

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SAYISAL AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ PROBLEMLERİNİN
OPTİMİZASYON ANALİZLERİNDE KRIGING YÖNTEMİNİN
KULLANILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Alpay AKGÜÇ**

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Isı - Akışkan

OCAK 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SAYISAL AKIŞKANLAR DİNAMIĞI PROBLEMLERİNİN
OPTİMİZASYON ANALİZLERİNDE KRIGING YÖNTEMİNİN
KULLANILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Alpay AKGÜÇ
(503071101)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ocak 2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasan GÜNEŞ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. N. L. Okşan ÇETİNER (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Yalçın URALCAN (İTÜ)

OCAK 2010

Akgüç ve Sarol ailesine,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans bitirme tezim için yaptığım çalışmalar süresince benden desteğini esirgemeyen herkese teşekkür etmek istiyorum.

Öncelikle, tezim boyunca engin bilgisini ve tecrübesini benimle paylaşarak çalışmama yön veren saygıdeğer hocam Prof. Dr. Hasan GÜNEŞ'e teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Ayrıca manevi desteğinden ötürü Yrd. Doç. Dr. Levent Kavurmacıoğlu'na teşekkürü bir borç bilirim.

Araştırma Projesi kapsamında yürüttüğüm bitirme tezime, iki yıl boyunca verdiği destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca benden dostluklarını ve yardımlarını esirgemeyen, aynı sınıfta paylaştığım tüm arkadaşlarıma ve İstanbul Teknik Üniversitesi'nde görev yapan tüm Araştırma Görevlisi arkadaşlarımla özel olarak Büşra Hepgüzel'e, Emre Pehlivan'a, Hacer Özperk'e, Mustafa Kocagül'e, Hakan Ertuğrul'a, Ayhan Nazmi İlikan'a, Emrah Deniz'e, Sertaç Çadircı'ya, Oktay Yılmaz'a ve Fırat İlyasoğlu'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bana gösterdikleri ilgiden, sevgiden, anlayıştan ve yetişmemde sağladıkları desteklerden ötürü ailem ile kuzenim Yonca Sarol ve ailesine özel teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2009

Alpay Akgüç
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOLLER.....	xviii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KRIGING YÖNTEMİ.....	7
3. BENZETİLMİŞ TAHLAMA YÖNTEMİ.....	12
4. ZORLANMIŞ TAŞINIM PROBLEMİNE UYGULAMA.....	15
4.1 Kanal İçerisinde Zorlanmış Taşınım İle Isı Geçişi.....	15
4.2 Matematiksel Model ve Çözüm Yöntemi.....	16
4.3 CFD Simülasyon Sonuçları.....	17
4.4 Kriging Modelinin Oluşturulması.....	30
4.4.1 İki boyutlu Kriging modeli.....	30
4.4.2 Üç boyutlu Kriging modeli.....	30
4.5 Kriging-Benzetilmiş Tahlama Meta-Algoritması İle Zorlanmış Taşınım Probleminin Optimizasyonu.....	46
5. KARIŞIK TAŞINIM PROBLEMİNE UYGULAMA.....	56
5.1 Dikdörtgen Bir Bölgede Karışık Taşınım İle Isı Geçişi.....	56
5.2 Matematiksel Model ve Çözüm Yöntemi.....	57
5.3 CFD Simülasyon Sonuçları.....	61
5.4 Kriging Modelinin Oluşturulması.....	78
5.5 Kriging-Benzetilmiş Tahlama Meta-Algoritması İle Karışık Taşınım Probleminin Optimizasyonu.....	79
6. SONUÇLAR.....	92
KAYNAKLAR.....	94
EKLER.....	98

KISALTMALAR

BLUE	: Best Linear Unbiased Estimator (En İyi Doğrusal Yansız Tahminleyici)
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Sayısal Akışkanlar Dinamiği)
LHS	: Latin Hypercube Sampling (Latin Hiperküp Örnekleme)
MARS	: Multivariate Adaptive Regression Splines (Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Uzanımları)
RBF	: Radial Basis Function (Radyal Tabanlı Fonksiyon)
RMS	: Response Surface Models (Yanıt Yüzey Modelleri)
rms	: Root Mean Square (Karekök Ortalama)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması.....	13
Çizelge 4.1 : Kriging modeli ve CFD analizinden elde edilen maksimum sıcaklık değerlerinin rms hata sonuçları (CFD çözümleri birinci mertebededir).	48
Çizelge 4.2 : Kriging modeli ve CFD analizinden elde edilen maksimum sıcaklık değerlerinin rms hata sonuçları (CFD çözümleri ikinci mertebededir)..	48
Çizelge 4.3 : Optimizasyon işleminde başlangıç noktasının konumunun iterasyon sayısına etkisi. Her bir optimizasyon için soğutma katsayıları ve başlangıç sıcaklıkları eşittir ($c = 1$, $T_0 = 100$).	54
Çizelge 5.1 : Karışık taşınım (doğal + zorlanmış) probleminde ısı kaynağının monte edildiği levhanın ısı iletim katsayısı k ve Reynolds sayısının sistemde oluşan maksimum sıcaklığa etkisi (levhanın kalınlığı $b = 1 \text{ mm}$).	61
Çizelge 5.2 : Karışık taşınım (doğal + zorlanmış) probleminde ısı kaynağının monte edildiği levhanın ısı iletim katsayısı k_b ve Reynolds sayısının sistemde oluşan maksimum sıcaklığa etkisi (levhanın kalınlığı $b = 2 \text{ mm}$).	62
Çizelge 5.3 : Karışık taşınım (doğal + zorlanmış) probleminde ısı kaynağının monte edildiği levhanın ısı iletim katsayısı k ve Reynolds sayısının sistemde oluşan maksimum sıcaklığa etkisi (levhanın kalınlığı $b = 3 \text{ mm}$).	62
Çizelge 5.4 : 20 farklı tasarım dışı noktanın CFD simülasyonu sonuçları ile 100 ve 250 LHS noktasına ait Kriging modeli tahmininin karşılaştırılması....	79
Çizelge 5.5 : 50 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) optimizasyon sonucu bulunan optimum parametre değerleri ($b = 1 \text{ mm}$, $Re = 110$).	87
Çizelge 5.6 : 50 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) optimizasyon sonucu bulunan optimum parametre değerleri ($b = 3 \text{ mm}$, $Re = 110$).	88
Çizelge A.1 : 30 adet Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.	105
Çizelge A.2 : 60 adet Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.	106
Çizelge A.3 : 120 adet Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.	107
Çizelge A.4 : 240 adet Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.	108
Çizelge A.5 : 15 adet Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.	110

Çizelge A.6 : 30 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktaları için CFD simülasyon sonuçları.	110
Çizelge A.7 : 60 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası için CFD simülasyon sonuçları.	111
Çizelge A.8 : Karışık taşınım problemi için 50 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.	112
Çizelge A.9 : Karışık taşınım problemi için 100 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.	113
Çizelge A.10 : Karışık taşınım problemi için 250 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.	114

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Deneysel ve model variogram ile bileşenleri.	8
Şekil 2.2 : P noktasındaki bilinmeyen değerın Kriging yöntemiyle tahmin edilmesi..	9
Şekil 2.3 : Varyans hesabının şematik gösterimi (bkz. Denklem 2.1).	9
Şekil 3.1 : Farklı soğuma hızları (c) için sıcaklığın iterasyon sayısı ile değişimi.....	14
Şekil 4.1 : Yivli kanal geometrisi.....	15
Şekil 4.2 : Hesaplama ağı ve sınır koşulları.....	17
Şekil 4.3a : Isı kaynakları arasındaki mesafenin (l) sıcaklık dağılımına etkisi (2. mertebeden çözüm yöntemi kullanılmış olup $Re = 150$, $h = 1,0$ cm olarak sabit tutulmuştur).	18
Şekil 4.3b : Isı kaynakları arasındaki mesafenin (l) akım fonksiyonuna etkisi ($Re = 150$, $h = 1,0$ cm).	19
Şekil 4.4a : Isı kaynakları arasındaki mesafenin (l) sıcaklık dağılımına etkisi ($Re = 150$, $h = 1,7$ cm).	20
Şekil 4.4b : Isı kaynakları arasındaki mesafenin (l) akım fonksiyonuna etkisi ($Re = 150$, $h = 1,7$ cm).	21
Şekil 4.5a : Isı kaynağı (yiv) yüksekliğinin (h) sıcaklık dağılımına etkisi ($Re = 100$, $l = 1,5$ cm).	22
Şekil 4.5b : Isı kaynağı (yiv) yüksekliğinin (h) akım fonksiyonuna etkisi ($Re = 100$, $l = 1,5$ cm).	23
Şekil 4.6a : Isı kaynağı (yiv) yüksekliğinin (h) sıcaklık dağılımına etkisi ($Re = 100$, $l = 3$ cm).	24
Şekil 4.6b : Isı kaynağı yüksekliğinin (h) akım fonksiyonuna etkisi ($Re = 100$, $l = 3$ cm).	25
Şekil 4.7a : Reynolds sayısının sıcaklık dağılımına etkisi ($h = 1,5$ cm, $l = 2$ cm). ..	26
Şekil 4.7b : Reynolds sayısının akım fonksiyonuna etkisi ($h = 1,5$ cm, $l = 2$ cm). ..	27
Şekil 4.8a : Reynolds sayısının sıcaklık dağılımına etkisi ($h = 2$ cm, $l = 2$ cm).....	28
Şekil 4.8b : Reynolds sayısının akım fonksiyonuna etkisi ($h = 2$ cm, $l = 2$ cm).	29
Şekil 4.9 : 30 ve 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için ısı kaynağı üzerinde oluşan maksimum sıcaklık T_{max} [K] dağılımının parametre uzayındaki [h, l, Re] değişimi (Güneş ve diğ 2008).....	32
Şekil 4.10a : 30 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve ısı kaynakları arasındaki mesafenin maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 1. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.	33
Şekil 4.10b : 30 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 1. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.....	34

Şekil 4.10c : 30 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynakları arasındaki mesafe l ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 1. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.).....	35
Şekil 4.11a : 30 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve ısı kaynakları arasındaki mesafenin maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 2. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.....	36
Şekil 4.11b : 30 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 2. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.	37
Şekil 4.11c : 30 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynakları arasındaki mesafe l ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 2. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.	38
Şekil 4.12a : 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve ısı kaynakları arasındaki mesafenin maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 1. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.	39
Şekil 4.12b : 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 1. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.	40
Şekil 4.12c : 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynakları arasındaki mesafe l ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 1. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.	41
Şekil 4.13a : 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve ısı kaynakları arasındaki mesafenin maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 2. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.....	42
Şekil 4.13b: 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 2. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.	43
Şekil 4.13c : 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynakları arasındaki mesafe l ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 2. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.	44

Şekil 4.14 : 30 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktasını esas alan Kriging modeline göre ısı kaynakları arasındaki mesafenin (l) maksimum sıcaklığa etkisi.	45
Şekil 4.15 : Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) sayısına bağlı olarak oluşturulan Kriging modeli sonuçları. Kriging modelleri (solda) birinci ve (sağda) ikinci mertebeden CFD sonuçlarından elde edilmiştir.	47
Şekil 4.16a : Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları. Sol sütun: 30 LHS noktası, Sağ sütun 60 LHS noktasına ait sonuçlar.	50
Şekil 4.16b : Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları. Sol sütun: 120 LHS noktası, Sağ sütun 240 LHS noktasına ait sonuçlar.	51
Şekil 4.17 : Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları (120 LHS örnekleme noktası). Başlangıç sıcaklığı $T_0 = 5$ K. Optimizasyon sonuçları (sol sütun), olasılık fonksiyonu değerleri (sağ sütun).	53
Şekil 4.18 : Farklı başlangıç noktalarının optimizasyon işlemine etkisi. (LHS nokta sayısı = 120). Başlangıç noktasının koordinatları ve maksimum sıcaklığın minimizasyonu için gerekli olan iterasyon sayısı Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.	54
Şekil 4.19 : Farklı başlangıç sıcaklıkları için optimizasyon sonuçları. (Kriging modeli ikinci mertebeden CFD çözümü ve 120 LHS noktası kullanılarak elde edilmiştir). Her bir durumda soğutma hızı katsayısını sabit ($c = 1$) alınmıştır. Sağ sütünde T_0 başlangıç sıcaklığına bağlı olarak bulunan olasılık fonksiyonu (0 ile 1 arasında) gösterilmiştir.	55
Şekil 5.1 : Karışık taşınım problemi geometrisi.	56
Şekil 5.2 : Karışık taşınım problemine ait çözüm ağı.	60
Şekil 5.3 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 10 , $Ri = 200$, $b = 1$ mm).	63
Şekil 5.4 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 10 , $Ri = 200$, $b = 3$ mm).	64
Şekil 5.5 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 30 , $Ri = 22$, $b = 1$ mm).	65
Şekil 5.6 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 30 , $Ri = 22$, $b = 3$ mm).	65
Şekil 5.7 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 40 , $Ri = 12$, $b = 1$ mm).	66
Şekil 5.8 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 40 , $Ri = 12$, $b = 3$ mm).	67
Şekil 5.9 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 55 , $Ri = 8$, $b = 1$ mm).	67
Şekil 5.10 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 55 , $Ri = 8$, $b = 3$ mm).	68
Şekil 5.11 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 75 , $Ri = 3,5$, $b = 1$ mm).	69
Şekil 5.12 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 75 , $Ri = 3,5$, $b = 3$ mm).	69
Şekil 5.13 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 110 , $Ri = 1,6$, $b = 1$ mm).	70

Şekil 5.14 :	(a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 110 , $Ri = 1,6$, $b = 3$ mm).	71
Şekil 5.15 :	(a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 160 , $Ri = 0,7$, $b = 1$ mm).	72
Şekil 5.16 :	(a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 160 , $Ri = 0,7$, $b = 3$ mm).	72
Şekil 5.17 :	(a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 220 , $Ri = 0,4$, $b = 1$ mm).	73
Şekil 5.18 :	(a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi (Re = 220 , $Ri = 0,4$, $b = 3$ mm).	73
Şekil 5.19 :	Levha kalınlığının maksimum sıcaklığa etkisi (farklı Re ve k_b için)	74
Şekil 5.20 :	Levhanın ısı iletim katsayısının maksimum sıcaklığa etkisi (farklı Re ve b için).	76
Şekil 5.21 :	Reynolds sayısının maksimum sıcaklığa etkisi (farklı k_b ve b için).	77
Şekil 5.22 :	50, 100 ve 250 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktalarını esas alan Kriging modeline göre Reynolds sayısının maksimum sıcaklığa etkisi. 80	
Şekil 5.23 :	50, 100 ve 250 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktasını esas alan Kriging modeline göre soğutucu akışkanın ısı iletim katsayısının (k_b) maksimum sıcaklığa etkisi	84
Şekil 5.24 :	50 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası için Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları (b = 1 mm, Re = 110).	90
Şekil 5.25 :	50 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası için Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları (b = 3 mm, Re = 110).	91
Şekil A.1 :	Örnek fonksiyon 1, $f_1(x,y)$ kontür grafiği.	100
Şekil A.2 :	Örnek fonksiyon 2, $f_2(x,y)$ kontür grafiği.	100
Şekil A.3 :	LHS nokta sayısının Kriging modeline etkisi.	101
Şekil A.4 :	LHS nokta sayısının Kriging modeline etkisi.	102
Şekil A.5 :	LHS nokta sayısını Kriging modeli performansı üzerindeki etkisi ($y = -1$ için fonksiyonun gerçek değeri ile Kriging modeliyle bulunan değer karşılaştırılması).	103
Şekil A.6 :	LHS nokta sayısını Kriging modeli performansı üzerindeki etkisi ($y = -1$ için fonksiyonun gerçek değeri ile Kriging modeliyle bulunan değer karşılaştırılması).	104

SEMBOLLER

b	: Levha kalınlığı
c	: Soğutma hızı
$(c_p)_{Hava}$: Soğutucu akışkanın (hava) özgül ısısı
d	: Dikdörtgen bölgenin tabanından giriş aralığının yarısına kadar olan uzunluk
D	: Dikdörtgen bölgenin giriş aralığının genişliğinin
D_1	: Kanalın derinliği
e	: Mevcut ana kadar elde edilen bilinmeyen noktaya ait en iyi değer
e_1	: Levhanın yarısının uzunluğu
e_n	: Bilinmeyen noktaya ait en son tahminde bulunulan değer
g	: Yerçekimi ivmesi
h	: Isı kaynağının yüksekliği (yiv yüksekliği)
h_1	: Kanalın giriş aralığının genişliğinin yarısı
G	: Dikdörtgen bölgenin uzunluğu
Gr	: Grashof sayısı
k	: Zamanla soğumayı temsil eden iterasyon sayacı
K	: Toplam iterasyon sayısı
k_B	: Boltzmann sabiti
k_b	: Levhanın ısı iletim katsayısı
k_{Hava}	: Soğutucu akışkanın (hava) ısı iletim katsayısı
L	: Kanalın derinliği
l	: Isı kaynakları arasındaki mesafe
l_b	: Levhanın uzunluğu
l_o	: Kontrol uzunluğu
l_s	: Levha üzerindeki ısı kaynağının uzunluğu
\dot{m}	: Soğutucu akışkanın (hava) kütleli debisi
Nu	: Nusselt sayısı
P	: Olasılık fonksiyonu
P^*	: Boyutsuz basınç değeri
q	: Isı akısı
Re	: Reynolds sayısı
Re_{kritik}	: Kritik Reynolds sayısı
Ri	: Richardson sayısı
r_k	: Isıl iletkenlik oranı
r_α	: levha ısıl yayılma katsayısının (α_b) soğutucu akışkanın (hava) ısıl yayılma katsayısına (α) oranını
Pr	: Prandtl sayısı
se	: Tahmin varyansı
T	: Sıcaklık fonksiyonu
T_d	: Cidar sıcaklığı
T_i	: Soğutucu akışkanın kanala giriş sıcaklığı
T_0	: Başlangıç sıcaklık değeri

$T_{\max, \text{CFD}}$: CFD simülasyon sonucundan elde edilen maksimum sıcaklık değeri
$T_{\max, \text{Kriging}}$: CFD simülasyon sonuçları kullanılarak kurululan Kriging modelinden elde edilen maksimum sıcaklık değeri
T_{\max}	: Maksimum sıcaklık değeri
U	: X doğrultusundaki hız bileşeni
U_i	: Uniform giriş hızı
V	: Y doğrultusundaki hız bileşeni
V_{ref}	: Referans hızı
\bar{V}	: Ortalama hız
W	: Dikdörtgen bölgenin genişliği
W_i	: Ağırlık katsayıları
X	: Kartezyen koordinatlardaki x eksen
Y	: Kartezyen koordinatlardaki y eksen
$Y_{A,P}$: Noktanın gerçek değeri
$Y_{E,P}$: Tahmin edilmek istenen noktanın değeri
Y_i	: Bilinmeyen noktanın değeri
z_i	: değişkenin i konumundaki değeri
z_{i+h}	: değişkenin (i konumundan) h uzaklığındaki değeri
α	: Soğutucu akışkanın (hava) ısı yayılma katsayısı
α_b	: Levhanın ısı yayılma katsayısı
β_{Hava}	: Soğutucu akışkanın ısı genleşme katsayısı
ε_p	: Tahmin hatası
ρ	: Soğutucu akışkanın yoğunluğu
ρ_o	: Referans şartlardaki yoğunluk
γ	: Varyans değeri
λ	: Langrange çarpanı
θ	: Boyutsuz sıcaklık
μ_{Hava}	: Soğutucu akışkanın (hava) dinamik viskozitesi
τ	: Boyutsuz zaman değeri
ν	: Soğutucu akışkanın (hava) kinematik viskozitesi
∇	: Nabla operatörü
ΔE	: Enerji değişimi

SAYISAL AKIŞKANLAR DİNAMIĞI PROBLEMLERİNİN OPTİMİZASYON ANALİZLERİNDE KRIGING YÖNTEMİNİN KULLANILMASI

ÖZET

Günümüzde gittikçe artan yüksek hız ve hafızaya sahip bilgisayar teknolojisi sayesinde, mühendislik problemlerinin simülasyonları ve analizleri tasarım aracı olarak endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kapsamda, ısı-akış olayları ile ilgili birçok mühendislik problemlerinde, sayısal akışkanlar dinamiği (*computational fluid dynamics*-CFD) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu analizlerde, *Fluent*, *Flow3D*, *CFX*, *StarCD*, *Cfdesign* gibi birçok farklı ticari yazılım kullanılmaktadır. Ancak, bu ticari yazılımların arka planındaki kodlar genel amaçlı oldukları ve doğal olarak akışı temsil eden Navier-Stokes denklemlerini çözdükleri için, bu analizler çok uzun hesaplama zamanı gerektirmekte, her bir CFD analizi için bir kaç saatten bir kaç güne kadar uzun süreler gerekmektedir. Öte yandan, endüstrinin içinde bulunduğu rekabet ve sonuca çok daha kısa sürelerde gitme ihtiyacı dolayısıyla, bu tür CFD analizleri ancak sınırlı sayıda parametre değerleri için yapılabilmektedir. Öte yandan, CFD analizi ile optimizasyon yöntemlerinin/algorithmalarının uygulanması ile optimum ürün/sistem tasarımına gidilmesi imkan dahilindedir. Bu durum, hızlı ürün tasarlayıp geliştirmesi gereken endüstri için olduğu kadar, akademik çalışmalar için dahi, optimizasyon parametrelerinin çokluğu durumunda geçerlidir.

Bu çalışmada, CFD problemlerinin optimizasyonu için optimizasyon algoritmalarında kullanılacak bir model geliştirilmiştir. Bu yöntemler, çok pahalı ve zaman alıcı olan CFD analizlerinin sadece sınırlı sayıda parametre değerlerinde yapılmasıyla elde edilecek sonuçları esas alarak ilgili ısı-akışkan problemi için optimizasyon yapılmasına imkan sağlarlar. Kurulan Kriging modeli ile istenilen parametre değerleri için, çok hızlı ve güvenilir bir şekilde sonuçların elde edilmesi mümkün olur. Bu kapsamda, oluşturulacak Kriging modeli ile “Benzetilmiş Tavlama” (Simulated Annealing) adlı global optimizasyon yöntemi entegre edilerek yeni bir uygulama geliştirilmiştir.

Latin Hiperküp Örnekleme (Latin Hypercube Sampling) algoritması ile belirlenecek az sayıdaki parametre değerleri için oluşturulacak Kriging modeli sayesinde gerçek zamanlı (on-line) optimizasyon analizleri yapılmıştır. Bunun için ön şart, oluşturulacak Kriging modelinin doğruluğunun teyit edilmesidir. Bunun için de, çapraz-doğrulama (cross-validation) kullanılmıştır. Bir sonraki aşamada ise, doğruluğu teyit edilen Kriging modeli bir optimizasyon algoritması içinde kullanılmıştır. Bu kapsamda, *global* bir optimizasyon yöntemi olması (yani optimizasyonu yapılan fonksiyonun yerel minimum ve maksimum değerlerinde takılıp kalmaması nedeniyle) “Benzetilmiş Tavlama” (Simulated Annealing) yöntemi tercih edildi.

Bu alışma kapsamında geliştirilen yöntemler genel olup, farklı problemlerin CFD analizlerinin optimizasyonu için uygulanabilir. Çalışma kapsamında ise, iki farklı ısı taşınımı problemine uygulanmıştır. Bu problemler; iki boyutlu optimizasyonun uygulamasının yapıldığı zorlanmış taşınım ile üç boyutlu optimizasyon uygulamasının yapıldığı ve karışık (doğal + zorlanmış) taşınım problemleridir.

OPTIMIZATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS PROBLEMS USING KRIGING METHOD

SUMMARY

With the recent development of powerful computer technology, CFD simulations of engineering systems are widely used in industry as design tools. Important commercial CFD softwares used in industry includes Fluent, Flow3D, CFX, StarCD and Cfdesign. These software packages are intended for general purposes and since they solve the full Navier-Stokes equations, it takes quite a lot of time (usually hours to days) to obtain a solution for an engineering problem. On the other hand, due to the fierce competition, companies often do not have time and money for detailed optimization studies using these CFD codes.

In this study, an alternative procedure i.e Kriging that enables CFD modeling of thermofluid systems in reduced dimension has been proposed. This procedure is based on a limited number of CFD simulations which are carried out at a specified parameter values as determined by Latin Hypercube Sampling (LHS) algorithm. In this study, for the optimization of a desired parameter space (i.e, geometry, flow parameters etc.), Kriging model is combined with a Simulated Annealing (SA) algorithm. The advantage over CFD simulations are that the prediction of these models provides results almost instantly so that on-line (real time) predictions and optimization studies are very feasible. Simulated Annealing is a generic probabilistic meta-algorithm for the global optimization problems. SA's major advantage over other methods is its ability to avoid becoming trapped at local minima. SA is based on an analogy between techniques involving heating and controlled cooling of a material to increase the size of its crystals and reduce their defects (the annealing process in metallurgy) and the search for a minimum in a more general system.

In the scope of this study, Kriging procedure is incorporated with Simulated Annealing in order to develop a meta-algorithm for the optimization purpose of CFD simulations. The procedures can be used to many problems in engineering but in this study two problems were investigated: a two-dimensional optimization problem of forced convection and a three-dimensional optimization of mixed convection.

1. GİRİŞ

Bilimsel olgular için bazı durumlarda deney yapmak çok pahalı, zaman alıcı ya da imkânsız olabilir. Mühendisler ve bilim adamları fiziksel sistemleri tanımlayabilmek ve inceleyebilmek için matematiksel modeller ve sayısal çözümler geliştirmişlerdir. Gittikçe karmaşık hale gelen modellerin çözümleri çoğu defa analitik olarak elde edilemediği ve zaman alıcı olduğu için bilgisayarlar aracılığıyla yapılan sayısal çözümler önem kazanmıştır.

Son yıllarda ısı ve akış analizlerinin endüstriyel uygulamalarında yüksek hesaplama kapasiteleri ve gelişmiş sayısal algoritmalarından ötürü CFD (Computational Fluid Dynamics) yazılımlarının kullanımı oldukça artmıştır. Bununla birlikte halen karmaşık yapıdaki üç boyutlu ısı-akışkan problemlerini mevcut Navier Stokes denklemleri ile çözmek çok zaman alıcı olmaktadır. Akışı tam olarak temsil eden Navier-Stokes denklemlerinden yola çıkarak, gerçek zamanlı (on-line) çözüm imkanı sağlayan meta-modellerin kurulması yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu modellerden, RMS (Response Surface Models), MARS (Multivariate Adaptive Regression Spline), RBF (Radial Basis Function) ve Kriging gibi birçok meta-model mühendislik alanında kullanılmıştır. Bu modeller arasında Kriging algoritması tahmin varyansının minimum olması, tahminlerinin yansız (unbiased) olması ve tahminler için bir hata değeri belirlemesi gibi özellikleriyle diğer yöntemlere göre oldukça avantajlı olup bu avantajları Kriging algoritmasını En İyi Doğrusal Yansız Tahminleyici (Best Linear Unbiased Estimator - BLUE) yöntemi haline getirmiştir **(Park ve diğ., 2002)**.

Kriging algoritması yarı variogram yapısal özellikleri kullanılarak örneklenmemiş noktadaki konumsal değişikliklerin yansız tahminin optimal şekilde yapıldığı bir yöntemeye dayanır **(Trangmar ve diğ., 1985)**, **(Başkan, 2004)**.

Bu yöntem ismini, ilk geliştiricisi olan Prof. Dr. Daniel G. Krige isimli Güney Afrikalı bir maden mühendisinden almaktadır.

Geoistatistikte bölgesel değişkenin değerleri arasındaki farkın uzaklığa bağlı değişimleri variogram fonksiyonu ile ortaya konur. Variografi ve Kriging geostatistik araçlardır. Variografi, örnek noktalar arasındaki konumsal korelasyonun niceliğini, miktarını hesaplama ve modelleme olanağı sağlar. Ayrıca, Kriging variografide olduğu gibi ölçülen değerlerden ve onların konumsal ilişkilerinden interpolasyon yapma olanağı sağlar (**Rohuani ve Wackernagel, 1990**).

Variogram uzayda farklı noktalardaki değişkenler arasındaki bağımlılığı ölçen, karakterize eden bir fonksiyondur. Variogram analizi, incelenen özelliğin konumsal bağımlılık derecesini, yani ölçme yapılan noktalar arasındaki konumsal bağımlılığı belirlemede, Kriging analizi ise ölçme yapılmayan nokta veya alanlardaki özelliklerin kestirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (**Öztaş, 1995**), (**Başkan, 2004**).

Kriging algoritmasının diğer tahmin tekniklerine göre yansız sonuçlar vermesinin yanı sıra, bu algoritma minimum varyanslı ve tahmine ait standart sapmanın hesaplanmasına olanak veren bir tekniktir (**Deutsch ve Journel, 1992**), (**Abtew ve diğ., 1993**), (**Başkan, 2004**). Kriging algoritmasında örnekleme yapılmamış bir noktada araştırılan özellik için interpolasyon yapılırken bu noktanın yakın çevresinde ölçüm yapılmamış en az 6 ve 8, en çok 16 ve 24 arasında değişik nokta kullanılır (**Wollenhaupt ve diğ., 1997**), (**Dikici, 2001**).

Kriging yöntemine En Doğrusal Yansız Tahminci (Best Linear Unbiased Estimator) adı verilir (**Boogaart ve Schaeben, 2002**). Bu, tahmin hatasının minimum olması şartına göre ağırlıkların belirlenmesidir ve bu Kriging yönteminin önemli özelliklerden biridir (**Isaak ve Srivastava, 1989**), (**İnal ve Yiğit, 2003**). Yöntemin diğer bir üstünlüğü, Kriging varyansı aracılığı ile kestirim hatasının büyüklüğünü değerlendirecek bir olanak sunmasıdır (**Tercan ve Saraç, 1998**). Bugün yaygın olarak kullanılan Kriging yöntemleri aşağıda sıralanmıştır (**Yiğit, 2003**):

- Simple Kriging
- Ordinary Kriging
- Universal Kriging
- Block Kriging
- Indicator Kriging

– Disjunctive Kriging

– Cokriging

Ordinary Kriging'in ilk adımı interpolate edilecek noktalar kümesinden variogram oluşturmaktır. İkinci aşamada deneysel variogramdaki eğilimi modelleyen basit matematiksel fonksiyon olan teorik variogram bulunur. Ordinary Kriging yönteminde bilinmeyen değerlerin belirlenmesi değişkenlerin durağan ve ortalamanın sabit olduğu varsayımına göre gerçekleştirilir. Variogram fonksiyonundan ağırlıkların belirlenmesinde tahmin ağırlıkları variogram modellerine dayanır. Simple Kriging interpolasyonu Ordinary Kriging'e benzer ancak, ağırlıkların toplamının 1'e eşit olması yerine burada ağırlık, veri setlerinin ortalaması ile bulunur (**Yaprak ve Arslan, 2008**).

Daha doğru bir ifadeyle Simple Kriging yönteminde ortalama değer bilindiği varsayılmaktadır. Veri setleriyle ilgili daha önceden böyle bir varsayım yapılmasının Ordinary Kriging yöntemine oranla daha az güvenilir sonuçlar verdiği bilinmektedir. Buna göre model variogramı belirlerken daha güvenilir bir yöntem kullanılmasından ötürü bu tez çalışmasında *Ordinary Kriging* yöntemi kullanılmıştır.

Sayısal yöntemlerin kullanıldığı bilim alanında pek çok optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Pek çoğu sadece belirli tipteki problemlerin çözümüne yönelik olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle optimizasyonu yapılacak olan probleme en uygun çözüm tekniğini uygulayabilmek için problemin karakteristiğini belirlemek oldukça önemlidir. Bunun yanında her problemin farklı sayısal değişkenleri olup, farklı yakınsama kıstasları vardır. Buna göre optimizasyon problemleri fonksiyonun matematiksel karakteristiği (lineer, üstel), sınırları ve kontrol değişkenlerine göre sınıflandırılır (**Pirsig, 1974**).

Hızlı optimizasyon algoritmaları bir fonksiyonu minimize/maksimize edecek değişkenlerin oluşturduğu noktalar arasından sadece yerel çözüm olan noktayı arar. Bulunan nokta her zaman minimum noktalar arasındaki en iyi değer, yani global çözüm olmamaktadır. Global çözümü tanımlamak ve bulunduğu noktayı tespit etmek güçtür (**Nocedal ve Wright, 1999**).

Kontrol değere yapılan sınırlandırma (sınır değer) ile global minimuma ait değer daha etkin bir biçimde bulunur. (**Pirsig, 1974**).

1983'de Krikpatrick ve arkadaşları, termodinamikten esinlendikleri yeni bir optimizasyon tekniği geliştirdiler. Benzetilmiş Tavlama (Simulated Annealing) ismini alan bu yöntem temelde Metropolis algoritmasının genişletilerek sıcaklığın değişken olarak kullanıldığı bir algoritmadır. Başlangıçta kullanılan yüksek sıcaklık değerleri optimizasyon için doğru bir tercih gibi gözükse de iterasyonun ileriki adımlarında global optimum değer bulunmasında yeterince etkili olmadığı görülmüştür (**Reimann, 2002**).

Temelde bu yöntem, mevcut bilinen noktalar etrafında rastgele komşu noktalar oluşturarak probleme ait fonksiyona bu nokta kümesi etrafında optimum çözümü arar. Mevcut değerlerden biri başlangıçta en iyi çözüm noktası olarak belirlenir. Eğer yeni komşu değer mevcut en iyi noktadan daha küçükse daha iyi bir nokta bulmak üzere komşu noktalarda arama devam eder. Eğer fonksiyonun yeni değeri mevcut en iyi noktadan daha büyükse bu nokta bazen yeni en iyi nokta olarak kabul edilir bazen de edilmez. Bu kabul olasılık fonksiyonun değerine göre yapılır. Mevcut noktanın değeri, bulunan yeni noktanın değerinden daha yüksek olsa da yeni noktanın olasılık değeri mevcut noktanın değerinden büyük ise bu yeni nokta en iyi nokta olarak belirlenir (**Arora, 2004**).

Benzetilmiş Tavlama yöntemi günümüzde bilinen tavlama işleminden esinlenilmiştir. Başlangıçta bu yöntemle ilgili yapılan çalışmalarda yöntemin teorik açıdan probleme yeteri ölçüde adapte edilememesi nedeniyle sıkıntılar yaşanmış, ancak birkaç özel problemin (spin-glass modeli ve Ising modeli) optimizasyon çalışmalarında kısmen neticeye ulaşılmıştır. 1993'de Andersen tavlama hızı sabitini Benzetilmiş Tavlama yönteminde kullanarak soğutma işlemi için toplam entropi üretimini minimize etmeyi hedeflemiştir (**Reimann, 2002**).

Olasılık fonksiyonuna ait sıcaklık parametresi fonksiyonun optimum değerini belirlemede kullanılan önemli bir parametredir. Optimizasyon sırasında sıcaklığın değeri soğutma hızı ile giderek düşürülür ve yapılan bir çok denemenin ardından optimizasyon tamamlanır (**Arora, 2004**).

Global optimizasyon yöntemlerinden biri olan Benzetilmiş tavlama algoritmasının diğer algoritmalarından en büyük avantajı global optimum noktayı bulurken yerel minimum noktalara takılı kalmamasıdır. (**Pirsig, 1974**).

Benzetilmiş Tavlama algoritması metallerin soğutulması işlemine benzerliğinden ötürü bu ismi almıştır. Metalin ısıtılmasıyla metal atomlarının potansiyel enerjileri

yükselmeye başlar. Yüksek enerji, atomları kararsız hale getirerek buldukları bölgede rastgele hareket etmelerine neden olur. Ardından yapılan kontrollü bir soğutma ile atomların iç enerjileri düşmeye başlar. Bunun ardından atomlar periyodik biçimde bir diziliş göstererek yüksek olan potansiyel enerjilerini minimize etmeyi başarırlar. Bu çalışmada da aynı yöntem kullanılarak enerji değil, tanımlanan fonksiyon (soğutma sıcaklığını) minimize edilmek istenmektedir.

Soğutma işlemi benzetilmiş tavlama algoritmasında daha iyi sonuçların bulunmasını sağlayacak yeni komşu çözümlerin üretilmesini sağlayan üstel bir ifadedir. Boltzmann olasılık faktörü olarak isimlendirilen bu ifade aşağıda görülmektedir.

$$\exp(-E\{r_i\}/k_B T) \quad (1.1)$$

r_i : atomun konumunu ifade eden parametre

$E\{r_i\}$: atomların konumlarından ötürü elde ettikleri iç enerjileri

k_B : Boltzmann sabiti

T : sıcaklık

Sıcaklık, olasılık fonksiyonunda kullanılan önemli bir parametredir. Benzetilmiş tavlama algoritması içinde rastgelelik barındırır; yani algoritmanın her adımında elde edilen çözüm rastgele yakın bir çözümle yer değiştirir. Seçilen sıcaklık değerinin yüksek oluşu rastgele bir biçimde elde edilen çözümün değişmesine neden olur. Amaç, tanımlanan fonksiyonun global minimum noktasını elde ederek fonksiyonu minimize etmektir; ancak sıcaklığın yüksek olması nedeniyle çözüm global minimuma varamadan tanımlanan fonksiyon her hangi bir yerel minimum noktasında takılı kalır. İstenmeyen bu durumun düzeltilmesi; ancak sıcaklığı sıfıra yakın bir değerle ifadelendirmekle mümkün olur. Malzeme içindeki atomların uygun tane büyüklüğüne ulaşması ve kusurların minimize edilmesi açısından optimum sıcaklığı belirlemenin önemi oldukça büyüktür.

Bu algoritma ilk kez 1953'de Metropolis tarafından belirli bir sıcaklıkta atomların denge durumunda meydana getirdikleri dizilişleri gözlemlemek amacıyla kullanılmıştır. İç enerjideki değişim atomların buldukları konumdan farklı bir konuma hareket etmelerine neden olmaktadır. Eğer enerji değişimi sıfırdan küçükse, $\Delta E < 0$, atom rastgele bir seçimle yeni konumuna geçerek yeni bir diziliş meydana

getirir. Enerji değişiminin sıfırdan büyük olması, $\Delta E > 0$, durumunda atom olasılık fonksiyonuna, $P(\Delta E) = \exp(-\Delta E/k_B T)$, bağlı kalarak konum değiştirir. Olasılık fonksiyonunun aldığı değerler 0 - 1 arasındadır. Atomun konum değiştirerek yeni bir diziliş meydana getirmesi için olasılık fonksiyonun rastgele seçilmiş yeni değerden büyük olması gerekir. Aksi halde yeni bir adıma geçinceye kadar atom bulunduğu konumu korur. Bu işlem atomlar kararlı hale gelinceye kadar devam eder. Bu algoritmanın matematiksel boyuta indirgenişi ilk olarak 1983'de Kirkpatrick tarafından yapılmış ve kombinasyonel problemler için optimizasyon tekniklerinin temelini oluşturmuştur.

Optimizasyon çalışmaları kapsamında ise, Kriging modeli ve Benzetilmiş Tavlama yöntemleri birleştirilerek bir meta-algoritma oluşturulmuş ve göz önüne alınan iki farklı ısı-akış problemi için optimizasyon analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada, elektronik devre elemanlarının soğutulmasından esinlenerek iki farklı ısı-akışkan problemi göz önüne alınmıştır. Bu problemlerde ısı kaynaklarındaki (yonga-chip) ortaya çıkan maksimum sıcaklığın üretici tarafından izin verilen değeri aşmaması gereklidir. Bunun için Kriging ve Benzetilmiş Tavlama yöntemlerinin bir arada kullanıldığı meta-algoritma kullanılarak probleme ait geometrik/akış tasarım parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Ayrıca, geliştirilen meta-algoritmanın doğruluğunu belirlemek için, öncelikle analitik çözümlü mevcut olan test fonksiyonları kullanılarak algoritmanın etkinliği değerlendirilmiştir. (Analitik fonksiyonlara ait Kriging modeli ve optimizasyon sonuçları Ekler kısmında verilmiştir).

Bu çalışmada kullanılan Kriging ve Benzetilmiş Tavlama yöntemleri bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2. KRIGING YÖNTEMİ

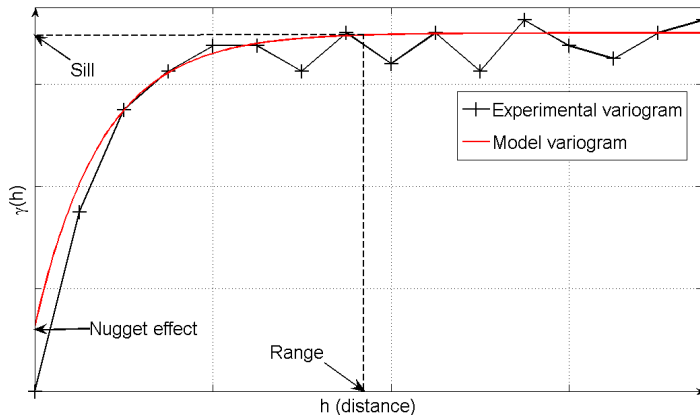
Kriging jeo-istatistik alanında yaygın olarak kullanılan, mevcut bilinen değerler kullanılarak oluşturulan bir variogram yardımı ile bilinmeyen değerlerin en doğru bir şekilde tahmin etme yöntemidir. Bu yöntem ismini geliştiricisi olan Güney Afrikalı maden mühendisi Prof. Daniel G. Krige'den almaktadır (**Krige, 1951**). İlk olarak maden kaynaklarının daha doğru şekilde tespiti için kullanılmış olup bütün istatistik biliminin önemli bir aracı olmuştur. Son yıllarda ise akışkanlar dinamiği problemlerine de uygulanmaya başlamıştır (**Venturi ve Karniadakis, 2004**), (**Gunes ve Rist 2007**). **Journel ve CH. J. Huijbregts (1981)** tarafından belirtildiği üzere, Kriging “optimal tahmin” ile eş anlamlı olup, mevcut noktalardaki bilinen verilerin lineer kombinasyonu ile bilinmeyen noktalardaki değerleri tahmin etme yöntemidir. Bir çeşit yüksek mertebeden interpolasyon olan bu yöntemde, bilinmeyen nokta veya noktalardaki değerler diğer mevcut bütün noktalardaki verilere ve bu verilerin uzaklıklarına bir variogram ile bağlıdır ve bu ilişki mevcut noktaların istenilen nokta üzerindeki ağırlık katsayıları ile belirlenir.

Kriging yönteminde mevcut veri setinden oluşturulan variogram çok önemli bir rol oynar. Variogram bir veri setinin konumsal sürekliliğinin veya düzensizliğinin (değişiminin), sayısal bir ölçüsünü ifade eder ve aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_i^n (z_i - z_{i+h})^2 \quad (2.1)$$

Burada, z_i değişkenin i konumundaki değeri, z_{i+h} değişkenin (i konumundan) h uzaklığındaki değeri, h aralıklı nokta çiftlerinin farklarının karelerinin ortalaması olup h mesafe farkı için bir varyans değeri denklem (2.1) elde edilir ve bu işlem h , $2h$, $3h$, $4h$ gibi değişik uzaklıklar için devam eder. Sonuçta mevcut verilere uygun bir “deneysel variogram” elde edilir (bkz. Şekil 2.1). Daha sonra, bu deneysel variogram noktalarına uygun bir eğri uydurularak “model variogram” oluşturulur (Şekil 2.1). Bu eğri lineer, çeşitli mertebeden polinomlar, üstel fonksiyon, Gauss fonksiyonu, kuvvet serileri, vb. gibi çeşitli model fonksiyonlardan oluşabilir. Hangi modelin seçileceği problemin fiziksel anlamına ve deneysel variogramın karakteristiğine göre

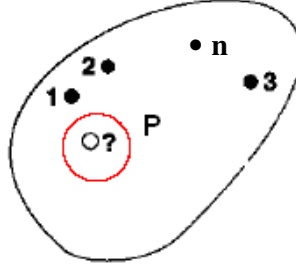
belirlenir. Model variogram elde edildikten sonra mevcut verilerin birbirlerine bağıllığı, istenilen yeni noktalar ve mevcut noktalar arasındaki konumsal bağımlılık belirlenebilir ve bu bağımlılıklardan faydalanılarak belirlenmek istenilen nokta üzerindeki her bir mevcut noktanın ağırlığı hesaplanabilir. Variogramın belirlenmesi Kriging interpolasyonunun en önemli aşamasıdır, çünkü tahmin hatasına doğrudan etki eder. Şekil 2.1’de tipik bir deneysel ve buna uydurulmuş bir model variogram gösterilmiştir. Ayrıca, tipik bir variogramda görüldüğü gibi noktalar arasında herhangi bir korelasyonun olmadığı mesafeyi belirten erim değeri (range), bu değere karşılık gelen varyans değeri (sill) ile gürültü içeren verileri düzgünleştirme amacıyla kullanılan “nugget etkisi” gösterilmiştir. Çeşitli variogram modelleri ve bu modellerin Kriging modeline olan etkileri hakkında ayrıntılı bilgi için, **Davis (2002)**, **Gunes and Rist (2007)**, **Cekli (2007)** ve bu yayınlarda verilen kaynaklara başvurunuz.



Şekil 2.1 : Deneysel ve model variogram ile bileşenleri.

Kriging yönteminde, tahmin edilmek istenen P noktasındaki fonksiyonun değeri ($Y_{E,P}$), bilinen n adet noktadaki fonksiyonun değeri (Y_i) ve P noktasının bu bilinen noktalara göre olan ağırlıklarının (weights, W_i) belirlenmesi suretiyle aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Y_{E,P} = \sum_{i=1}^n W_i Y_i \quad (2.2)$$

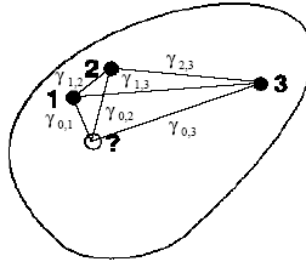


Şekil 2.2 : P noktasındaki bilinmeyen değerin Kriging yöntemiyle tahmin edilmesi.

Tahmin doğruluğu ve yapılan hata, ağırlık katsayılarının belirlenme yöntemine bağlıdır. Minimum hata için Kriging optimum ağırlıkları verir. Optimum ağırlıklar yansız (unbiased) tahmin ve minimum hata üretirler ve aşağıda verilen bir dizi denklem sisteminin çözülmesi ile elde edilirler. Kriging yöntemine göre bu ağırlıklar (W_1, W_2, \dots, W_n) aşağıdaki denklem sistemini sağlarlar:

$$\begin{aligned}
 W_1\gamma(h_{11}) + W_2\gamma(h_{12}) + \dots + W_n\gamma(h_{1n}) &= \gamma(h_{1P}) \\
 W_1\gamma(h_{21}) + W_2\gamma(h_{22}) + \dots + W_n\gamma(h_{2n}) &= \gamma(h_{2P}) \\
 \vdots & \\
 W_1\gamma(h_{n1}) + W_2\gamma(h_{n2}) + \dots + W_n\gamma(h_{nn}) &= \gamma(h_{nP})
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Burada $\gamma(h_{ij})$ i ve j noktaları arasındaki uzaklığa bağlı varyansın değeridir. $h_{ij} = h_{ji}$ olduğundan sol taraftaki katsayılar matrisi simetrik olup köşegen terimleri sıfırdır. Varyans değerleri deneysel variograma uygun olarak seçilen variogram modelinden belirlenir. Bunun için öncelikle mevcut noktalardaki değerlerden konumsal bağımlılığın ölçüsünü ifade eden deneysel variogram belirlenir.



