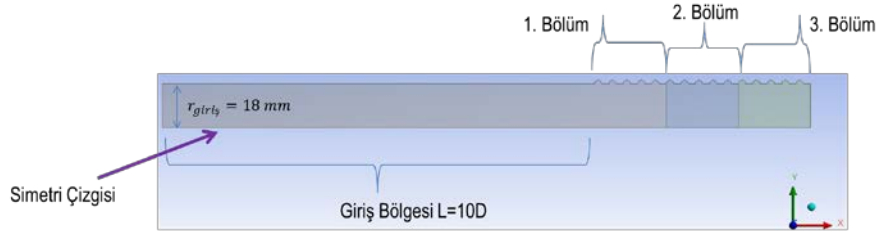
Isı transfer yüzey alanını ve akışkan nüfuziyetini arttırması sayesinde ısı verimi iyileştiren yivli boru sistemleri, ısı-akış mühendisliği sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde özellikle iç içe borulu, eş eksenli ve gövde borulu ısı değiştirici sistemlerinde verimi artırmak için kullanılan yivli tasarımlara sahip boru/kanallar üzerine birçok deneysel ve sayısal çalışma bulunmaktadır. Yivli tasarımlar üzerine ilk çalışmaların Sparrow vd. [1,2] tarafından 1980'lerin ortasında başlatıldığı kabul edilebilir. Bu çalışmalarda yivli ya da dalgalı tasarımlar, ısı transferi ve basınç düşümü parametreleri açısından deneysel olarak incelenmiştir. Analizler, farklı Reynolds sayıları için ($Re > 2000$) tekrarlanmış ve Nusselt sayısı ve basınç düşümü grafikleri paylaşılmıştır. Deneysel olarak yivli boru ve kanal tasarımlarının incelendiği birçok çalışma ise ülkemiz Üniversitelerinden literatüre kazandırılmıştır [3-7]. Bu çalışmalarda dikdörtgen, trapez ve dairesel yivli tasarımlar giriş bölgesindeki Reynolds sayısı, yiv genişliği, yiv kenar açısı ve yiv yüksekliği gibi parametreler açısından deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, yivli kanal tasarımlarına sahip modellere ait sonuçlar Dittus-Boelter ve Gnielinski korelasyonları ile de karşılaştırılarak, sonuçların doğrulanması sağlanmıştır. Bilen vd. [8] farklı yiv tasarımlarını Nusselt sayısı açısından incelemiş ve sonuçlar dairesel yiv geometrisine sahip modellerin ısı verimliliğinin diğer tasarımlara göre daha yüksek olduğu çıkarımını ortaya koymuştur.

Bilişim teknolojileri ve yazılım yeteneklerinin gelişmesi ile birlikte, sayısal çalışmalar ve analizler ile simülasyon tabanlı çözümler hız kazanmıştır. Bu noktada, yivli tasarımlara sahip ısı-akış mühendisliği sistemlerine dair sayısal çalışmalar son derece güncel konumdadır. Wang vd. [9] yiv genişliği ve yiv yüksekliğine bağlı olarak ısı değiştirici modellerindeki ısı transferi parametresini $1500 < Re < 10000$ aralığında sayısal olarak incelemiştir. Bu sayısal çalışma, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ortamında gerçekleştirilmiş ve farklı ısı değiştirici tasarımları için Nusselt sayısı ile sürtünme katsayısı değişimleri sunulmuştur. Ayrıca, sonuçlar literatürdeki benzer bir deneysel çalışma [10] ile karşılaştırılmıştır. Optimum yiv geometrisi tasarımını oluşturmak ve yiv bölgesinin etkilerini incelemek adına HAD analizleri yanı sıra deney tasarımı (DOE), tepki yüzeyi yöntemi (RSM) ve optimizasyon algoritmaları kullanılan sayısal çalışmalar [11-17], ısı transferi performansını iyileştirme açısından son derece önemlidir. Bu çalışmalarda tasarım değişkenleri olarak genelde yiv genişliği ve yüksekliği kullanılmış ve analizler için çok sayıda senaryo olasılığı bulunduğundan deney tasarımı yöntemi kullanılmıştır. Deney tasarımı yöntemi sayesinde daha az deney ile problemin fiziğini tanıyabilme ve mühendislik fenomenini anlayabilme imkânı elde etmekteyiz. Söz konusu çalışmalarda, deney tasarımı yöntemi ile elde edilen tasarım değişkenlerine bağlı ısı çıktı verileri, tepki yüzeyi yöntemi ile incelenerek optimum noktalar elde edilmiştir. Bu noktada özellikle paket yazılımlarda birçok deney tasarımı ve tepki yüzeyi seçenekleri olmakla birlikte, ısı akış sistemlerinde en çok merkez kompozit tasarımı (Central composite design) ve yapay sinir ağları (Neural network) yöntemleri öne çıkmaktadır.