Şekil 2.3 : Varyans hesabının şematik gösterimi (bkz denklem 2.1).

Çok çeşitli Kriging uygulaması mevcut olup, en çok tercih edilen doğal Kriging (ordinary Kriging) uygulamasında, ağırlık katsayılarının toplamının 1'e eşit olması şartı aranır:

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (2.4)$$

ve bununla beraber minimum tahmin hatasını sağlamak için *Langrange Çarpanı*, λ adı verilen yeni bir değişkene ihtiyaç vardır. Sonuç olarak ağırlık katsayılarını veren lineer denklem sistemi açık olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned} W_1\gamma(h_{11}) + W_2\gamma(h_{12}) + \dots + W_n\gamma(h_{1n}) + \lambda &= \gamma(h_{1p}) \\ W_1\gamma(h_{21}) + W_2\gamma(h_{22}) + \dots + W_n\gamma(h_{2n}) + \lambda &= \gamma(h_{2p}) \\ \vdots & \\ W_1\gamma(h_{n1}) + W_2\gamma(h_{n2}) + \dots + W_n\gamma(h_{nn}) + \lambda &= \gamma(h_{np}) \\ W_1 + W_2 + \dots + W_n &= 1 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Yukarıdaki denklem sistemi aşağıdaki gibi matris formunda yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \dots & \gamma(h_{1n}) & 1 \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(h_{22}) & \dots & \gamma(h_{2n}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \gamma(h_{n1}) & \gamma(h_{n2}) & \dots & \gamma(h_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(h_{1p}) \\ \gamma(h_{2p}) \\ \vdots \\ \gamma(h_{np}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

genel olarak;

$$[A] \cdot [W] = [B]$$

Denklem (2.6)'da verilen A ve B matrisindeki değerler variogram yardımıyla hesaplanır. Denklem (2.6)'nın çözümünde, sayısal hesaplama açısından dikkat edilecek önemli hususlardan biri, A matrisinin boyutunun mevcut veri sayısına bağlı olduğu (tahmin edilmesi istenen noktadan bağımsız olduğu), B matrisinin ise hem mevcut hem de tahmin edilmesi istenen noktaya bağlı olduğudur. Dolayısıyla, A matrisi üzerinde bir defa LU ayrımı (triangular decomposition - üçgenlere ayırma) yönteminin uygulanması ile en fazla hesaplama zamanı gerektiren bu ayırma işlemi tahmin edilecek nokta sayısından bağımsız olarak yalnızca bir defa uygulanır. Daha sonra her bir nokta için tahmin değeri, L ve U matrisi ve "Geriye Yerleştirme Algoritması" kullanılarak her bir nokta için ağırlık katsayıları etkin ve hızlı bir şekilde hesaplanabilir. Ağırlık katsayıları, W_i belirlendikten sonra veri alanı

içerisindeki istenilen bir nokta için tahmin denklem (2.2) kullanılarak kolayca yapılabilir.

Kriging yönteminin diğer interpolasyon yöntemlerine göre önemli bir avantajı da yapılan tahminin hata aralığını da vermesidir. Genel olarak, P noktası için tahmin edilen $Y_{E,P}$ değeri bu noktanın gerçek değeri olan $Y_{A,P}$ değerinden farklı olup tahmin hatası aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\varepsilon_p = (Y_{E,P} - Y_{A,P}) \quad (2.7)$$

Tahmin varyansı ise aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$s_e^2 = W_1\gamma(h_{1p}) + W_2\gamma(h_{2p}) + \dots + W_n\gamma(h_{np}) \quad (2.8)$$

Tahmin varyansının karekökü, tahmin standart hatası olarak ifade edilir:

$$s_e = \sqrt{s_e^2} \quad (2.9)$$

Kriging yönteminin diğer avantajları, tahmin varyansının minimum olması, tahminlerinin yansız (unbiased) olması, tahminler için bir hata değeri belirlenebilmesidir. Kriging bir BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) yöntemidir. Kriging doğrusaldır çünkü tahmini değerler belirli değerlerin lineer kombinasyonu ile ağırlıklaştırılmıştır (Davis, 2002), (Deutsch ve Journel, 1992).

Bu çalışma kapsamında sınırlı sayıdaki CFD (Computational Fluid Dynamics) analizlerinden elde edilen sonuçlardan Kriging modeli elde edilmiştir. Bu sınırlı sayıdaki CFD analizlerinin, parametre alanını en etkili bir şekilde temsil etmesi ve belirsizliklerin en az seviyeye indirilmesi gereklidir. Tasarım parametreleri yani CFD analizlerinin gerçekleştirildiği geometrik/akış/akışkan parametrelerinin, göz önüne alınan sistemi en iyi şekilde temsil etmesi (örnekleme) için Latin Hiperküp Örnekleme (Latin Hypercube Sampling - LHS) yöntemi kullanılmıştır. LHS rastgele üretilen sayılara bağlı olmakla beraber, tüm parametre vektör alanının tüm kısımlarının temsil edilmesini garanti eder (McKay ve diğ., 1979).

3. BENZETİLMİŞ TAVLAMA (SIMULATED ANNEALING)

Benzetilmiş tavlama algoritması, birden fazla değişkene sahip fonksiyonların optima (en büyük veya en küçük) değerlerinin etkin bir şekilde bulunması ve özellikle pek çok yerel optima değere sahip doğrusal olmayan fonksiyonların global optima değerlerinin bulunması için geliştirilmiştir. Bu yöntem, katı cisimlerin tavlama işlemi sırasında, (ısıtıldıktan sonra çok yavaş olarak soğutma işlemi), mükemmel şekilde atomik dizilişlerini örnek aldığından ve özellikle metalurjide metallerin tavlama işleminden esinlenerek geliştirildiğinden bu isimi almıştır. Bu yontemin en önemli özelliklerinden biri yerel optimalara (maksimum veya minimum) takılıp kalmadığı için diğer optimizasyon yöntemlerine göre avantajları vardır.

Konuya aşına olmayan kişiler için kolay anlaşılır olması açısından sıklıkla řu örnek verilebilir: “En alçak noktası aranan, delik derinlikleri farklı çok sayıda delik içeren bir golf sahası dūřunelim. Eęer sahanın eğimi yōnünde ilerletmek gibi basit bir yöntem kullanılırsa o zaman yüksek olasılıkla deliklerden birinde (en derin olmayanda) takılabiliriz. Bunun yerine řu yol izlenebilir: Sahaya bir top koyup arazi olduğu gibi sallamaya (metalurjide tavlama) başlıyoruz. Top arada bir deliklere girse de, sūrekli sallandığımız için sonra çıkıyor. Zamanla sallama hızımızı gittikçe (yavaş yavaş) azaltıyoruz. Tamamen durduğumuzda ise topumuzun sahanın en alçak noktasında (global minimum) ya da yakın bir yerinde olmasını sağlıyoruz.”

Gerçek katı cisimlerde de durum bu örneğe benzetilebilir. Örneęimizdeki sallama hareketi cisimlerin sıcaklığına karşılık gelir. Bir gazı soğuturken atomlar bir sūre sonra nasıl ki periyodik aralıklarla dizilip potansiyel enerjiyi minimize ediyorlar ise (kristalleşme), benzer yaklaşımla, enerjiyi değil probleme uygun olarak tanımlanan herhangi bir hedef fonksiyon (objective function) minimize edilebilir. “Soęutma” işlemi olarak adlandırılan bu durum, genel olarak, daha iyi sonuçların bulunmasını sağlayacak yeni komşu özūmlerin üretilmesini sağlayan üstel bir ifadedir ve soğutma hızını kontrol eden bir parametre içerir.

Benzetilmiş tavlama algoritması; elektronik devre tasarımı, görüntü işleme, yol bulma problemleri, seyahat problemleri gibi birçok problemlerde kullanılmıştır.

Bununla birlikte bu çalışma kapsamında Kriging modelleri ile birlikte kullanılarak CFD analizlerinin optimizasyonu için etkin bir yöntem olarak kullanılmıştır. Daha önce bahsedildiği gibi Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) algoritması ile belirlenen tasarım noktalarında elde edilen veri setinden oluşturulan Kriging modeli, aşağıda verilen Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritmasında, istenilen noktadaki değerlerin hızlı bir şekilde bulunması ve optimizasyonu için kullanılır.

Çizelge 3.1 : Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması.

s := s0; e := Krig(s)	% Başlangıç noktası ve Kriging tahmini
s_best := s; e_best := e	% Başlangıçtaki "en iyi" çözüm
k := 0	% Nokta iterasyon sayacı.
while k < kmax and e > emax	% İterasyon süresince & optimizasyon şartı:
sn := neighbour(s)	% Komşu noktanın seçimi.
en := Krig(sn)	% Yeni değer Kriging modeli ile hesabı
if en < e_best then	% Yeni nokta en iyi nokta mı?
s_best := sn; e_best := en	% Evet, en iyi noktayı kaydet.
if P(e, en, temp(k/kmax)) > random() then	% Hayır, yinede yeni noktaya gidilmeli mi?
s := sn; e := en	% Evet, yeni noktaya git.
k := k + 1	% İterasyon sayısını bir artır
return s_best	% başa dön

Yukarıda verilen meta-algoritmada, iterasyona bir başlangıç noktası (parametre değerleri) seçilerek başlanır ve bu noktadaki fonksiyonun değeri Kriging yöntemi ile tahmin edilir ve başlangıçta "en iyi" değer olarak atanır. Daha sonra, mevcut noktaya yakın olan başka bir "komşu" nokta seçilir ve bu noktadaki çözüm yine Kriging yöntemi ile tahmin edilir. Eğer bu komşu noktadaki çözüm istenilen hedef fonksiyonu açısından başlangıçtaki seçilen değerden daha iyi ise, bu yeni nokta "en iyi" nokta olarak atanır. Aksi durumda bu yeni noktanın "en iyi" olarak seçilip seçilmeyeceği denklem (3.1)'de verilen olasılık fonksiyonuna (probability function) göre değerlendirilir.

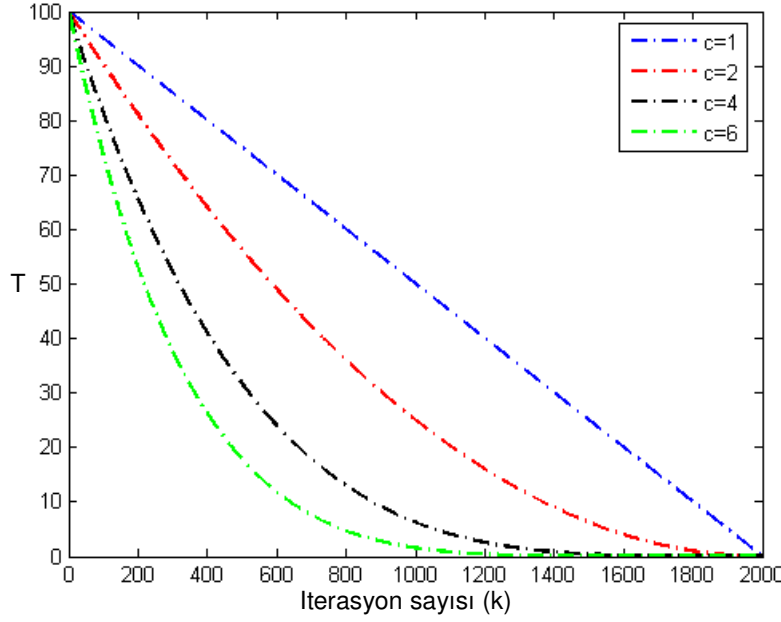
$$P = \exp\left[\frac{e - e_n}{T}\right] \quad (3.1)$$

Yukarıda, e mevcut ana kadar olan geçen süredeki "en iyi" değer ve e_n ise en son tahminde bulunulan değerdir. T ise optimizasyon problemi için "tavlama sıcaklığını" temsil etmekte olup, optimizasyon işlemi boyunca gittikçe azalan bir fonksiyon ile temsil edilmelidir.

Örneğin, sıcaklığın değişimi aşağıdaki gibi bir denklemle hesaplanabilir:

$$T = T_0 (1 - k/K)^c \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'de T_0 itersyon başlangıç sıcaklık değeri, c ise soğuma hızını kontrol eden bir parametre olup, k zamanla soğumayı temsil eden itersyon sayacı ve K ise toplam itersyon sayısını (tam soğuma için gereken maksimum itersyon sayısını) temsil eder. Şekil 3.1'de denklem (3.2)'nin farklı soğuma hızları (c) için sıcaklığın itersyon sayısı ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Farklı soğuma hızları (c) için sıcaklığın itersyon sayısı ile değişimi (Cekli 2007).

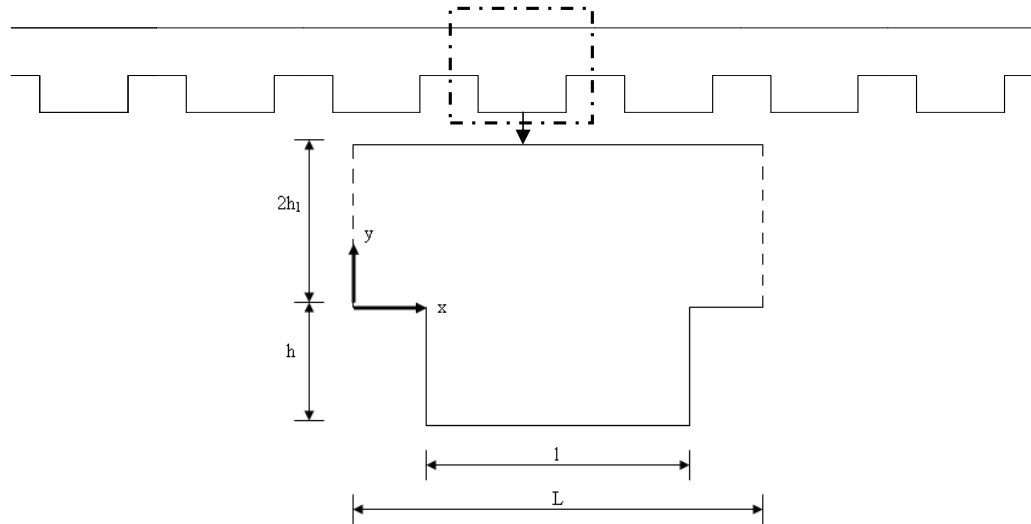
Şekil 3.1'de $c = 1$ için doğrusal bir soğuma mevcut iken, c değeri arttıkça gittikçe artan bir soğuma hızı, yani sıcaklık düşüşü görülmektedir. Örneğin 1000. itersyonda $c = 1$ için sıcaklık değeri yaklaşık 50 iken $c = 2$ 'de bu değer 25 ve $c = 4$ için ise yaklaşık olarak 7'dir.

Rastgele sayı oluşturma algoritması kullanılarak (0,1) arasında rastgele sayılar oluşturulur ve bu sayılar olasılık fonksiyonu P değeri ile karşılaştırılır. Olasılık fonksiyonun (P) değeri, (0,1) arasında üretilen rastgele değerden büyük ise, seçilen komşu noktanın enerjisi, mevcut "en iyi" noktadan daha yüksek olmasa dahi, "en iyi" olarak düşünülür ve bu noktaya geçilir. Bu sayede, optimizasyon yönteminin yerel optimalara takılıp kalması önlenmiş olur. Bu adımlar uzun bir süre tekrar edilerek sonunda "en iyi" (optimum) çözüm elde edilir.

4. ZORLANMIŞ TAŞINIM PROBLEMİNE UYGULAMA

4.1 Kanal İçerisinde Zorlanmış Taşınım İle Isı Geçişi

Bölüm 2 ve 3’de verilen yöntemlerin uygulaması için Şekil 4.1’de görüldüğü gibi bir kanal içerisine belirli aralıklarla periodik olarak yerleştirilmiş olan ve çok sayıda ısı kaynağı içeren bir ısı geçişi problemi ele alınmıştır. Bu problem, elektronik devre elemanlarında sıklıkla karşılaşılan durumu temsil etmek üzere ele alınmış olup, soğutucu akışkan olarak hava kullanılmıştır. Elektronik devrelerin soğutulmasında uygulama alanı mevcut olan bu problemde, bir ısı kaynağından (örneğin, bilgisayarlardaki işlemciden) yayılan ısı dolayısıyla, işlemci üzerinde oluşacak sıcaklığın üretici tarafından müsaade edilen en yüksek sıcaklık değerinin altında kalmasını sağlamak üzere sisteme bir fan ile zorlanmış taşınım oluşturulması gerekmektedir. Buradaki optimizasyon problemini boyutsuz sayılar cinsinden ifade etmek gerekirse, verilen bir ısı akısı (Nusselt sayısı) ve maksimum işletme sıcaklığı için gerekli olan minimum hava debisinin (Reynolds sayısı) bulunmasıdır. Isı kaynakları arasındaki mesafe l , ısı kaynağının yüksekliği (veya yiv yüksekliği) h ve Reynolds sayısı Re ve akış alanına etki eden temel optimizasyon parametreleri olarak ele alınmıştır. Şekil 5.1’de çözüm ağına karşılık gelen bir periyoda ait bölüm gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Yivli kanal geometrisi.

4.2 Matematiksel Model ve Çözüm Yöntemi

Şekil 4.1'de görülen kanal giriş kesitinde akışkan hızı üniformdur ve zorlanmış taşınımın etkisi Re sayısı ile temsil edilmektedir. Soğutucu akışkan olarak seçilen hava karşılaşılan hız değerleri küçük olduğu için sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. Aşağıda laminar akışta zorlanmış taşınım olayını temsil eden süreklilik, Navier-Stokes ve enerji denklemleri boyutsuz olarak verilmiştir:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P^*}{\partial X} + \frac{1}{Re} \nabla^2 U \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P^*}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \nabla^2 V \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Re} \nabla^2 \theta \quad (4.4)$$

Enerji denklemindeki (4.4) viskoz dissipasyon terimi düşük hızlar dolayısıyla ihmal edilmiştir. Yukarıdaki denklemlerdeki değişkenler, üniform giriş hızı U_i , akışkan sıcaklığı T_i , giriş aralığının genişliği $2h_1$, akışkan yoğunluğu ρ , kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır.

$$X = \frac{x}{h_1}, \quad U = \frac{u}{U_i}, \quad \theta = \frac{T - T_i}{T_d - T_i}, \quad \tau = \frac{U_i t}{h_1}, \quad P^* = \frac{p}{\rho U_i^2} \quad (4.5)$$

Formülasyonda Reynolds sayısı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$Re = \frac{V_{ref} h_1 \rho}{\mu} \quad \text{burada: } V_{ref} = \frac{3}{2} \bar{V} \quad (4.6)$$

Burada h_1 karakteristik uzunluk olup, periyodik kanal giriş uzunluğunun yarısı kadardır (bkz. Şekil 4.1). Referans hız, ortalama hızın (\bar{V}) 3/2 ile çarpımından bulunur. Kanala giren kütleli hava debisi ise:

$$\dot{m} = \rho \bar{V} A = \rho \bar{V} (2h_1 D_1) \quad \text{burada } D_1 \text{ kanalın derinliği olup 1 birim alınabilir.} \quad (4.7)$$

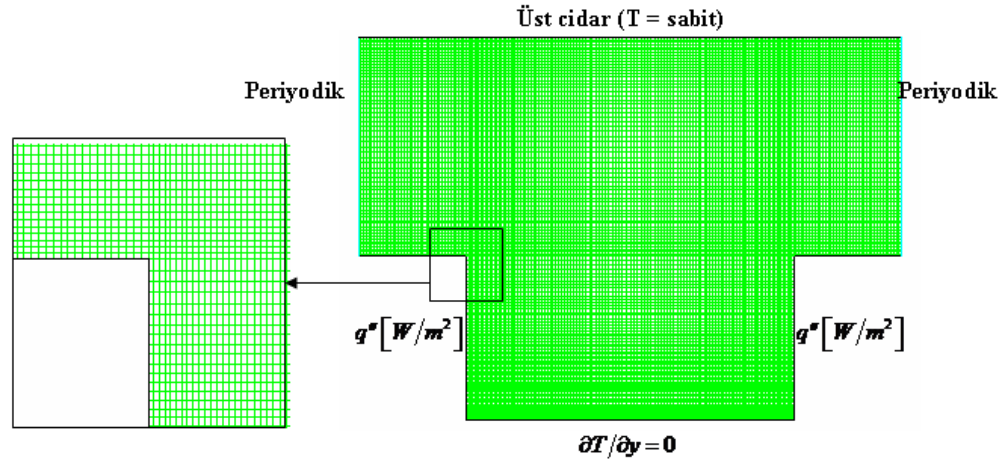
$$\dot{m} = \frac{4}{3} \rho V_{ref} h_1 D_1 = \frac{4}{3} \mu (Re) D_1 \quad (4.8)$$

μ havanın dinamik viskozitesidir ($\mu = 1,7894 \times 10^{-5}$ kg/ms).

$$Nu = \frac{h \cdot (h_1)}{k} \text{ şeklinde olup, hava için } k = 0,0242 \text{ W/mK alınmıştır.} \quad (4.9)$$

Yukarıda açıklanan süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin çözümü, sonlu hacimler tekniğinin kullanıldığı Fluent[®] yazılımı ile zamana bağlı, ikinci mertebeden kapalı (implicit) yöntemlerle elde edilmiş olup hesap bölgesinde hız ve sıcaklık alanları elde edilmiştir.

Bu çalışmada tipik çözüm ağı yaklaşık 88000 eleman içermekte ve çözüm ağı uniform olmayıp katı cidarlara doğru sıklaştırılmıştır. Bu şekilde cidarlar çevresinde hız ve sıcaklık gradyanlarının yeterli ölçüde çözümlenebilmesi sağlanmıştır. Şekil 4.2’de örnek bir çözüm ağı verilmiştir. Kanal yüksekliği h ve kaynaklar arasındaki mesafe l değiştikçe, çözüm ağı da uygun bir şekilde yeniden oluşturulmuştur.



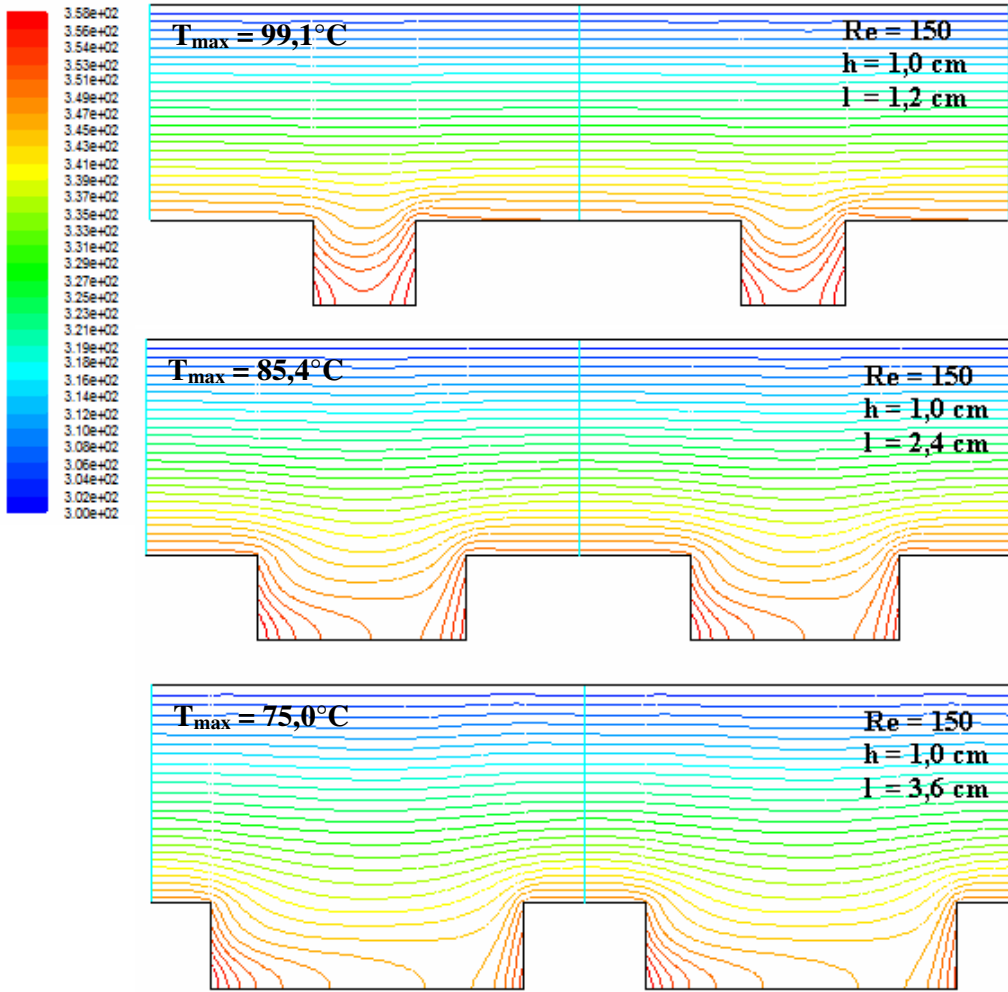
Şekil 4.2 : Hesaplama ağı ve sınır koşulları.

4.3 CFD Simülasyon Sonuçları

Bölüm 2’de açıklanan Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) algoritması ile 30 ve 60 adet LHS noktası belirlenmiş olup bu parametre değerleri için Fluent[®] yazılımı kullanarak CFD simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına ait veri tabanı, ısı kaynağı üzerindeki maksimum sıcaklık değerini (T_{max}) gösterecek şekilde Ek 3’de verilen Çizelgelerde (A.6, A.7) gösterilmiştir. Çizelgelerde verilen LHS noktaları için gerçekleştirilen simülasyonlara örnek olmak üzere yivli kanal içerisindeki eş sıcaklık eğrileri (isotherms) ve akım fonksiyonu (stream function) sonuçları Şekil 4.3 – 4.8’de gösterilmiştir. Isı kaynakları arasındaki mesafenin (l) eş sıcaklık eğrilerine

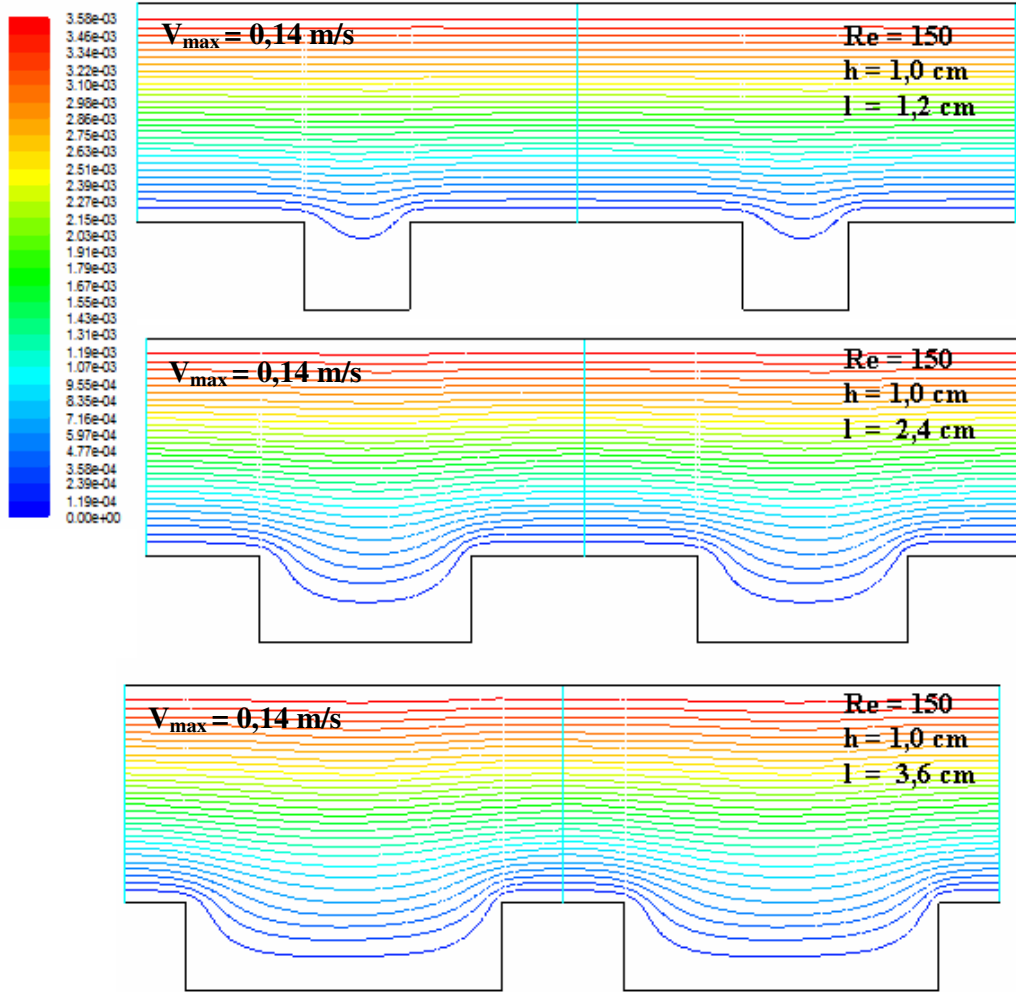
etkisi Şekil 4.3 – 4.4’de, ısı kaynağı yüksekliğinin (h) eş sıcaklık eğrilerine etkisi Şekil 4.5 – 4.6’da, Reynolds sayısı etkisi ise Şekil 4.7 – 4.8’de verilmiştir.

Şekil 4.3a’da soğutucu akışkanın (hava) hızı ile kanalın yiv yüksekliğinin (h) değerleri sabitken ısı kaynakları arasındaki mesafenin (l) farklı değerlerinin kanal içindeki sıcaklık dağılımına etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.3a’da görüldüğü gibi ısı kaynakları arasındaki mesafe arttıkça kanal içindeki maksimum sıcaklık önemli oranda azalmaktadır. Bu mesafenin artması ile zorlanmış taşınımın etkisini artmış ve kanal içinde daha etkin bir soğutma sağlamıştır.



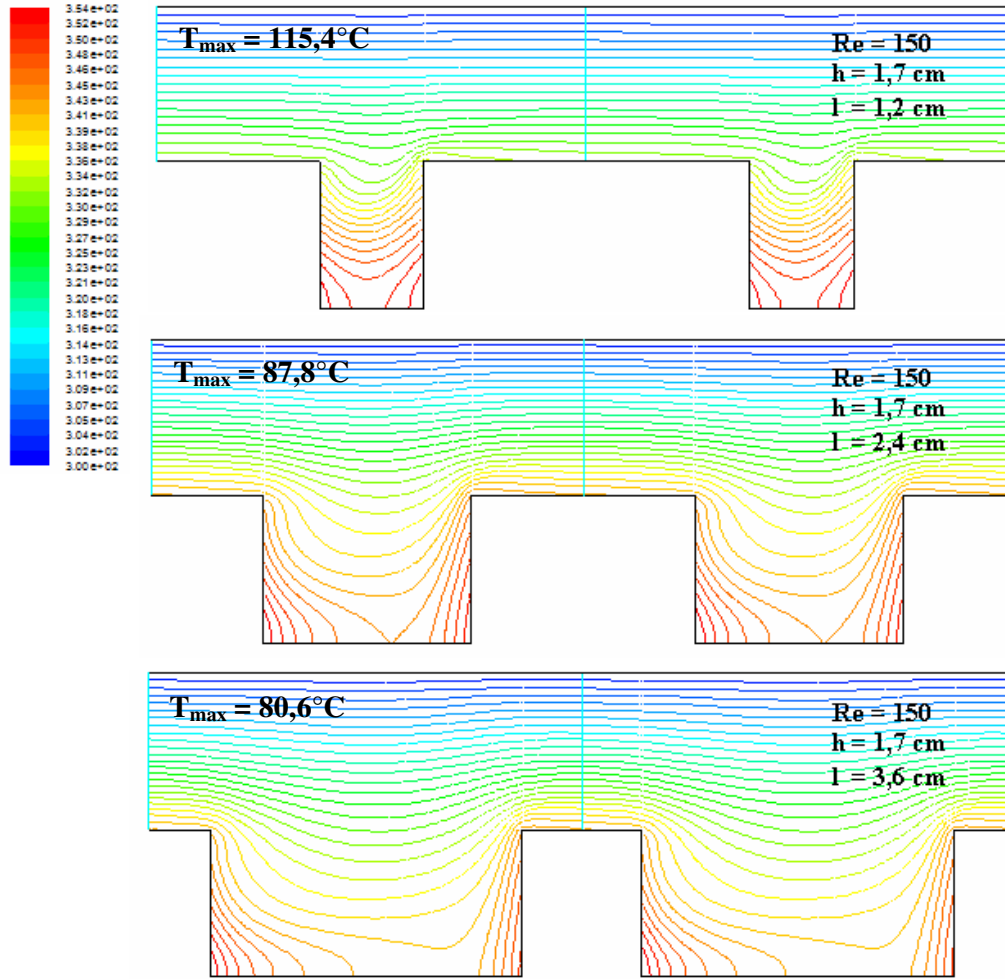
Şekil 4.3a : Isı kaynakları arasındaki mesafenin (l) sıcaklık dağılımına etkisi (2. mertebeden sayısal çözüm yöntemi kullanılmış olup, $Re = 150$, $h = 1,0 \text{ cm}$ olarak sabit tutulmuştur).

Şekil 4.3b'de ise ısı kaynakları arasındaki mesafenin (l) değişiminin akım fonksiyonuna etkisi gösterilmiştir. Akım çizgilerinden görüldüğü gibi ısı kaynakları arasındaki mesafe (l) arttıkça, kanal akışının yiv içine doğru ilerlediği daha iyi bir soğutma sağladığı görülmektedir. Reynolds sayısı sabit tutulduğu için maksimum hızlarda değişiklik görülmemekle beraber, maksimum sıcaklıkta daha önce bahsedildiği gibi önemli bir düşüş gözlemlenmiştir.



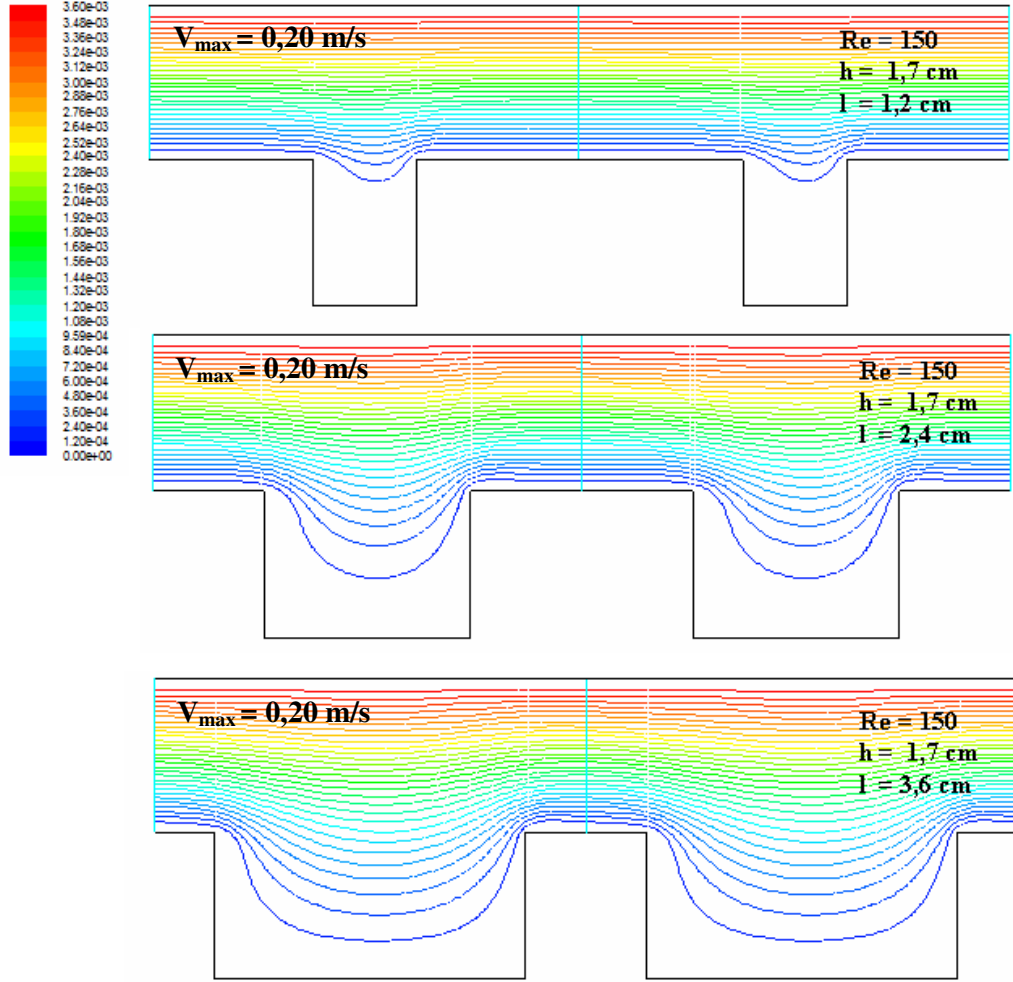
Şekil 4.3b: Isı kaynakları arasındaki mesafenin (l) akım fonksiyonuna etkisi ($Re = 150$, $h = 1,0 \text{ cm}$).

Şekil 4.4a'da farklı bir yiv yüksekliğinde ($h = 1,7$ cm) ısı kaynakları arasındaki mesafenin (l) kanal içindeki sıcaklık dağılımına etkisi gösterilmektedir. Şekil 4.3a'ya benzer şekilde ısı kaynakları arasındaki mesafe arttıkça kanal içindeki maksimum sıcaklıkta önemli bir azalma meydana gelmektedir. Burada yiv yüksekliği Şekil 4.3a'daki değerden ($h = 0,7$ cm) daha fazladır; ancak her iki şekilde de eş sıcaklık eğrilerinin benzer bir yapıda olduğu görülmektedir.



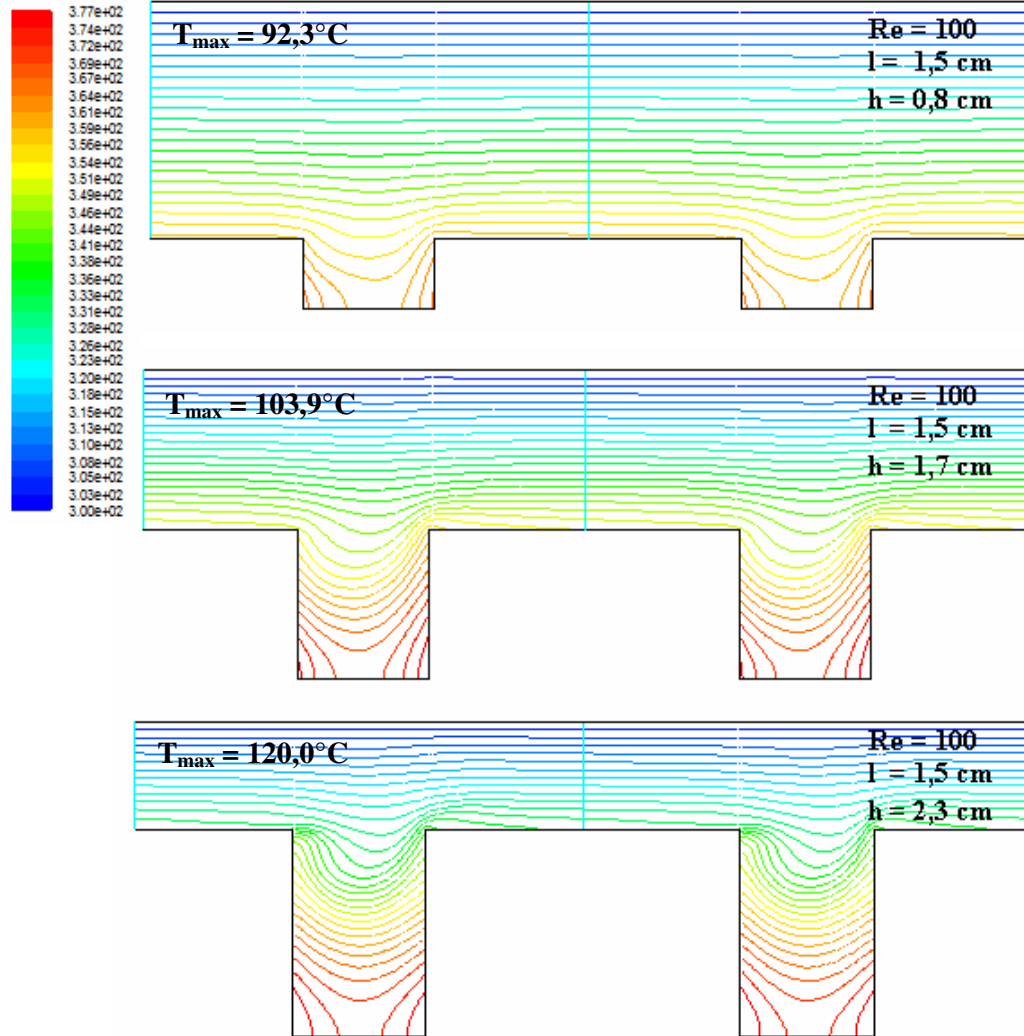
Şekil 4.4a : Isı kaynakları arasındaki mesafenin (l) sıcaklık dağılımına etkisi ($Re = 150$, $h = 1,7$ cm).

Şekil 4.3b'ye benzer olarak, Şekil 4.4b'de ısı kaynakları arasındaki mesafenin (l) akım fonksiyonuna etkisi, ısı kaynağı yüksekliğinin $h = 1,7$ cm olması halinde gösterilmiştir. Şekil 4.3b'ye benzer bir durum burada da söz konusudur.



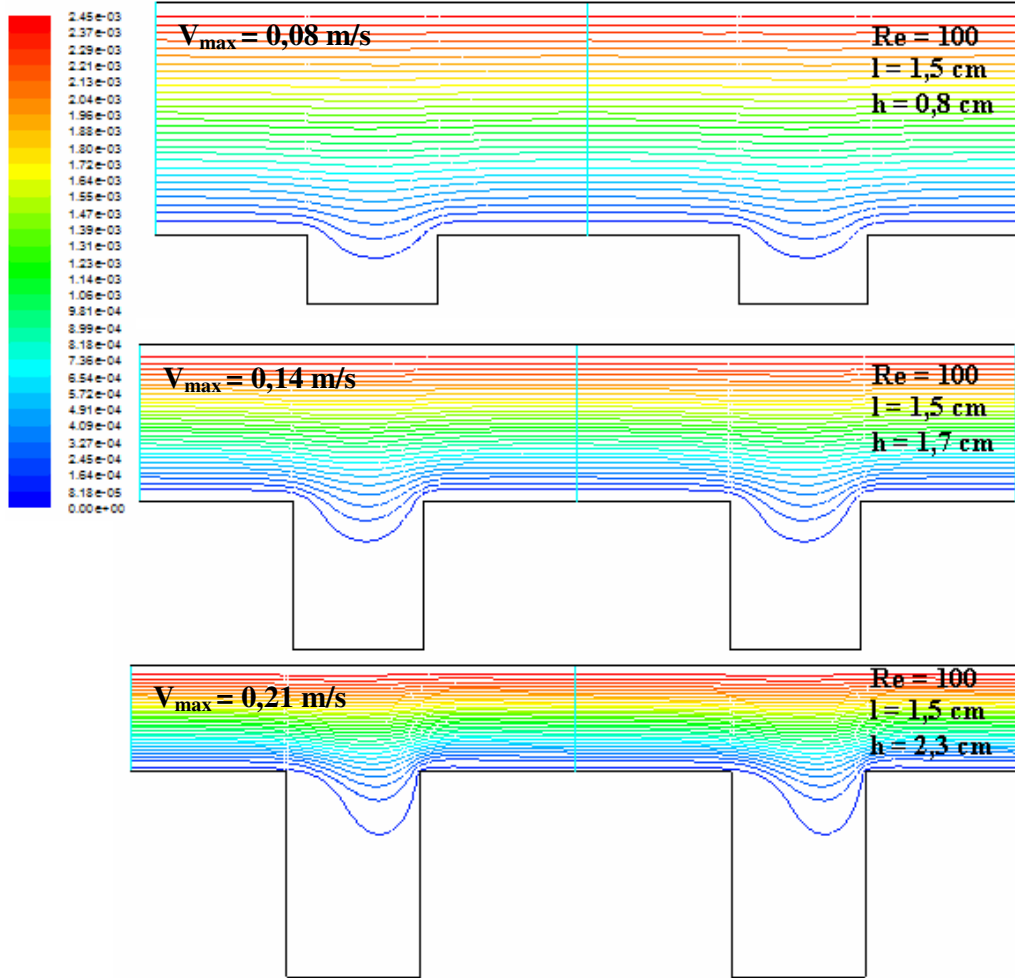
Şekil 4.4b: Isı kaynakları arasındaki mesafenin (l) akım fonksiyonuna etkisi ($Re = 150$, $h = 1$).

Şekil 4.5a'da ısı kaynağı yüksekliğinin (h) sıcaklık dağılımına etkisi gösterilmiştir. Burada, Reynolds sayısı, $Re = 100$ ve ısı kaynakları arasındaki mesafe ($l = 1,5$ cm) olarak sabit tutulmuştur. Isı kaynağı (yiv) yüksekliği (h) arttıkça kanal içindeki sıcaklığın giderek arttığı görülmektedir. Yüksekliğin artması sonucu kaynaklardan üretilen ısı, yüksekliğin daha az olduğu durumlardaki gibi taşınım ile aktarılamadığı için kanal içindeki sıcaklık yükselmektedir.