Literatürde farklı tasarım parametrelerine göre yivli sistemlere dair inceleme yapan çok sayıda sayısal veya deneysel çalışma bulunmasına rağmen, bu çalışmaların en büyük eksikliği yiv geometrilerin akış yönünde ve kanal boyunca sabit geometride olmasıdır. Bu çalışmada, akış yönünde üç adet dairesel yivli bölge oluşturularak, bu bölgelerde yiv yarıçapı ve dolayısıyla yiv genişliği tasarım değişkeni olacak şekilde problem tasarlanmıştır. Örnek model olarak iç içe borulu ya da eş eksenli ısı değiştirici tasarımı ele alınmış ve tasarım kısıdı olarak bu modelin 3B yazıcıda üretilebileceği uygun bir aralık belirlenmiştir. Problem çıktısı olarak her bir yiv bölgesindeki yerel ısı transfer katsayıları tanımlanmıştır. CAD ortamında modellenen tasarım, Fluent HAD programında farklı senaryolar için analiz edilmiştir. Bu noktada, hem tüm olasılıklar hem de farklı deney tasarımı yöntemleri için analizler tekrarlanmış ve deney tasarımı araçlarının ürettiği setlerin farklılıkları irdelenmiştir. Elde edilen veri setleri, tepki yüzeyi yöntemi (RSM) ile incelenerek yiv yarıçapının yerel ısı transferine öncül ve geri etkileri ile maksimum ısı transfer katsayılarının elde edildiği senaryolar tespit edilmiştir. Aynı şekilde tüm senaryolar ve deney tasarımı senaryoları ile elde edilen veri setleri Mathematica programında yazılan bütünleşik bir regresyon ve optimizasyon kodu ile incelenerek, stokastik optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçlar ile RSM yönteminden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

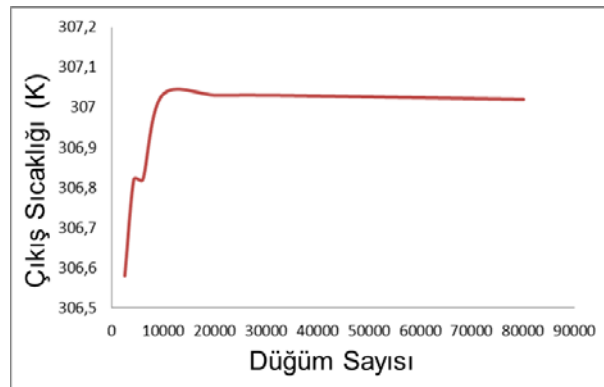
2. YÖNTEM VE ANALİZLER

Yivli ısı değiştirici modeli tasarlanırken, akışın tam gelişmiş koşullara ulaşabilmesi için uzun bir giriş bölgesi eklenmiştir. Model eksen çizgisine göre radyal simetrik olduğundan analizle eksenel simetrik yöntem ile gerçekleştirilmiş ve bu sayede hesaplama yükü azaltılarak analiz süreleri kısaltılmıştır. Şekil 1’de analizlerde kullanılan hesaplamalı akış bölgesi sunulmuştur. Giriş bölgesinden itibaren değişken yiv yarıçaplarına sahip ve her biri beş adet yivden oluşan üç yiv bölümü bulunmaktadır.



Şekil 1. Analizlerde kullanılan hesaplamalı akış bölgesi.

Giriş bölgesinde 298 K sıcaklıkta ve 1200 ile 24000 arasında değişen Reynolds sayısına sahip akışkan, giriş bölgesinden tam gelişmiş akış koşulları altında yiv bölgesine ulaşır. Analizlerde türbülanslı akış koşulları için k-ε türbülans modeli ve gelişmiş duvar koşulları kullanılmıştır. Yivli bölgeler ise duvar sıcaklıkları 350 K olacak şekilde ayarlanarak, her bir bölgedeki yerel ısı transfer katsayıları (ITK1, ITK2, ITK3) sistem çıktısı olarak tanımlanmıştır. Yiv yarıçapları 2 mm ile 6 mm aralığında ve 0,2 mm hassasiyetle değişebilecek şekilde parametrik olarak tanımlanmıştır. Bu ölçüler Laboratuvarımızda bulunan 3 boyutlu prototipleme cihazının üretim kısıtlarına göre tespit edilmiştir. Modellemenin ardından ağ yapısı çalışmaları yapılarak ağdan bağımsızlık (Şekil 2) sağlanıncaya kadar çeşitli ağ sistematiği denenmiştir ve uygun ağ yapısı belirlenmiştir.