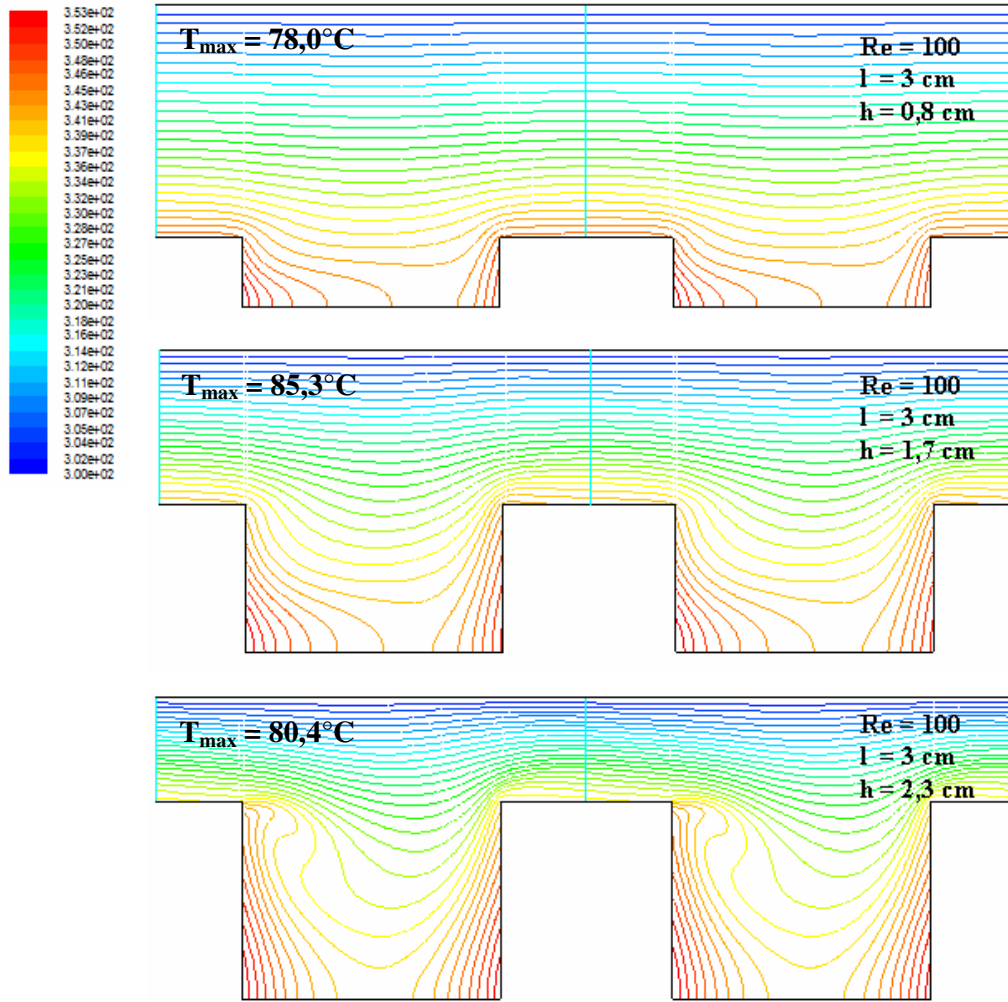
Şekil 4.5a : Isı kaynağı yüksekliğinin (h) sıcaklık dağılımına etkisi ($Re = 100$, $l = 1,5$).

Şekil 4.5b’de kanalın yiv yüksekliğinin akım fonksiyonuna etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.5’de $Re = 100$ olarak sabit tutulduğu için, yiv yüksekliğinin artması ile kanal giriş yüksekliği azalmakta, dolayısıyla Reynolds sayısının $Re = \frac{V_{ref} h_1}{\nu}$ ifadesi gereği kanal giriş hızı artmaktadır. Ancak, Şekil 4.5b’de görülen bu hızlardaki artışa rağmen iyi bir soğutma sağlanamadığı için, sıcaklıklarda önemli artış gözlemlenmektedir (bkz. Sekil 4.5a).



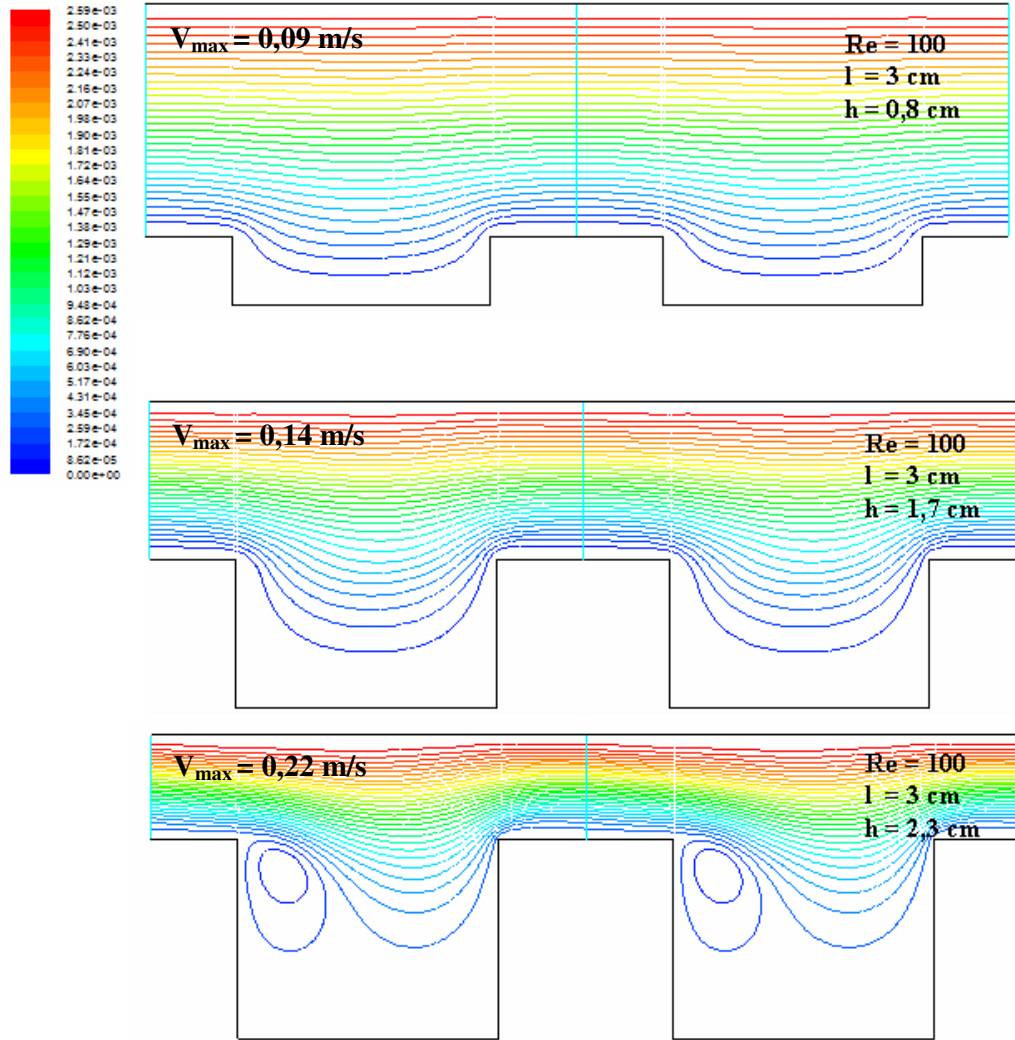
Şekil 4.5b : Isı kaynağı yüksekliğinin (h) akım fonksiyonuna etkisi (Re = 100, l = 1,5 cm).

Şekil 4.6a'da Reynolds sayısı $Re = 100$ değerinde sabit tutulmuştur; ancak ısı kaynakları arasındaki mesafe ($l = 3$ cm) iki kat artırılmıştır. Bu durum için, ısı kaynağı (yiv) yüksekliğinin sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Şekil 4.5a'dan farklı olarak burada yiv yüksekliği belirli bir değere kadar kanal içindeki sıcaklık yükseklikle birlikte artış göstermektedir; ancak yiv yüksekliği belli bir değeri aşınca (örneğin $h = 2,3$ cm) kanal içindeki sıcaklıkta bir önceki yiv yüksekliğine oranla düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Eş sıcaklık eğrilerinde de önemli değişiklikler ortaya çıkmaktadır.



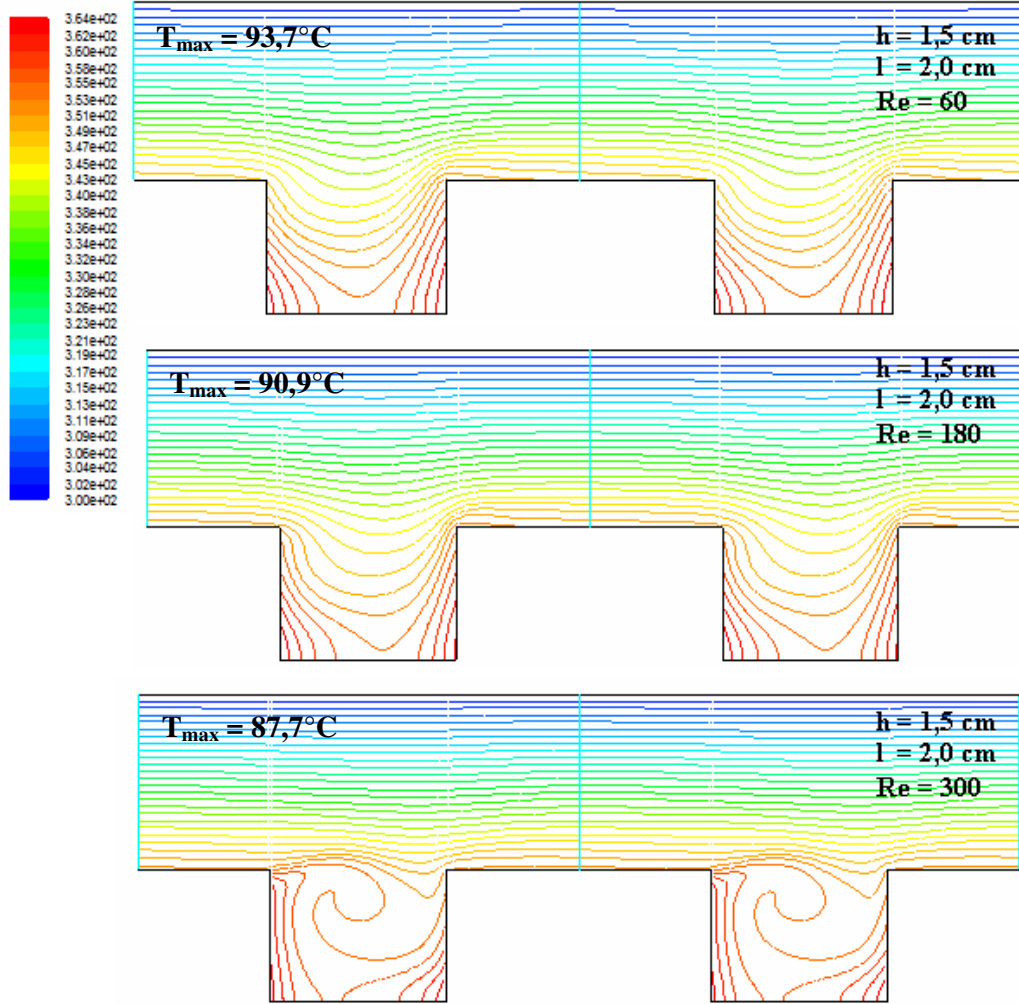
Şekil 4.6a : Isı kaynağı yüksekliğinin (h) sıcaklık dağılımına etkisi ($Re = 100$, $l = 3$ cm).

Bu farklı durum Şekil 4.6b’de gösterilen akım fonksiyonu eğrileri ile açıklanabilir. Şekil 4.6b’de yiv yüksekliğinin akım fonksiyonuna etkisini gösterilmektedir. Yiv yüksekliğinin artmasıyla (kanal giriş kesiti azaldığı için) soğutucu akışkanın hızı beklendiği gibi artmaktadır. Bu artan hız değerleri nedeniyle, yiv yüksekliği $h = 2,3$ cm için yiv içerisinde ikincil vorteksler oluşmakta, bu da toplam ısı miktarı artmasına rağmen, maksimum sıcaklıkta düşüşe neden olmaktadır (bkz Şekil 4.6a).



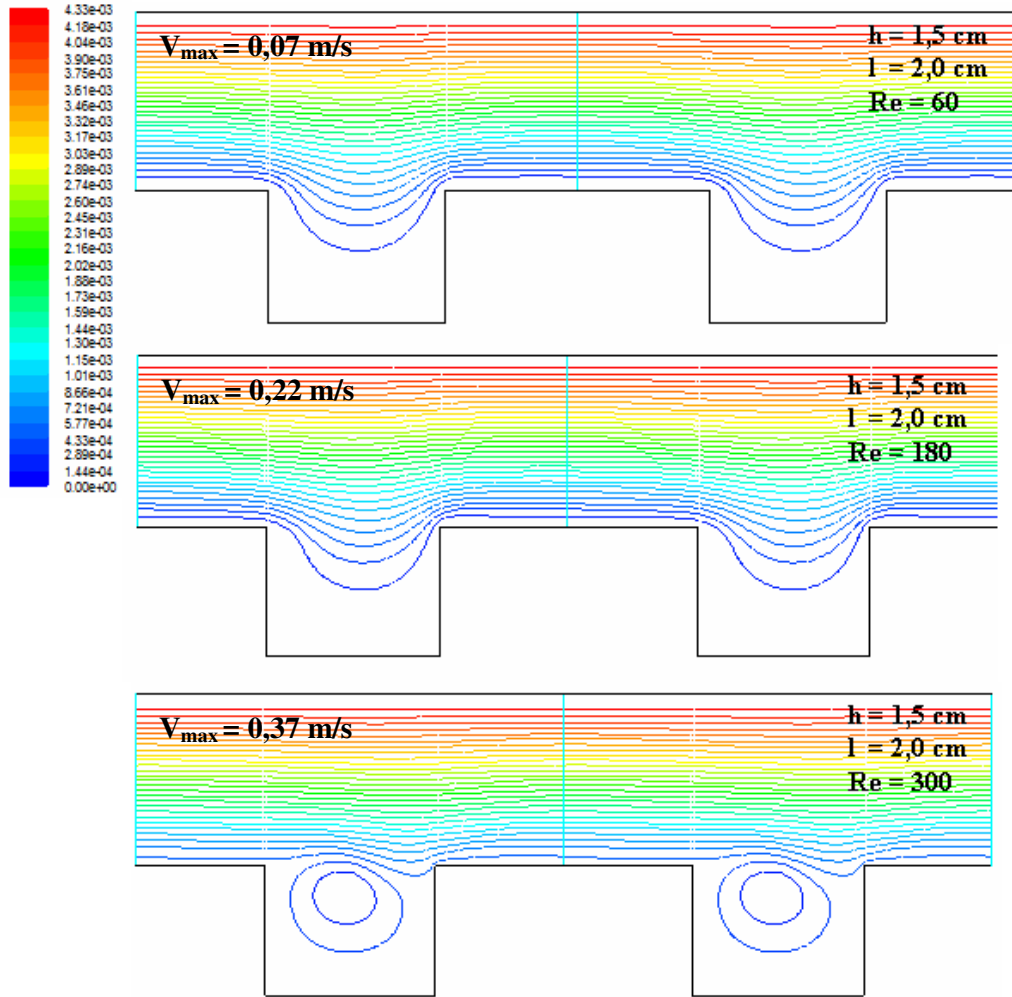
Şekil 4.6b : Isı kaynağı yüksekliğinin (h) akım fonksiyonuna etkisi ($Re = 100$, $l = 3$ cm).

Yivli kanal içerisindeki sıcaklık ve akış karakteristiklerinin daha sonraki optimizasyon analizlerinde kullanılacak geometrik ve akış parametreleriyle değişiminin belirlenmesine yönelik olmak üzere, Şekil 4.7a'da sabit bir yiv geometrisi için ($h = 1,5$ cm, $l = 2$ cm) Reynolds sayısının kanal içindeki sıcaklık dağılımına etkisi gözlemlenmiştir. Reynolds sayısı arttıkça havanın kanala giriş hızı artacağından, sabit geometri için, tasarımla olan ısı geçişi artacak, dolayısıyla kanal içindeki sıcaklık düşecektir (bkz. 4.7a).



Şekil 4.7a : Reynolds sayısının sıcaklık dağılımına etkisi ($h = 1,5$ cm, $l = 2$ cm).

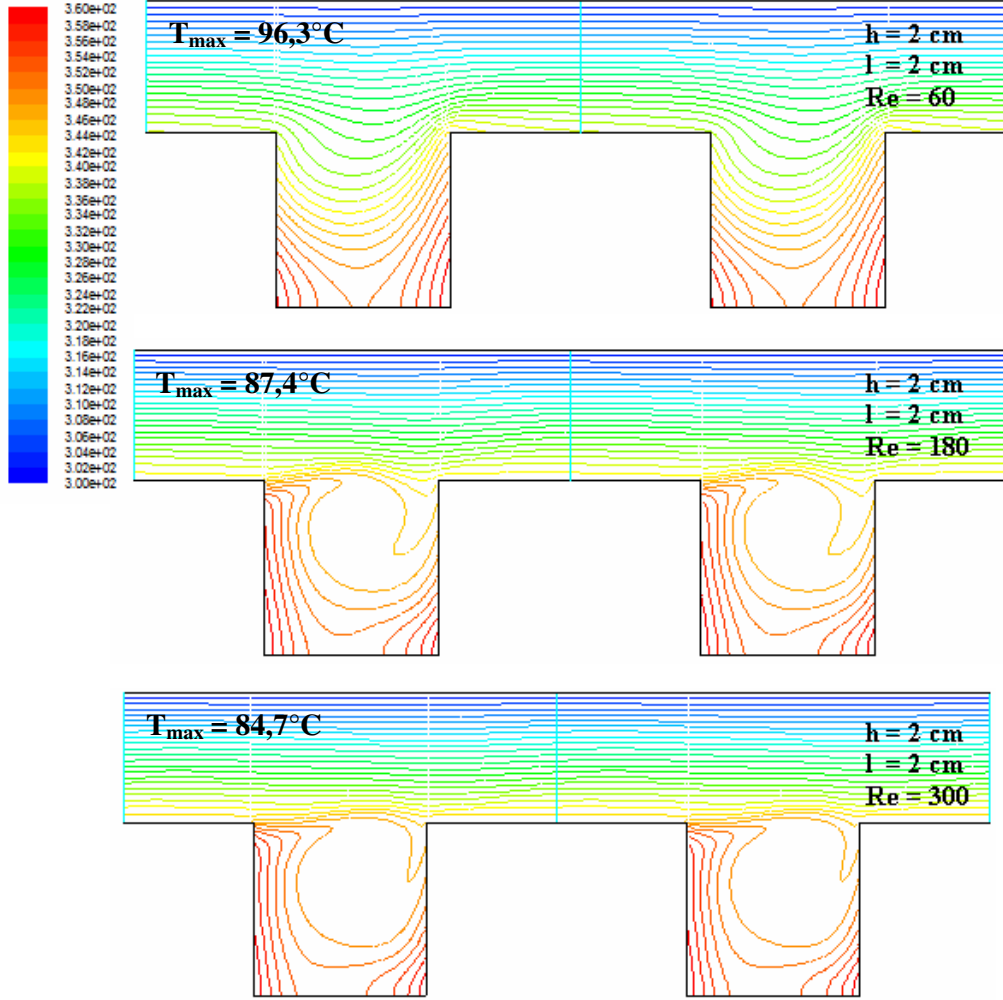
Şekil 4.7b’de ise akım fonksiyonu Reynolds sayısına bağlı olarak verilmiştir. Reynolds sayısı yüksek değerlere ulaşınca yiv içerisinde büyük bir vorteks oluşmaktadır. Bu vorteksin yiv içindeki ısıtıcı yüzeyleri süpürerek soğutulmasını sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 4.7b : Reynolds sayısının akım fonksiyonuna etkisi ($h = 1,5$ cm, $l = 2$ cm).

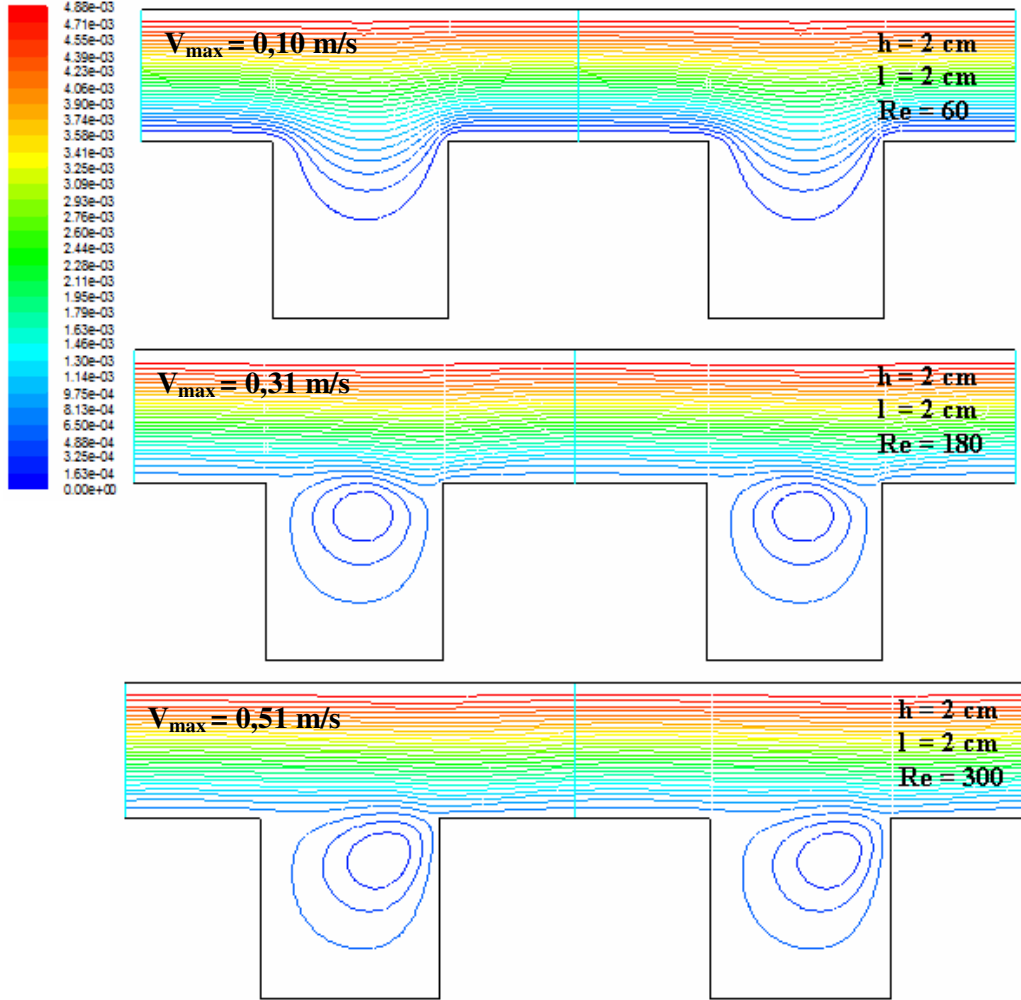
Şekil 4.8a’da ise farklı bir yiv geometrisi için ($h = 2$ cm, $l = 2$ cm) Reynolds sayısının kanal içindeki sıcaklık dağılımına etkisi gözlemlenmiştir. Şekil 4.7a’ya benzer olarak Reynolds sayısı arttıkça sıcaklık dağılımı azalmaktadır. Ancak, Şekil 4.7a ve 4.8a’yı karşılaştırdığımız zaman, $Re = 60$ için, beklenen bir durum olmak üzere, yiv yüksekliği arttıkça, maksimum sıcaklık artmaktadır. Örnek olarak, yiv yüksekliği $h = 1,5$ cm için, $T_{max} = 93,7$ °C iken, yiv yüksekliği $h = 2$ cm’ye çıkınca $T_{max} = 96,3$ °C dir. Ancak, $Re = 180$ ve $Re = 300$ için durum tam tersidir.

Örnek olarak, $Re = 180$ için; yiv yüksekliği $h = 1,5$ cm için, $T_{max} = 90,9$ °C iken, yiv yüksekliği $h = 2$ cm'ye çıkınca $T_{max} = 87,4$ °C'ye gerilemektedir. Isı kaynağı (yiv) yüksekliği arttıkça kanala verilen ısı miktarı artmasına rağmen, taşınım ile olan ısı geçişindeki artış nedeniyle sıcaklık düşüşü görülmektedir. Şekil 4.8a'daki $Re = 60$ için verilen eş sıcaklık eğrileri, iletim ağırlıklı ısı geçişini karakterize ederken, $Re = 180$ ve $Re = 300$ için verilen eş sıcaklık eğrileri taşınım ağırlıklı ısı geçişinin etkin olduğunu açık bir şekilde göstermektedir.



Şekil 4.8a : Reynolds sayısının sıcaklık dağılımına etkisi ($h = 2$ cm, $l = 2$ cm).

Şekil 4.8b’de ise akım fonksiyonunun etkisi Reynolds sayısına bağlı olarak verilmiştir. Reynolds sayısı yüksek değerlere ulaşınca kanalın orta kısmında büyük bir vorteksin oluştuğu dolayısıyla, taşınım ile ısı geçişi ile etkin bir soğutmanın sağlandığı görülmektedir. Şekil 4.8a’da verilen eş sıcaklık eğrileri ile şekil 4.8b’de verilen akım fonksiyonu eğrileri tam bir uyumluluk içindedir.



Şekil 4.8b : Reynolds sayısının akım fonksiyonuna etkisi ($h = 2 \text{ cm}$, $l = 2 \text{ cm}$).

4.4 Kriging Modelinin Oluşturması

4.4.1 İki boyutlu Kriging modeli

Optimizasyon yapılacak bir parametre uzayında, öncelikle her bir parametrenin alabileceği sınır değerler belirlenmelidir. Kanal geometrisi için, ısı kaynağı yüksekliğinin $0,5 < h < 2,5$ cm arasında, ısı kaynakları arasındaki mesafenin $1,0 < l < 4,0$ cm arasında değişmesine izin verilmiştir. Tüm çözümlerde Reynolds sayısı $Re = 250$ değerinde sabit tutulmuştur.

Bundan sonra, mevcut iki boyutlu parametre uzayı $[h, l]$ için Latin Hiperküp Örnekleme algoritması ile 30, 60, 120 ve 240 adet LHS tasarım noktası belirlenmiş ve bu parametre değerleri için Fluent[®] yazılımını kullanarak CFD simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon sonuçları, ısı kaynağı üzerindeki maksimum sıcaklık değerini (T_{max}) gösterecek şekilde EK 2’de verilen çizelgelerde gösterilmiştir (30 adet LHS noktası için Çizelge A.1 , 60 adet LHS noktası için Çizelge A.2, 120 adet LHS noktası için Çizelge A.3 ve 240 adet LHS noktası için Çizelge A.4). Tüm çözümlerde, momentum ve enerji denklemleri birinci ve ikinci merteye olmak üzere iki farklı doğrulukta çözüm yöntemi kullanarak gerçekleştirilmiş olup, ilgili çizelgelerde her iki çözüme ait kanal içerisinde ortaya çıkan maksimum sıcaklıkların değeri gösterilmiştir. Bu çalışmanın amaçlarından bir tanesi, çizelgelerde farklı LHS noktaları için verilen maksimum sıcaklıklar veritabanı oluşturmak üzere, maksimum sıcaklığı minimize edecek bir yiv geometrisi $[h, l]$ değerinin etkin ve hızlı bir şekilde belirlenmesini temin etmek üzere, Kriging ve Benzetiilmiş Tavlama algoritmalarının bir arada kullanan bir meta-algoritmanın geliştirilmesi ve test edilmesidir.

4.4.2 Üç boyutlu Kriging modeli

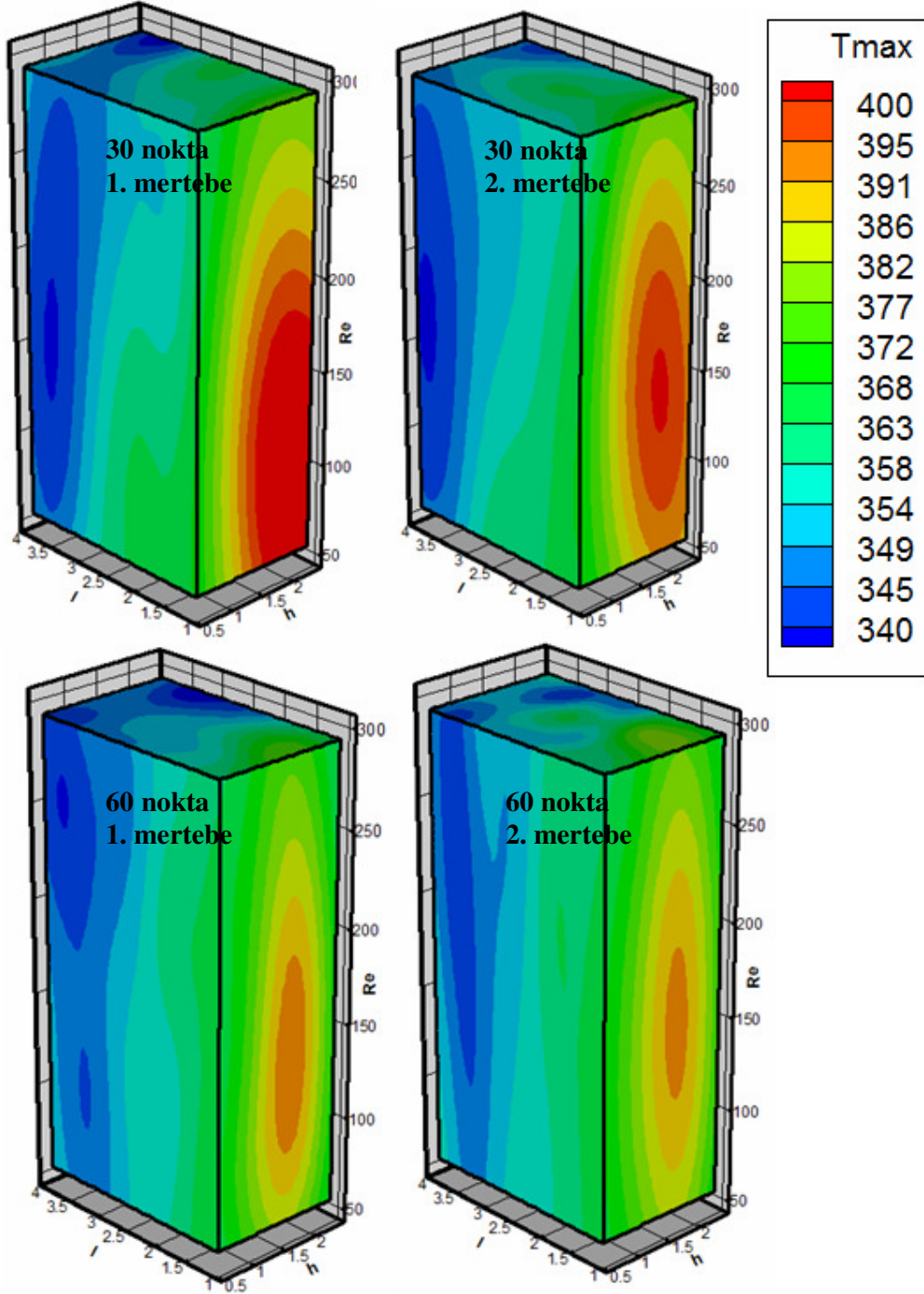
Bu bölümde de ısı kaynağı yüksekliğinin (h) ve ısı kaynakları arasındaki mesafenin (l) sınır değerleri bir önceki bölümde verilen sınır değerleriyle aynıdır. Ancak bu kez Reynolds sayısı sabit tutulmamış, $50 < Re < 300$ arasında değişmesine izin verilmiştir. Reynolds sayısının farklı değerler almasıyla parametre sayısı üçe çıkarılmıştır; böylece problem üç boyutlu hale getirilmiştir.

Bundan sonra, göz önüne alınan üç boyutlu parametre uzayı $[h, l, Re]$ için Latin Hiperküp Örnekleme algoritması ile (15), 30 ve 60 adet LHS noktası belirlenmiş

olup bu parametre değerleri için yine Fluent[®] yazılımını kullanarak CFD simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon sonuçları, ısı kaynağı üzerindeki maksimum sıcaklığı değerini (T_{max}) gösterecek şekilde Ek 3’de verilen çizelgelerde gösterilmiştir (15 adet LHS noktası için Çizelge A.5, 30 adet LHS noktası için Çizelge A.6 ve 60 adet LHS noktası için Çizelge A.7). CFD simülasyonları, momentum ve enerji denklemleri birinci ve ikinci mertebe olmak üzere iki farklı doğrulukta çözüm yöntemi kullanarak gerçekleştirilmiştir.

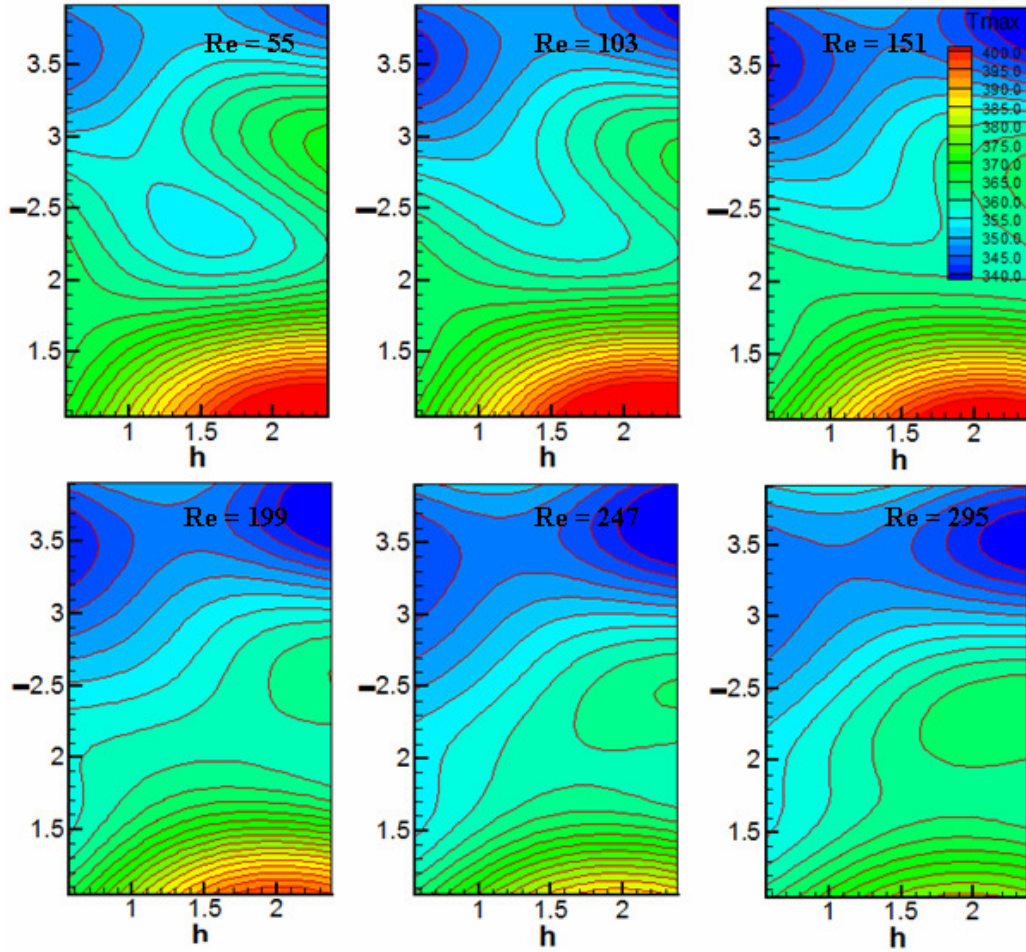
Üç boyutlu parametre uzayı için öncelikle 15 adet LHS noktası için CFD analizlerinden veri tabanı oluşturulmuştur. Ancak örnekleme sayısı çok yetersiz olduğu için 15 nokta için Kriging modeli kurmaya gerek görülmemiştir. Bu veri tabanı daha sonra 30 ve 60 örnekleme noktası ile kurulan Kriging modellerinin performansının ölçülmesinde kullanılmıştır.

Latin Hiperküp Örnekleme algoritması ile parametre uzayı için 30 ve 60 örnekleme noktasının CFD simülasyon sonuçları kullanılarak Kriging modelleri elde edilmiştir. Probleme ait parametre uzayı üç boyutlu olduğu için $[h, l, Re]$ üç boyutlu Kriging modeli elde edilmiş olup, bu modeller kullanılarak söz konusu parametre uzayının çözünürlüğü artırılarak $40 \times 40 \times 61$ (toplam 97600) noktada model çözümü elde edilmiştir. Elde edilen model çözümleri, LHS nokta sayısı ve Fluent[®] yazılımında kullanılan sayısal yöntemin mertebesine bağlı olarak Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Şekil 4.9’da eksenler h , l ve Re sayısına karşılık gelmekte olup, bu etkilere bağlı maksimum sıcaklık değerinin (T_{max}) değişimi gösterilmiştir. LHS nokta sayısının etkisi şekilde görülmektedir. LHS nokta sayısı artırılarak, oluşturulan modelin doğruluğu doğal olarak artacaktır. Ancak, belli bir nokta sayısından sonra model sonucuna etki etmeyeceği bilinmektedir. Kriging modellerinin etkinliği ve performanslarının ayrıntılı olarak incelenmesi için bilinen, analitik fonksiyonlar için modeller geliştirilmiş ve LHS nokta sayısının etkisi ayrıntılı olarak Ek 1’de incelenmiştir. Şekil 4.10 – 4.13’de 30 ve 60 LHS nokta sayısı kullanılarak oluşturulan Kriging modellerinin tahminleri 2 boyutlu parametre uzayında gösterilmiştir. Şekil 4.14’de ise Kriging modeli ile (tasarım dışı yani oluşturulan modelde yer almayan) CFD sonuçları arasındaki karşılaştırma verilmiştir. Kriging modelinin CFD sonuçlarıyla uyum içinde olduğu görülmektedir. LHS nokta sayısının Kriging performansına olan etkisi, gerek Ek 1’de açıklandığı gibi, gerekse de, Şekil 4.10 – 4.13’de görülmektedir (**Güneş ve diğ., 2008**).



Şekil 4.9 : 30 ve 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için ısı kaynağı üzerinde oluşan maksimum sıcaklık T_{max} [K] dağılımının parametre uzayındaki [h , l , Re] değişimi (Güneş ve diğ., 2008)

Şekil 4.10a'da kanal problemini oluşturan üç değişken parametreye $[h, l, Re]$ ait 30 Latin Hiperküp Örnekleme noktasının üç boyutlu Kriging modelinin sonuçları görülmektedir.

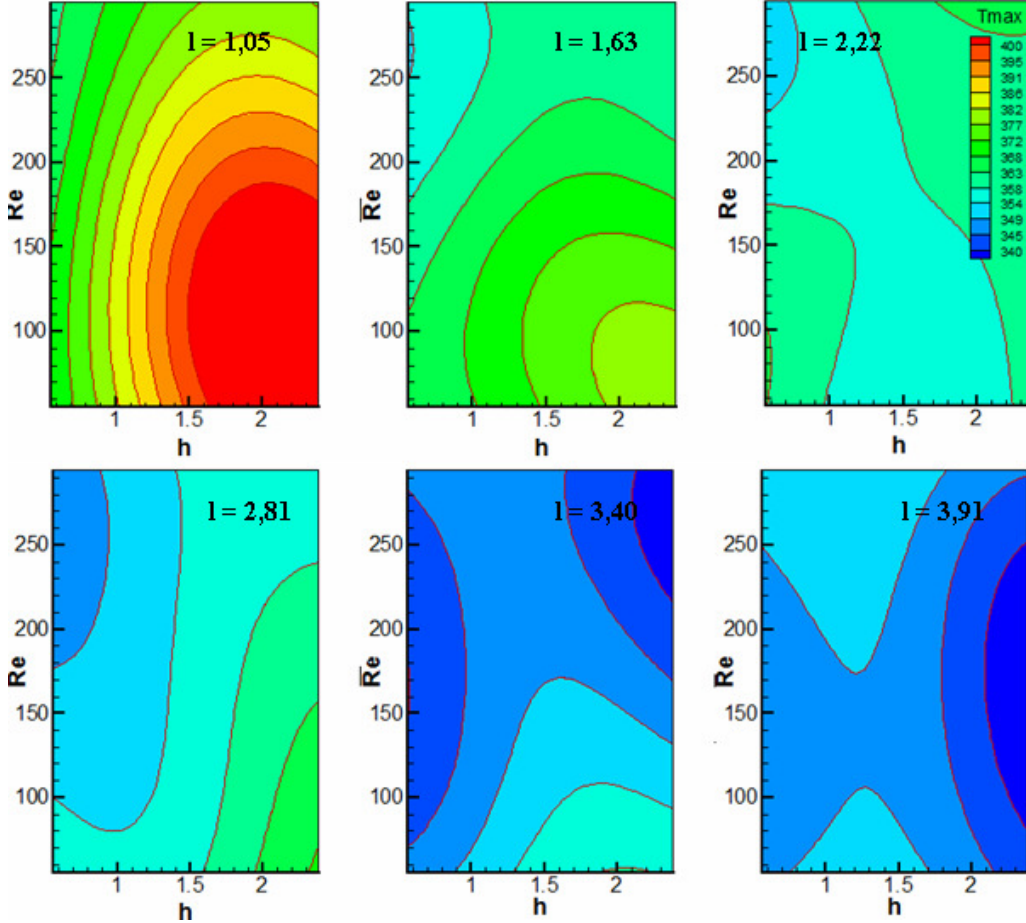


Şekil 4.10a : 30 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve ısı kaynakları arasındaki mesafenin maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 1. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.

Kanalın yiv yüksekliği $0.5 < h < 2.5$ aralığındayken ısı kaynakları arasındaki mesafe $1.0 < l < 4.0$ aralığında değişmektedir. Şekil 4.9'da görülen 30 LHS noktası için T_{max} 'ın 1. mertebe doğruluklu sayısal çözümüne ait grafiğinden Reynolds sayısının istenilen farklı değerleri için kesitler alınarak oluşturulan Kriging modeli hakkında Şekil 4.10a bilgi vermektedir. Buna göre örneğin yiv yüksekliğinin fazla, ısı kaynakları arasındaki mesafenin düşük olduğu modelde T_{max} 'ın (maksimum sıcaklık) en yüksek değere yaklaştığı görülmektedir. Ancak aynı model düşük yiv yüksekliğine sahip olduğu ve ısı kaynakları arasındaki mesafenin yüksek olduğu

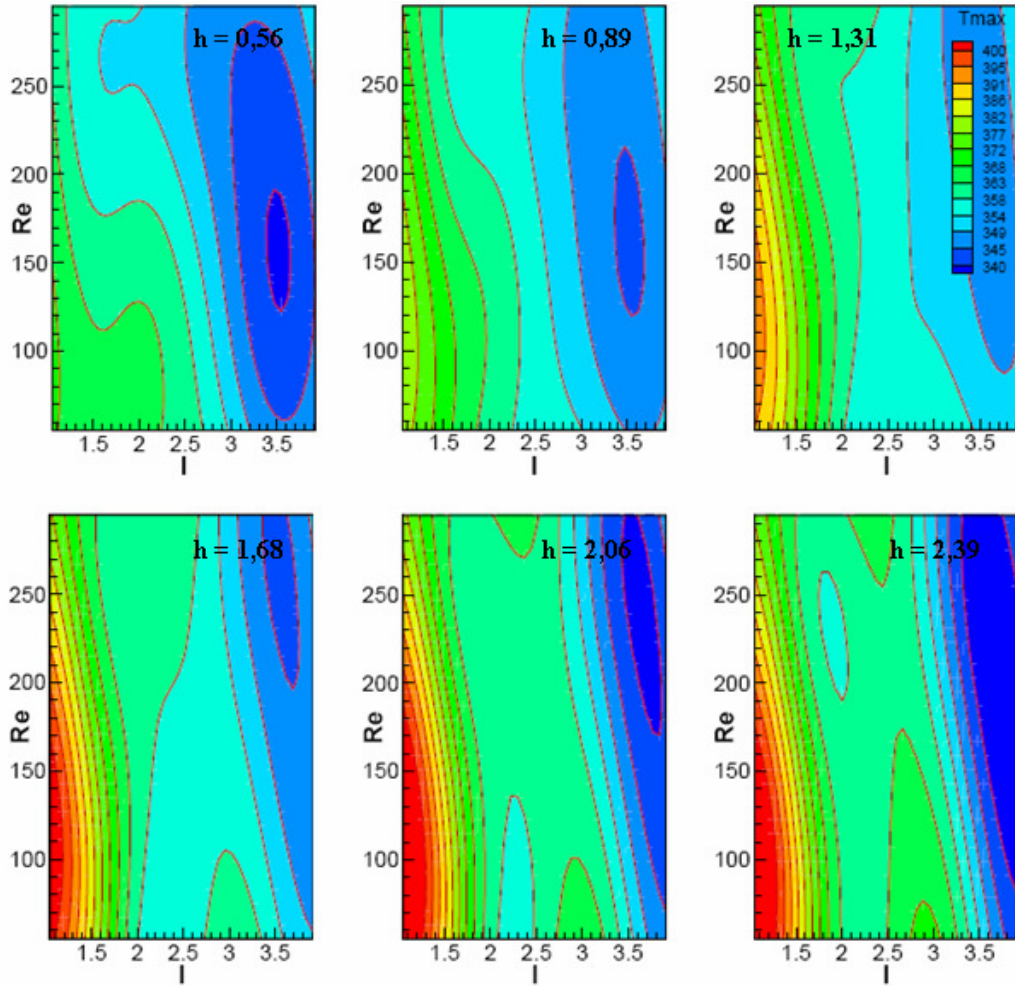
durumda T_{\max} 'ın en düşük değere yaklaştığı görülmektedir. $50 < Re < 300$ aralığında değişen Reynolds sayısının en yüksek değerine yaklaştıkça maksimum sıcaklık değerinin giderek düştüğü gözlemlenmektedir.

Şekil 4.10b'de yine aynı modelin bu kez ısı kaynakları arasındaki mesafenin istenilen farklı değerlerde alınan kesitlerinin Reynolds sayısı ve kanalın yiv yüksekliği için bilinen aralıklardaki değişimi verilmiştir. l 'nin şekildeki en küçük değeri için Reynolds sayısının giderek küçüldüğü ve kanal yiv yüksekliğinin giderek artan değerlerinde maksimum sıcaklık değerinin artışa geçtiği görülmektedir. l 'nin şekildeki en büyük değerine yaklaşıldıkça maksimum sıcaklık değerinin düştüğü gözlemlenmektedir.



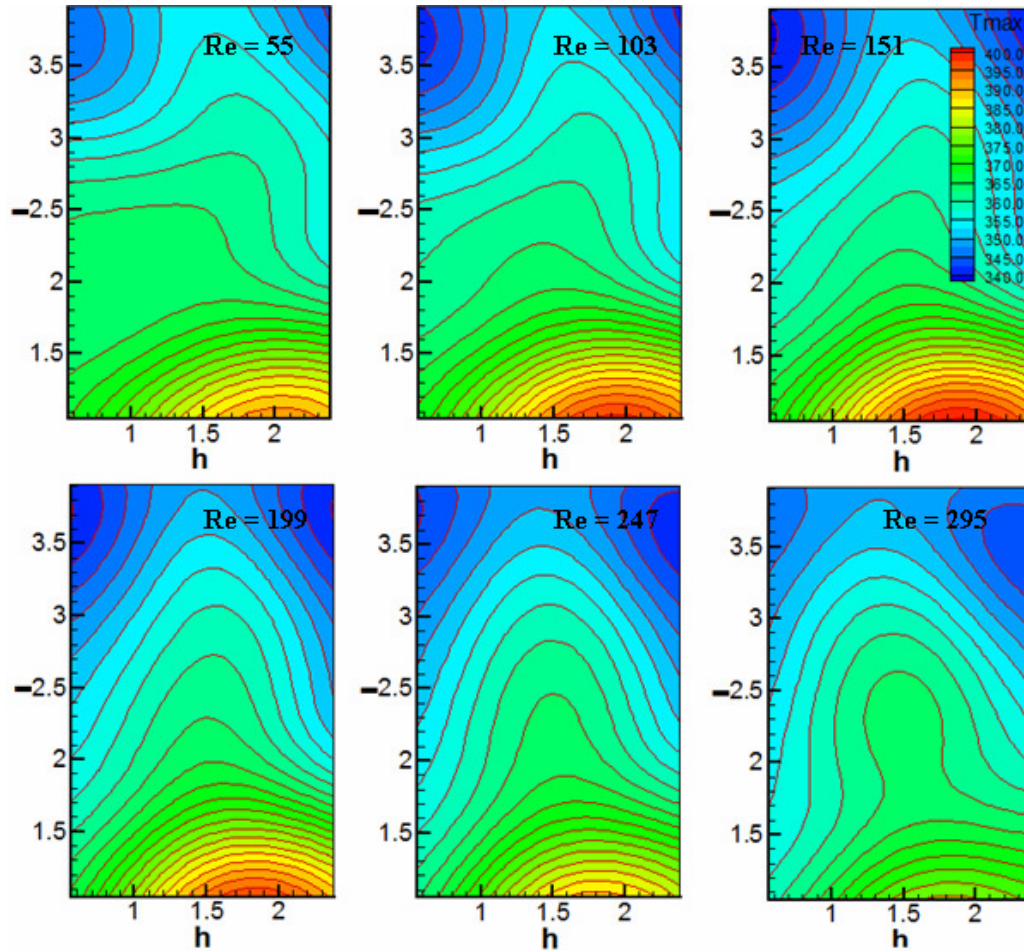
Şekil 4.10b : 30 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 1. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.

Şekil 4.10c’de 30 LHS noktası için kurulan modeldeki kanalın yiv yüksekliğinin istenilen farklı değerlerde alınan kesitlerinin havanın Reynolds sayısı ve ısı kaynakları arasındaki mesafe için bilinen aralıklardaki değişimi verilmiştir. h ’nin şekildeki en küçük değeri için Reynolds sayısının giderek küçüldüğü ve ısı kaynakları arasındaki mesafenin giderek arttığı değerlerde maksimum sıcaklık değerinin düştüğü görülmektedir. h ’nin şekildeki en büyük değerine yaklaşıldıkça l ’nin ve Re ’nin azalan değerlerine doğru maksimum sıcaklık değerinin yükseldiği görülmektedir.



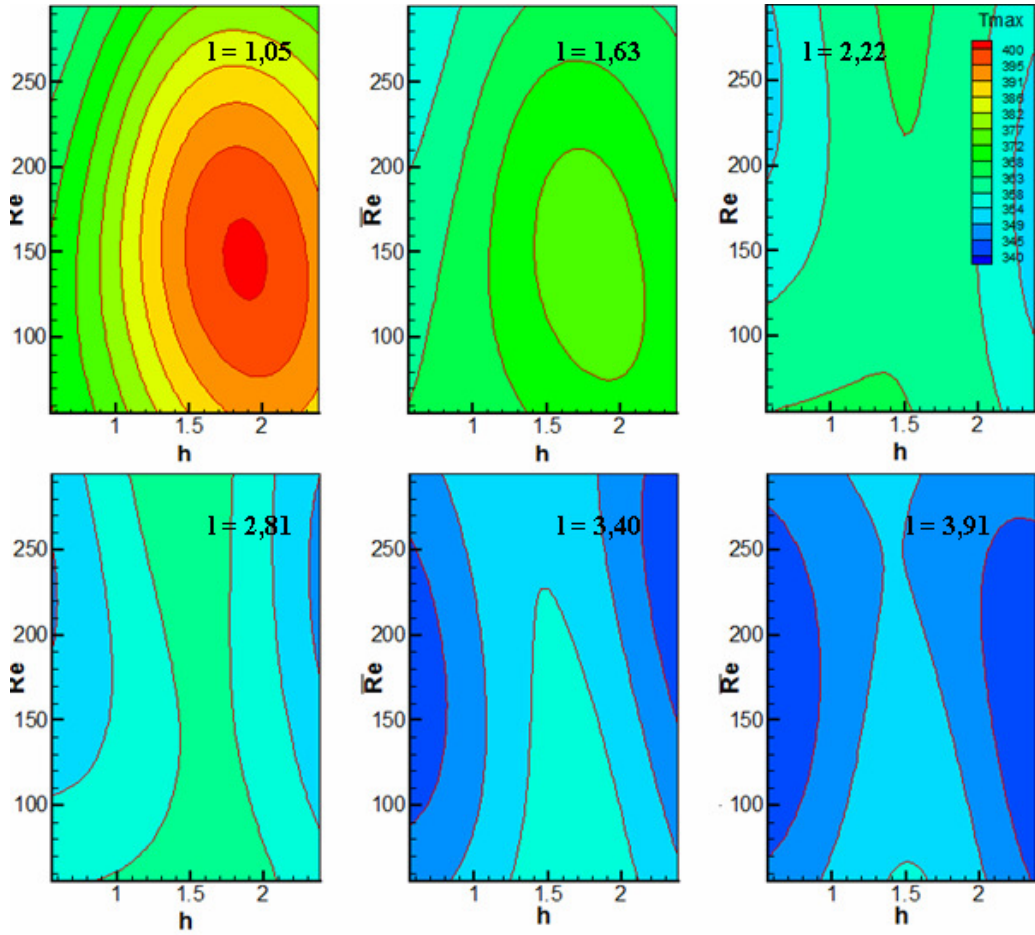
Şekil 4.10c : 30 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynakları arasındaki mesafe l ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 1. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.

Şekil 4.9’da görülen 30 LHS noktası için T_{max} ’ın 2. mertebe doğruluklu sayısal çözümüne ait grafiğinden Şekil 4.11a Reynolds sayısının istenilen farklı değerleri için kesitler alınarak oluşturulan Kriging modeli hakkında bilgi vermektedir. 2. mertebe doğruluklu sayısal çözümlerinin 1. mertebe doğruluklu sayısal çözümlere oranla daha hassas sonuçlar verdiği bilinmektedir. Buna göre örneğin $Re = 55$ için 1. mertebe doğruluklu çözüm ile 2. mertebe doğruluklu çözümü kıyasladığımız zaman yiv yüksekliğinin fazla, ısı kaynakları arasındaki mesafenin düşük olduğu aralıkta 2. mertebe çözümde maksimum sıcaklığın yüksek değerlere yaklaştığı ancak bu değer 1. mertebe çözümdeki değerden daha düşük değerde olduğu görülmektedir. Bu sonuç her iki çözümde de T_{max} için verilen renk skalasından görülebilir. Bunun dışında 1. mertebe çözümde olduğu gibi Reynolds sayısının yüksek değerine yaklaştıkça maksimum sıcaklık değerinin giderek düştüğü görülmektedir.



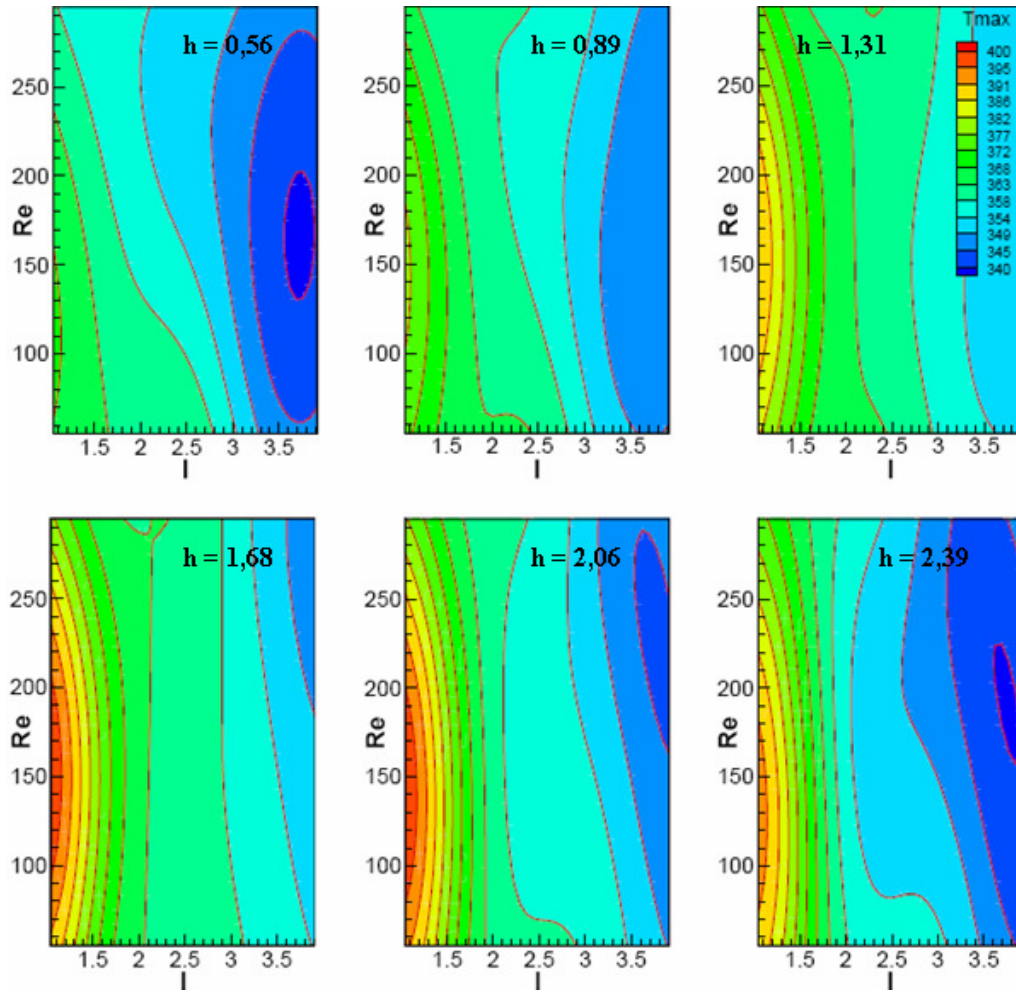
Şekil 4.11a : 30 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve ısı kaynakları arasındaki mesafenin maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 2. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.

Şekil 4.11b’de yine aynı modelin bu kez ısı kaynakları arasındaki mesafenin istenilen farklı değerlerde alınan kesitlerinin havanın Reynolds sayısı ve kanalın yiv yüksekliği için bilinen aralıklardaki değişimi verilmiştir. Isı kaynakları arasındaki mesafenin şekildeki en küçük değeri için ($l = 1,05$ cm) 1. ve 2. mertebe çözümler kıyaslanacak olursa 2. dereceden çözüm için Reynolds sayısının $Re \approx 150$ olduğu ve kanal yiv yüksekliğinin giderek artan değerlerinde maksimum sıcaklık değerinin artışa geçtiği ancak 1. mertebe çözüme oranla bu değer daha düşük olduğu söylenebilir. 1. dereceden çözümde olduğu gibi burada da l ’nin şekildeki en büyük değerine yaklaşıldıkça maksimum sıcaklık değerinin düştüğü görülebilmektedir.



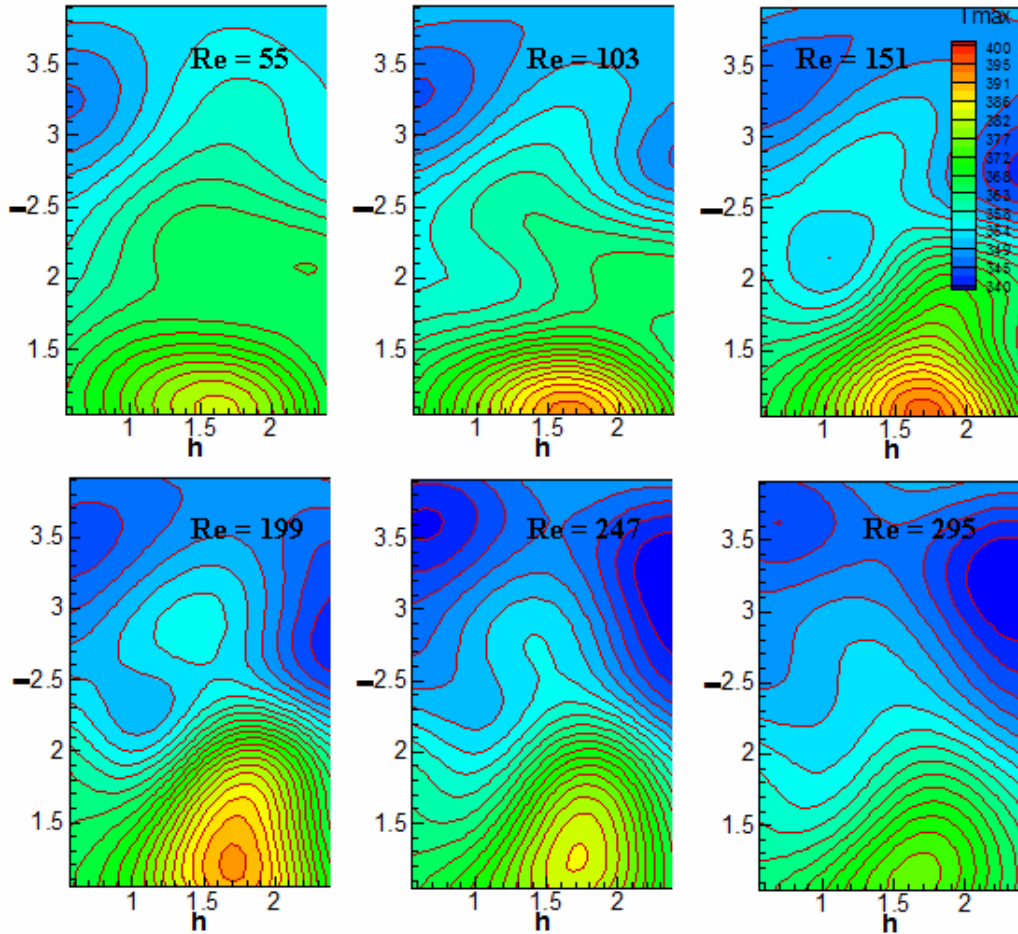
Şekil 4.11b : 30 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 2. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.

Şekil 4.11c’de kanalın yiv yüksekliğinin istenilen farklı değerlerde alınan kesitlerinin havanın Reynolds sayısı ve ısı kaynakları arasındaki mesafe için bilinen aralıklardaki değişimi verilmiştir. 1. ve 2. mertebe doğruluklu çözümlerin her ikisinde de h 'nin şekildeki en küçük değeri için ($h = 0,56$ cm) Reynolds sayısının giderek küçüldüğü ve ısı kaynakları arasındaki mesafenin giderek arttığı değerlerde maksimum sıcaklık değerinin düştüğü görülmektedir. h 'nin şekildeki en büyük değerine yaklaştıkça l 'nin ve Re 'nin azalan değerlerine doğru maksimum sıcaklık değerinin yükseldiği görülmektedir.



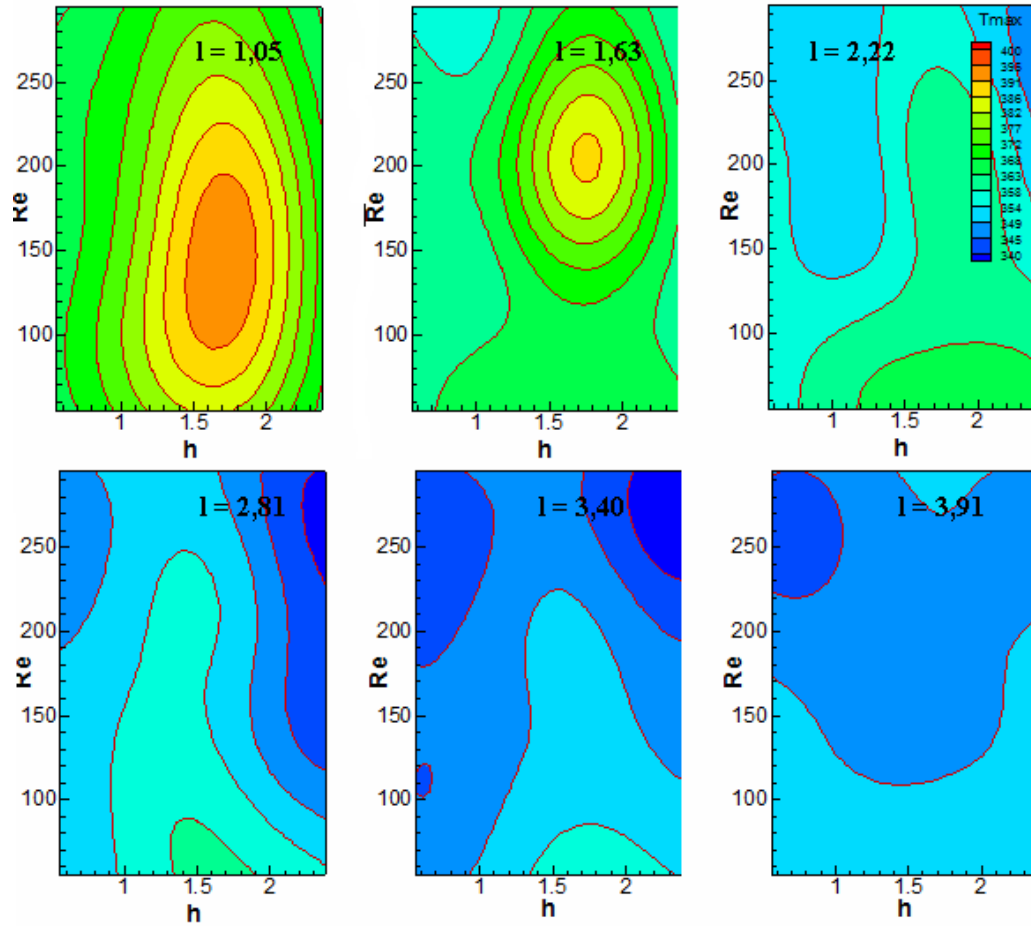
Şekil 4.11c : 30 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynakları arasındaki mesafe l ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 2. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.

LHS nokta sayısının artmasıyla oluşturulan modelin doğruluğunun artacağı bilinmektedir. Şekil 4.12’de LHS nokta sayısı 60’a çıkarılmıştır ve oluşturulan modelde Reynolds sayısının istenilen farklı değerleri için kesitler alınarak T_{\max} ’a ait 2. mertebe doğruluklu sayısal çözümlerin sonuçları gösterilmiştir. Buna göre 30 ile 60 LHS noktasının 1. mertebe doğruluklu sayısal çözümlerini kıyaslayacak olursak nokta sayısı artırılarak elde edilen çözümde maksimum sıcaklığın ulaştığı en yüksek değer 30 LHS noktasıyla oluşturulan modelden daha düşük olduğu görülmektedir. Yani çözümün istenilen gerçek değere daha yaklaştığı görülmüştür.



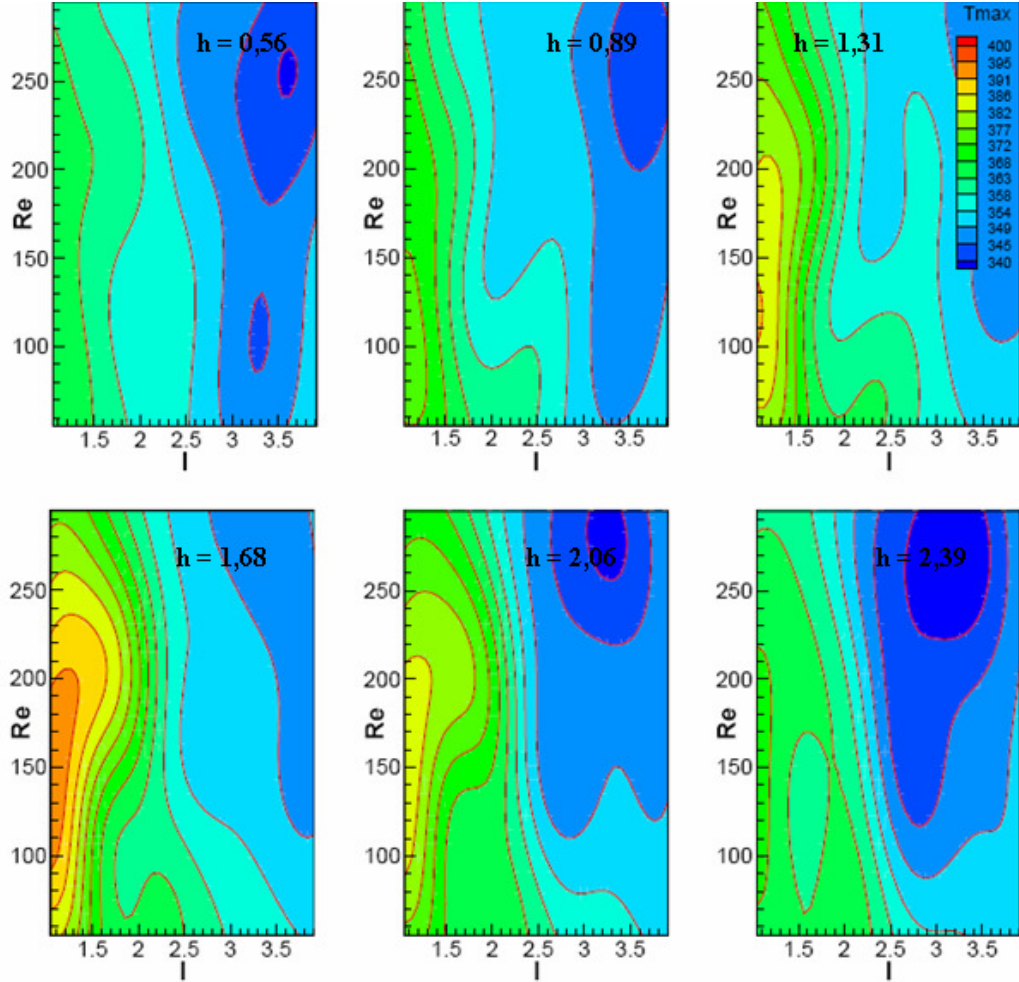
Şekil 4.12a : 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve ısı kaynakları arasındaki mesafenin maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 1. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.

Şekil 4.12b’de yine aynı modelin bu kez ısı kaynakları arasındaki mesafenin istenilen farklı değerlerde alınan kesitlerinin havanın Reynolds sayısı ve kanalın yiv yüksekliği için bilinen aralıklardaki değişimi verilmiştir. Örneğin l nin şekildeki en küçük değeri ($l = 1,05$ cm) için 30 ve 60 LHS noktası karşılaştırılacak olursa 60 LHS noktası için Reynolds sayısının giderek küçüldüğü ve kanal yiv yüksekliğinin giderek artan değerlerinde maksimum sıcaklık değerinin artışa geçtiği ancak 30 LHS noktası için bu değerlerin daha düşük olduğu görülmektedir. Yani çözümün istenilen gerçek değere daha yaklaştığı görülmüştür.



Şekil 4.12b : 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 1. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.

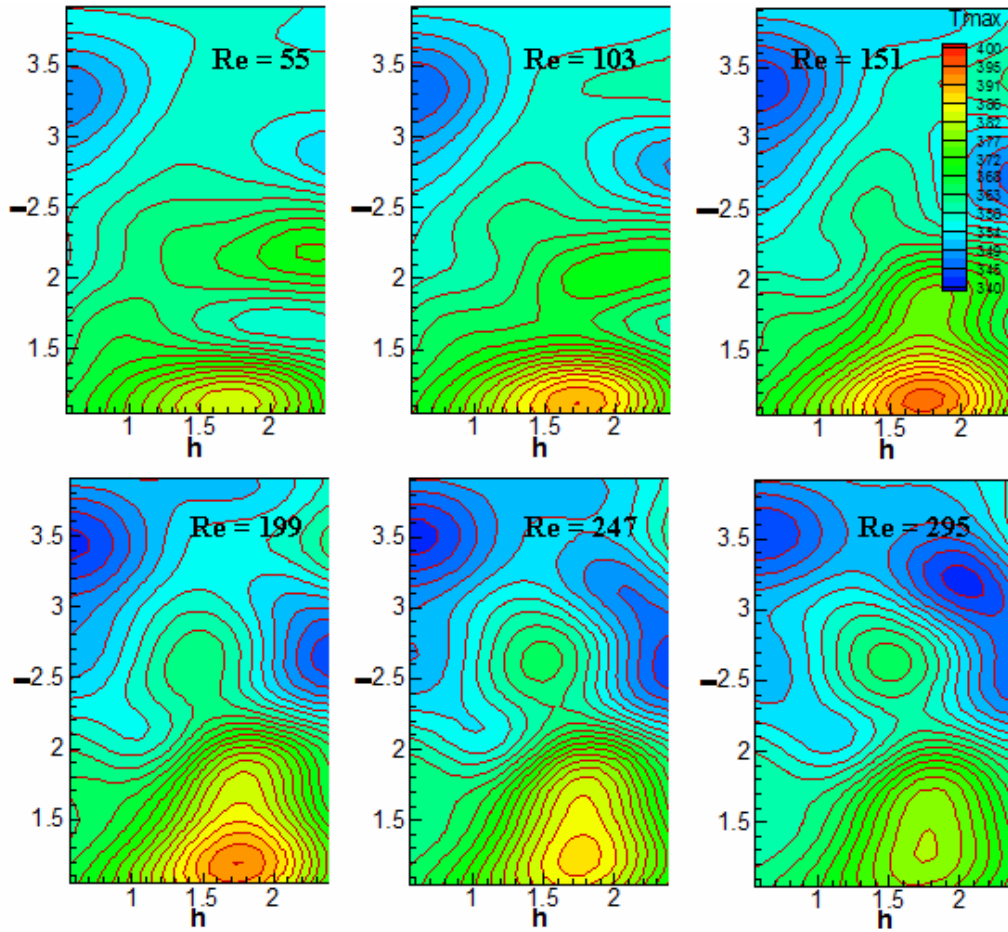
Şekil 4.12c'de nokta sayısı artırılarak kurulan model bu kez kanalın yiv yüksekliğinin istenilen farklı değerlerde alınan kesitlerinin havanın Reynolds sayısı ve ısı kaynakları arasındaki mesafe için bilinen aralıklardaki değişimi vermiştir. Yiv yüksekliğinin $h = 1,68$ cm için alınan kesitinde 30 LHS noktasına oranla maksimum sıcaklık değerinin küçüldüğü gözlemlenmiştir. h 'nin şekildeki en büyük değerine yaklaştıkça l 'nin ve Re 'nin azalan değerlerine doğru maksimum sıcaklık değerinin yükseldiği görülmektedir.



Şekil 4.12c : 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynakları arasındaki mesafe l ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 1. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.

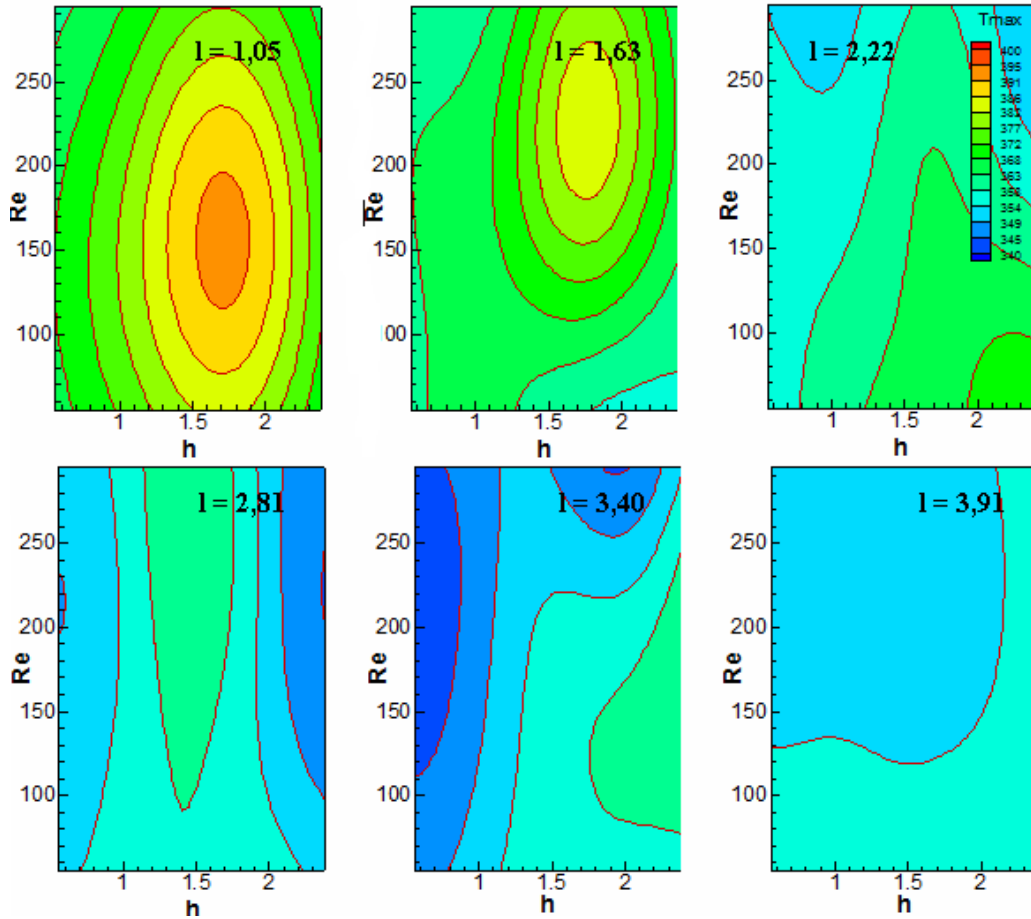
60 LHS noktası için maksimum sıcaklığın 2. mertebe doğruluklu sayısal çözümüne ait Kriging modeli geliştirilmiştir. 2. mertebe doğruluklu sayısal çözümlerinin 1. mertebe doğruluklu sayısal çözümlere oranla daha doğru sonuç verdiği bilinmektedir. Şekil 4.13a-c'de görülen sonuçlar, 2. mertebe doğrulukta 60 LHS nokta sayısı için geçerli Kriging modeline aittir.

Şekil 4.13a'da Reynolds sayısının istenilen farklı değerleri için alınan kesitlerde oluşturulan Kriging modeli sonuçları verilmiştir. 30 LHS noktası ile 2. mertebe doğrulukta oluşturulan model bu yeni modelle kıyaslandığında her iki model de 2. dereceden doğrulukta olmasına rağmen nokta sayısı artırılarak oluşturulan bu yeni modelin daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.



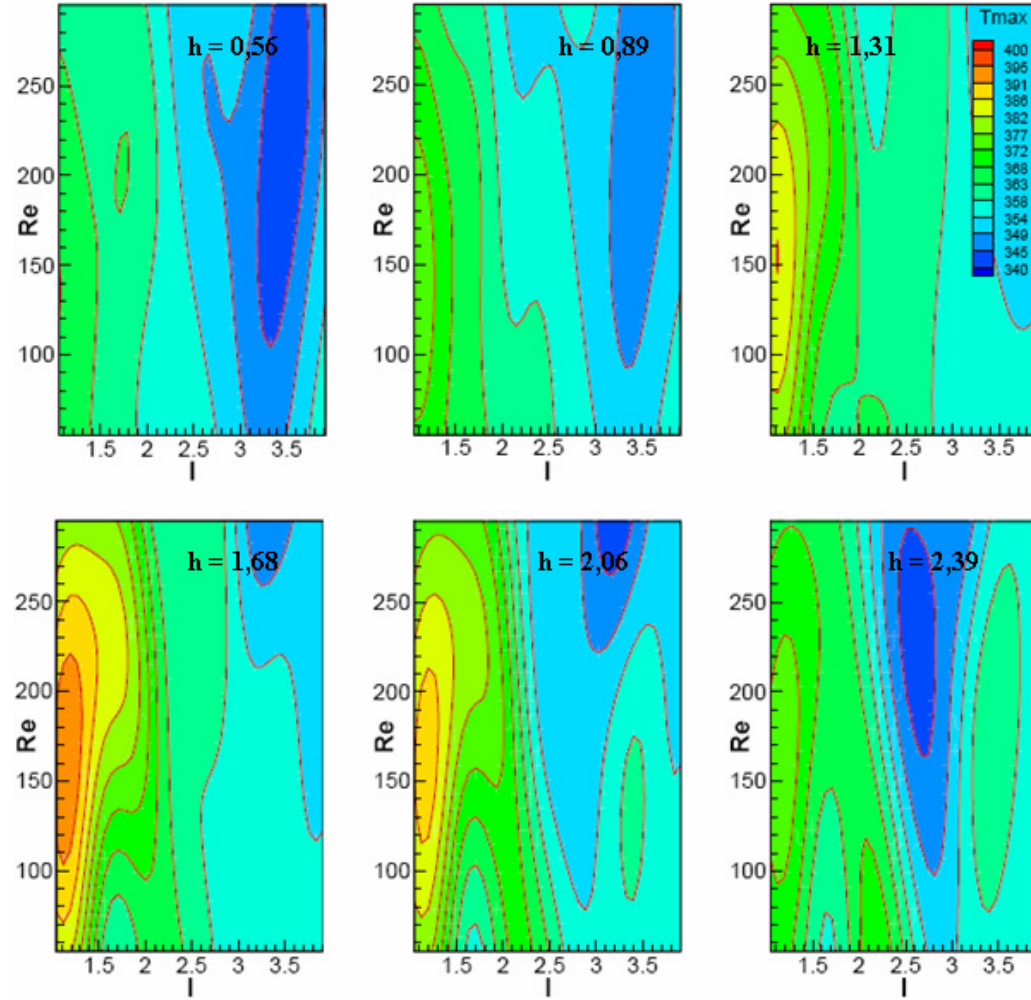
Şekil 4.13a : 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve ısı kaynakları arasındaki mesafenin maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 2. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.

Aynı model Şekil 4.13b’de ısı kaynakları arasındaki mesafenin istenilen farklı değerlerde alınan kesitlerinin havanın Reynolds sayısı ve kanalın yiv yüksekliği için bilinen aralıklardaki değişimi göstermek için kullanılmıştır. 30 LHS noktası ile 2. mertebe doğrulukta oluşturulan model bu 60 LHS noktasından oluşan modelle kıyaslandığında ısı kaynakları arasındaki mesafe arttırıldıkça kurulan bu modelde maksimum sıcaklığın giderek azalma gösterdiği ve son olarak ısı kaynakları arasındaki mesafe $l = 3,91$ cm olduğunda tutarlılık göstererek uygun bir değer aralığında kaldığı görülmektedir.



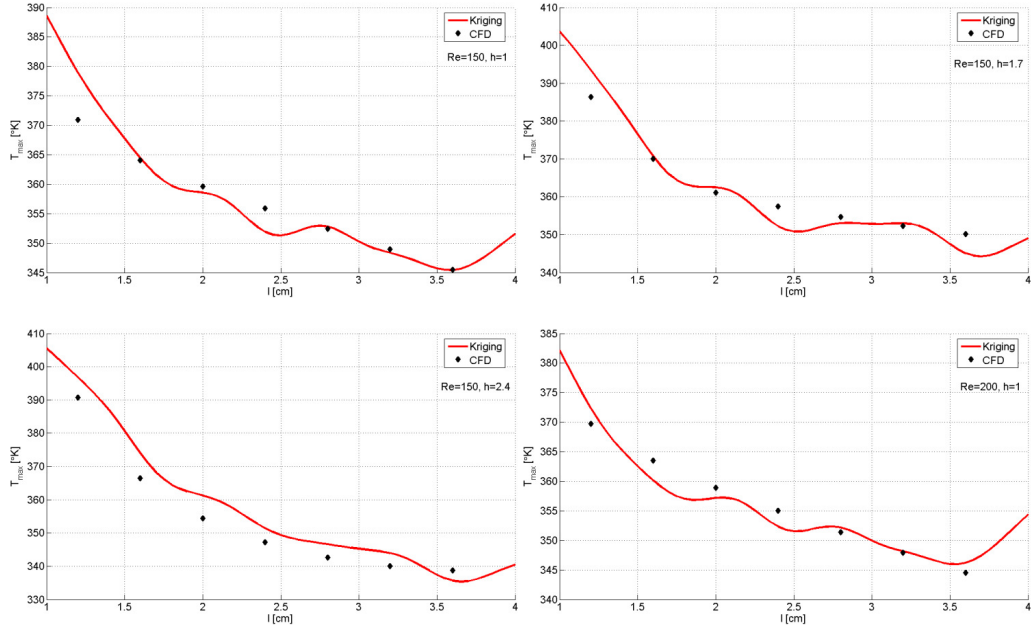
Şekil 4.13b : 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynağı yüksekliği (yiv yüksekliği) h ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 2. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.

Şekil 4.13c’de kanalın yiv yüksekliğinin istenilen farklı değerlerde alınan kesitlerinin Reynolds sayısı ve ısı kaynakları arasındaki mesafe için bilinen aralıklardaki değişimi verilmiştir.



Şekil 4.13c : 60 Latin Hiperküp Örnekleme noktası için üç boyutlu Kriging model sonuçları. Isı kaynakları arasındaki mesafe l ve Reynolds sayısının maksimum sıcaklık değeri üzerine etkisi. Kriging modeli 2. mertebeden doğruluklu sayısal çözüm yönteminden (CFD) elde edilmiştir.

Şekil 4.14, üç boyutlu Kriging modelinin performansını göstermektedir. Şekilde Reynolds sayısı sabit tutulmuştur ($Re = 150$). Farklı yiv yükseklikleri için, ısı kaynakları arasındaki mesafenin maksimum sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir. Siyah noktalı semboller CFD sonuçlarını (1. mertebe çözüm), kırmızı çizgiler ise Kriging modeli tahmini göstermektedir.



Şekil 4.14 : 30 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktasını esas alan Kriging modeline göre ısı kaynakları arasındaki mesafenin (l) maksimum sıcaklığa etkisi. Siyah noktalı semboller CFD sonuçlarını (1. mertebe çözüm), kırmızı çizgiler ise Kriging modeli tahmini göstermektedir.

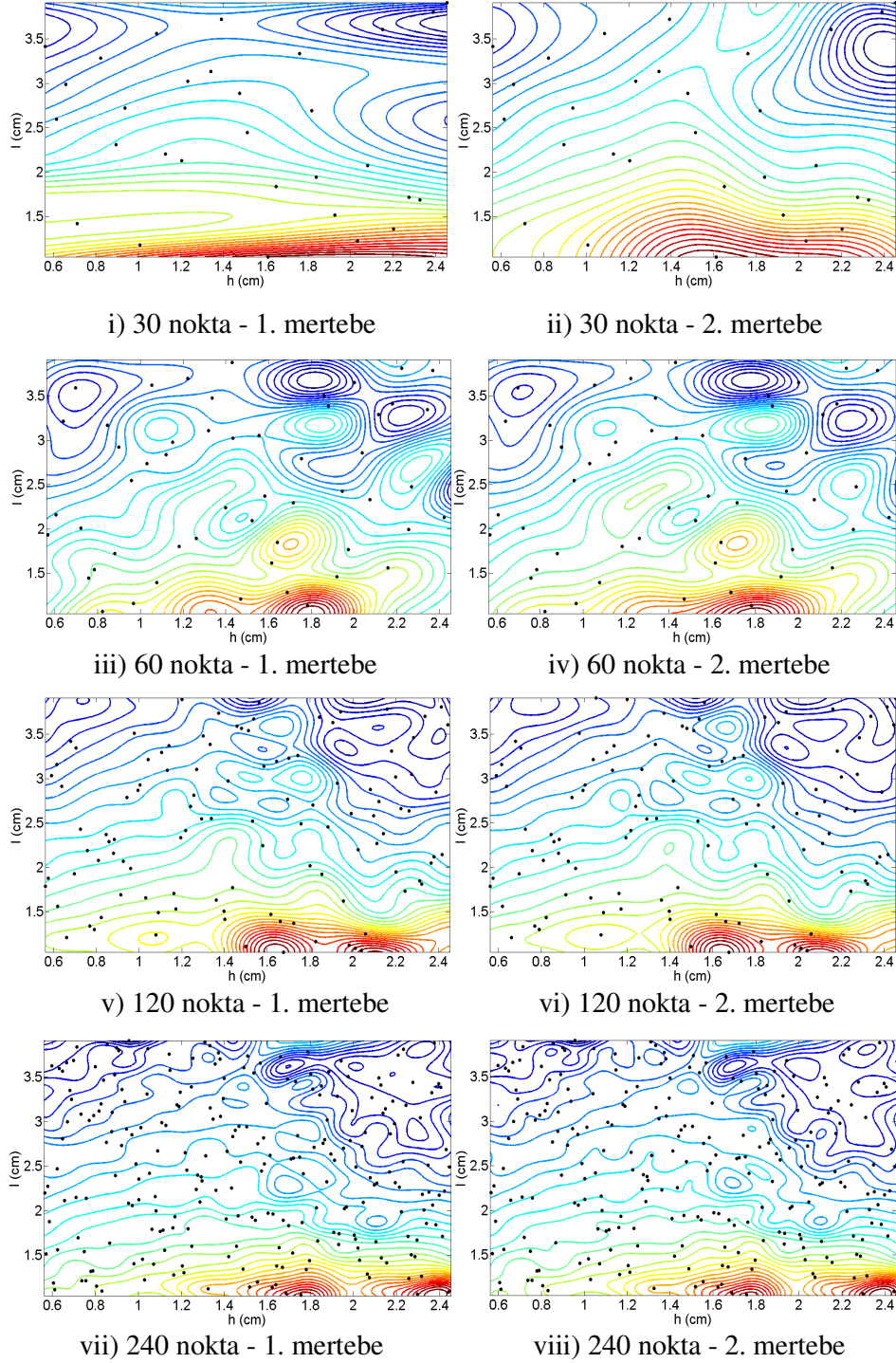
4.5 Kriging-Benzetilmiş Tavlama Meta-Algoritması ile Zorlanmış Taşımın Probleminin Optimizasyonu

Ek 2'deki çizelgelerde verilen Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktaları esas alınarak belirlenen ısı kaynağı yükseklikleri (h) ve ısı kaynakları arasındaki mesafeler (l) için CFD analizleri ile maksimum sıcaklık değerleri bulunduktan sonra 30, 60, 120 ve 240 adet örnekleme noktası için ayrı ayrı Kriging modelleri oluşturulmuştur. Bu model sonuçları, LHS örnekleme sayısı ve çözüm yönteminin mertebesine bağlı olarak şekil 4.15'de gösterilmiştir. Şekil 4.15'de siyah noktalar LHS örnekleme noktalarının konumlarını göstermektedir. Şekil 4.15'den görüldüğü gibi LHS nokta sayısının düşük değerlerinde Kriging modelinin LHS sayısına bağlı olduğu, LHS örnekleme sayısı arttırdıkça modelin yakınsadığı yani örnekleme sayısından büyük oranda bağımsız olduğu görülmektedir. Doğal olarak örnekleme sayısı, problemin optimizasyonu yapılmak istenen parametre uzayındaki karmaşık yapısına/değişimine bağlı olup her bir problem için farklı örnekleme sayısı gerekebilir; ancak yapılan çalışmalar göstermektedir ki, pratik bir kural olarak karmaşık iki boyutlu problemlerin optimizasyonu için LHS örnekleme sayısı 2 parametre için en az 100 olmalıdır. Şekil 4.15'de birinci ve ikinci mertebe doğrulukta gerçekleştirilen CFD sonuçlarına ait Kriging modelleri gösterilmiştir. Çok düşük LHS örnekleme sayıları hariç olmak üzere, sayısal çözüm yönteminin Kriging modeline etkisi sınırlıdır. Şekil 4.15'de 30 LHS noktası kullanılarak elde edilen Kriging modelinde birinci ve ikinci mertebe sayısal çözüm yöntemlerinin sonuçları oldukça farklı iken, bu fark yüksek sayıdaki LHS noktaları için büyük oranda ortadan kalkmaktadır. Çizelge 4.8'de ve 4.9'da birinci ve ikinci mertebe CFD sonuçlarında elde edilen Kriging modellerinin LHS nokta sayısına bağlı olarak performans değerleri gösterilmektedir. Burada, LHS örnekleme noktasına ait olmayan 12 farklı noktada CFD sonuçlarıyla Kriging modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmakta ve rms (root-mean square), karekök ortalama, hataları Çizelge 4.1'de ve 4.2'de verilmektedir. Kullanılan rms hata tanımı:

$$\text{Rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{\max, \text{CFD}} - T_{\max, \text{kriging}})^2} \quad (4.5)$$

şeklinde olup, LHS nokta sayısı artışıyla Kriging modelinin doğruluğunun, önce doğrusal sonra ise, daha yüksek mertebede arttığı görülmektedir. Doğal olarak, en

küçük rms değerinin 240 LHS noktasına ait olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, LHS noktasını artırarak rms değerlerini istenilen ölçüde küçültmek, Kriging modelinin doğruluğu artırmak mümkündür.



Şekil 4.15 : Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) sayısına bağlı olarak oluşturulan Kriging modeli sonuçları. Kriging modelleri (solda) birinci ve (sağda) ikinci mertebeden CFD sonuçlarından elde edilmiştir.

Çizelge 4.1 : Kriging modeli ve CFD analizinden elde edilen maksimum sıcaklık değerlerinin rms hata sonuçları (CFD çözümleri birinci mertebededir).

h (cm)	l (cm)	Re	T-CFD (K)	30 nokta T-Krig (K)	60 nokta T-Krig (K)	120 nokta T-Krig (K)	240 nokta T-Krig(K)
0,8	1,5	250	362,8	373,0	364,4	362,7	362,8
1,2	1,5	250	365,2	376,2	367,7	364,7	365,1
1,6	1,5	250	368,2	376,3	368,2	367,6	368,3
2,0	1,5	250	365,4	373,2	367,2	362,1	366,0
0,8	2,5	250	352,2	352,1	352,6	351,9	351,8
1,2	2,5	250	354,0	354,6	357,0	353,7	354,2
1,6	2,5	250	353,9	353,7	355,6	353,9	354,1
2,0	2,5	250	347,5	349,5	351,9	348,1	348,4
0,8	3,5	250	342,0	342,4	343,1	342,9	341,3
1,2	3,5	250	346,1	345,5	349,5	346,1	346,2
1,6	3,5	250	347,0	345,6	346,9	348,1	346,9
2,0	3,5	250	338,0	342,6	343,2	336,0	338,3
rms hata – 1. mertebe				5,61	2,63	1,21	0,42

Çizelge 4.2 : Kriging modeli ve CFD analizinden elde edilen maksimum sıcaklık değerlerinin rms hata sonuçları (CFD çözümleri ikinci mertebededir).