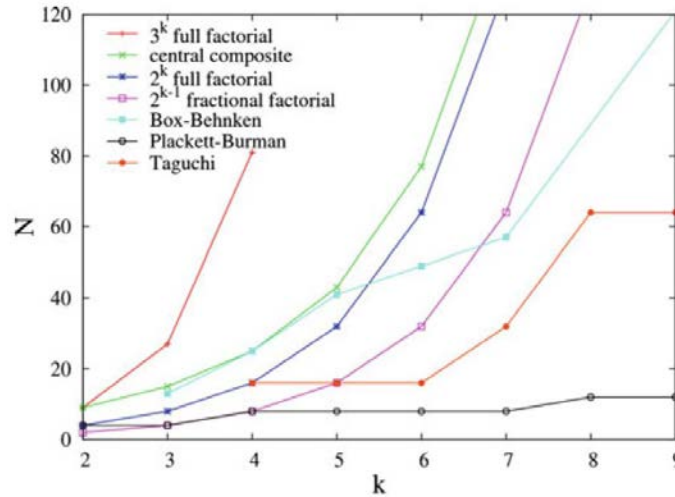


Şekil 2. Ağdan bağımsızlık çalışmaları.

2.1. Deney Tasarımı Bazlı Tepki Yüzeyi Yöntemi ile Isıl Performans Analizleri

Tepki yüzeyi yöntemi, bir mühendislik problemine ait tasarım değişkenleri ve sistem çıktıları arasındaki ilişkiyi sistem kısıtları altında regresyon bağıntıları ile ilişkilendiren bir algoritmadır. Bu noktada, tepki yüzeyi yöntemi ile ilişkilerin ve optimum noktaların incelenebilmesi için öncül şart tasarım değişkenlerinin, sistem çıktılarının ve limitlerin problemde tanımlanmasıdır ve bu şartlar altında analiz edilen farklı senaryolara ait veri setlerinin elde edilmesidir. Özellikle, 3B eklemeli üretim gibi tasarım özgürlüğünü artıran yöntemler sayesinde tasarımlar daha karmaşık ve daha fazla değişken parametreye sahip hale gelmiştir. Bu anlamda sayısal çalışmalarda problem fiziğine ait tüm senaryoların analizi hesaplama yükü getirmekte ve iş gücü artmaktadır. Deney tasarımı yöntemi, problem fiziğini daha az senaryo ile tahmin edecek algoritmalara sahiptir ve tepki yüzeyi yönteminde kullanılacak veri seti eldesi için son derece pratik bir yöntemdir. Daha az tasarım noktası ile fiziksel fenomeni anlatan istatistiksel bir yöntem olan deney tasarımı yöntemi sayısal çalışmalar için son derece verimlidir [18].

Bu çalışmada, öncelikle her bir yiv bölgesinin 2-6 mm aralığında ve 0,2 mm hassasiyetle değişebilen ölçülerde olabilen yarıçap değerleri tasarım değişkeni olarak kabul edilmiştir. Üretilebilirlik kısıtları altında tüm senaryolar için 21x21x21 olasılık, toplamda 9261 farklı senaryo türetilmiştir. Analizlerin ilk adımında, tüm senaryolar için her bir yiv bölgesindeki ısı transfer katsayıları analiz edilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Yivli ısı değiştirici modeli için ısı verim parametresinin en yüksek ve en düşük olduğu noktalar tespit edilmiştir. Daha sonra ANSYS yazılımının DOE modülü altında yer alan deney tasarımı yöntemleri için farklı istatistik seçenekleri, farklı Reynolds sayıları için analiz edilerek deney tasarımı yönteminin başarısı araştırılmıştır.



Şekil 3. Deney tasarımı ile tasarım değişkeni sayısı ilişkisi (N: deney tasarımı sayısı, k: tasarım değişkeni sayısı), [18].