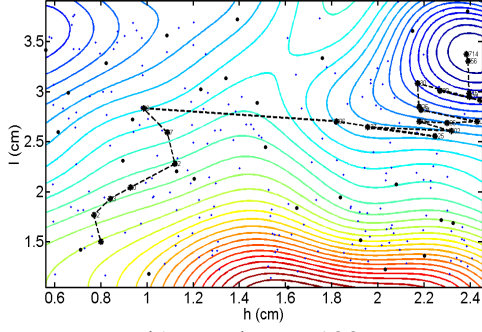
h (cm)	l (cm)	Re	T-CFD(K)	30 nokta T-Krig(K)	60 nokta T-Krig(K)	120 nokta T-Krig(K)	240 nokta T-Krig(K)
0,8	1,5	250	364,2	362,9	365,0	364,0	364,2
1,2	1,5	250	366,8	368,4	369,4	366,2	366,6
1,6	1,5	250	369,9	374,6	369,4	369,4	370,2
2,0	1,5	250	367,0	369,1	368,2	363,8	367,6
0,8	2,5	250	353,7	355,4	354,7	353,6	353,3
1,2	2,5	250	355,9	358,4	357,8	355,7	356,1
1,6	2,5	250	355,9	357,3	358,3	355,9	356,1
2,0	2,5	250	349,5	352,1	355,3	350,3	350,4
0,8	3,5	250	343,5	345,2	344,4	344,3	342,6
1,2	3,5	250	347,9	349,6	351,2	347,9	347,9
1,6	3,5	250	348,8	354,2	348,4	350,7	348,7
2,0	3,5	250	339,9	351,4	345,3	336,9	340,2
rms hata – 2. mertebe				4,26	2,81	1,43	0,43

Daha önce bahsedildiği gibi sıcaklık, denklem (2.1)'de verilen olasılık fonksiyonunda kullanılacak önemli bir parametredir. Benzetlenmiş Tavlama algoritması, içinde rastgelelik barındırır; yani algoritmanın her adımında elde edilen çözüm olasılık fonksiyonuna bağlı olarak rastgele yakın bir çözümle yer değiştirebilir. Seçilen sıcaklık değerinin yüksek oluşu çözümün yerel en iyi noktadan ayrılmasına izin verir. Soğutma hızına bağlı olarak sıcaklığın iterasyon sırasında gittikçe düşürülmesi ile, yerel optimumlara takılmadan yoluna devam eden algoritma ile, global optimuma yaklaştıkça gittikçe düşen sıcaklık değerleri dolayısıyla, artık bulunan (global) optimum değerden çıkmasına izin verilmez ve global optimum hassas bir şekilde bulunur.

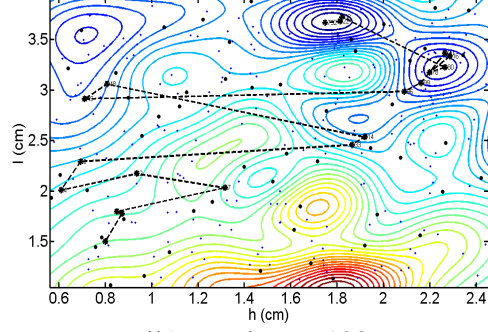
Şekil 4.16'da, Bölüm 4.3'de verilen Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları farklı LHS örnekleme sayıları için gösterilmektedir. Şekil 4.16'da ayrıca, her bir LHS örnekleme sayısı için denklem (3.2)'de verilen farklı soğuma hızını belirten parametreye (c)'ye bağlı olarak optimizasyon sonuçları gösterilmiştir (bkz. Şekil 3.1).

Şekil 4.16a ve 4.16b üzerinde görülen her bir siyah nokta, Latin Hiperküp Örnekleme algoritması ile belirlenen parametre uzayına ait CFD sonuçlarını göstermektedir. Çözümü temsil eden bu noktalardan yararlanılarak şekilde farklı örnekleme sayıları ve farklı soğutma hızları için Kriging modelleri oluşturulmuş ve ardından Benzetilmiş Tavlama algoritması kullanılarak minimum sıcaklık değerine karşılık gelen ısı kaynağı yüksekliğinin (h) ve ısı kaynakları arasındaki mesafenin (l) optimum değerleri elde edilmiştir. Örneğin Şekil 4.16a'da 30 (sol sütun) ve 60 (sağ sütun) adet LHS nokta kullanılarak oluşturulan Kriging modeli ile yapılan optimizasyon sonuçları görülmektedir. Şekil üzerindeki konturlar Kriging model sonuçlarına ait maksimum sıcaklık değerlerini göstermektedir. Optimizasyonun amacı maksimum sıcaklığın en düşük değerini veren geometrinin $[h, l]$ belirlenmesidir. Şekil üzerindeki kesikli çizgiler optimizasyon sırasında Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritmasının izlediği yolu (yerel minimumlar) göstermektedir.

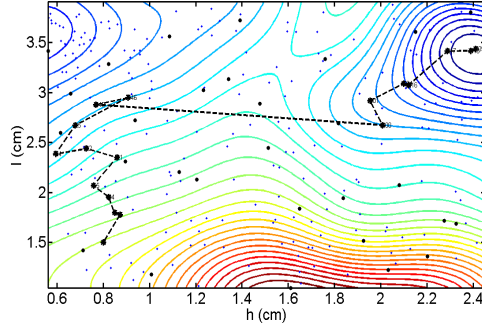
Şekil 4.16'da her bir soğutma hızı durumunda, optimizasyonun yerel optimum değerlerine takılıp kalmadığı, global optimum değeri bulunduğu görülmektedir. Ancak, yapılan araştırmalar yüksek soğutma hızlarında dikkatli olunması gerektiği, kısa zamana karşılık gelen düşük iterasyon değerlerinde global optimumun bulunamaması halinde, yerel optimuma takılıp kalma riskinin mevcut olduğunu göstermiştir. Özellikle, soğutmaya (iterasyona) başlama sıcaklığının değeri (T_0) düşük ise, soğuma hızının etkisi çok önem kazanmaktadır.



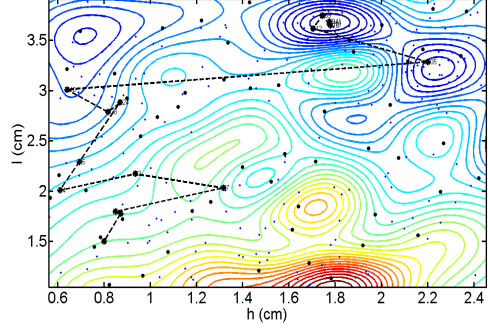
i) $c = 1, T_0 = 100$
 $h = 2,38 \text{ cm}, l = 3,37 \text{ cm}, T = 332,5 \text{ K}$



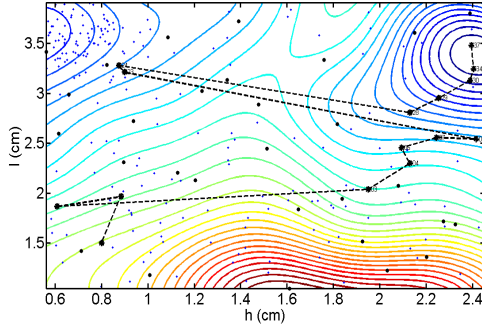
ii) $c = 1, T_0 = 100$
 $h = 1,74 \text{ cm}, l = 3,67 \text{ cm}, T = 334,3 \text{ K}$



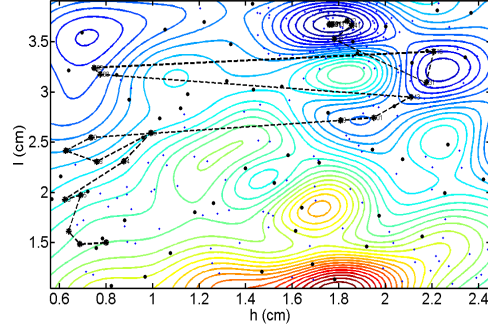
iii) $c = 2, T_0 = 100$
 $h = 2,41 \text{ cm}, l = 3,43 \text{ cm}, T = 332,4 \text{ K}$



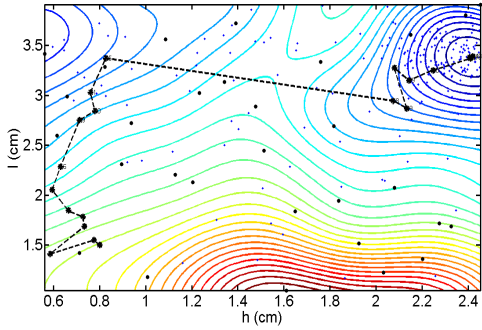
iv) $c = 2, T_0 = 100$
 $h = 1,77 \text{ cm}, l = 3,68 \text{ cm}, T = 334,1 \text{ K}$



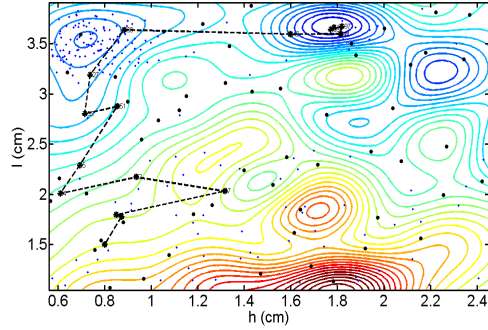
v) $c = 4, T_0 = 100$
 $h = 2,39 \text{ cm}, l = 3,48 \text{ cm}, T = 332,8 \text{ K}$



vi) $c = 4, T_0 = 100$
 $h = 1,77 \text{ cm}, l = 3,67 \text{ cm}, T = 334,1 \text{ K}$

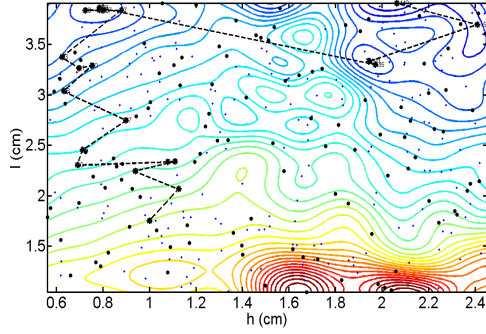


vii) $c = 6, T_0 = 100$
 $h = 2,42 \text{ cm}, l = 3,39 \text{ cm}, T = 332,3 \text{ K}$

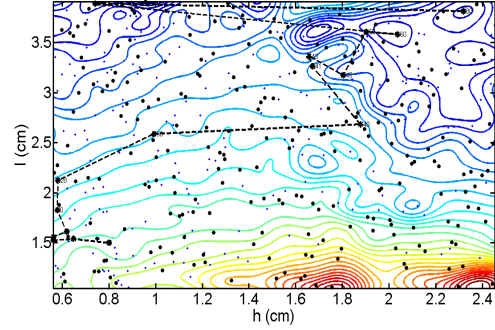


viii) $c = 6, T_0 = 100$
 $h = 1,78 \text{ cm}, l = 3,66 \text{ cm}, T = 334,18 \text{ K}$

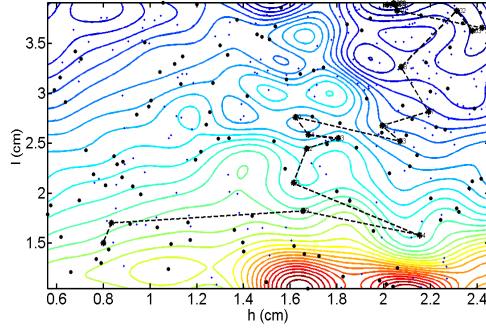
Şekil 4.16a : Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları. Sol sütun: 30 LHS noktası, Sağ sütun 60 LHS noktasına ait sonuçlar.



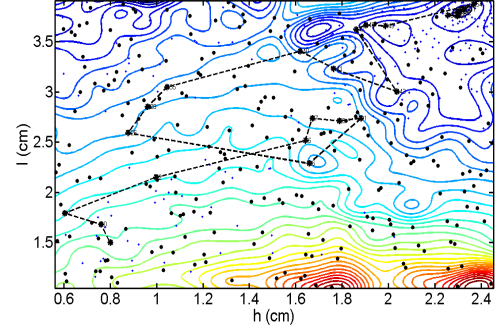
i) $c = 1, T_0 = 100$
 $h = 2.06 \text{ cm}, l = 3.90 \text{ cm}, T = 333.9 \text{ K}$



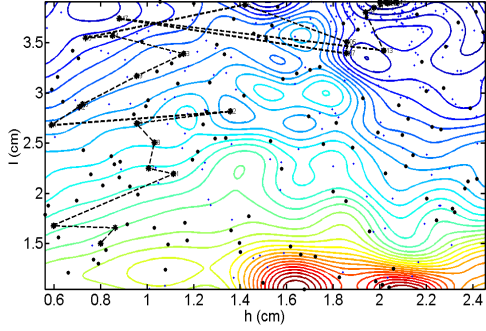
ii) $c = 1, T_0 = 100$
 $h = 2.31 \text{ cm}, l = 3.81 \text{ cm}, T = 336.5 \text{ K}$



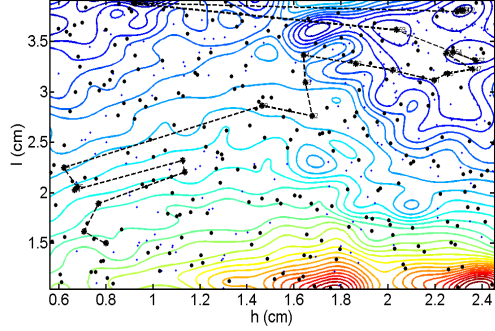
iii) $c = 2, T_0 = 100$
 $h = 2.04 \text{ cm}, l = 3.90 \text{ cm}, T = 333.7 \text{ K}$



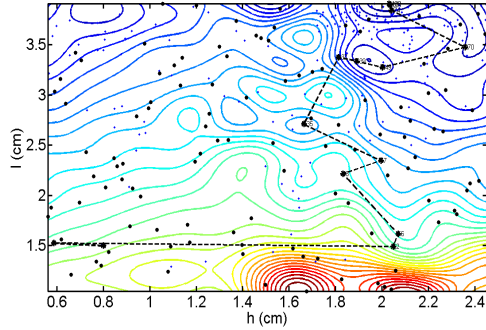
iv) $c = 2, T_0 = 100$
 $h = 2.31 \text{ cm}, l = 3.80 \text{ cm}, T = 336.5 \text{ K}$



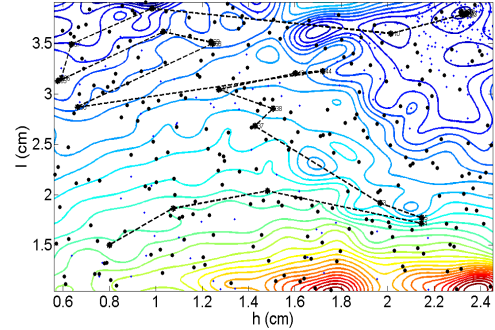
v) $c = 4, T_0 = 100$
 $h = 2.01 \text{ cm}, l = 3.90 \text{ cm}, T = 333.6 \text{ K}$



vi) $c = 4, T_0 = 100$
 $h = 2.32 \text{ cm}, l = 3.82 \text{ cm}, T = 336.6 \text{ K}$



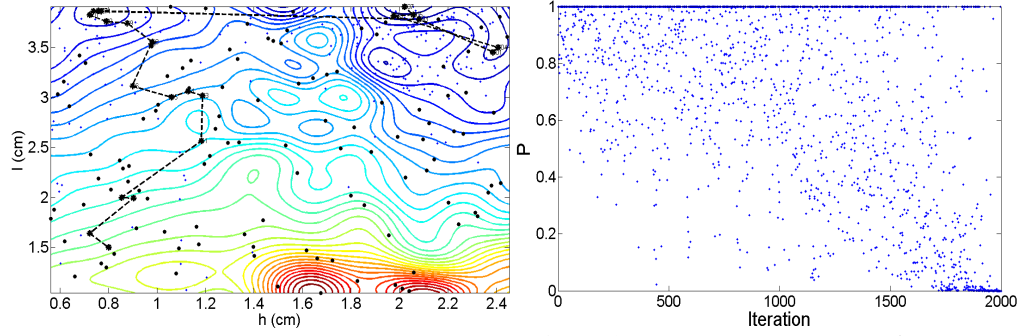
vii) $c = 6, T_0 = 100$
 $h = 2.03 \text{ cm}, l = 3.91 \text{ cm}, T = 333.5 \text{ K}$



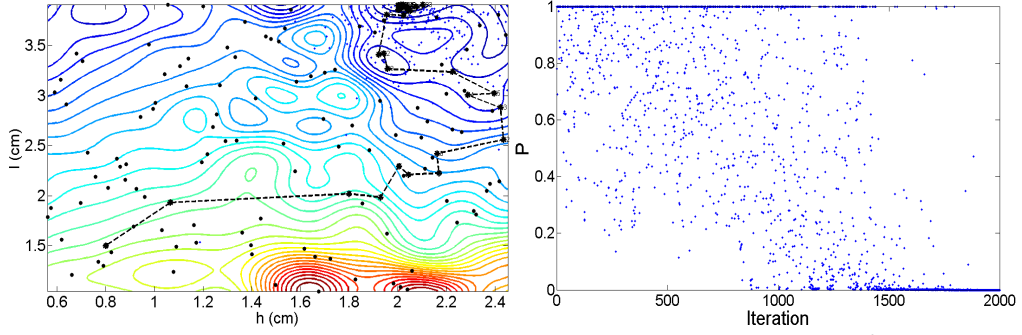
viii) $c = 6, T_0 = 100$
 $h = 2.31 \text{ cm}, l = 3.80 \text{ cm}, T = 336.5 \text{ K}$

Şekil 4.16b : Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları. Sol sütün: 120 LHS noktası, Sağ sütün 240 LHS noktasına ait sonuçlar.

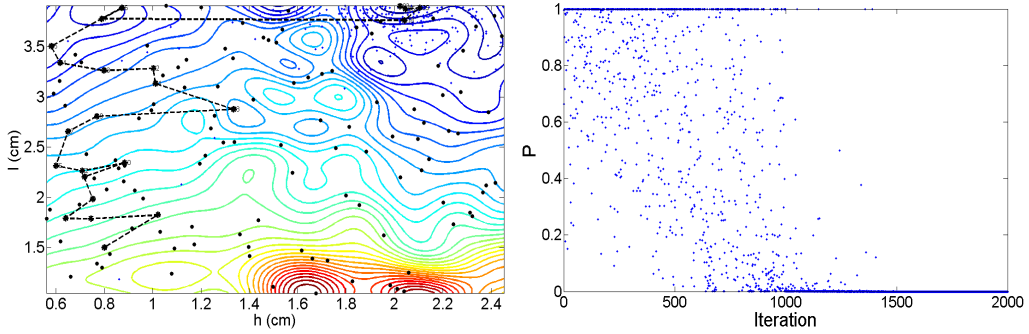
Şekil 4.17’de (sağ sütunda) soğutma katsayısına (c) bağlı olan olasılık fonksiyonunun (P) iterasyon sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Soğuma hızı ile sıcaklık azalmakta, sıcaklığın azalmasıyla da şekil 4.17’den görüldüğü gibi denklem (3.2)’den hesaplanan olasılık fonksiyonu (P) değeri azalmaktadır. Bu ise, yeni bir noktaya geçme olasılığını azaltmaktadır. Bu ise, yeni bir noktaya geçme olasılığını azaltmaktadır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer husus, düşük iterasyon değerlerinde P değeri yüksek olmakta, dolayısıyla “en iyi nokta” şartını sağlamaksızın yeni nokta değerine geçilmesine imkan verilmektedir. Dolayısıyla, optimizasyon işleminin yerel bir minimum değerine takılıp kalınması önlenmektedir. Yüksek iterasyon sayılarına gelindiğinde ise, artık global minimum/maksimum bulunduğu kabulüyle, çözümün bu bulunan değerden ayrılmasına izin vermemek için olasılık değeri çok küçük değerler almaktadır. Örnek olarak, Şekil 4.17a-d’de $T_0 = 5$ için farklı soğuma hızlarında Kriging-Benzetilmiş Tavlama optimizasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 4.17d’den görüldüğü gibi yüksek soğuma hızlarında ($c = 6$) global optimuma erişilememekte, algoritma yerel bir minimum olan [$h = 0,78$ cm, $l = 3,88$ cm] noktasında takılı kalmakta, ilerleme sağlanamamaktadır. Bu örnekte görüldüğü gibi bu takılma yaklaşık 500 iterasyondan itibaren görülmektedir (bkz. Şekil 4.17d-sağ sütunda verilen olasılık fonksiyonu değerleri). Pratik açıdan, olasılık fonksiyonu esas itibarıyla $P = 0$ değerlerini almaya başladığı iterasyon sayısından itibaren yerel optimum değerinden kurtulmak mümkün olmadığından, artan iterasyon sayısının hiç bir etkisi/faydası olmamaktadır. Bu iterasyon sayıları, yaklaşık olarak Şekil 4.17a-d’de sırasıyla, 1800, 1500, 1000 ve 500 olarak görülmektedir (bkz. Şekil 4.17a-d sağ sütun). Dolayısıyla, Kriging-Benzetilmiş Tavlama algoritmasında olasılık fonksiyonunun dağılımı çok önemli olup, iterasyon sırasında göz önünde bulundurulması gereken bir konudur. Doğal olarak, optimizasyona herhangi bir başlangıç noktası seçilerek başlanmaktadır. Şekil 4.18’de farklı başlangıç noktalarının optimizasyon sonucuna etkisi gösterilmiştir. Her bir durumda soğutma hızı (c) ve başlangıç sıcaklığı (T_0) sabit alınmıştır. Çizelge 4.3’den görüldüğü gibi başlangıç noktası global optimum noktasına yaklaştıkça optimizasyon için gerekli olan iterasyon sayısının önemli oranda azaldığı görülmekte olup, beklenen bir durumdur. Öte yandan, farklı başlangıç şartlarının optimizasyon sonucuna bir etkisi olmayıp, global optimum noktasına giden yol ve bu yol sırasında karşılaşılan (tespit edilen) yerel optimum değerleri değişebilmektedir.



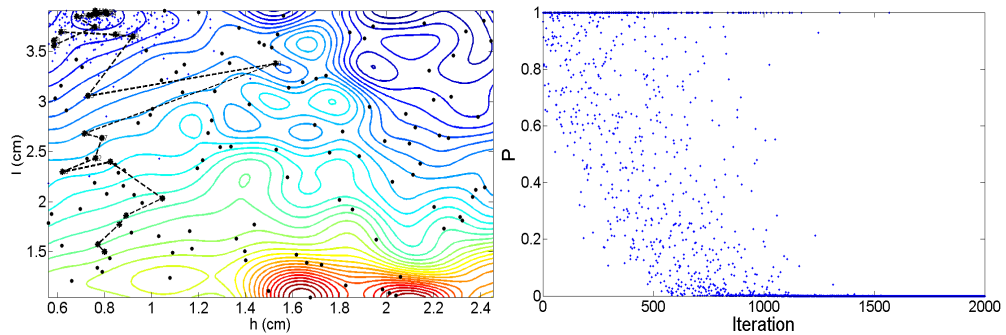
a) $h = 2,02$ cm, $l = 3,90$ cm, $T = 333,6$ K, k (iterasyon sayısı) = 707, $c = 1$



b) $h = 2,01$ cm, $l = 3,91$ cm, $T = 333,5$ K, k (iterasyon sayısı) = 1804, $c = 2$

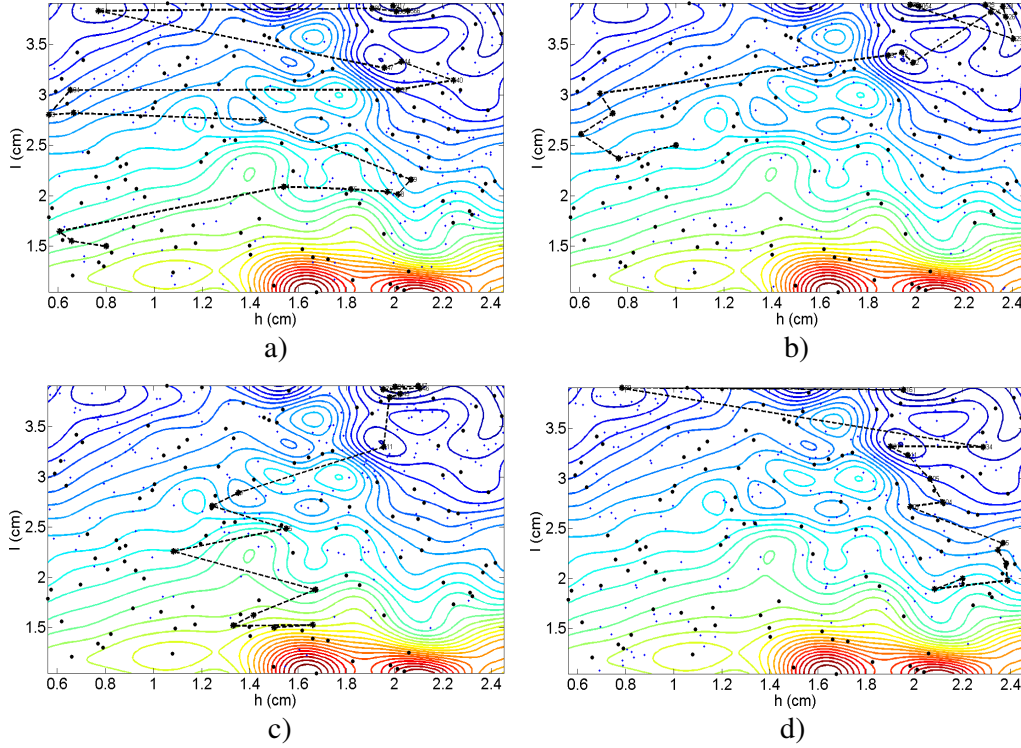


c) $h = 2,02$ cm, $l = 3,90$ cm, $T = 333,6$ K, k (iterasyon sayısı) = 393, $c = 4$



d) $h = 0,78$ cm, $l = 3,88$ cm, $T = 337,7$ K, k (iterasyon sayısı) = 1896, $c = 6$

Şekil 4.17 : Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları (120 LHS örnekleme noktası). Başlangıç sıcaklığı, $T_0 = 5$ K. optimizasyon sonuçları (sol sütun), olasılık fonksiyonu değerleri (sağ sütun).

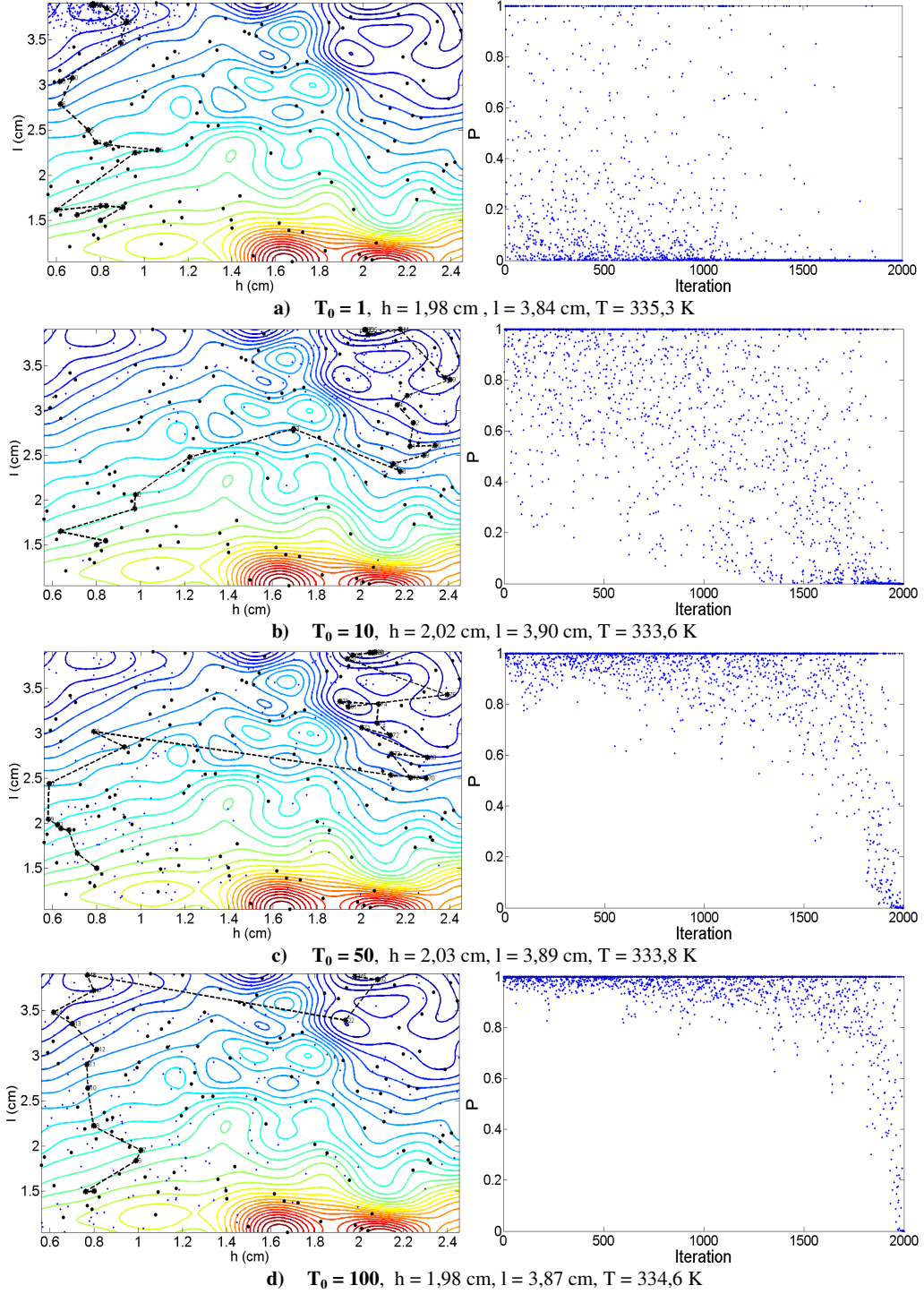


Şekil 4.18 : Farklı başlangıç noktalarının optimizasyon işlemine etkisi. (LHS nokta sayısı = 120). Başlangıç noktasının koordinatları ve maksimum sıcaklığın minimizasyonu için gerekli olan iterasyon sayısı Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Optimizasyon işleminde başlangıç noktasının konumunun iterasyon sayısına etkisi. Her bir optimizasyon için soğutma katsayıları ve başlangıç sıcaklıkları eşittir ($c = 1$, $T_0 = 100$).

	(a)	(b)	(c)	(d)
Başlangıç noktası koordinatları	(0,8 ; 1,5)	(1 ; 2,5)	(1,5 ; 1,5)	(2,2 ; 2)
Toplam iterasyon sayısı	1917	1054	691	216

Şekil 4.19’da ise, optimizasyona işlemine başlangıç sıcaklığının etkisi gösterilmiştir. Burada, düşük başlangıç sıcaklıkları için yerel optimumun belirlenmesi halinde buradan çıkışın oldukça zor olduğu tespit edilmiştir. Nitekim, Şekil 4.19a’da sağ sütunda verilen olasılık değerlerine bakıldığında, $T_0 = 1$ başlangıç değeri için olasılık fonksiyonun ağırlıklı olarak sıfır civarında bulunduğu dolayısıyla bulunan yerel optimum değerinden çıkma olasılığının son derece az olduğu görülmektedir. $T_0 = 1$ başlangıç değeri ile yapılan farklı optimizasyon analizleri, yerel minimuma uğraması durumunda, optimizasyon algoritmasının buradan çoğunlukla çıkamadığını göstermiştir (bkz. Şekil 4.19a). Öte yandan, göz önüne alınan iterasyon aralığında (maksimum 2000) $T_0 = 100$ başlangıç değeri ile yapılan farklı optimizasyon analizlerinde, hiç bir zaman yerel minimuma takılma probleminin olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.19 : Farklı başlangıç sıcaklıkları (T_0) için optimizasyon sonuçları. (Kriging modeli ikinci mertebeden CFD çözümü ve 120 LHS noktası kullanılarak elde edilmiştir). Her bir durumda soğutma hızı katsayısı sabit ($c = 1$) alınmıştır. Sağ sütunda T_0 başlangıç sıcaklığına bağlı olarak bulunan olasılık fonksiyonu (0 ile 1 arasında) gösterilmiştir.

5.2 Matematiksel Model ve Çözüm Yöntemi

Sayısal simülasyonlar için detaylı geometri, Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, hesap bölgesini çevreleyen dış kenarlar ısıya karşı yalıtılmıştır. Isı kaynağı levhanın yüzeyine yerleştirilmiş ve sıfır kalınlıkta kabul edilmiştir. Akış ve sıcaklık alanını karakterize eden geometrik parametreler haricindeki, akış ile ilgili parametreler olarak Reynolds sayısı ve Grashof sayısı (ya da Richardson sayısı, Gr/Re^2) esas alınmıştır. Giriş kesitinde akışkan hızı uniformdur ve zorlanmış taşınımın etkisi Re sayısı ile temsil edilmektedir. Grashof sayısı ise doğal taşınımın bir ölçüsüdür. Soğutucu akışkan olarak seçilen hava ($Pr = 0,71$), problemde karşılaşılan hız değerleri küçük olduğu için, genellikle doğal taşınım problemlerinde olduğu gibi sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. Ancak burada belirtilmesi gereken nokta yoğunluğun y - koordinatı (düşey) yönde yazılan momentum denklemindeki doğal taşınım terimi için sabit olmadığı, $\rho = \rho_0[1-\beta(T-T_i)]$ şeklinde sıcaklıkla değiştiğidir. Bu değişim düşük sıcaklık farklarında %1'den az olduğu için genellikle diğer terimlerde yoğunluk sabit kabul edilerek akışı temsil eden süreklilik ve momentum denklemleri sıkıştırılmaz akışkan durumu için yazılabilir. Bu kabul literatürde Boussinesq kabulü olarak adlandırılır ve doğal taşınım problemlerinde yaygın olarak kullanılır.

Girişte akışkan sıcaklığının değeri T_i sabit tutulmuştur. Üzerinde ısı kaynağı bulunan levha ısı iletkenliğine sahiptir. Dolayısıyla levha ısı iletim katsayısı k_b , ısı geçişine etki eden bağımsız bir parametre olarak ele alınmıştır ve etkileri incelenmiştir. Yukarıda açıklanan Boussinesq kabulü ile iki boyutlu, laminar akışta karışık taşınım olayını temsil eden süreklilik, Navier-Stokes ve enerji denklemleri boyutsuz olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P^*}{\partial X} + \frac{1}{Re} \nabla^2 U \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P^*}{\partial Y} + \frac{Gr}{Re^2} \theta + \frac{1}{Re} \nabla^2 V \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{r_k}{r_\alpha \text{Pr Re}} \nabla^2 \theta \quad (5.4)$$

Enerji denklemindeki (5.4) viskoz dissipasyon terimi düşük hızlar dolayısıyla ihmal edilmiştir. Yukarıdaki denklemlerdeki değişkenler, üniform giriş hızı U_i , akışkan sıcaklığı T_i , giriş aralığının genişliği D , akışkan yoğunluğu ρ , ısı kaynağından yayılan ısı akısı q ve akışkanın ısı iletim katsayısı k_{Hava} 'nın kullanılmasıyla bir sonraki sayfada dönüşümler yapılarak boyutsuzlaştırılmıştır.

$$(X, Y) = \frac{(x, y)}{D}, \quad (U, V) = \frac{(u, v)}{U_i}, \quad \theta = \frac{k(T - T_i)}{qD}, \quad \tau = \frac{U_i t}{D}, \quad P^* = \frac{p}{\rho U_i^2} \quad (5.5)$$

Genel olarak büyük harfler boyutsuz değişkenleri göstermektedir. Ancak boyutlu sıcaklık T ile boyutsuz sıcaklık ise θ ile gösterilmiştir.

(5.4) denklemini hem katı hem de akışkan bölgeleri için geçerlidir. $r_k = k_b/k_{\text{Hava}}$, levha ısı iletim katsayısının akışkanın ısı iletim katsayısına oranını (ısıl iletkenlik oranı), $r_\alpha = \alpha_b/\alpha$ ise levha ısıl yayılma katsayısının (α_b) akışkanın ısıl yayılma katsayısına ($\alpha = k_{\text{Hava}}/\rho c_p$) oranını (ısıl yayılma oranı) göstermektedir. Yukarıdaki denklemlerden de açık olarak görüldüğü gibi, problemi karakterize eden boyutsuz parametreler, zorlanmış taşınım etkisini gösteren Reynolds sayısı, $Re = U_i D/\nu$, doğal taşınımın zorlanmış taşınımına göre önemini gösteren Richardson sayısı, $Ri = Gr/Re^2$ ve soğutucu akışkanı tanımlayan Prandtl sayısı, $Pr = \nu/\alpha$ 'dır. Ayrıca r_k ve r_α levha içerisindeki ısı iletiminde etkili parametrelerdir.

Burada Grashof sayısı, $Gr = \frac{g\beta_{\text{Hava}} q D^4}{k_{\text{Hava}} \nu^2}$ olarak verilmiştir ve değeri tüm çözümler

için sabittir ($Gr = 20004$). g yerçekimi ivmesi, β ısıl genleşme katsayısı, k_{Hava} akışkanın ısı iletim katsayısı, ν ise akışkanın kinematik viskozitesini göstermektedir. Ayrıca, tüm simülasyonlarda Prandtl sayısı $Pr = 0,71$ alınmıştır.

Akış sınır şartları olarak tüm katı yüzeylerde hız bileşenleri sıfırdır. Yani katı duvarlarda kaymama şartı ($U = V = 0$) vardır. Giriş aralığında hız x-yönünde üniformdur ve hızın y bileşeni sıfırdır ($U = 1, V = 0$). Çıkış aralığında çıkış sınır şartı

olarak tüm değişkenlerin (U, V, θ) gradyanları ($\frac{\partial U}{\partial X}, \frac{\partial V}{\partial X}$ ve $\frac{\partial \theta}{\partial X}$) sifira eşit alınmıştır.

Bu şartı elde etmek için, geometriye l_0 uzunluğu eklenmiştir. $l_0 = 1/8W$ uzunluğu çıkış sınır şartını sağlayabilmek için yeterli olduğu literatürde belirtilmiştir. **(Hsu ve Wang, 2000)**

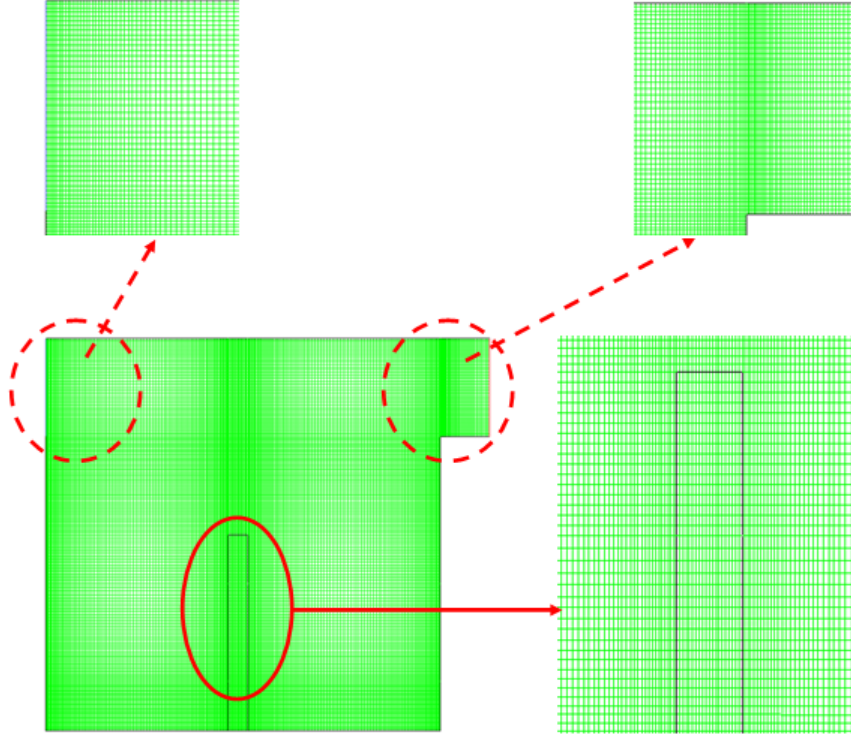
Sıcaklık şartları olarak n , duvara dik normal yön vektörü, θ ise boyutsuz sıcaklık olmak üzere, $\partial\theta/\partial n = 0$ şartı tüm yalıtılmış duvarlarda geçerlidir ve giriş aralığı için $\theta = 0$ 'dır. Bunun yanı sıra levha-akışkan ara yüzeylerinde, ısı akısının sürekliliği aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial n}\right)_{\text{akışkan}} = r_k \left(\frac{\partial\theta}{\partial n}\right)_{\text{levha}} \quad (5.6)$$

Simülasyonlarda akışkan olarak alınan havanın fiziksel özellikleri sabit olup, $\rho_{\text{hava}} = 1,293 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, $\mu_{\text{hava}} = 1,72 \times 10^{-5} \text{ [kg/m.s]}$, $(c_p)_{\text{hava}} = 1000 \text{ [J/kg.K]}$, $k_{\text{Hava}} = 0,024225 \text{ [W/m.K]}$ ve $\beta_{\text{hava}} = 3 \times 10^{-3} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ olarak belirlenmiştir. Levhanın ısı iletim katsayısı k_b ile levha kalınlığı b ise, değişken parametreler olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, Reynolds sayısı da değişken olarak düşünülerek 3 adet optimizasyon parametresi elde edilmiştir.

Yukarıda açıklanan süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin çözümü, sonlu hacimler tekniğinin kullanıldığı Fluent[®] yazılımı ile daimi ve gerektiğinde zamana bağlı sayısal simülasyonlarla gerçekleştirilmiş ve hesap bölgesinde hız ve sıcaklık alanları elde edilmiştir. Simülasyonlar $t \rightarrow \infty$ hali için elde edilmiş olup, (k_b, b, Re) parametre uzayındaki değerlere bağlı olarak, daimi rejimde çözümler zamandan bağımsız ve zamana bağlı (periodik) olarak bulunmuştur **(Güneş ve diğ., 2009)**.

Bu çalışmada akış ve sıcaklık alanları 42520 eleman kullanılarak oluşturulmuştur ve elemanlar üniform olmayıp duvarlara ve levha'ya doğru sıklaştırılmıştır. Bu şekilde kenarlarda ve levha çevresinde hız ve sıcaklık gradyanlarının yeterli ölçüde çözümlenebilmesi sağlanmıştır. Şekil 5.2'de örnek bir çözüm ağı verilmiştir. Levha kalınlığı b değiştiğinde, çözüm ağı da uygun bir şekilde yeniden oluşturulmuştur.



Şekil 5.2 : Karışık taşınım problemine ait çözüm ağı.

5.3 CFD Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, yukarıda tanımlanan karışık taşınım problemine ait CFD sonuçları verilmiştir. Daha önceden belirtildiği gibi uygulanacak optimizasyon analizleri için gerekli olan veriler, ticari bir yazılım olan Fluent[®] ile levha ısı iletim katsayısı (k_b), levha kalınlığı (b) ve Reynolds sayısına (Re) bağlı olarak elde edilmiştir ve optimizasyonu yapılacak olan bu parametrelere göre sistemin fiziksel davranışı ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Çizelge 5.1 - 5.3'de sayısal simülasyon sonuçları (CFD) gösterilmiştir. Sıcaklık değerleri sistemde ortaya çıkan maksimum sıcaklık değerleri olup Kelvin (K) cinsinden verilmiştir. Bu maksimum sıcaklık değerleri genellikle sabit bir ısı akısı verecek şekilde modellenmiş olan yonga üzerinde olduğu için, bu değerlerin yonga için izin verilen maksimum değer altında olması, sistemin sorunsuz çalışması için gereklidir.

Çizelge 5.1 : Karışık taşınım (doğal + zorlanmış) probleminde ısı kaynağının monte edildiği levhanın ısı iletim katsayısı k_b ve Reynolds sayısının sistemde oluşan maksimum sıcaklığa etkisi (Levhanın kalınlığı $b = 1$ mm).

$b = 1$ [mm]	k_b [W/mK]						
	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Re = 10	369,8	369,5	369,5	369,7	369,9	369,9	370,1
Re = 30	356,8	356,6	356,6	356,8	357,0	357,1	357,2
Re = 40	357,6	357,4	357,4	357,5	357,6	357,7	357,8
Re = 55	359,2	358,6	358,6	358,8	359,0	359,1	359,2
Re = 75	360,7	360,5	360,6	360,9	361,2	361,5	361,7
Re = 110	357,3	357,3	357,0	356,3	357,8	357,3	357,0
Re = 160	352,3	351,3	351,0	351,5	351,7	351,8	352,0
Re = 220	348,7	347,7	346,3	346,5	346,7	346,8	346,9

Çizelge 5.2 : Karışık taşınım (doğal + zorlanmış) probleminde ısı kaynağının monte edildiği levhanın ısı iletim katsayısı k_b ve Reynolds sayısının sistemde oluşan maksimum sıcaklığa etkisi (Levhanın kalınlığı $b = 2$ mm).

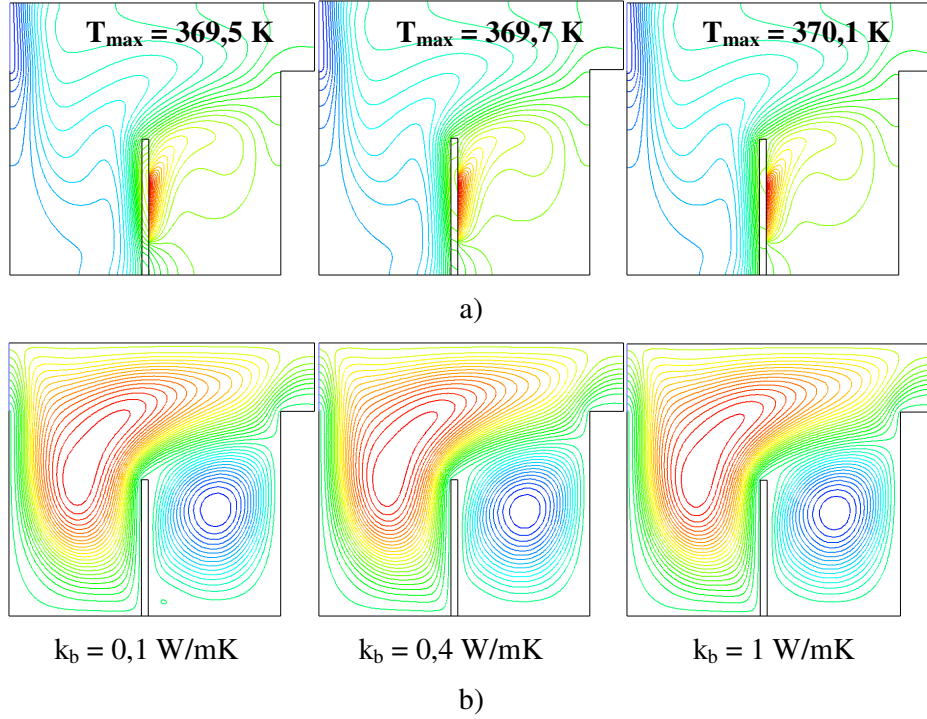
b = 2 [mm]	k_b [W/mK]						
	0,025	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Re = 10	372,8	371,1	370,9	370,9	371,0	371,0	371,1
Re = 30	359,7	358,0	357,9	357,9	358,0	358,0	358,1
Re = 55	361,8	360,0	359,9	359,9	360,0	360,0	360,1
Re = 75	363,0	361,5	361,3	361,5	361,3	361,4	362,0
Re = 110	358,0	356,5	356,4	356,9	356,6	355,5	356,8
Re = 160	353,5	350,2	350,0	350,3	350,4	350,4	350,6
Re = 220	350,0	346,7	346,5	346,7	346,8	346,9	346,9
Re = 300	347,0	345,2	345,6	345,9	346,0	345,9	346,0
Re = 350	345,6	345,8	346,1	346,3	346,3	346,2	346,3

Çizelge 5.3 : Karışık taşınım (doğal + zorlanmış) probleminde ısı kaynağının monte edildiği levhanın ısı iletim katsayısı k_b ve Reynolds sayısının sistemde oluşan maksimum sıcaklığa etkisi (Levhanın kalınlığı $b = 3$ mm).

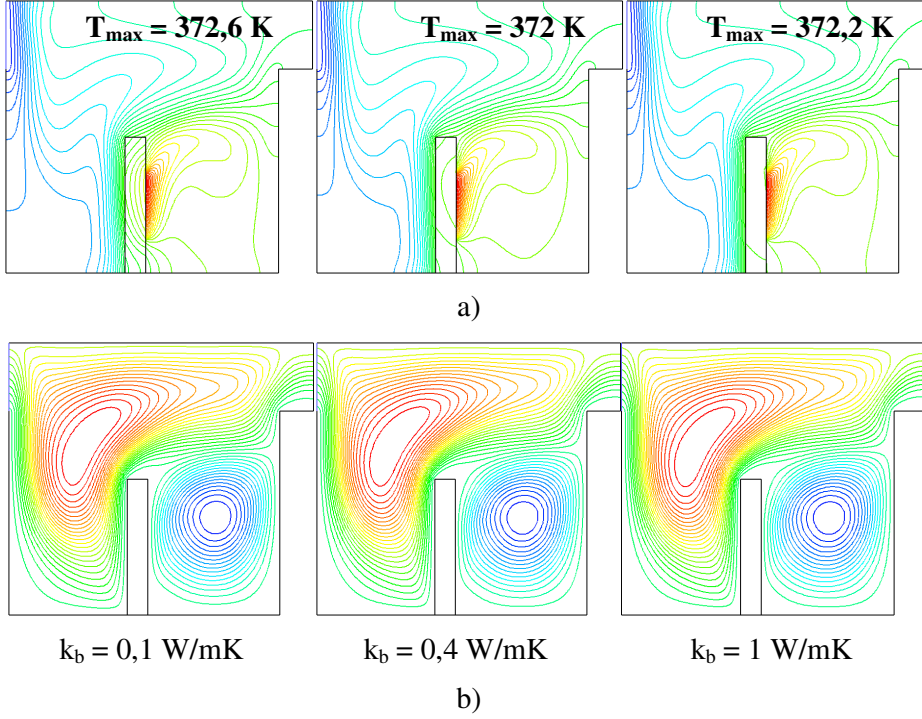
b = 3 [mm]	k_b [W/mK]						
	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Re = 10	373,5	372,6	372,2	372,0	372,1	371,9	372,2
Re = 30	360,3	359,4	358,9	358,7	358,7	358,6	358,8
Re = 40	361,2	360,2	359,8	359,6	359,7	359,6	359,7
Re = 55	362,2	361,4	361,1	361,0	361,1	361,1	361,2
Re = 75	362,0	361,0	362,0	362,0	361,8	361,8	361,0
Re = 110	356,1	355,4	355,5	356,8	356,4	356,2	356,4
Re = 160	351,5	349,8	350,1	350,1	350,3	350,4	351,4
Re = 220	348,2	346,4	346,6	346,8	346,9	346,8	347,0

Uygun soğutma sistemi ve çalışma şartı sağlanarak bu sıcaklık değerlerinin üretici tarafından izin verilen maksimum sıcaklık değerlerini aşmaması sağlanmalıdır. Şekil 5.3 - 5.18'da karışık taşınım problemine ait eş sıcaklık eğrileri ve akım fonksiyonu çizgileri, levha ısı iletim katsayısı k_b ve Reynolds sayısına (Re) bağlı olmak üzere levha kalınlığı $b = 1$ mm ve $b = 3$ mm için ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

İlk olarak doğal taşınımın daha belirgin olduğu, $Re = 10$ için, CFD simülasyonlarıyla elde edilen eş sıcaklık eğrileri ve akım çizgileri Şekil 5.3a - 5.3b'de ve Şekil 5.4a - 5.4b'de gösterilmiştir. Bu kısımda zorlanmış taşınımın etkisi hemen hemen hiç görülmektedir. $Re = 10$ 'da hesap bölgesine giren soğutucu akışkanın (hava) hızı çok düşük olduğu iyi bir soğutma elde edilememektedir. Nitekim Şekil 5.3a'da ve Şekil 5.4a'da, $Re = 10$ için elde edilmiş olan eş sıcaklık eğrilerinden görüldüğü gibi bu durumda ısı ortamdan ağırlıklı olarak doğal taşınım ile atılmaktadır ($Ri = 200$).

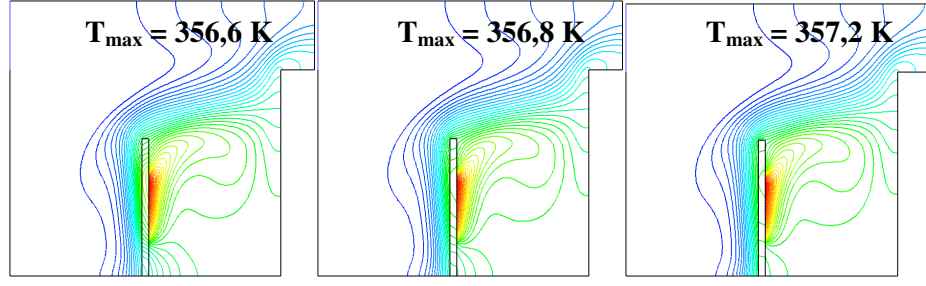


Şekil 5.3 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 10$, $Ri = 200$, $b = 1 \text{ mm}$).

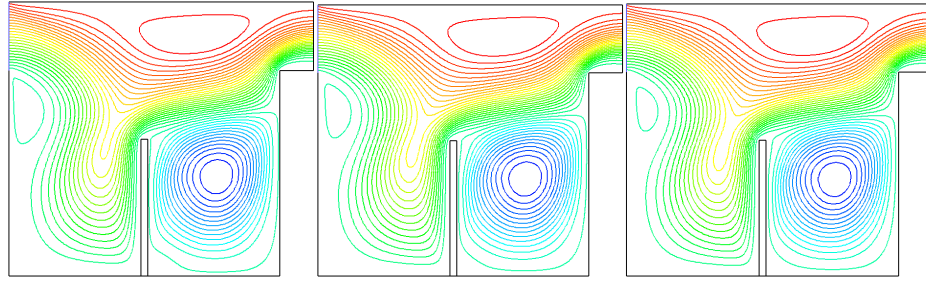


Şekil 5.4 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 10$, $Ri = 200$, $b = 3 \text{ mm}$).

Zorlanmış taşınım etkileri Re sayısı arttıkça ortaya çıkmaktadır. $Re = 30$ için Şekil 5.5a - 5.5b'de ve Şekil 5.6a - 5.6b'de gösterildiği gibi eş sıcaklık eğrilerinde $Re = 10$ 'a göre değişimler gözlemlenmektedir. Bu değişim, bölgeye giren havanın çıkış kesitine doğru daha belirgin olarak yöneldiğini yani daha etkin bir soğutma meydana geldiğini göstermektedir. Aynı zamanda bu değişim Çizelge 5.1'deki $Re = 10$ ile $Re = 30$ için sayısal simülasyonla elde edilen sıcaklık değerlerini karşılaştırarak da görülebilir.



a)



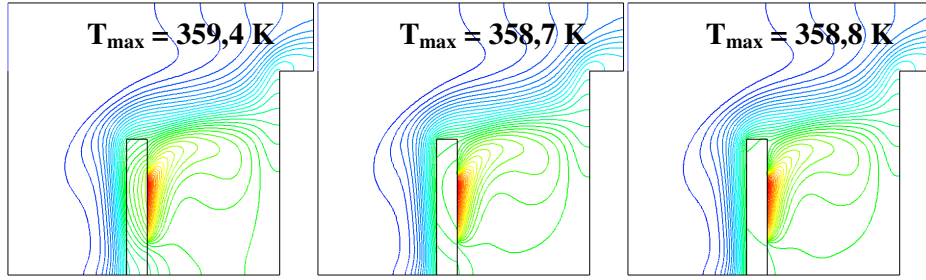
$k_b = 0,1 \text{ W/mK}$

$k_b = 0,4 \text{ W/mK}$

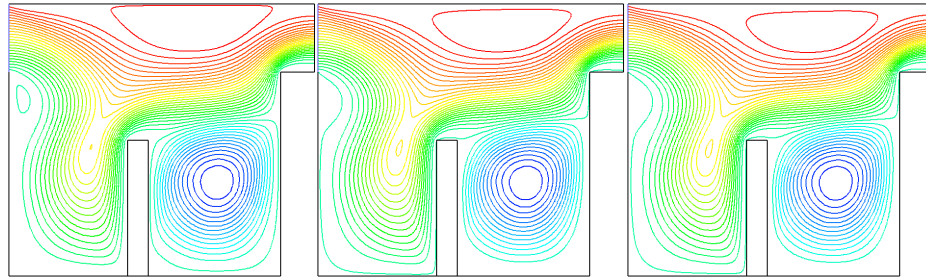
$k_b = 1 \text{ W/mK}$

b)

Şekil 5.5 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 30$, $Ri = 22$, $b = 1 \text{ mm}$).



a)



$k_b = 0,1 \text{ W/mK}$

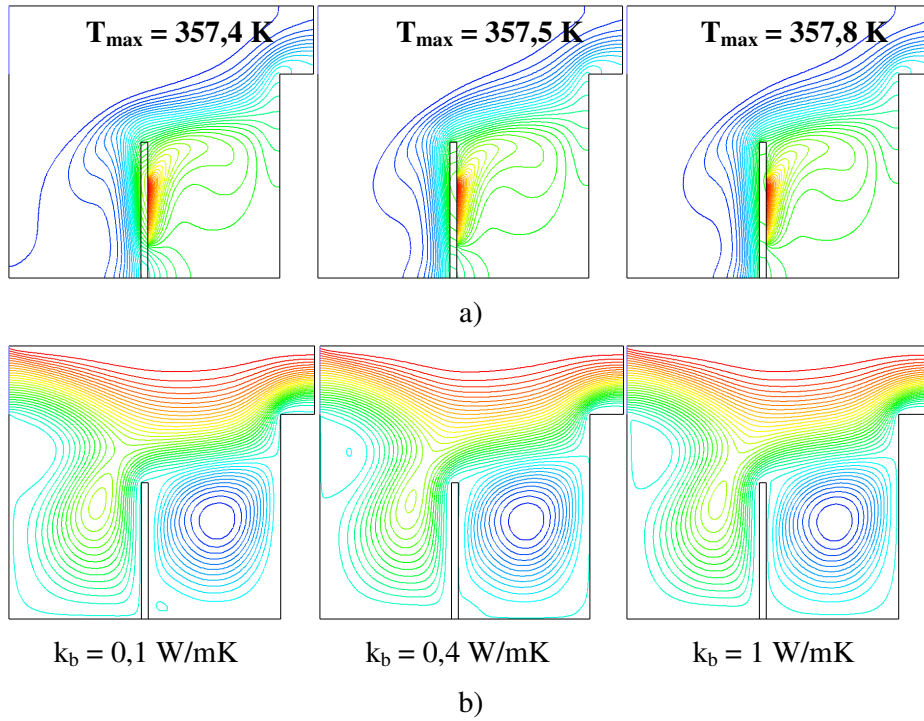
$k_b = 0,4 \text{ W/mK}$

$k_b = 1 \text{ W/mK}$

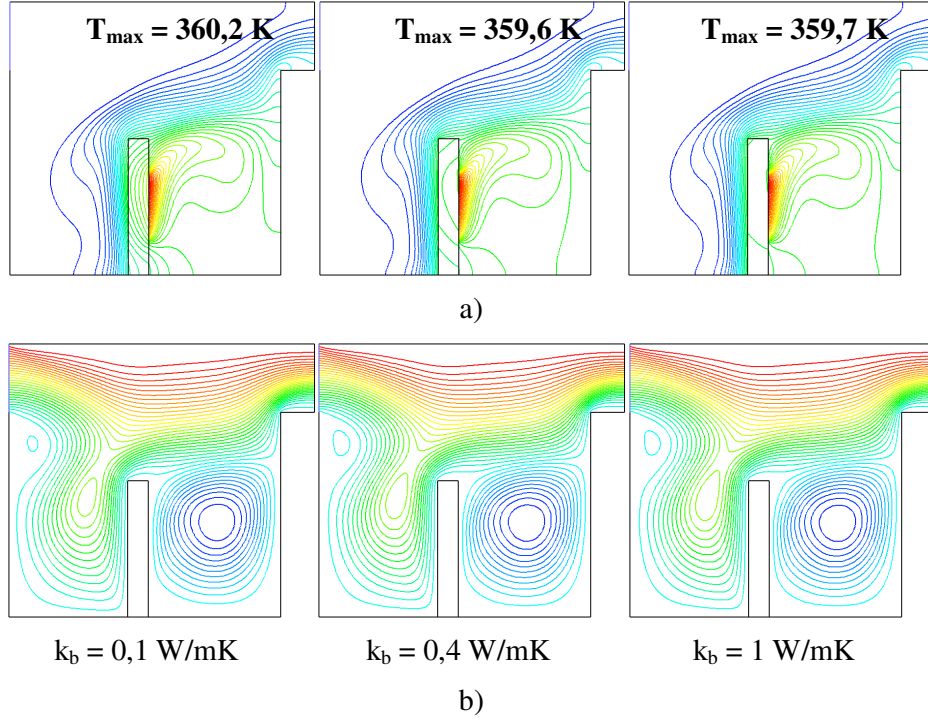
b)

Şekil 5.6 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 30$, $Ri = 22$, $b = 3 \text{ mm}$).

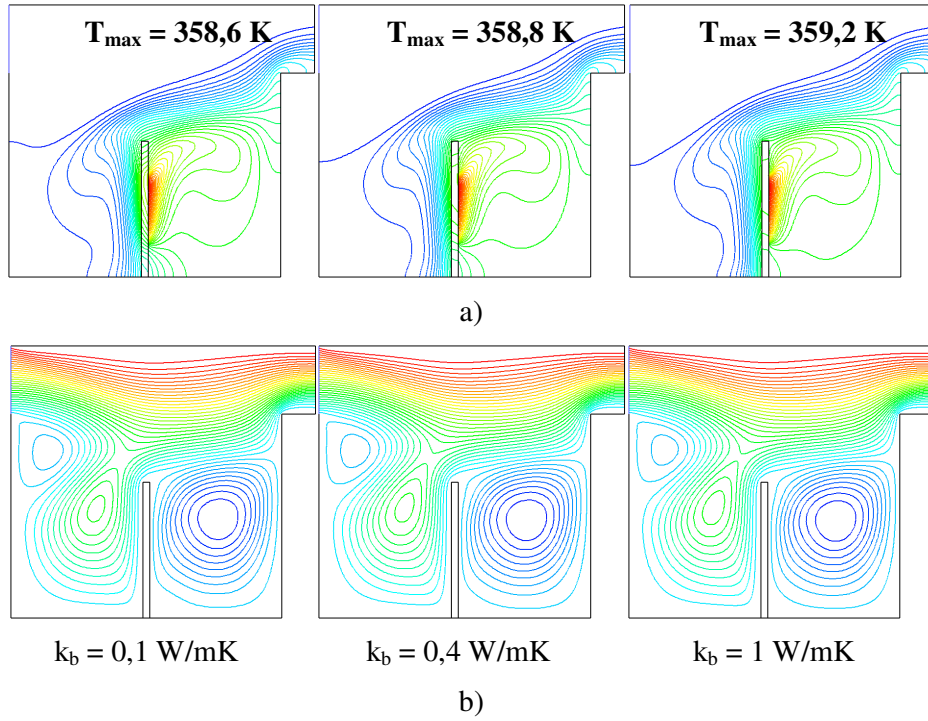
Reynolds sayısı artmaya devam ettikçe levha kalınlığının etkisini görmek mümkün hale gelmektedir. Soğutucu akışkanın hesap bölgesine girmesinden itibaren akış içinden meydana gelen kopmalar levha kalınlığına bağlı olarak Reynolds sayısının farklı değerlerinde oluştuğu gözlemlenmektedir. Soğutucu akışkanın hızlarının (Reynolds) sabit olduğu farklı levha kalınlıklarının gösterildiği Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 incelendiği zaman levha kalınlığı düşük olan Şekil 5.11'deki örnekte, yonga üzerindeki sıcaklık levha içine nüfuz etmeye başlamışken daha yüksek levha kalınlığına sahip Şekil 5.12'deki örnek için sıcaklık henüz levha içine nüfuz etmemiştir.



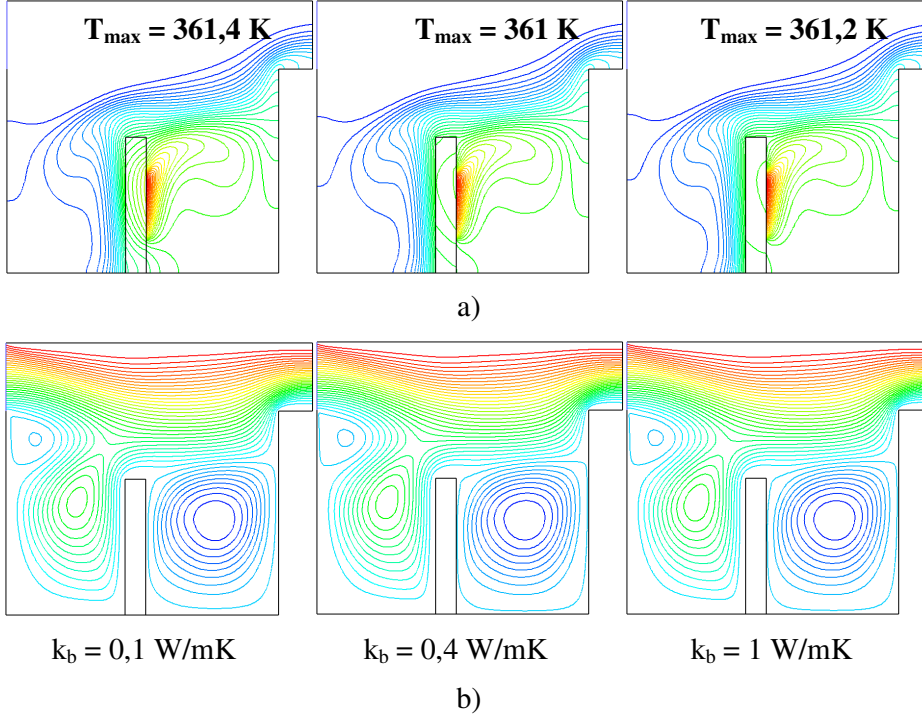
Şekil 5.7 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 40$, $Ri = 12$, $b = 1 \text{ mm}$).



Şekil 5.8 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 40$, $Ri = 12$, $b = 3$ mm).



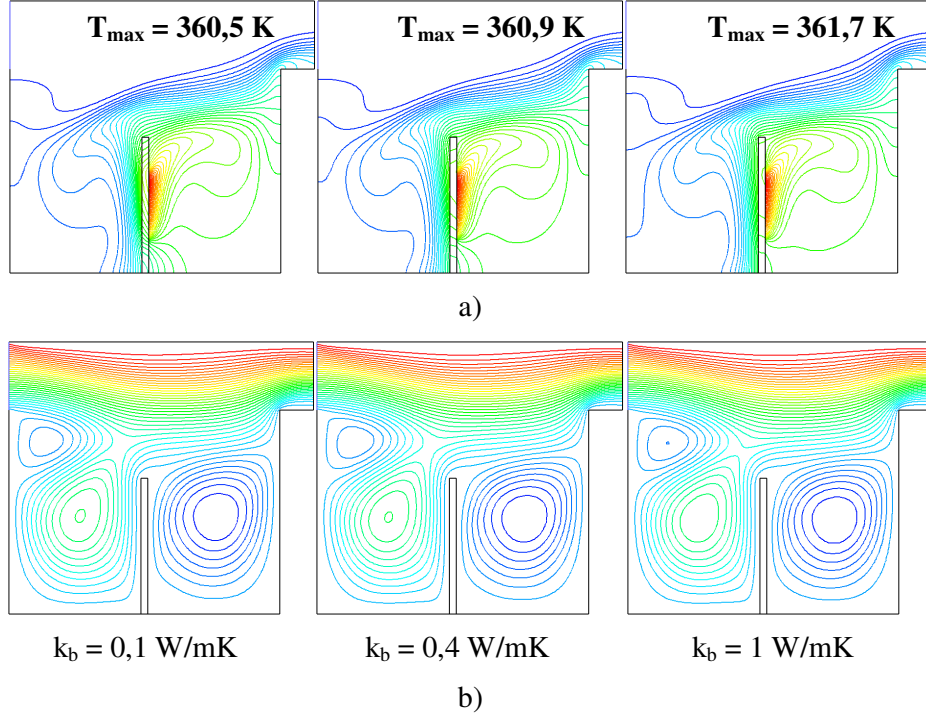
Şekil 5.9 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 55$, $Ri = 8$, $b = 1$ mm).



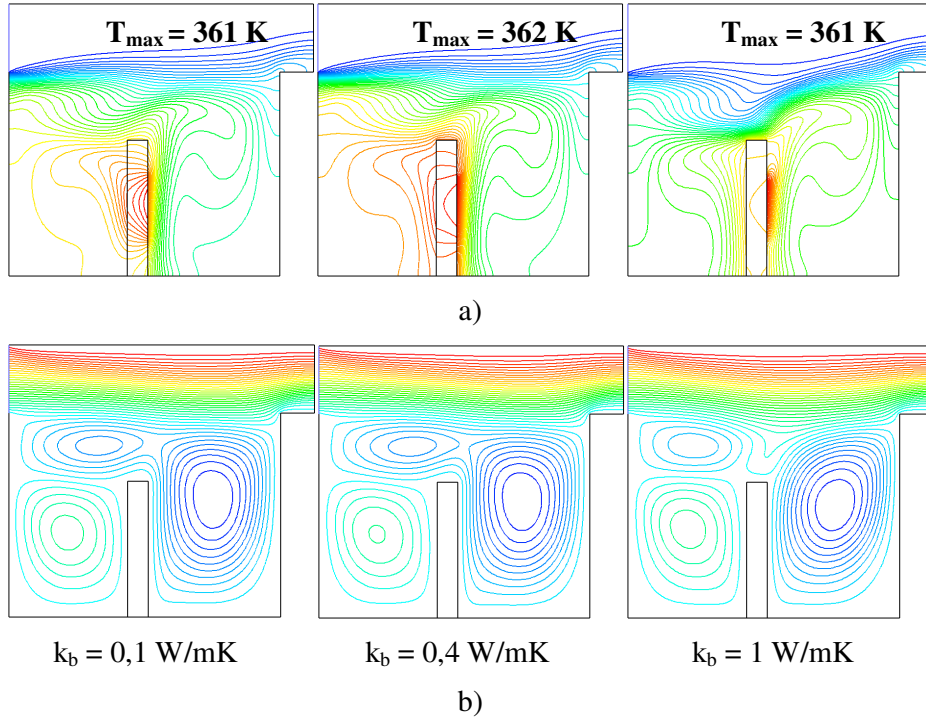
Şekil 5.10 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 55$, $Ri = 8$, $b = 3$ mm).

Levha kalınlıkları $b = 1$ ve 3 mm için elde edilen akım fonksiyonu eğrilerinden, Reynolds sayısının düşük değerlerinden itibaren levhanın sol tarafında başlayan yeni vorteks oluşumunun $Re = 75$ olduğu zaman iyice belirginleştiği ve $Re = 110$ civarında vorteks kopmasının meydana geldiği gözükmemektedir. Vorteks kopması için kritik Reynolds değerinin, levha kalınlığına bağlı olmak üzere, $75 < Re_{kritik} < 110$ aralığında olduğu tespit edilmiştir. (Şekil 5.13b, 5.12b). Dolayısıyla, vorteks kopması gerçekleştiğinde, levhanın sol kısmında ölü vorteks bölgesi oluşmakta, bu ölü bölgeye soğutucu yeni akışkan giremediği için, Reynolds sayısı arttıkça sistemde oluşan maksimum sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Tam vorteks kopması oluştuğundan sonraki Reynolds sayısı artışları ise kademeli olarak maksimum sıcaklıkta düşmeye neden olmaktadır. Dolayısıyla, sistemdeki çalışma şartları öncelikle vorteks kopması civarında olmayacak şekilde belirlenmelidir.

Yapılan CFD simülasyonları sonucu levha kalınlığı, b arttıkça Re_{kritik} değerinin de azaldığı tespit edilmiştir. Örneğin $b = 1$ mm için $Re \approx 110$ olup, $b = 3$ mm için $Re \approx 75$ 'dir.

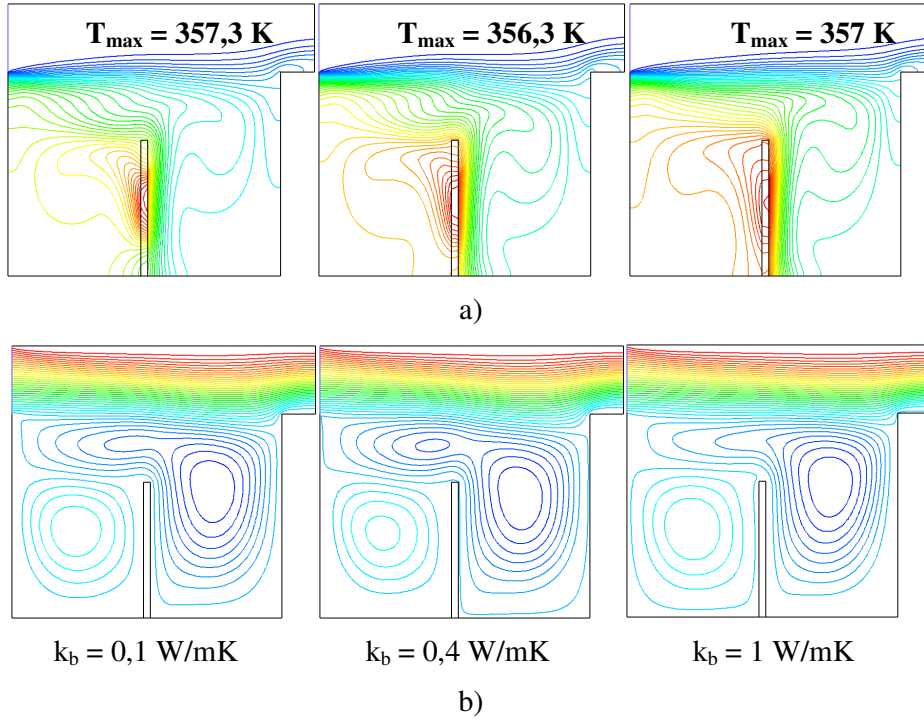


Şekil 5.11 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 75$, $Ri = 3,5$, $b = 1 \text{ mm}$).

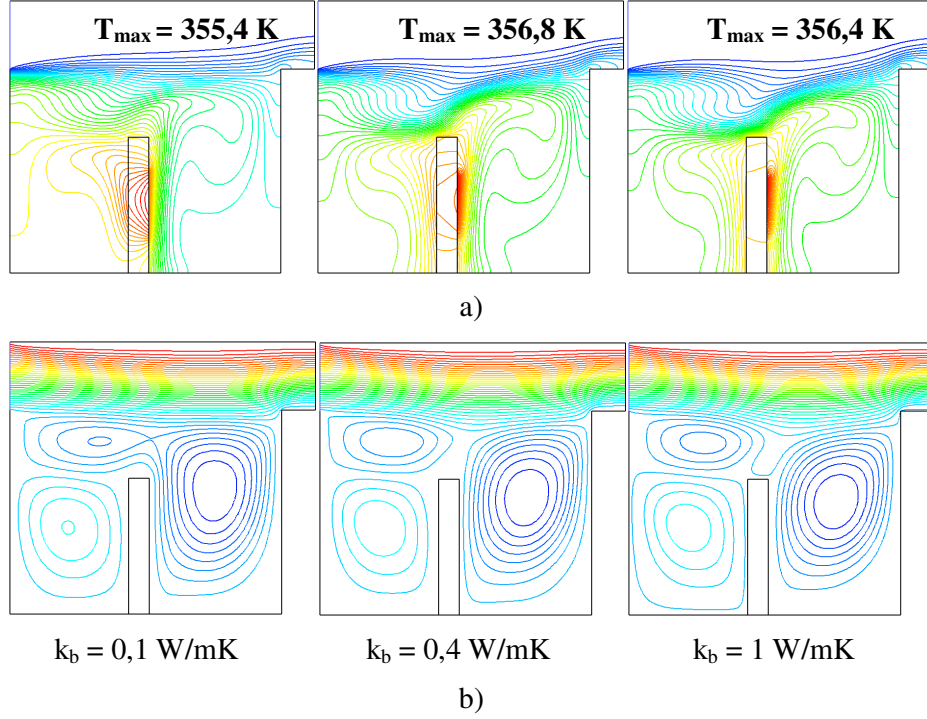


Şekil 5.12 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 75$, $Ri = 3,5$, $b = 3 \text{ mm}$).

Şekil 5.3, 5.5, 5.7, 5.9, 5.11’de görüldüğü gibi ince levha kalınlıkları için, levha ısı iletim katsayısının etkisi ihmal edilebilir düzeyde olup, sadece yüksek Reynolds sayılarında ($Re \geq 110$) eş sıcaklık ve akım fonksiyonu eğrilerinde belirgin farklar görülmektedir (bkz. Şekil 5.13, 5.15, 5.17). Beklendiği gibi, levha ısı iletim katsayısı k_b , belirli bir değeri geçtikten sonra levha içinde uniform bir sıcaklık dağılımı görülmektedir. Karışık taşınım probleminde ısı kaynağının monte edildiği levhanın ısı iletim katsayısı ve Reynolds sayısının sistemde oluşan maksimum sıcaklığa etkisi Çizelge 5.1 - 5.3’de farklı levha kalınlıkları için verilmiştir.



Şekil 5.13 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 110$, $Ri = 1,6$, $b = 1 \text{ mm}$).

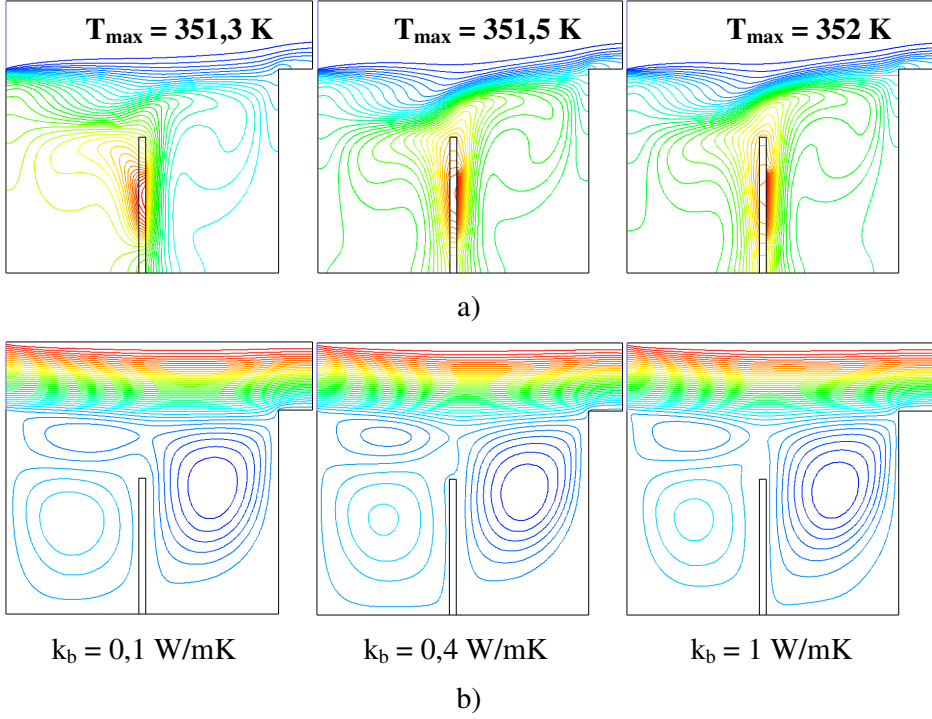


Şekil 5.14 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 110$, $Ri = 1,6$, $b = 3$ mm).

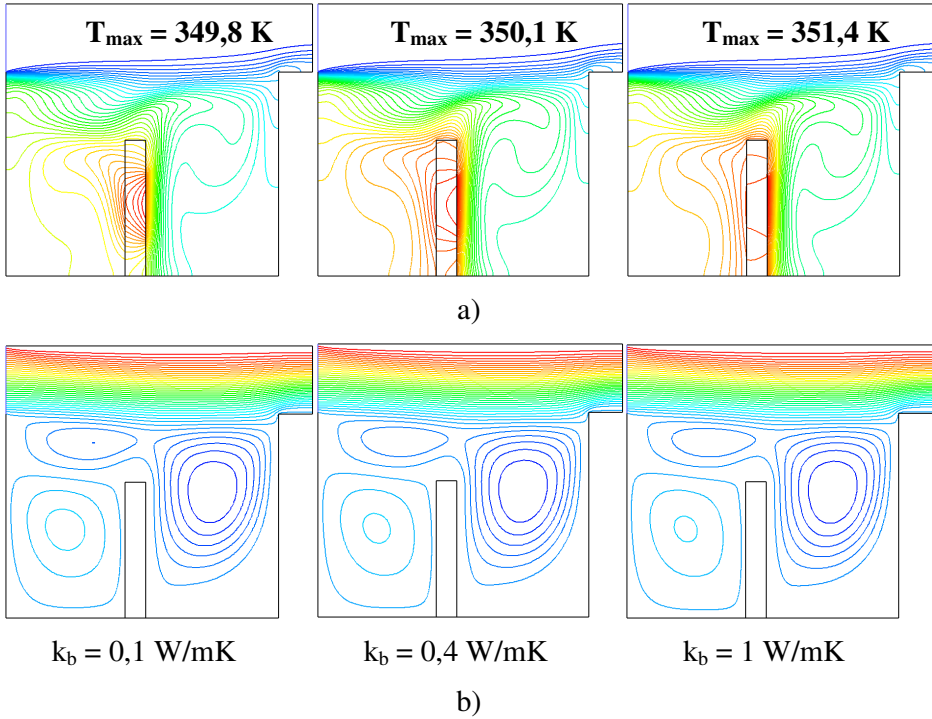
Normal şartlarda, soğutucu akışkan hızı (Re sayısı) arttıkça sistemde ortaya çıkan maksimum sıcaklık azalacaktır. Ancak, akış alanında ortaya çıkan bifürkasyon (karakter değişikliği) nedeniyle bu durum her zaman doğru olmayabilir.

Çizelge 5.1–5.3’de görüldüğü gibi sistemde oluşan maksimum sıcaklık Reynolds sayısı ile devamlı bir düşüş göstermemekte, belirli bir aralıkta geçerli olmak üzere, Reynolds sayısı ile artış görülmektedir.

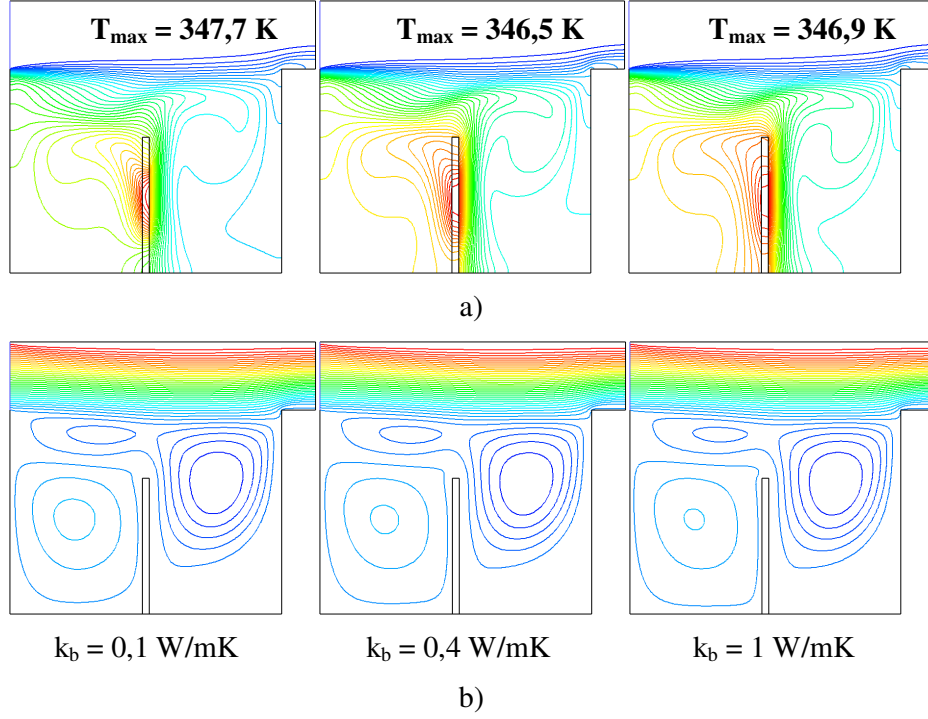
Daha yüksek Reynolds sayılarında sirkülasyon şiddetini kaybetmeye devam ederken doğal taşınım etkileri azalmaktadır ve zorlanmış taşınım etkileri daha belirgin hale gelmektedir.



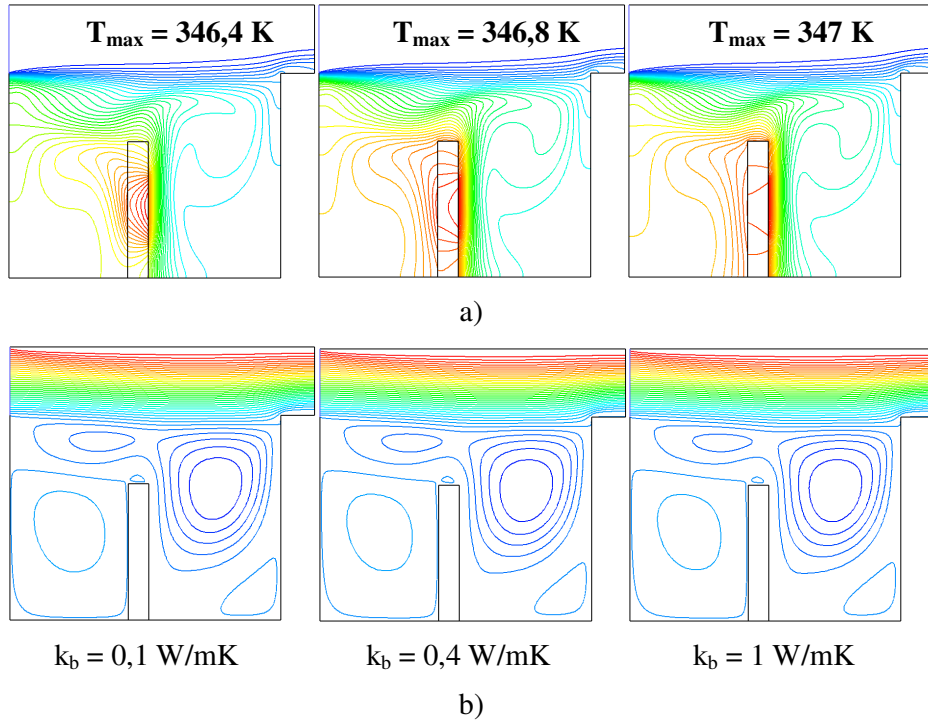
Şekil 5.15 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 160$, $Ri = 0,7$, $b = 1$ mm).



Şekil 5.16 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 160$, $Ri = 0,7$, $b = 3$ mm).

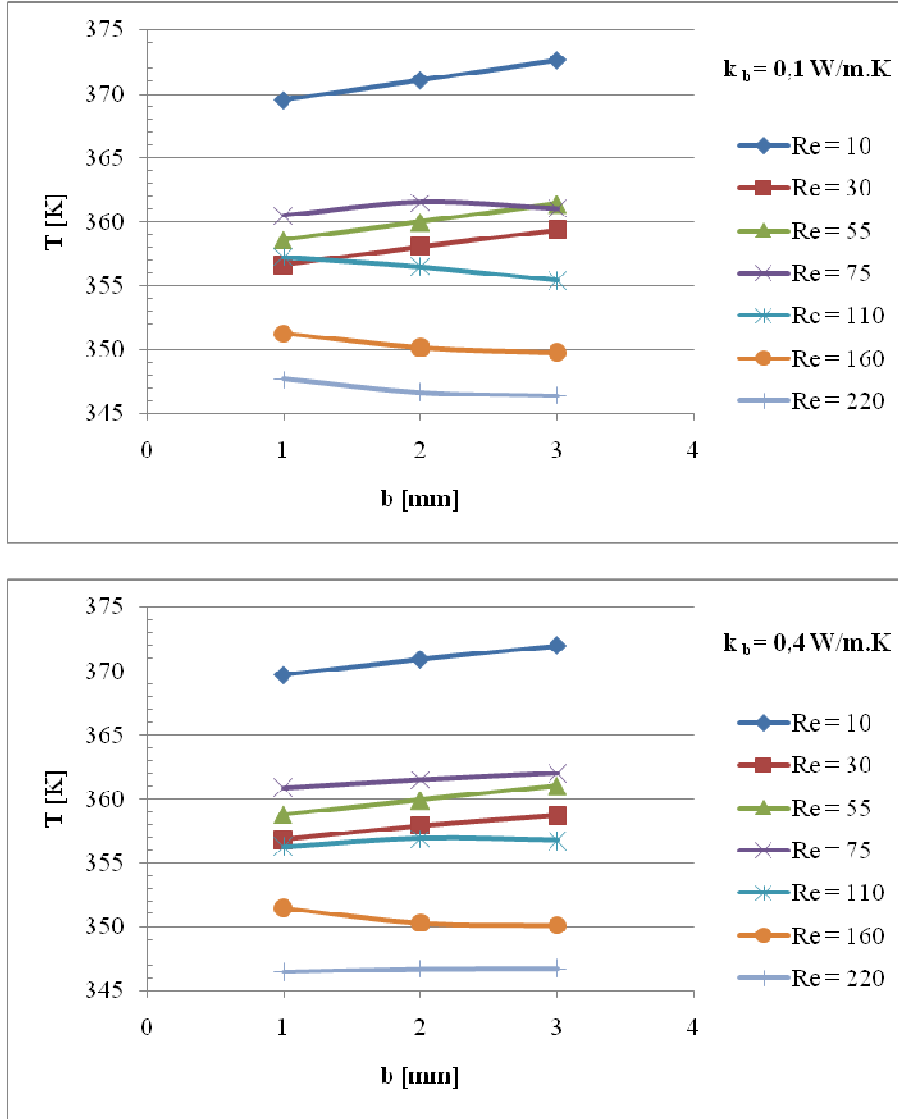


Şekil 5.17 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 220$, $Ri = 0,4$, $b = 1$ mm).

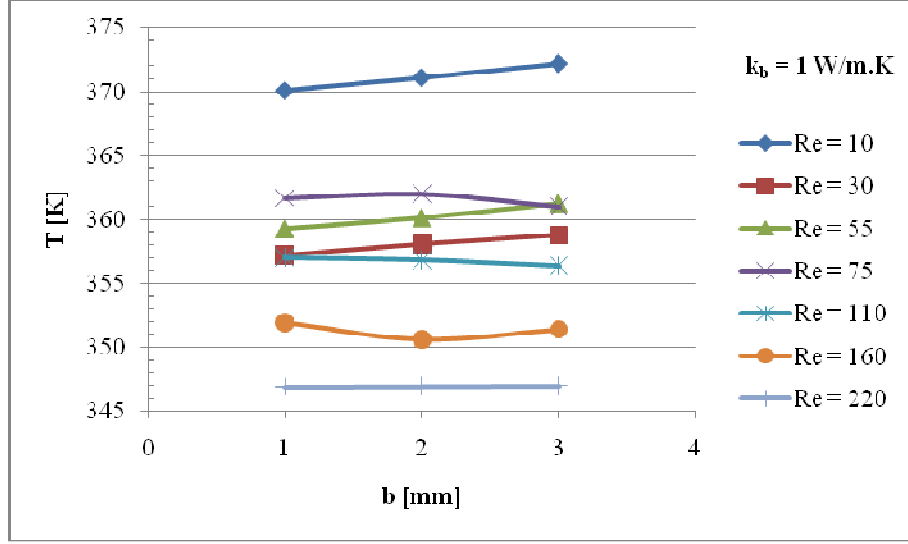


Şekil 5.18 : (a) Eş sıcaklık eğrilerinin ve (b) akım fonksiyonunun levha ısı iletim katsayısı (k_b) ile değişimi ($Re = 220$, $Ri = 0,4$, $b = 3$ mm).

Çizelge 5.1'den ve Çizelge 5.3'den de anlaşıldığı gibi daha etkin bir soğutmanın gerçekleştiği bu kısımda levha kalınlığının etkisi önemini yitirmektedir. Bifürkasyon'nun (karakter değişikliği) etkisini şekil 5.19'a bakarak da anlayabilmek mümkündür. Sistemde oluşan maksimum sıcaklık Reynolds sayısı ile devamlı bir düşüş göstermemekte, belirli bir aralıkta geçerli olmak üzere, levha kalınlığına bağlı olmaksızın Reynolds sayısı ile artış görülmektedir.