Şekil 3'te referans çalışmada yer alan ve farklı matematiksel algoritmalar ile deney tasarımı sayısının tayini için elde edilmiş bir grafik sunulmaktadır. Yivli ısı değiştirici problemimiz için tasarım değişkeni her bir yiv bölgesinin yarıçap ölçüsü olduğundan, k=3 için deney tasarımı sayısının 20'den küçük olduğu görülmektedir. Analiz programındaki her bir deney tasarımı algoritması (merkez kompozit tasarımı, geleneksel ve örneklemeli tasarım vb.) için oluşturulan deney sayısı ile Şekil 3'te yer alan grafik sonuçları son derece uyumludur. Farklı deney tasarımı algoritmaları ile elde edilen yerel ısı transfer katsayılarına ait veri setleri tepki yüzeyi yöntemine taşınarak ısı değiştirici performansının en yüksek ve en düşük olduğu noktalar tespit edilmiştir. Ayrıca, ısı performansının en yüksek olduğu noktaların Reynolds sayısına bağlı olup olmadığı araştırılmış ve Reynolds sayısı arttıkça akışkanın yivli kanallara daha iyi nüfuz ettiği gerekçesiyle ısı transfer katsayılarında artış tespit edilmiştir. Her bir senaryo için tepki yüzeyi grafikleri ve en düşük-en yüksek yerel ısı transferi katsayıları hesaplanarak, tespit edilen çıkarımlar sonuçlar kısmında paylaşılmıştır.

2.2. Stokastik Optimizasyon Algoritmaları ve Kodlama

Regresyon ve optimizasyon algoritmalarını içeren bütünleşik kodlama çalışmaları için tüm senaryoların analiz sonuçlarını içeren veri seti kullanılmıştır. Tasarım değişkenleri, sistem çıktısı ve problem kısıtları aynı olacak şekilde veri seti Mathematica programına aktarılmıştır. Veri seti incelenerek en uygun regresyon modelini elde edebilmek için birçok deneme yapılmıştır ve bu çalışmalar neticesinde doğrusal olmayan 2. derece rasyonel regresyon modelinin (Denklem(1)) veri setini en iyi şekilde temsil ettiğine karar verilmiştir.

$$\text{Reg} = (a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.z + a_4.x.y + a_5.x.z + a_6.y.z + a_7.x^2 + a_8.y^2 + a_9.z^2) / (b_0 + b_1.x + b_2.y + b_3.z + b_4.x.y + b_5.x.z + b_6.y.z + b_7.x^2 + b_8.y^2 + b_9.z^2) \quad (1)$$

Bu noktada regresyon modeli için R^2 ve düzeltilmiş R^2 değerleri kodun içinde hesaplanmış ve her ikisinin de 0.97 değerinin üzerinde olduğu görülmüştür. Çoğu regresyon model tabanlı araştırmalardaki eksikliklerden biri olan stabilite çalışması, elde edilen model için yapılmış ve veri setinde olmayan ara noktalar için modelin herhangi bir sıra dışı değer üretip üretmediği de ayrıca değerlendirilmiştir (Tablo1). Sonuç olarak ilgili modelin bu açıdan da kullanılabilir olduğu ve fiziksel yönden gerçekçi değerler ürettiği gösterilebilmiştir.

Tablo 1. Regresyon modeli için stabilite çalışmaları; yby1: 1. yivli bölge yarıçapı, yby2: 2. yivli bölge yarıçapı, yby3: 3. yivli bölge yarıçapı, ITK: ısı transfer katsayısı.

yby1 (mm)	yby2 (mm)	yby3 (mm)	ITK (W/m ² .K)	Model Sonuçları (W/m ² .K)
2	2	2	10.366	
2.2	2	2	10.213	
2.1	2	2		10.274
3.4	2.4	2	9.6092	
3.6	2.4	2	9.576	
3.433	2.4	2		9.571
5	2.8	2	9.0197	
5.2	2.8	2	8.6912	
5.1421	2.8	2		8.803

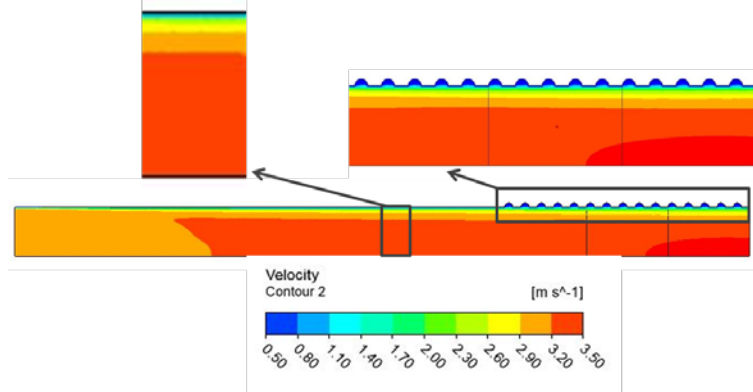
Regresyon modeli ile optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu olan matematiksel ifade elde edilmiştir. Mathematica tabanlı yazılan optimizasyon kodu kısmında stokastik optimizasyon algoritmaları olan Nelder-Mead, Random Search, Differential Evaluation ve Simulating Annealing yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmamızda stokastik optimizasyon algoritmalarının kullanılmasındaki en önemli neden bu algoritmaların türevden bağımsız olmaları nedeniyle problem fiziği içerisindeki pik veya doğrusal olmayan noktalarda daha başarılı ve güvenilir olmalarıdır [19].