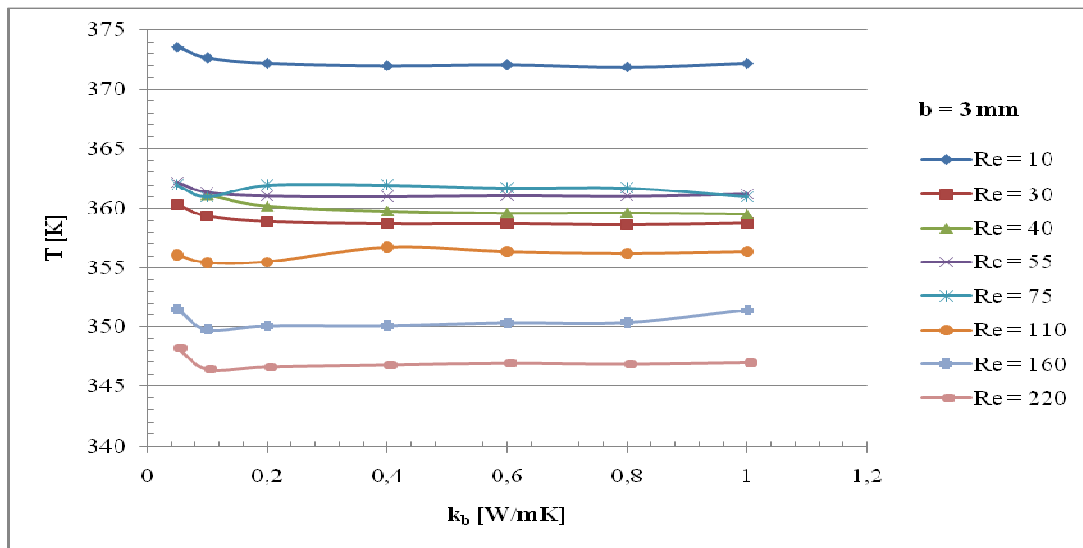
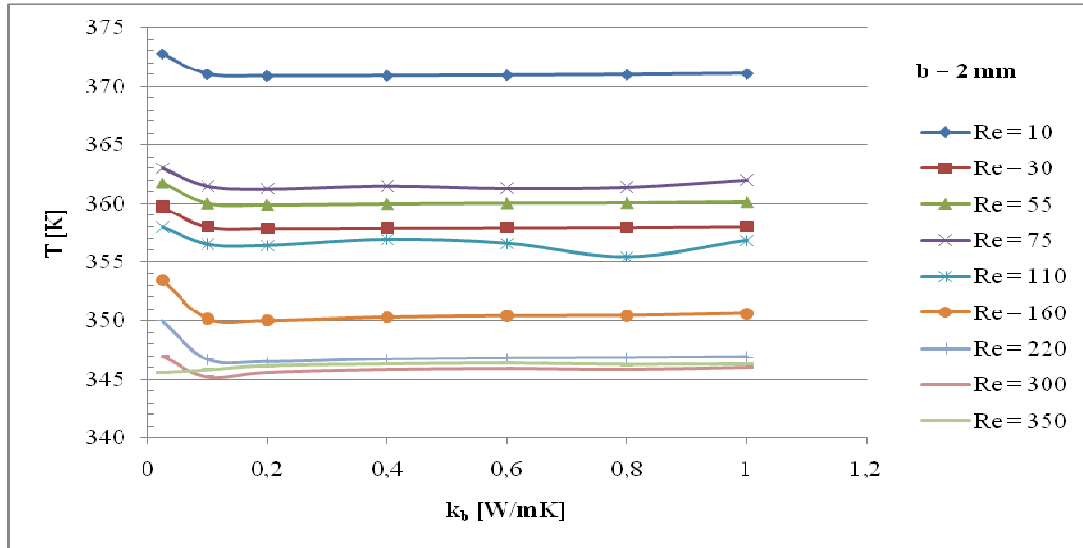
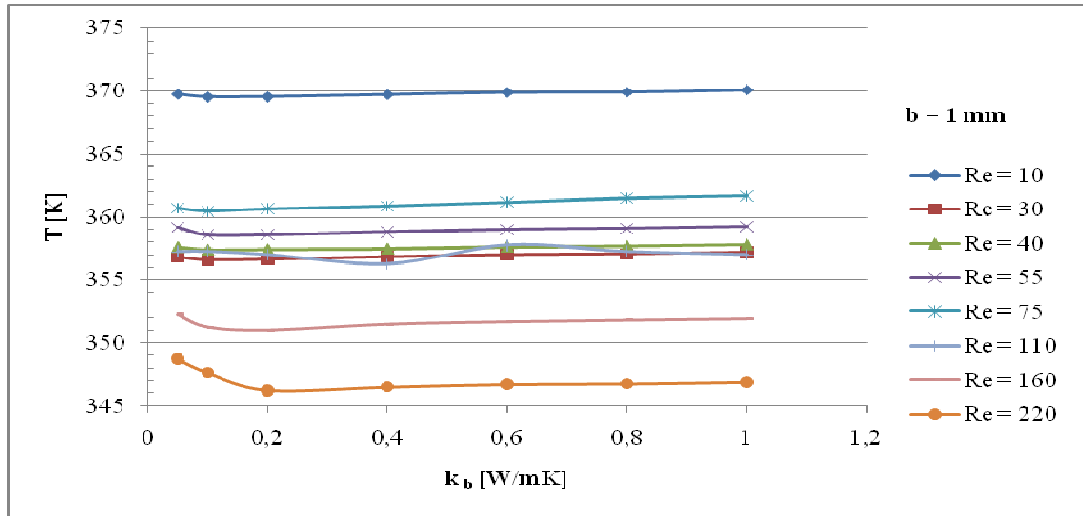


Şekil 5.19 : Levha kalınlığının maksimum sıcaklığa etkisi (farklı Re ve k_b için).

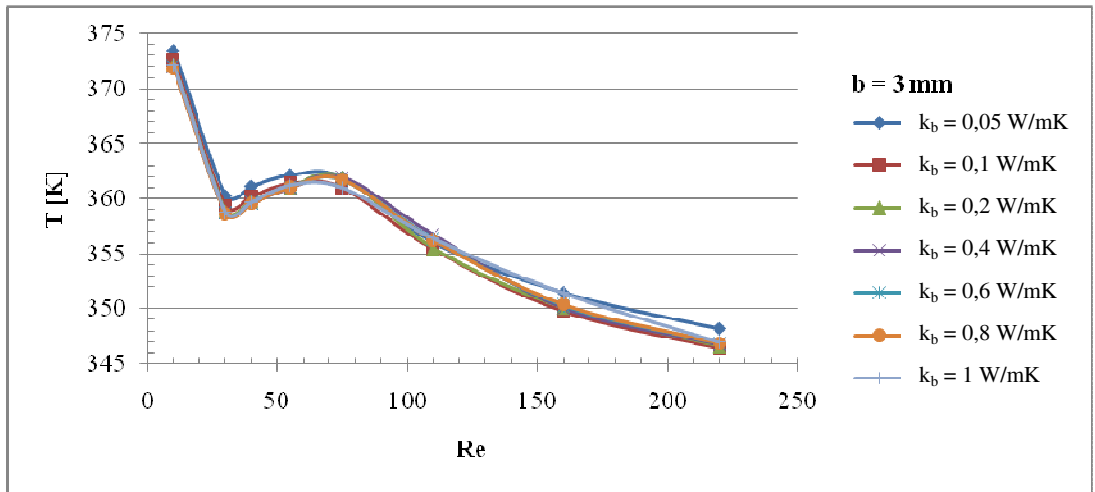
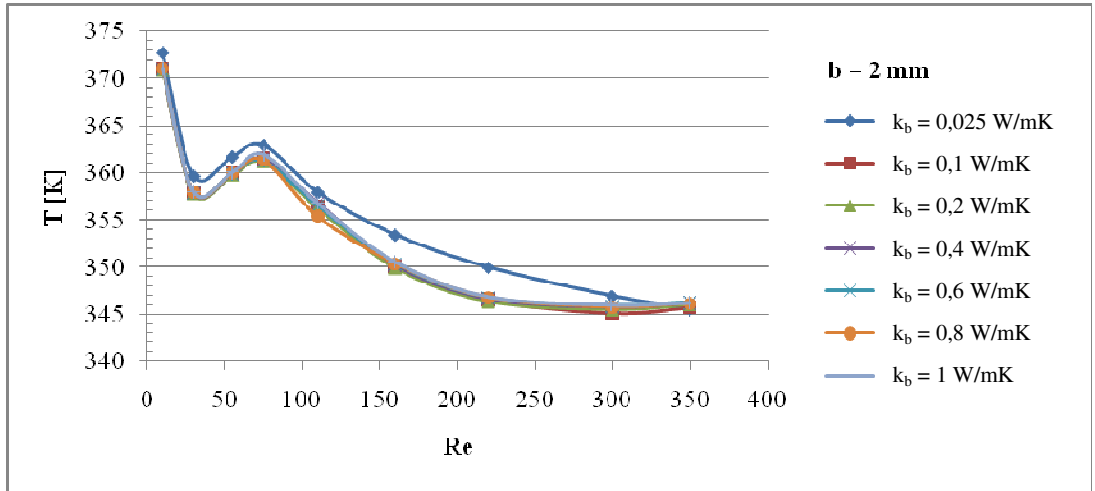
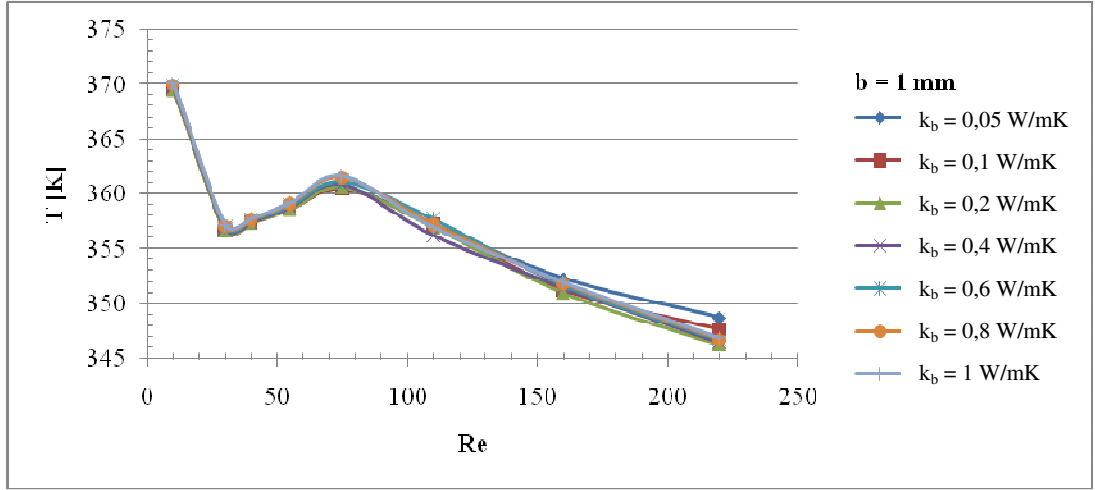


Şekil 5.19 (devam) : Levha kalınlığının maksimum sıcaklığa etkisi. (farklı Re ve k_b için).

Aynı etki şekil 5.20'ye bakılarak da görülebilmektedir. Burada Reynolds sayısının her bir değeri için levhanın ısı iletim katsayısı (k_b) belirli bir değeri geçtikten sonra sistemde oluşan maksimum sıcaklığın ısı iletim katsayısının değişiminden etkilenmeyip neredeyse sabit bir değere ulaştığı görülmektedir. Benzer etki Şekil 5.21'de de görülmektedir. Sabit ısı iletim katsayısına bağlı olarak sistemde oluşan maksimum sıcaklığın, levha kalınlığının değişiminden etkilenmeyerek, Reynolds sayısı ile değişiminin benzer karakterde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.20 : Levhanın ısı iletim katsayısının maksimum sıcaklığa etkisi (farklı Re ve b için).



Şekil 5.21 : Reynolds sayısının maksimum sıcaklığa etkisi (farklı k_b ve b için).

5.4 Kriging Modelinin Oluşturulması

Bu kapsamda, öncelikle göz önüne alınan parametre uzayı [k_b , b , Re] için Latin Hiperküp Örnekleme algoritması ile 50, 100 ve 250 adet LHS noktası belirlenmiştir. Sonra bu parametre değerleri için Fluent[®] yazılımı kullanılarak CFD çözümleri elde edilmiş ve probleme ait parametre uzayı için maksimum sıcaklıkları içeren veri tabanı oluşturulmuştur. CFD çözümleri için çözüm ağı, akış ve ısı sınır şartları ve diğer sayısal parametreler Şekil 5.2’de gösterildiği gibidir. Simülasyon sonuçları, ısı kaynağı üzerindeki maksimum sıcaklık değerini (T_{max}) gösterecek şekilde EK 4’de verilen çizelgelerde gösterilmiştir (50 adet LHS noktası için Çizelge A8, 100 adet LHS noktası için Çizelge A9, 250 adet LHS noktası için Çizelge A10). Reynolds sayısı, parametre uzayına ait değişken olduğu için her simülasyonda farklı değer almıştır. Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması kullanılarak, Çizelge A8 – A10’daki LHS noktaları için verilen maksimum sıcaklıklar göz önüne alınarak maksimum sıcaklığı minimize edecek optimum [k_b , b , Re] değeri etkin ve hızlı bir şekilde belirlenmiştir. Ayrıca, her yonga için izin verilen bir maksimum işletme sıcaklığı olacağı düşünülerek, verilen bir maksimum sıcaklık değerini aşmayan [k_b , b , Re] parametre uzayından en küçük Re sayısına sahip [k_b , b] ikilisi bulunmuştur. Böylece, parametre uzayında bulunan [k_b , b , Re] üçlüsü, hem izin verilen maksimum sıcaklık değerini aşmayacak hem de Re sayısı mümkün olan en küçük değere sahip olacaktır. Gerekli değişiklikler yapılan Kriging-Benzetilmiş tavlama meta-algoritması ile yukarıda tarif edilen problem çözülmüştür.

Çizelge 5.4’de üçüncü mertebeye CFD sonuçlarından elde edilen Kriging modelinin 100 ve 250 LHS noktası için performans değerleri gösterilmektedir. Burada, LHS örnekleme noktasına ait olmayan 20 farklı noktada CFD sonuçlarıyla Kriging modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmakta ve tasarım dışı noktalarda Kriging modelinin doğruluğu rms hatası olarak verilmektedir. Yapılan diğer tasarım dışı model tahminleri gerek 100 LHS, gerekse de 250 LHS noktası için model tahmin rms değeri yaklaşık 1,5 – 2,5 arasındadır. Buradaki performans değerine ait sonuçta zorlanmış taşınımında olduğu gibi rms hata değerinin LHS nokta sayısı artışıyla doğru orantılı olarak azalmadığı görülmüştür. Bunun sebebinin karışık taşınım problemine ait CFD sonuçlarında görülen bifürkasyon etkisiyle belirli bir Reynolds sayısı aralığında meydana gelen sıcaklık artışından ötürü kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ayrıca üç boyutlu problemlerde çok daha fazla LHS örnekleme sayısına ihtiyaç vardır.

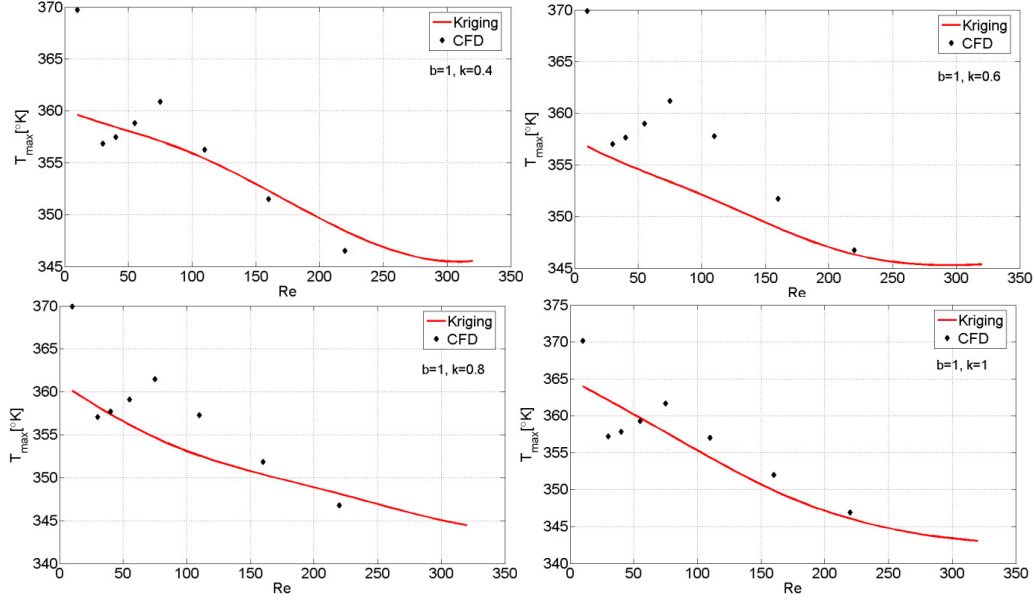
Çizelge 5.4 : 20 farklı tasarım dışı noktanın CFD simülasyonu sonuçları ile 100 ve 250 LHS noktasına ait Kriging modeli tahmininin karşılaştırılması. Sistemde ortaya çıkan maksimum sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır (CFD çözümleri üçüncü mertebeden doğruluktur).

Örnekleme noktası (LHS) adedi	k_b [W/m.K]	b [mm]	Re	T-CFD [K]	100 nokta T-Krig [K]	250 nokta T-Krig [K]
1	0,47	1,8	65	361,1	359,2	361,1
2	0,76	2,2	264	346,0	346,0	346,0
3	0,96	2,1	208	347,3	347,7	347,5
4	0,32	2,0	194	348,9	349,8	348,9
5	0,84	3,6	136	352,5	352,6	352,6
6	0,08	0,6	255	360,7	358,9	352,0
7	0,89	3,8	287	345,8	345,2	345,6
8	0,99	2,5	156	350,9	352,4	351,2
9	0,72	1,3	209	347,3	347,9	348,0
10	0,60	3,4	42	359,8	360,1	358,6
11	0,42	1,2	20	358,5	358,0	358,8
12	0,62	2,7	142	352,2	352,7	351,1
13	0,83	3,9	50	360,7	362,8	360,9
14	0,81	3,7	131	353,0	353,0	353,0
15	0,14	1,6	236	353,9	355,9	353,5
16	0,65	2,7	175	349,1	349,5	349,5
17	0,19	3,2	125	355,1	359,0	354,4
18	0,27	1,4	317	346,6	346,0	348,1
19	0,55	2,4	23	357,8	358,6	364,3
20	1,12	3,0	174	349,2	351,7	349,5
rms hata					1,45	2,48

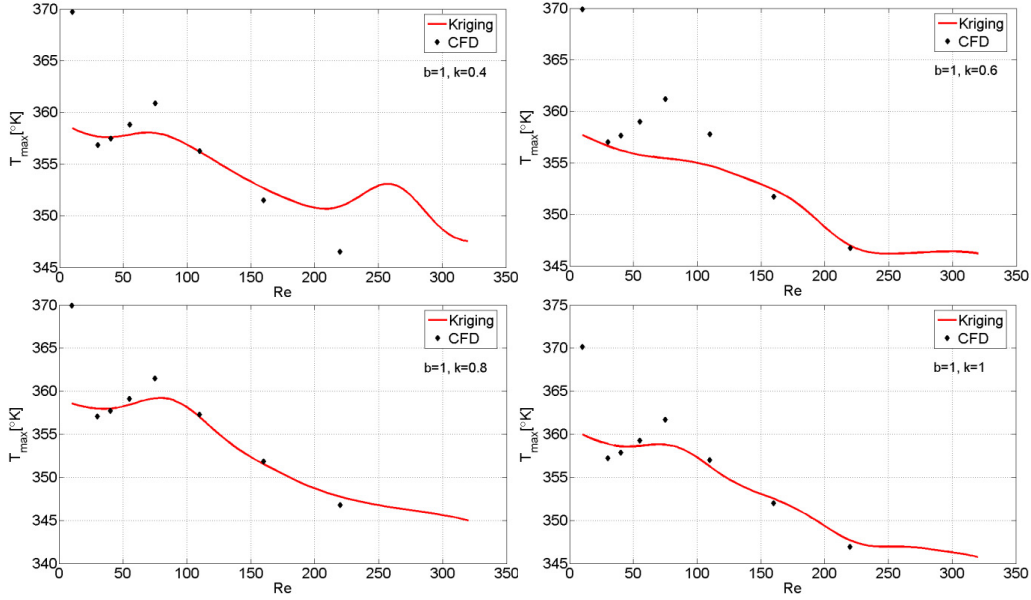
5.5 Kriging Modeli ve Benzetilmiş Tavlama İle Karışık Taşınım Probleminin Optimizasyonu

Ek 4'de Çizelge A.8 – A.10'da verilen LHS noktaları esas alınarak bulunan levhanın ısı iletim katsayısı (k_b), levhanın kalınlığı (b) ve soğutucu akışkanın Reynolds sayısı (Re) için CFD analizleri ile maksimum sıcaklık değerleri bulunduktan sonra 50, 100 ve 250 adet örnekleme noktası için ayrı ayrı Kriging modeli oluşturulmuştur. Doğal olarak örnekleme sayısı problemin optimizasyonu yapılmak istenen parametre uzayındaki karmaşık yapısına/değişimine bağlı olup, her bir problem için farklı örnekleme sayısı gerekli/yeterli olabilir. LHS örnekleme sayısının Kriging modelinin tasarım dışı tahmin doğruluğuna etkisi çok önemlidir. Özellikle üç boyutlu optimizasyon problemlerinde yüksek LHS örnekleme sayısı ihtiyacı beklenmelidir. LHS noktalarına ait çözümler yapıp istenilen veri tabanı oluşturulduktan sonra bu veri tabanını esas alan Kriging modeli kurularak, bu model öncelikle tasarım dışı noktalarda test edilmelidir. Şekil 5.22 - 5.23'de 50, 100 ve 250 LHS noktası için oluşturulan Kriging modeli ile (tasarım dışı yani oluşturulan modelde yer almayan)

CFD sonuçları arasındaki karşılaştırma verilmiştir. Kriging modeli ile CFD sonuçları yeterli uyum içinde olup LHS nokta sayısının Kriging performansına olan etkisi Şekil 5.22’de görülmektedir.

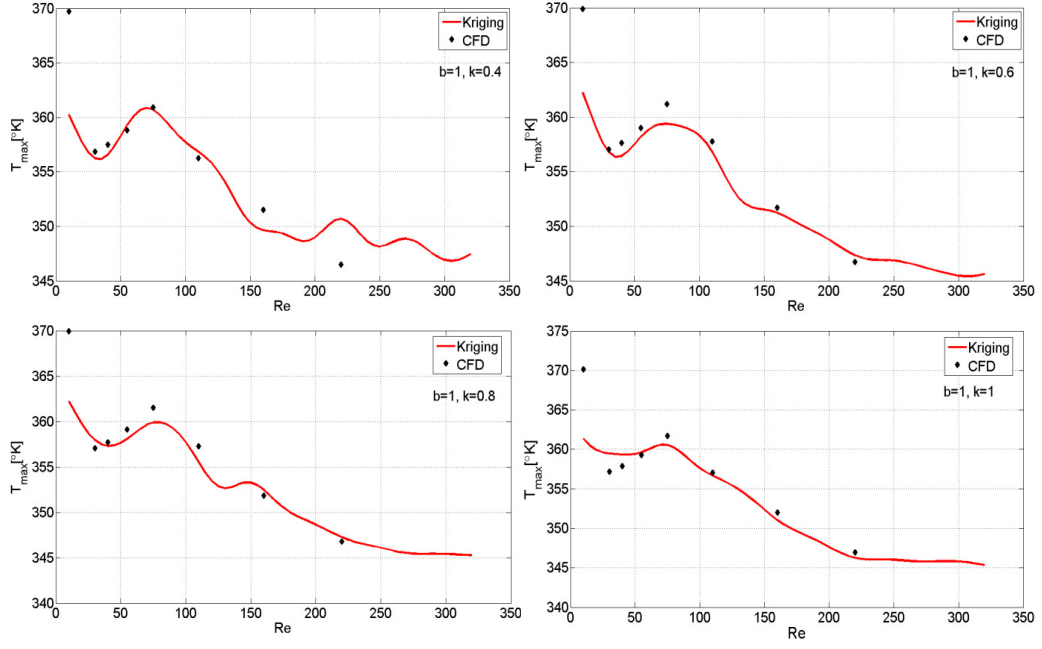


a) LHS = 50 nokta

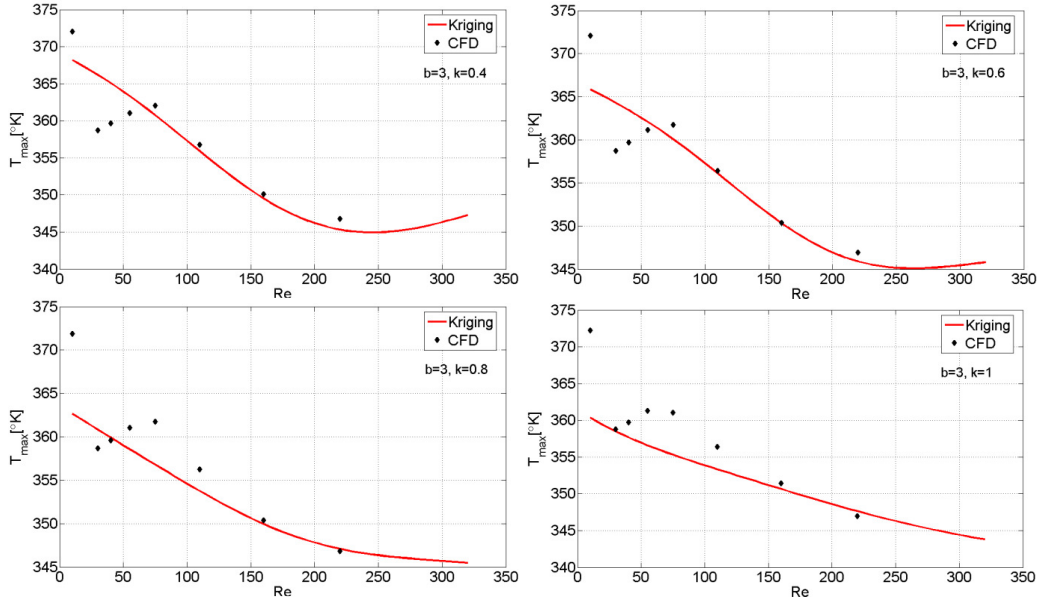


b) LHS = 100 nokta

Şekil 5.22 : 50, 100 ve 250 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktalarını esas alan Kriging modeline göre Reynolds sayısının maksimum sıcaklığa etkisi. Siyah noktalı semboller CFD sonuçlarını (3. mertebe çözüm), düz (kırmızı) çizgiler ise Kriging modeli tahminini göstermektedir.

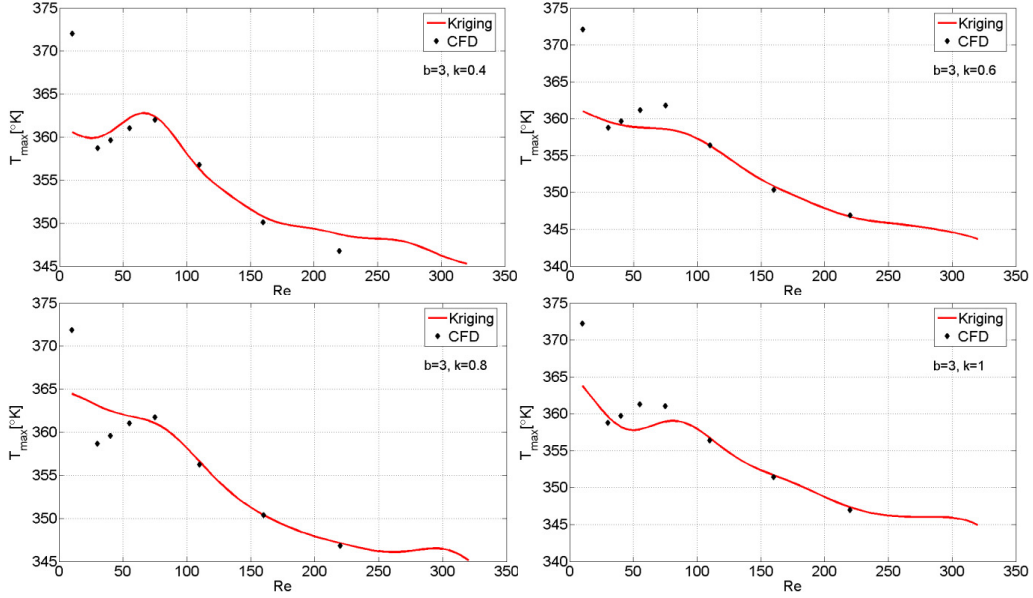


c) LHS = 250 nokta

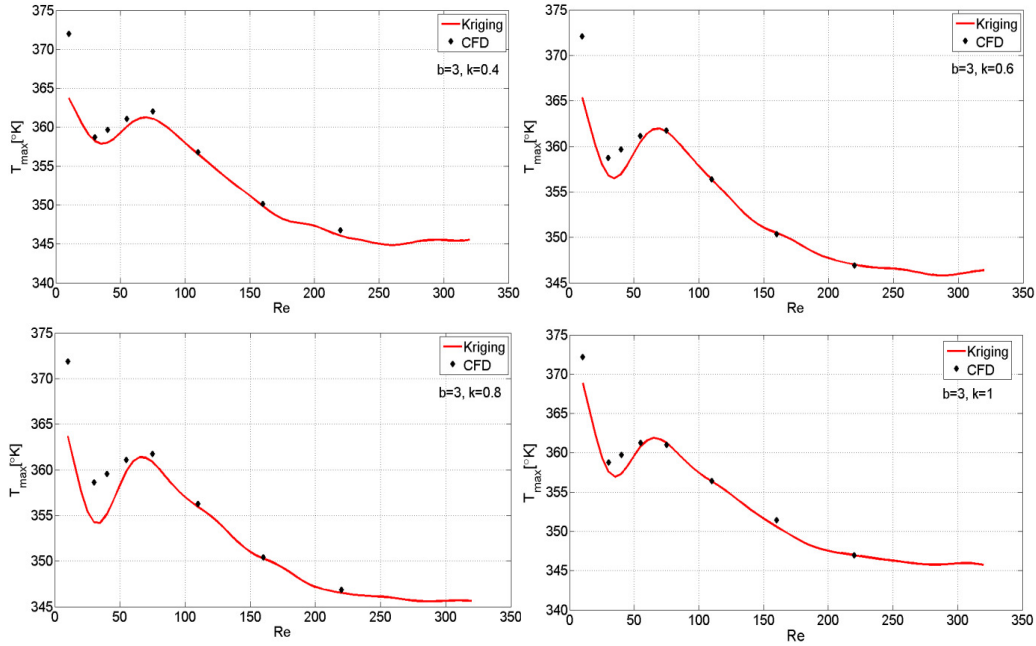


d) LHS = 50 nokta

Şekil 5.22 (devam) : 50, 100 ve 250 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktalarını esas alan Kriging modeline göre Reynolds sayısının maksimum sıcaklığa etkisi. Siyah noktalı semboller CFD sonuçlarını (3. mertebe çözüm), düz (kırmızı) çizgiler ise Kriging modeli tahminini göstermektedir.



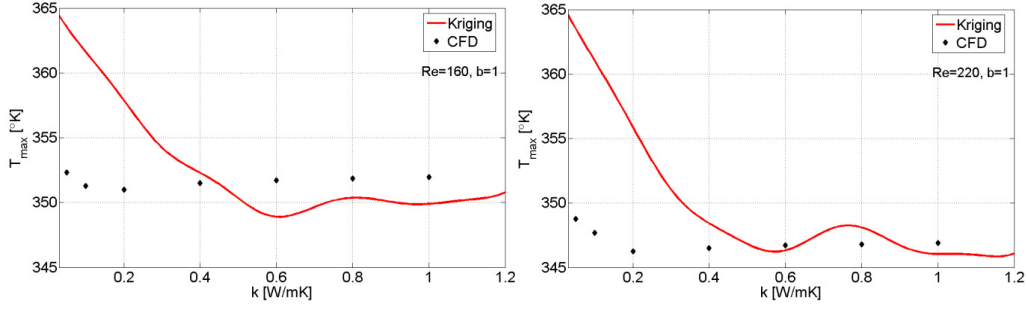
e) LHS = 100 nokta



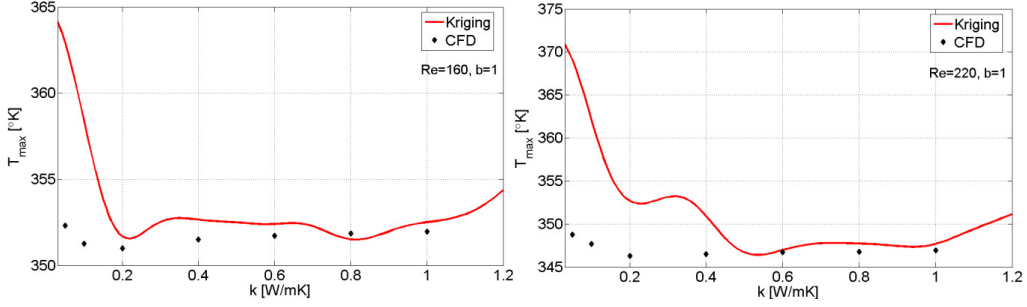
f) LHS = 250 nokta

Şekil 5.22 (devam) : 50, 100 ve 250 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktalarını esas alan Kriging modeline göre Reynolds sayısının maksimum sıcaklığa etkisi. Siyah noktalı semboller CFD sonuçlarını (3. mertebe çözüm), düz (kırmızı) çizgiler ise Kriging modeli tahminini göstermektedir.

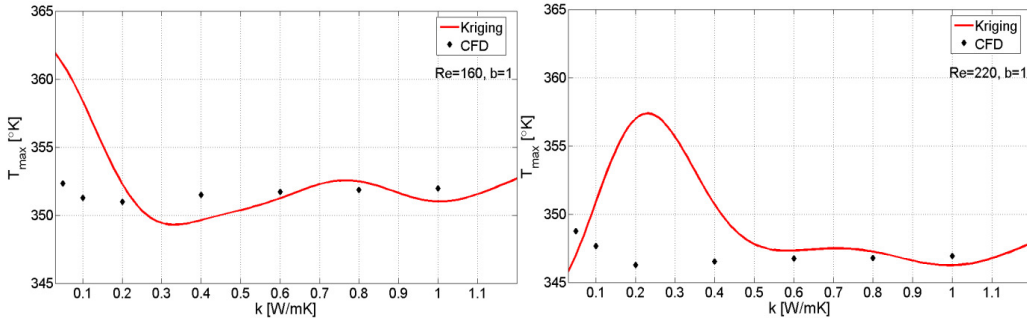
Şekil 5.23’de 50, 100 ve 250 LHS noktası için oluşturulan Kriging modeli ile (tasarım dışı yani oluşturulan modelde yer almayan) CFD sonuçları arasındaki karşılaştırma verilmiştir. Şekilde, siyah noktalar tasarım dışı CFD analizlerinin yapıldığı parametre değerlerini, kırmızı çizgiler ise LHS algoritmasıyla elde edilen parametre uzayına $[k_b, b, Re]$ ait örnekleme noktaları temel alınarak Kriging modeli tahmin sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5.23’de levha ısı iletim katsayısına (k_b) bağlı olarak Kriging modeli ve tasarım dışı CFD sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.23’de Reynolds sayısı ve levha kalınlığı sabit tutulmuş sadece ısı iletim katsayısının değişimi göz önüne alınmıştır. LHS örnekleme sayısının arttırılmasıyla, çok küçük ısı iletim katsayıları hariç olmak üzere, CFD ve Kriging model sonuçlarının uyum içinde olduğu görülmektedir.



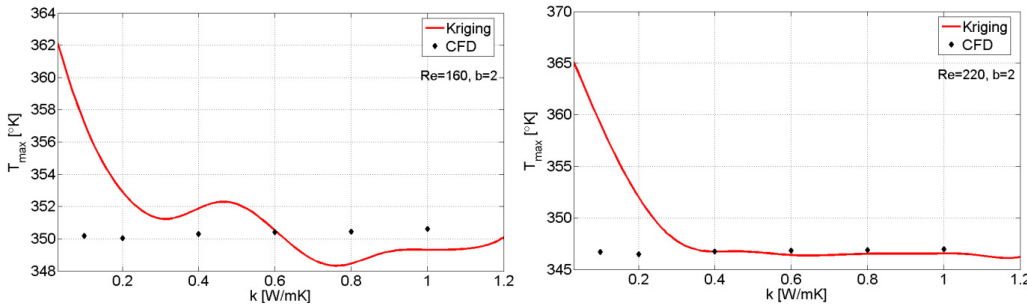
a) LHS = 50 nokta



b) LHS = 100 nokta

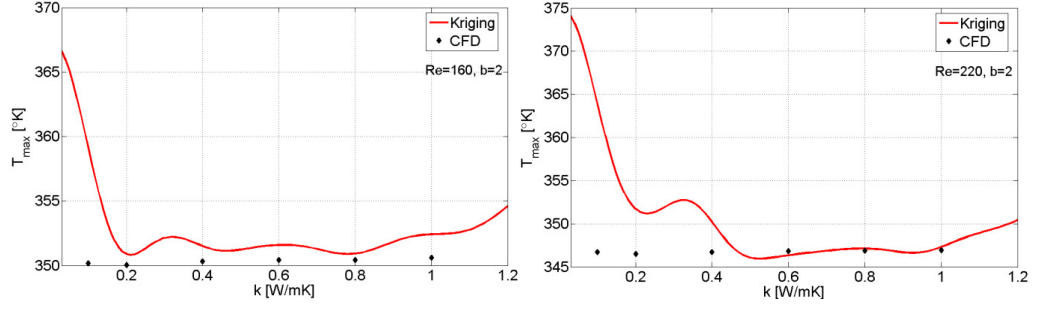


c) LHS = 250 nokta

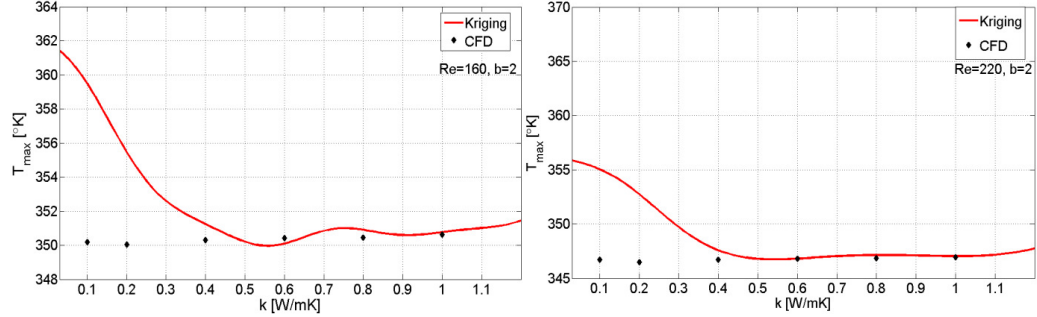


d) LHS = 50 nokta

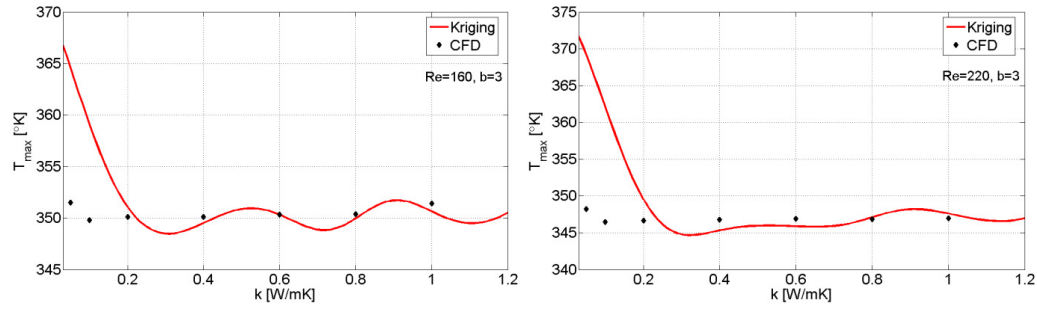
Şekil 5.23 : 50, 100 ve 250 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktasını esas alan Kriging modeline göre soğutucu akışkanın ısı iletim katsayısının (k_b) maksimum sıcaklığa etkisi. Siyah noktalı semboller CFD sonuçlarını (3. mertebe çözüm), düz (kırmızı) çizgiler ise Kriging modeli tahminini göstermektedir.



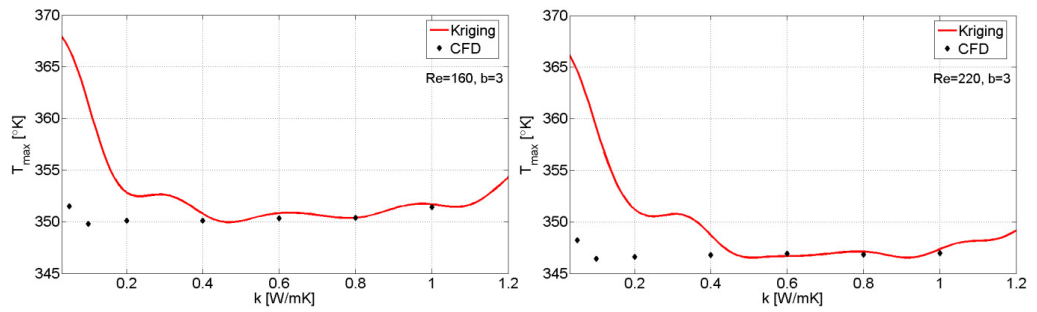
e) LHS = 100 nokta



f) LHS = 250 nokta

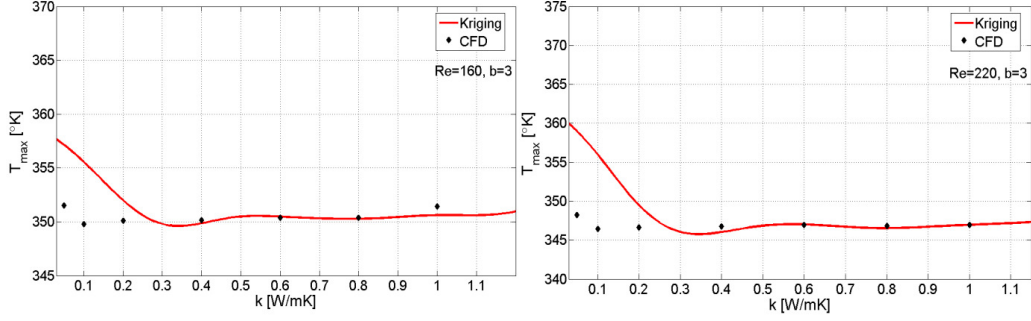


g) LHS = 50 nokta



h) LHS = 100 nokta

Şekil 5.23 (devam) : 50 ve 100 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktasını esas alan Kriging modeline göre soğutucu akışkanın ısı iletim katsayısının (k_b) maksimum sıcaklığa etkisi. Siyah noktali semboller CFD sonuçlarını (3. mertebe çözüm), düz (kırmızı) çizgiler ise Kriging modeli tahminini göstermektedir.

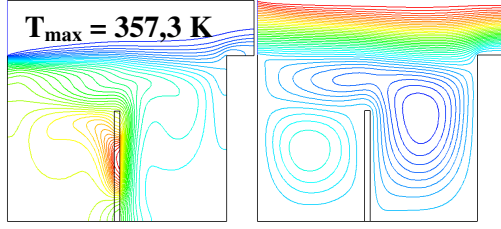


i)LHS = 250 nokta

Şekil 5.23 (devam) : 50 ve 100 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktasını esas alan Kriging modeline göre soğutucu akışkanın ısı iletim katsayısının (k_b) maksimum sıcaklığa etkisi. Siyah noktalı semboller CFD sonuçlarını (3. mertebe çözüm), düz (kırmızı) çizgiler ise Kriging modeli tahminini göstermektedir.