2.3. Öncül ve Geri Etkilerin İncelenmesi

Yiv bölgelerindeki yarıçap değerlerinin değişken olması nedeniyle, geri ve öncül yiv bölgelerinin yerel ısı transfer katsayılarına etkileri incelenmiştir. Geri ve öncül etkilerin akış yönünde doğrusal olmadığı tespit edilmiş ve tepki yüzeyi yöntemi ile yerel ısı transfer katsayısı-her bir bölgedeki yiv yarıçapı ilişkileri görselleştirilmiştir. Geri ve öncül etkilerin incelenmesinde tepki yüzeyi simülasyonları son derece etkili bir yöntemdir. Özellikle çift fazlı akışkan veya yerel ısı transferi etkileri çalışan araştırmacılar için geri ve öncül etkiler ile yerel noktalardaki ısı performans ihtiyacı optimizasyonu arasında kuvvetli bir bağ bulunmaktadır. Bu nedenle, bir ısı-akış sisteminde toplam ısı performans yerine yerel etkilerin daha önemli olduğu durumlarda, geri ve öncül etki parametreleri de aynı oranda önem kazanmaktadır.

3. SONUÇ

Bu çalışmada, yivli ısı değiştirici modelinde 1200 ile 24000 aralığında değişen giriş bölgesi Reynolds sayıları için laminar ve türbülanslı akış koşulları altında sistemin yerel ısı transfer katsayıları incelenmiştir. Tam gelişmiş akış koşullarının sağlanması adına giriş bölgesinde oluşturulan $L=10D$ uzunluktaki bölüm sayesinde, hız dağılımının yiv bölgesine ulaşmadan önce tam gelişmiş koşulları sağladığı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Örnek bir senaryo ($V_{giriş}=3$ m/s, $Re=6696$) için hız konturu.

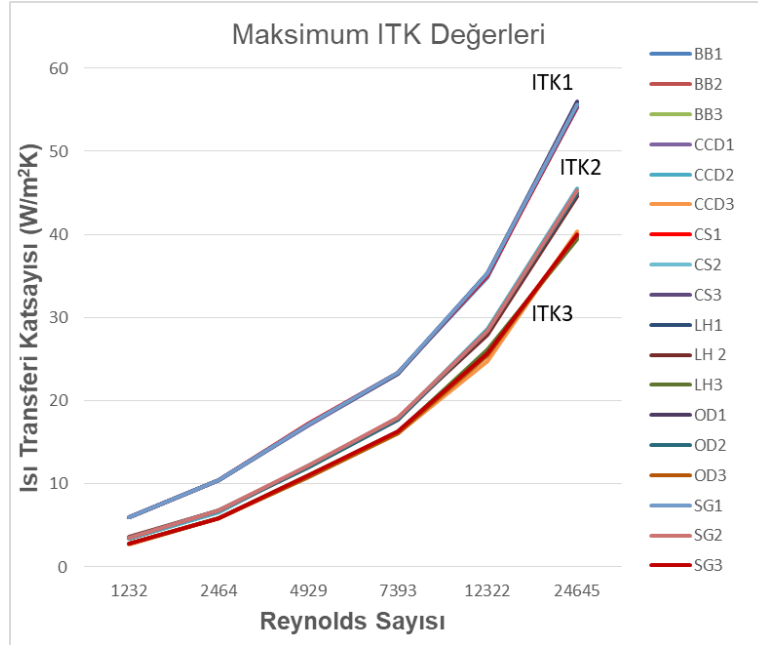
Yivli bölge yarıçap ölçülerinin tasarım değişkeni, yerel ısı transfer katsayılarının sistem çıktısı ve üretilebilirlik sınırlarının sistem limiti olduğu koşullar için hem tüm olası senaryolar hem de deney tasarımı yöntemi algoritmaları ile elde edilen senaryolara dair sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo incelendiğinde, yiv yarıçapının her bir bölgede değiştirilerek yerel ısı transferi katsayılarının yaklaşık %20 oranında artırılabilirdiği anlaşılmaktadır. En yüksek ısı performanslarının hangi noktalarda gerçekleştiğini anlatmadan önce, tüm olasılıklar ve her bir deney tasarımı algoritmasına ait sonuçları incelediğimizde ısı transfer katsayısı değerlerinin son derece uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Tüm senaryoların 9261 olası deneyden oluştuğu ısı değiştirici modelinde, her bir deney tasarımı için belirlenen deney sayısının Şekil 3'teki referans çalışma ile uyumlu olarak sadece 20 deneyden az olmasına karşın sonuçların bu kadar uyumlu olması çok önemli bir doğrulama çalışması ve kazanımdır. Bilgisayar ve iş gücü yüklerinin %1 oranına düşüren deney tasarımı sayesinde problemler ve sistem tasarımları çok kısa sürelerde çözüme kavuşabilecektir.

Tablo 2. Tüm olası senaryolar ve farklı deney tasarımı algoritmaları için en düşük ve en yüksek ısı transfer katsayıları (DT: Deney tasarım yöntemi, ITK: ısı transfer katsayısı, 1,2 ve 3 sırasıyla yiv bölgeleri).

	ITK1		ITK2		ITK3	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
YÖNTEMLER						
Tüm Olası Senaryolar	8.535	10.424	5.691	6.753	5.025	5.929
DT (Central Composite)	8.572	10.435	5.765	6.641	5.062	5.858
DT (Optimal Design)	8.098	10.422	5.667	6.767	5.061	5.868
DT (Sphere Grid Initialization)	8.579	10.425	5.755	6.723	5.076	5.882
DT (Custom and Sampling)	8.452	10.451	5.735	6.729	5.108	5.868
DT (Box-Behnken Design)	8.579	10.405	5.688	6.669	5.101	5.875
DT (Latin Hypercube Design)	8.467	10.429	5.747	6.728	5.055	5.889

Sonuçlar farklı Reynolds sayıları için tekrarlanarak ısı performansın maksimum olduğu noktalar tepki yüzeyi yöntemi ile elde edilmiştir. Şekil 5' te her bir deney tasarımı için yerel ısı transfer katsayılarının

maksimum olduğu noktaların Reynolds sayısı ile ilişkisi sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, farklı deney tasarımı algoritmaları ile elde edilen yerel ısı transfer katsayısı değerlerinin çok yakın olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Reynolds sayısı arttıkça algoritmalara bağlı ısı performans sonuçlarında farklılıklar oluşmaya başladığı tespit edilmiştir.



Şekil 5. Maksimum ısı transferi katsayısının Reynolds sayısına bağlı değişimi: BB: Box-Behnken, CCD: Central composite design, CS: Custom and Sampling, LH: Latin Hypercube, OD: Optimal Design, SG: Spharse Grid yöntemi ve 1, 2, 3 sırasıyla yiv bölgelerini temsil etmektedir.

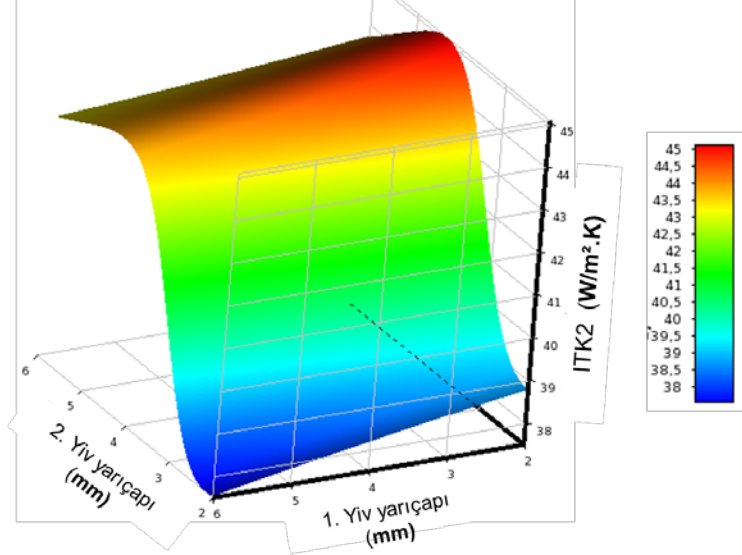
Çalışmamızda deney tasarımı ve tepki yüzeyi yönteminin yanı sıra, Mathematica yazılımında oluşturulan bütünleşik kodlama ile optimizasyon çalışması da yapılmıştır. Optimizasyon çalışmasında kullanılan regresyon modeli ve optimizasyon algoritmalarına dair bilgiler bir önceki bölümde açıklanmıştır. Kodlama kısmında tüm senaryolar için analiz sonuçlarının yer aldığı veri seti kullanılmış ve regresyon-optimizasyon çalışmaları ile sonuçlar tekrar elde edilmiştir. Tablo 3'te optimizasyon kodu ile elde edilen sonuçlar ve tepki yüzeyi ile elde edilen sonuçlara dair bir örnek sunulmuştur. Yivli bölgeler için yerel ısı transferi katsayısı sonuçları her iki yöntem için de incelendiğinde sonuçların uyumlu olduğu ve iki yöntem arasındaki ısı transferi katsayısı sonuç değeri farkının genellikle %1 'den küçük olduğu anlaşılmaktadır. Optimizasyon çalışmasında kullanılan dört farklı stokastik yöntem ile de aynı ısı transferi katsayısı değerleri elde edilmiştir. Ancak, bu yöntemler arasında optimum noktaları elde ederken harcanan çözüm süresi farklılık göstermektedir. Bu noktada, modifiyeli Nelder-Mead optimizasyon algoritması en kısa sürede çözüme ulaşmamızı sağlamıştır.

Tablo 3. Optimizasyon algoritmaları ve tepki yüzeyi sonuçları (Re=1232).

		ITK1	ITK2	ITK3
Tepki Yüzeyi Yöntemi	Min.	8.535	5.691	5.025
	Max.	10.424	6.753	5.929
Optimizasyon Kodu	Min.	8.564	5.715	5.091
	Max.	10.381	6.724	5.892
Fark (%)	Min.	-0.339	-0.437	-1.313
	Max.	0.412	0.427	0.624

Çalışmamızın literatürdeki çalışmalardan temel farkı, akış yönünde değişken yiv parametrelerine sahip ısı değiştirici modelindeki tasarım değişkenlerinin sistem çıktısı olan yerel ısı transfer katsayılarını

etkilemesidir. Bu noktada geri ve öncül etkilerin incelenmesi yerel ısı transfer katsayısının optimizasyonunda son derece önemlidir. Bunun bir kanıtı, ısı değiştirici modeli için elde edilen maksimum ısı transfer katsayısı değerlerinin en büyük ya da en küçük yiv bölgelerinde olmayıp ara değerlerde elde edilmesidir. Şekil 6’ da bir Reynolds sayısı örneği için sunulan geri ve öncül etki tepki yüzeyi sonucu incelendiğinde, yerel ısı transferi katsayısının yiv yarıçaplarına bağlı değişimi görülmektedir.



Şekil 6. Farklı bölgelerdeki yiv yarıçapının ısı transferi katsayısına geri ve öncül etkisinin tepki yüzeyi ile incelemesine dair bir örnek (Reynolds sayısı yaklaşık 12000).

4. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, ısı-akış mühendisliği sistemlerinin sayısal incelemelerinde parametrik analiz ve deney tasarımı yöntemlerinin kullanılması, tepki yüzeyi yöntemi ile optimum noktaların eldesi ve çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon tabanlı optimizasyon algoritmalarının bütünlük kodlama ile problemlere uygulanması fikirleri araştırılmıştır. Literatürdeki sayısal ve deneysel çalışmalardan farklı olarak, 3B eklemeli üretim yöntemindeki gelişmeler ile meydana gelen özgün ve asimetrik tasarımların üretilebilir hale gelmesi fikri ışığında ısı değiştirici yiv bölgesi parametreleri kanal boyunca sabit tutulmamıştır. Böylelikle, akış boyunca değişken yiv bölgesi parametreleri için gerek tepki yüzeyi yöntemi gerekse de stokastik algoritmalar ile optimizasyon çalışmaları yapılarak detaylı sonuçlar elde edilmiş ve incelenmiştir. Çalışmamız, öncelikle deney tasarımı yönteminin çözücü yükü ve iş gücü parametrelerini %1 oranına kadar düşürebilmesi sayesinde son derece avantajlı olduğu ve doğru sonuçlar verdiğini kanıtlamıştır. Bu nedenle çalışmamız, ısı akış sistemlerinde deney tasarımı algoritmalarından elde edilen verilerin güvenilirliğine dair bir ön analiz olarak kabul edilebilir. Ayrıca veri setleri, oluşturduğumuz bütünlük bir regresyon ve optimizasyon kodu ile de incelenmiş ve tepki yüzeyi ile optimizasyon kodu sonuçları karşılaştırılmıştır. Optimizasyon kodu ile elde edilen yerel ısı transfer katsayıları ile tepki yüzeyi yönteminden elde edilen sonuçlar son derece uyumludur. Çalışmanın diğer bir katkısı da geri ve öncül etkilerin yerel etkilerinin irdelenmesidir. Geri ve öncül etkiler tepki yüzeyi yöntemi ile incelendiğinde, ısı-akış problemlerinde optimum noktaların ara değerlerde elde edilebileceği sonucu ortaya çıkmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Koordinatörlüğü tarafından (2017-ÖNAP-MÜMF-0005) desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] E.M. Sparrow, J.W. Comb, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, **26**, 7 (1983)
- [2] E.M. Sparrow, L.M. Hossfeld, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, **27**, 10 (1984).
- [3] Y. Islamoğlu, C. Parmaksızoğlu, *Applied Thermal Engineering*, **23**, p. 979-987 (2003)
- [4] Y. Islamoğlu, A. Kurt, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**, p. 1361-1365 (2004)
- [5] Y. Islamoğlu, *Int. Com. of Heat and Mass Transfer*, **35**, p. 643-647 (2008)
- [6] I. Taymaz, I. Koç, Y. Islamoğlu, *Heat and Mass Transfer*, **44**, p. 1257-1262 (2008)
- [7] H. Pehlivan, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, **66**, p. 128-138 (2013)
- [8] K. Bilen, M. Çetin, H. Gul, T. Balta, *Applied Thermal Engineering*, **29**, p. 753-761 (2009)
- [9] L. Wang, L. Deng, C. Ji, E. Liang, C. Wang, D. Che, *Applied Energy*, **174**, p. 25-36 (2016)
- [10] J.A. Stasiek, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, **41**, p. 899-914 (1998)
- [11] L. Sun, C. Zhang, *Int. Journal of Thermal Sciences*, **75**, p. 45-53 (2014)
- [12] H.Z. Han, B. Li, H. Wu, W. Shao, *Int. Journal of Thermal Sciences*, **90**, p. 173-186 (2015)
- [13] W. Wang, Y. Zhang, Y. Li, H. Han, B. Li, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, **120**, p. 782-792 (2018)
- [14] S. Pethkool, S. Eimsa-ard, S. Kwankaomeng, P. Promvong, *Int. Com. in Heat and Mass Transfer*, **38**, p. 340-347 (2011)
- [15] S. Wang, G. Jian, J. Xiao, J. Wen, Z. Zhang, *Applied Thermal Engineering*, **119**, p. 603-609 (2017)
- [16] A.F. Neto, A.F.B. Costa, M.F. Lima, *Experimental Techniques*, **42**, 319-331 (2018)
- [17] B.C. Nookaraju, P.S.V. Kurmarao, S. Nagasarada, R. Karthikeyan, A. Vinay, *Materials Today*, **5**, p. 5262-5271 (2018)
- [18] M. Cavazutti, *Optimization Methods: From Theory to Design*, Springer, (2013)
- [19] M. Savran, L. Aydın, *Engineering Structures*, Elsevier, **174**, p. 675-687 (2018)

ÖZGEÇMİŞ

Şahin GÜNGÖR

1987 yılı Erzurum doğumludur. 2010 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Şu an İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümünde doktora eğitimine devam etmekte ve 2017 yılından beri İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalında Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Isı transferi optimizasyonu, kompakt ısı değiştiriciler, 3B yazıcıların HVAC sistemlerinde kullanılması, ısı-akış sistemlerinin HAD ortamında modellenmesi ve analizi konularında çalışmaktadır.

Levent AYDIN

1978 yılı Denizli doğumludur. 2001 yılında Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında 2005 yılında Yüksek Mühendis, 2011 yılında Doktor unvanını almıştır. 2004-2011 yılları arasında aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2012 yılından beri İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim Dalı'nda Dr. Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır. Kompozit malzeme mekaniği ve optimizasyonu konularında çalışmaktadır.

Ziya Haktan KARADENİZ

1980 yılı İzmir doğumludur. 2002 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden, 2005 ve 2011 yıllarında ise aynı Üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji yüksek lisans ve doktora programlarından mezun olmuştur. 2002-2013 yılları arasında DEU Makine Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmıştır. 2013 yılından beri İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı'nda Dr. Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır. Rüzgar enerjisi, HVAC bileşenlerinin 3B eklemeli üretim yöntemi ile üretilmesi ve nanoakışkanlar konuları üzerinde çalışmaktadır.