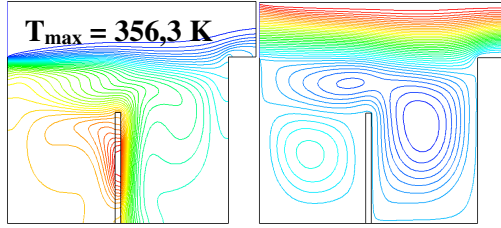
Bundan sonraki kısımda 50 LHS örnekleme noktası için Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları gösterilmektedir. CFD simülasyon sonuçlarından faydalanılarak Çizelge 5.5 ve 5.6'da farklı başlangıç noktaları için optimizasyon sonuçları verilmiştir. Çizelgelerdeki en üst kısımda görülen (sıfırıncı iterasyon) başlangıç noktasını ifade etmektedir. Çizelge 5.5 ve 5.6'da görüldüğü gibi farklı başlangıç noktasının nihai optimizasyon sonucuna etkisi pratik açıdan yoktur. Göz önüne alınan problemde, maksimum sıcaklığın 350 K'nin altında olması şartını sağlayan minimum Reynolds sayısını ve bu Re sayısına ait $[k_b, b]$ parametre değeri bulunmak istenmektedir. Çizelge 5.5 ve 5.6'da görüldüğü gibi, bu optimum değer $[Re = 80, k_b = 0,75 \text{ W/mK}, b = 2,3 \text{ mm}]$ olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.5 : 50 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası için iterasyon sonucu bulunan optimum parametre değerleri ($b = 1$, $Re = 110$)



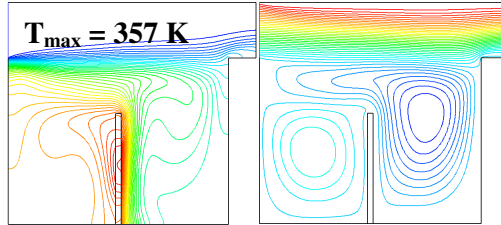
İterasyon Sayısı	k_b [W/m.K]	b [mm]	Re	T_{max} [K]
0	0,10	1,0	110	357,3
23	0,76	2,0	110	348,5
29	0,75	1,9	110	348,8
86	0,77	1,6	109	349,5
98	0,76	2,7	107	348,7
114	0,76	2,8	104	349,1
174	0,74	2,0	101	348,8
176	0,73	1,7	99	350,0
316	0,78	1,9	96	349,2
862	0,76	2,3	82	349,8
1637	0,75	2,2	81	349,8

a) $k_b = 0,1$ W/mK, $b = 1$ mm, $Re = 110$ (başlangıç noktası)



İterasyon Sayısı	k_b [W/m.K]	b [mm]	Re	T_{max} [K]
0	0,40	1,0	110	356,3
111	0,79	1,7	109	349,0
135	0,76	2,2	107	348,3
163	0,73	2,8	102	350,0
176	0,76	1,6	102	349,4
178	0,76	1,6	101	349,3
599	0,74	1,7	100	349,6
659	0,75	2,4	95	348,6
1207	0,79	2,1	93	349,1
1332	0,78	2,4	92	348,8
1342	0,76	1,9	91	349,1
1365	0,76	2,3	90	348,8
1586	0,76	2,3	84	349,5
2086	0,76	2,2	82	349,7

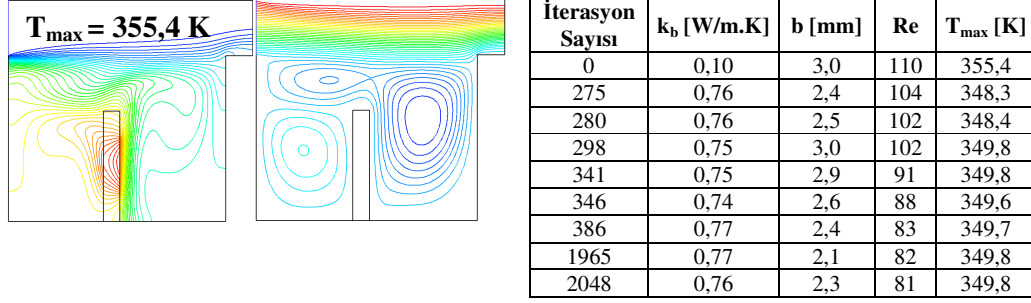
b) $k_b = 0,4$ W/mK, $b = 1$ mm, $Re = 110$ (başlangıç noktası)



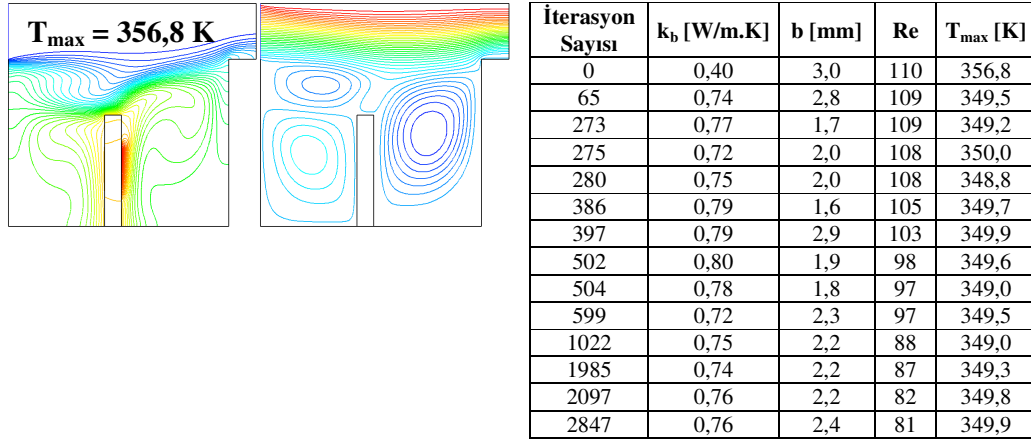
İterasyon Sayısı	k_b [W/m.K]	b [mm]	Re	T_{max} [K]
0	1,00	1,0	110	357,0
13	0,79	1,6	101	349,8
21	0,75	2,0	98	348,6
22	0,75	1,9	98	348,9
1535	0,72	2,4	95	349,6
1536	0,75	2,4	95	348,6
1537	0,76	2,3	94	348,4
1543	0,78	2,6	93	349,0
1699	0,78	2,5	88	349,5
1710	0,76	2,6	86	349,6
1777	0,75	2,5	84	349,6
2271	0,75	2,3	80	350,0

c) $k_b = 1$ W/mK, $b = 1$ mm, $Re = 110$ (başlangıç noktası)

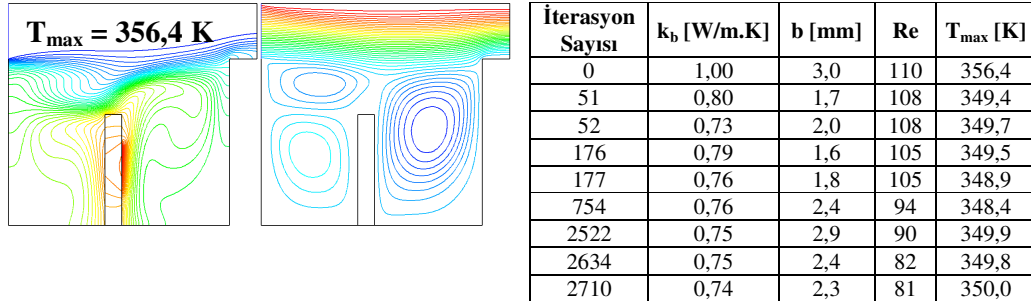
Çizelge 5.6 : 50 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası için iterasyon sonucu bulunan optimum parametre değerleri ($b = 3$, $Re = 110$)



a) $k_b = 0,1$ W/mK, $b = 3$ mm, $Re = 110$ (başlangıç noktası)

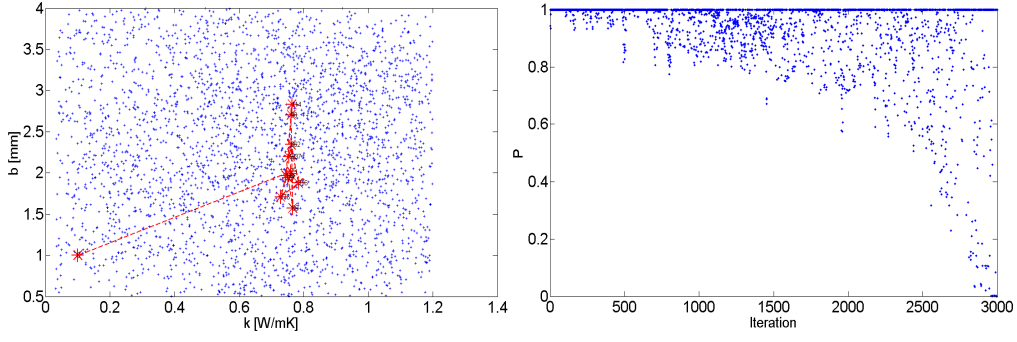


b) $k_b = 0,4$ W/mK, $b = 3$ mm, $Re = 110$ (başlangıç noktası)

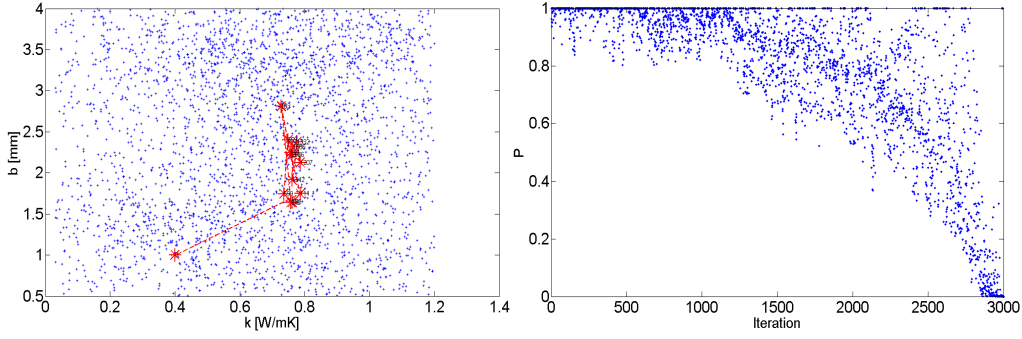


c) $k_b = 1$ W/mK, $b = 3$ mm, $Re = 110$ (başlangıç noktası)

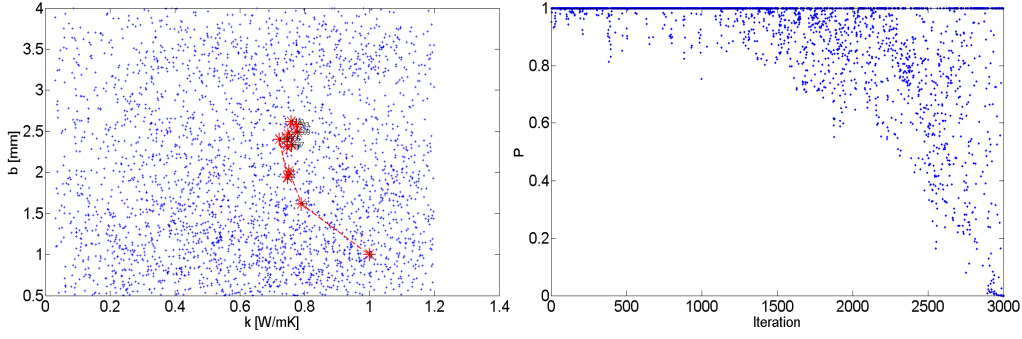
Şekil 5.24 - 5.25’de sol sütunda bulunan grafikler farklı başlangıç noktalarının optimizasyon sonucuna etkisi gösterilmiştir. Her bir durumda soğutma hızı (c) ve başlangıç sıcaklığı (T_0) sabit alınmıştır. Çizelge 5.7 - 5.8’den görüldüğü gibi farklı başlangıç şartlarının optimizasyon sonucuna bir etkisi olmayıp, global optimum noktasına giden yol ve bu yol sırasında karşılaşılan (tespit edilen) yerel optimum değerleri değişebilmektedir. Şekil 5.24 - 5.25’de sağ sütunda verilen olasılık fonksiyonu (P) grafiklerine bakılacak olursa, olasılık fonksiyonu esas itibarıyla $P = 0$ değerlerini almaya başladığı iterasyon sayısından itibaren yerel optimum değerinden kurtulmak mümkün olmadığından, artan iterasyon sayısının hiç bir etkisi/faydası olmamaktadır. Bu nedenle iterasyon sayısının maksimum 3000 olması yeterli görülmüştür.



a) $k_b = 0,1 \text{ W/mK}$, $\mathbf{b = 1 \text{ mm}}$, $\text{Re} = 110$

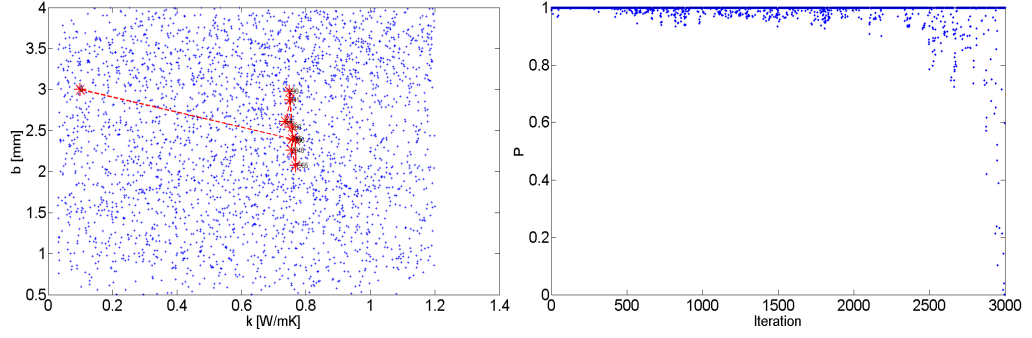


b) $k_b = 0,4 \text{ W/mK}$, $\mathbf{b = 1 \text{ mm}}$, $\text{Re} = 110$

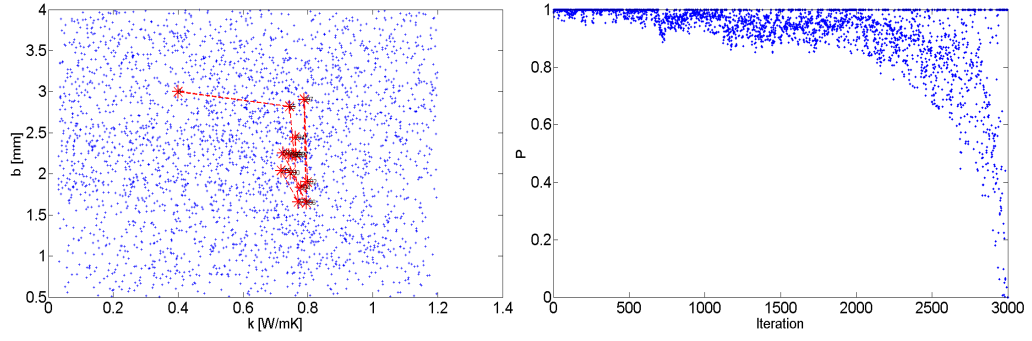


c) $k_b = 1 \text{ W/mK}$, $\mathbf{b = 1 \text{ mm}}$, $\text{Re} = 110$

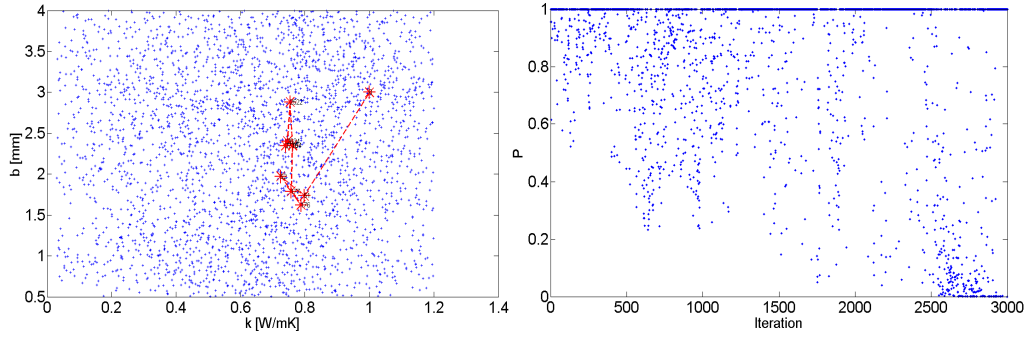
Şekil 5.24 : 50 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası için Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları ($\mathbf{b = 1\text{mm}}$, $\text{Re} = 110$).



a) $k_b = 0,1 \text{ W/mK}$, $b = 3 \text{ mm}$, $Re = 110$



b) $k_b = 0,4 \text{ W/mK}$, $b = 3 \text{ mm}$, $Re = 110$



c) $k_b = 1 \text{ W/mK}$, $b = 3 \text{ mm}$, $Re = 110$

Şekil 5.25 : 50 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası için Kriging-Benzetilmiş Tavlama meta-algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları ($b = 3\text{mm}$, $Re = 110$).

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, Kriging ve Benzetilmiş Tavlama algoritmaları bir araya getirilerek sayısal akışkanlar dinamiği problemlerinin modellenmesi ve optimizasyonunda kullanılmıştır.

İlk olarak taşınımın etkili olduğu bir kanal içerisine periodik olarak yerleştirilen ve sabit ısı akısı üreten bir yonga (chip) geometrisinin dışarıdan bir hava etkisiyle soğutulması problemi incelenmiştir. Bu problemde ısı kaynakları (yongalar) arasındaki mesafenin, yüksekliğin ve Reynolds sayısının taşınım problemine olan etkileri belirlenmiş, yukarıda bahsedilen yöntemlerle taşınım probleminin modellenmesi, optimizasyonu ve tersine tasarım analizleri başarıyla yapılmıştır.

Isı-akışkan problemine ikinci bir örnek olmak üzere, zorlanmış ve doğal taşınım olaylarının her ikisinin de etkili olduğu dikdörtgen bir bölge içerisindeki bir levha üzerine yerleştirilmiş bir ısı kaynağının dışardan bir hava akışı etkisiyle soğutulması problemi incelenmiştir. Bu problemde levhanın kalınlığının, ısı iletim katsayısının ve Re sayısının değişiminin sisteme olan etkileri üç boyutlu modeller ile ifade edilmiş, optimizasyon analizleri yapılmıştır.

İkinci problem için elde edilen CFD sonuçlarında ince levha kalınlıkları için, levha ısı iletim katsayısının etkisi ihmal edilebilir düzeyde olup, sadece yüksek Reynolds sayılarında ($Re \geq 110$) eş sıcaklık ve akım fonksiyonu eğrilerinde belirgin farklar olduğu görülmüştür. Levha ısı iletim katsayısı k_b , belirli bir değere ulaştıktan sonra, levha içinde beklenildiği gibi uniform bir sıcaklık dağılımı meydana gelmiştir.

Eş sıcaklık eğrilerinden görüldüğü gibi Reynolds sayısının küçük olduğu durumlarda ısı ortamdan ağırlıklı olarak doğal taşınım ile atılmaktadır. Zorlanmış taşınım etkileri Re sayısı arttıkça ortaya çıkmaktadır. Daha etkin bir soğutmanın gerçekleştiği bu bölgede levha kalınlığının etkisinin önemini yitirdiği görülmüştür.

Normal şartlarda, soğutucu akışkanın hızı (Re sayısı) arttıkça sistemde ortaya çıkan maksimum sıcaklığın azalması beklenir. Ancak ikinci problemde, akış alanında bifürkasyon (karakter değişikliği) meydana geldiği için sistemde oluşan maksimum

sıcaklık Reynolds sayısı ile devamlı bir düşüş gösterirken, belirli bir aralıkta geçerli olmak üzere, Reynolds sayısı ile artış göstermiştir. Bifürkasyonun meydana geldiği Reynolds sayısı aralığında levhanın sol kısmında meydana gelen vortekslerden ötürü oluşan ölü bölgelere yeni soğutucu akışkan giremediği için bu sonucun oluştuğu görülmüştür. Meydana gelen bu durumun levha kalınlığına bağlı olmaksızın gerçekleştiği de bulgular arasındadır.

Her iki problem için de gerekli tasarım parametreleri Latin Hiperküp Örnekleme algoritmasıyla elde edilerek Fluent[®] yardımı ile CFD analizleri yapılmıştır. CFD sonuçları daha sonra Kriging modeli oluşturmak için kullanılmıştır. LHS nokta sayısı, optimizasyonu yapılmak istenen problemin parametre uzayındaki değişken sayısı ve problemin karmaşık yapısına bağlı olup, her bir problem için farklı örnekleme sayısı gereklidir. Örnekleme sayısının modelde yer almayan (tasarım dışı) CFD sonuçları ile Kriging modeli arasındaki karşılaştırmalarda etkisi oldukça önemlidir. Özellikle ikinci problemde olduğu gibi üç boyutlu optimizasyon problemlerinde yüksek LHS nokta sayısına ihtiyaç duyulmaktadır.

Benzetilmiş Tavlama algoritmasıyla ilgili yapılan incelemeler olasılık fonksiyonuna ait soğutma hızının ve soğutma sıcaklığının oldukça önemli parametreler olduğunu göstermiştir. Seçilen başlangıç sıcaklık değerinin yüksek oluşu çözümün yerel en iyi noktadan ayrılmasına izin vermektedir. Soğutma hızına bağlı olarak sıcaklığın iterasyon sırasında gittikçe düşürülmesi ile, yerel optimumlara takılmadan global optimum hassas bir şekilde bulunmuştur.

KAYNAKLAR

Abtew W., Obeysekera J., Shih G., 1993: Spatial Analysis for Monthly Rainfall in South Florida, Water Resources Bulletin, 29, 179-188.

Arora, J.S., 2004: "Introduction to Optimum Design", The University of Iowa.

Başkan O., 2004: Gölbaşı Yöresi Topraklarının Mühendislik, Fiziksel Özellik İlişkilerinde Jeostatistik Uygulanması, Doktora Tezi, A. Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Boogaart KG van den, Schaeben H., 2002: Kriging of Regionalized Directions, Axes, and Orientations I. Directions and Axes, Mathematical Geology, Vol. 34, No. 5, 479 -503

Cekli H., 2007: Enhancement and smoothing methods for experimental data: application to PIV measurements of a laminar separation bubble, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Davis J.C., 2002: "Statistics and data analysis in Geology", New York, J. Wiley.

Dikici H., 2001: Toprak Bilminde Kullanılan Bazı Jeostatik Yöntemleri, Tarımda Bilişim Teknolojileri 4. Sempozyumu, p. 76-81.

Deutsch C.V. and Journel A.G., 1992: "GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide", New York, Oxford University Press.

Güneş H., Çadircı S., Akgüç A., 2008: Taşınım ile Isı Transferinin Kriging-Benzetilmiş Tavlama ile Modellenmesi ve Optimizasyonu, Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu (BUMAT), Osmangazi Üniversitesi – Eskişehir.

Gunes H., Cadirci S., Gocmen K., 2009: Numerical Simulation of Mixed Convection in a Rectangular Cavity With Multiple Heat Sources, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2009, Lake Buena Vista, Florida.

Gunes H., Rist U., Cekli H., 2008: Data Enhancement, Smoothing, Reconstruction and Optimization by Kriging Interpolation, Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, Miami-Florida.

Gunes H., Rist U., 2007: Spatial resolution enhancement/smoothing of stereo-particle-image-velocimetry data using proper-orthogonal-decomposition-based and Kriging interpolation methods, Phys. Fluids 19, 064101.

Gunes, H., Sirisup, S., and Karniadakis, G.E., 2006: “Gappy data: To Krig or not to Krig”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 212, Issue 1, pp. 358-382.

Hsu T. H., and Wang S. G., 2000: Mixed convection of micropolar fluids in a cavity. *I. J. Heat Mass Trans.* 43, 1563-1572.

Isaaks E.H., and Srivastava R.M., 1989: “Introduction to Applied Geostatistics”, New York, Oxford University Press.

İnal C. and Yigit C. O., Jeodezik Uygulamalarda Kriging Enterpolasyon Yönteminin Kullanılabilirliği, TUJK 2003 Yılı Bilimsel Toplantısı Coğrafi Bilgi Sistemleri Jeodezik Ağlar Çalıştayı 24 – 25 – 26 Eylül, Konya.

Journel A.G. and Huijbregts CH. J., 1981: " Mining Geostatistics", Academic Press.

Kirkpatrick S., Gelatt C.D., and Vecchi M.P., 1983 “Optimization by Simulated Annealing” *Science*, May 1983, Volume 220, Number 4598.

Krige D.G., 1951: "A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand". *J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa* 52 (6): 119-139.

Lophaven, S.N., Nielsen, H.B., and Sondergaard, J., 2002: DACE- A Matlab Kriging toolbox. Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark.

Lophaven, S.N., Nielsen, H.B. and Sondergaard, J., 2002: *DACE - A Matlab Kriging Toolbox, Version 2.0.* Report IMM-REP-2002-12, Informatics and Mathematical Modelling, DTU.

McKay M.D., Conover W.J. and Beckman, R.J., 1979: “A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code”, *Technometrics*, vol. 21, no. 2.

Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H. and Teller, E., 1953: “Equation of state calculations by fast computing machines”, *J. of Chemical Physics*, Volume 21, Number 6, June.

Nocedal J., Wright S.J, 1999: “Numerical Optimization”, Springer-Verlag New York.

Öztaş T., 1995: Jeostatistiğin Toprak Bilimindeki Önemi ve Uygulanışı, İlhan Akalak Toprak ve Çevre Sempozyumu, Cilt I. Sayfa: 271-280, Ankara,

Park S., Fowler J.W., Mackulak G.T., Keats J.B., Carlyle W.M., 2002: Doptimal sequential experiments for generating a simulation-based cycle time-throughput curve, *Operations Research* 50 (6) 981–990.

Pirsig, R.M; 1974: “Mathematical Optimization”,Zen and the Art of Motorcycle Maintanance’.

Reimann, A; 2002: “Evolutionary Algorithms and Optimization”, Humbolt University, Berlin.

Rohuani, S., ve Wackernagel, H., 1990: Multivariate Geostatistical Approach to Space - Time Data Analysis. Water Resources Research 26, (4), 585-591.

Tercan, A. E. ve Saraç C.; 1998: Maden Yataklarının Değerlendirilmesinde Jeostatiksel Yöntemler, T.M.M.O.B Maden Mühendisleri Odası Yayını, Ankara

Trangmar B. B., Yost R. J., Wehara G.; 1995: Application of Geostatistic to Spatial Studies of Soil Properties. Advances in Agronomy, Vol 38,65 - 91

Venturi, D., and Karniadakis G.E., 2004: “Gappy data and reconstruction procedures for flow past a cylinder”, J. Fluid Mech. 519 315–336.

Wollenhaupt N. C., Mulla D. J., Gotway Crawford C. A., 1997: Soil Sampling and Interpolation Techniques for Mapping Spatial Variability of Soil Properties, P 19 – 55. In F.J Pierce and E. J Sadler (eds) The state of site – specific management for agriculture. ASA, CSSA, SSSA, Madison

Yaprak S. ve Arslan E., 2008: Kriging Yöntemi ve Geoit Yüksekliklerinin Enterpolasyonu, Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi 2008/1 Sayı 98

Yaprak S. ve Arslan E., 2008: Kriging Yönteminin Geoit Modellemesinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, İTÜ Dergisi/Mühendislik, Cilt: 7, Sayı: 3, 51-62

Yiğit C. Ö.; 2003: Elipsoidal Yüksekliklerin Ortometrik Yüksekliğe Dönüşümünde Kullanılan Enterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

EKLER

EK A.1 : Analitik (Bilinen) Fonksiyonlar İçin Kriging Modelinin Oluşturulması

EK A.2 : Zorlanmış Taşınım Probleminin İki Boyutlu Kriging Modelini Kurmak İçin Kullanılan 30 ve 60 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) Noktasına Ait CFD Sonuçları

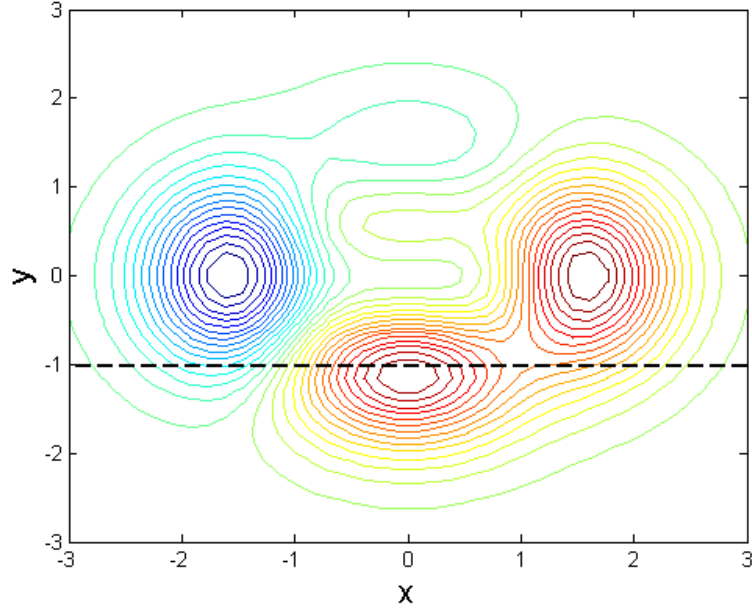
EK A.3 : Zorlanmış Taşınım Probleminin Üç Boyutlu Kriging Modelini Kurmak İçin Kullanılan 30, 60, 120 ve 240 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) Noktasına Ait CFD Sonuçları

EK A.4 : Karışık Taşınım Probleminin Üç Boyutlu Kriging Modelini Kurmak İçin Kullanılan 50, 100 ve 250 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) Noktasına Ait CFD Sonuçları

EK A.1

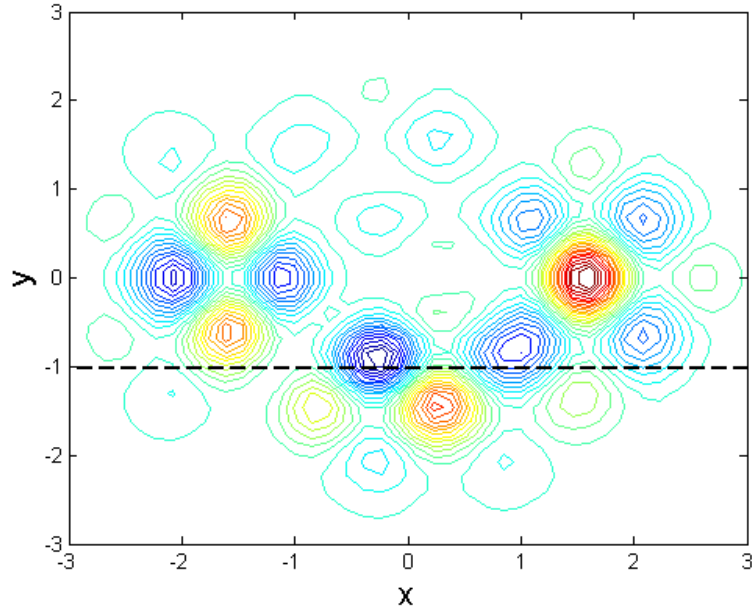
Bu ekte Bölüm 2 de formülasyonu verilen Kriging yönteminin bilinen analitik fonksiyonlar için uygulaması yapılarak, yöntemin etkinliği ve performansı incelenmiştir. Şekil A.1 ve Şekil A.2’de seçilen fonksiyonun kontür grafiği gösterilmiştir. Latin Hiperküp Örnekleme nokta sayısının Kriging modeline etkisi Şekil A.3 ve Şekil A.4’de gösterilmiştir. Şekil A.3’de verilen kontür grafikleri Şekil A.1’deki analitik (gerçek) sonuçla karşılaştırıldığında görüleceği gibi 20 LHS nokta ile oluşturulan model global olarak oldukça hatalı sonuç vermesine rağmen (hatta yerel optima sayısını dahi doğru olarak tahmin edemezken) 40 ve daha fazla LHS nokta kullanılarak elde edilen modeller global kontür hatlarını doğru bir şekilde temsil etmektedir. LHS nokta sayısı arttıkça gittikçe artan doğrulukta analitik fonksiyon tahmin edilebilmektedir. Benzer olarak Şekil A.4’de verilen kontür grafikleri Şekil A.2’deki analitik (gerçek) sonuçla karşılaştırıldığında LHS nokta sayısı arttıkça elde edilen modeller global kontür değerlerini daha doğru temsil edebilmektedir.

LHS nokta sayısının Kriging modeli performansı üzerindeki etkisinin ayrıntılı bir şekilde incelemek için Şekil A5’te ve Şekil A6’da $y = -1$ için denklemlerde (A.1 ve A.2) verilen fonksiyonun gerçek değeriyle Kriging modeliyle bulunan değer karşılaştırılmıştır. Şekil A5 için LHS nokta sayısı 80 ve üzeri olduğunda, Kriging modelinin son derece doğru sonuç verdiği, pratik açıdan denklem (A.1) ile verilen analitik fonksiyonu tamamen yeniden oluşturabildiği görülmektedir. Şekil A.6 için de LHS nokta sayısı 300 ve üzeri olduğunda, Kriging modeli çok daha doğru bir sonuç vermiştir. Dolayısıyla, yeterli LHS noktası alındığında (başka bir ifadeyle parametre uzayı için yeterli sayıda ölçüm/CFD analizi yapıldığında), Kriging modelinin ilgili parametre uzayındaki “fonksiyonu”/değişimi doğru olarak tahmin edebileceği görülmektedir. Bu kapsamda, gerek yöntemin gerekse de uygulamanın başarıyla diğer problemlere uygulanması mümkündür, ancak modelin yüksek doğrulukta tahmin yapabilmesi için LHS nokta sayısının yeterliliğinden emin olunmalıdır.



$$f_1(x, y) = (x^5 - y^3 + y^2)e^{-(x^2+y^2)} \quad (\text{A.1})$$

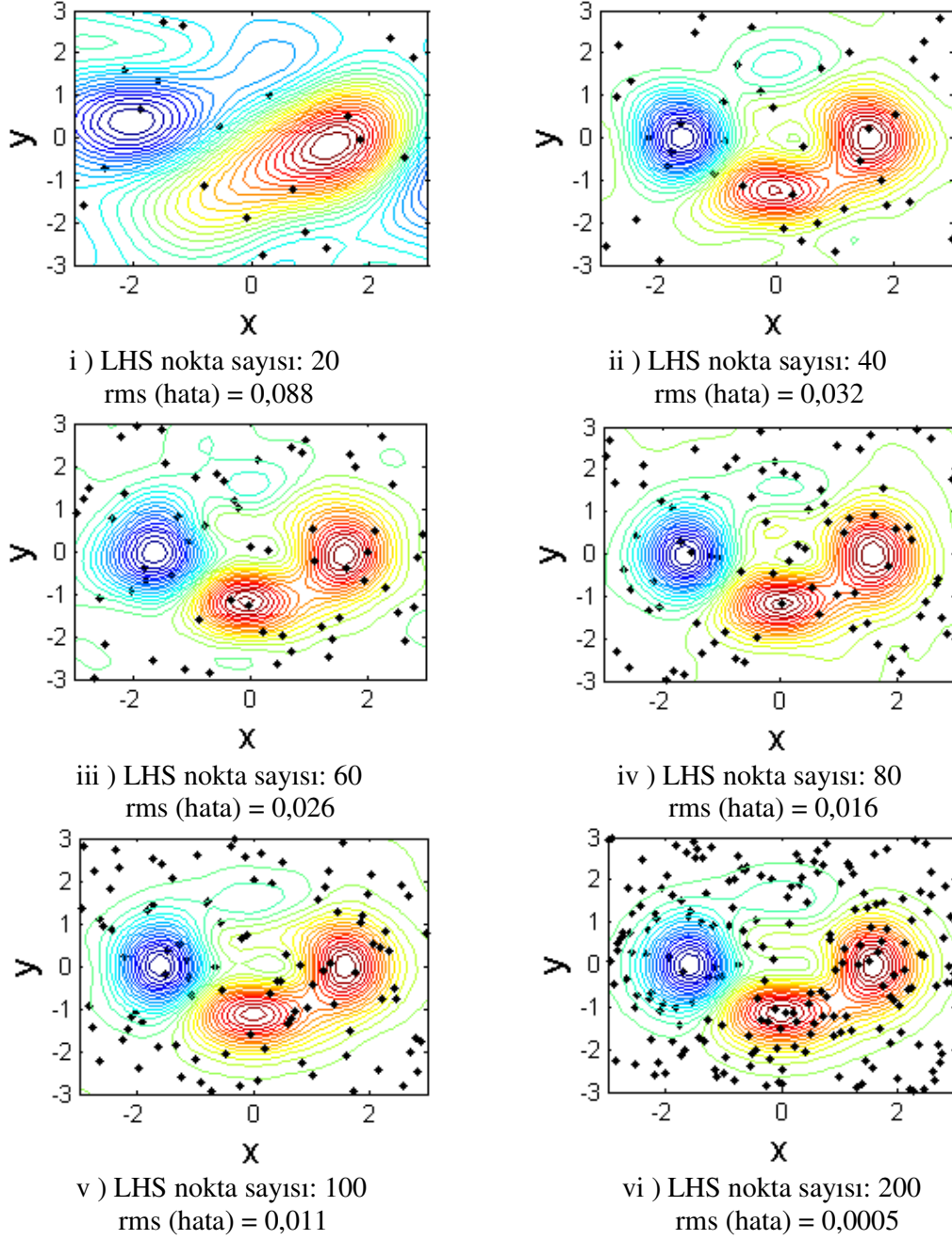
Şekil A.1 : Örnek fonksiyon 1, $f_1(x,y)$ kontür grafiği.



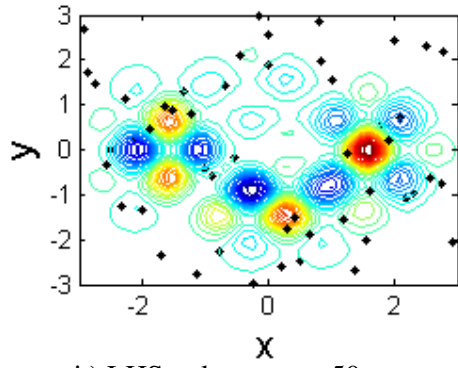
$$f_2(x, y) = (x^5 - y^3 + y^2)(\sin 5x + \cos 4y)e^{-(x^2+y^2)} \quad (\text{A.2})$$

Şekil A.2 : Örnek fonksiyon 2, $f_2(x,y)$ kontür grafiği.

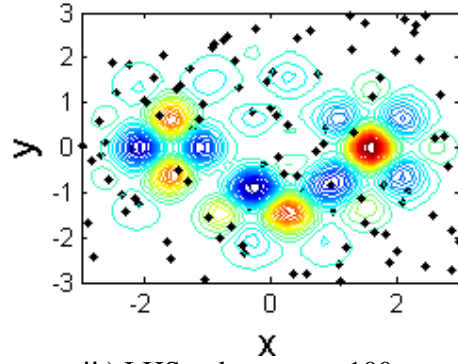
$$rms(hata) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{analitik} - f_{kriging})^2} \quad (A.3)$$



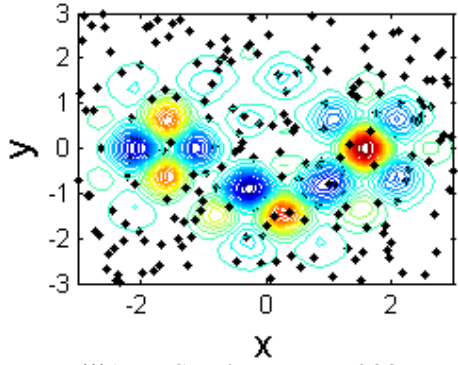
Şekil A.3 : LHS nokta sayısının Kriging modeline etkisi.



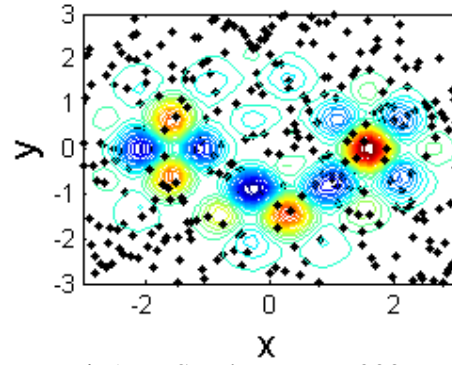
i) LHS nokta sayısı: 50
rms (hata) = 0,203



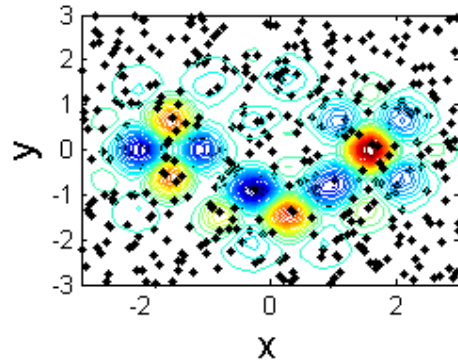
ii) LHS nokta sayısı: 100
rms (hata) = 0,144



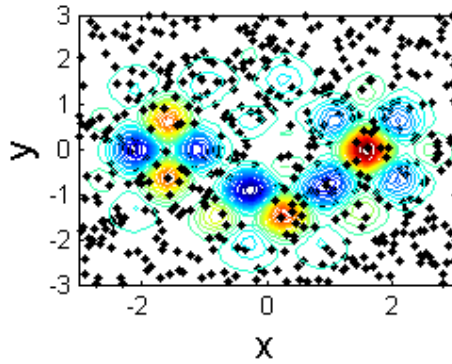
iii) LHS nokta sayısı: 200
rms (hata) = 0,042



iv) LHS nokta sayısı: 300
rms (hata) = 0,018

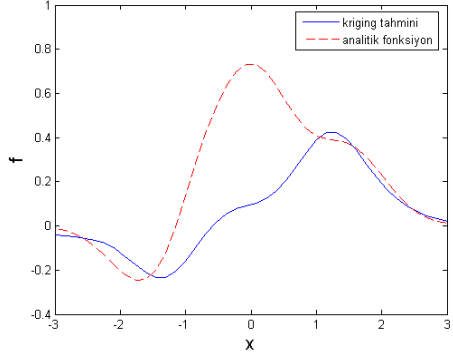


v) LHS nokta sayısı: 400
rms (hata) = 0,002

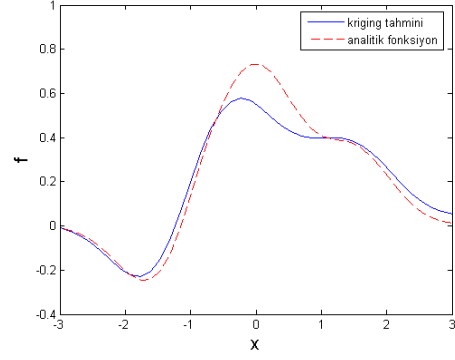


vi) LHS nokta sayısı: 500
rms (hata) = 0,0003

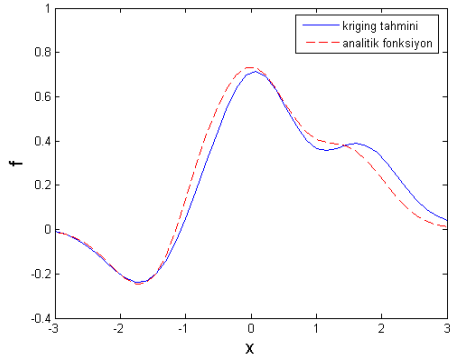
Şekil A.4 : LHS nokta sayısının Kriging modeline etkisi.



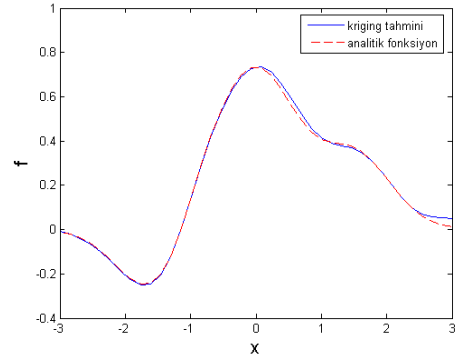
i) LHS nokta sayısı: 20



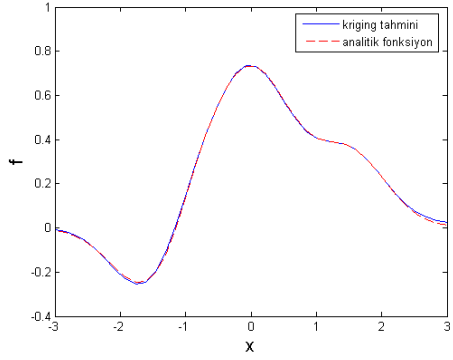
ii) LHS nokta sayısı: 40



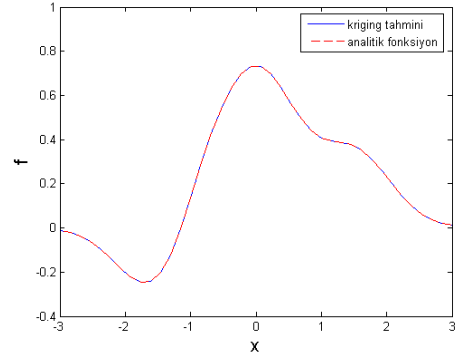
iii) LHS nokta sayısı: 60



iv) LHS nokta sayısı: 80

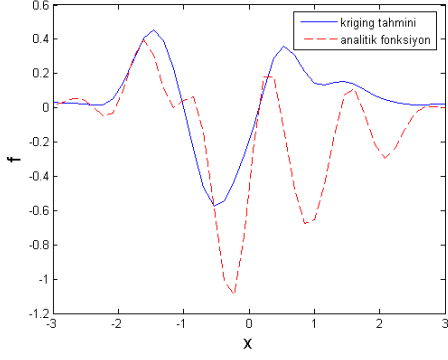


v) LHS nokta sayısı: 100

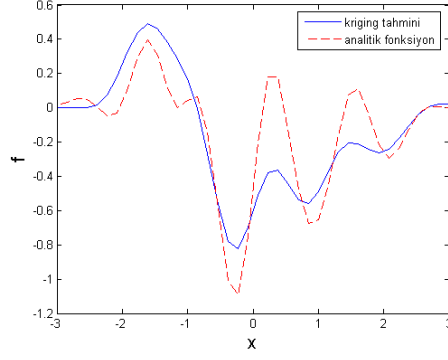


vi) LHS nokta sayısı: 200

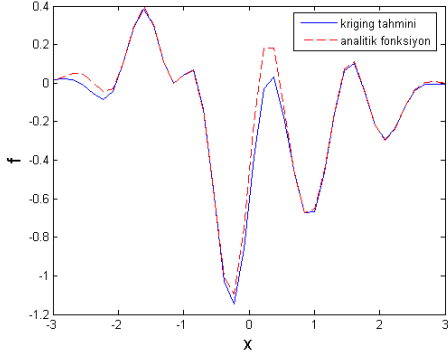
Şekil A.5 : LHS nokta sayısını Kriging modeli performansı üzerindeki etkisi ($y = -1$ için fonksiyonun gerçek değeriyle Kriging modeliyle bulunan değerin karşılaştırılması).



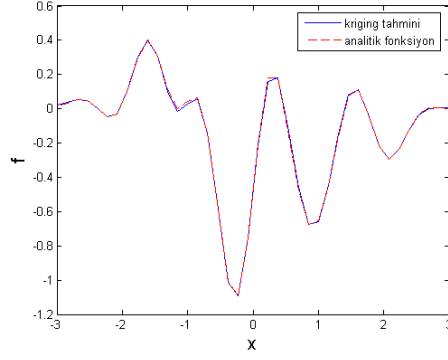
i) LHS nokta sayısı: 50



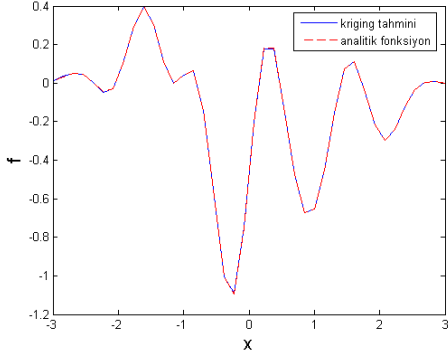
ii) LHS nokta sayısı: 100



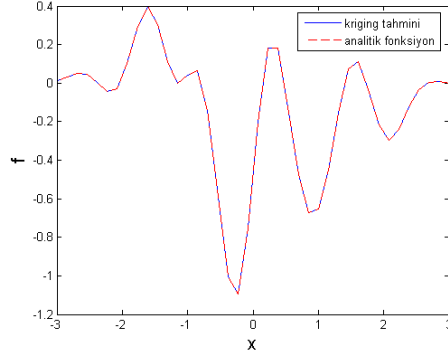
iii) LHS nokta sayısı: 200



iv) LHS nokta sayısı: 300



v) LHS nokta sayısı: 400



vi) LHS nokta sayısı: 500

Şekil A.6 : LHS nokta sayısını Kriging modeli performansı üzerindeki etkisi ($y = -1$ için fonksiyonun gerçek değeriyle Kriging modeliyle bulunan değer karşılaştırılması).

EK A.2

Çizelge A.1: 30 adet Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.

Örnekleme noktası (LHS) adedi	h [cm]	l [cm]	T _{max} [K] (1. mertebe)	T _{max} [K] (2. mertebe)
1	1,61	1,05	387,8	391,5
2	2,03	1,23	377,4	380,3
3	2,20	1,36	371,6	375,0
4	1,01	1,18	369,5	371,4
5	1,93	1,52	365,0	368,5
6	0,71	1,42	363,1	365,5
7	1,65	1,84	361,6	364,9
8	2,33	1,69	360,4	363,3
9	2,28	1,72	359,9	363,0
10	1,84	1,95	358,1	361,6
11	1,21	2,13	357,5	360,2
12	1,13	2,21	356,6	359,7
13	1,51	2,44	354,8	359,5
14	0,90	2,31	354,4	357,6
15	2,08	2,07	352,7	357,1
16	1,48	2,89	351,5	356,6
17	0,94	2,73	350,8	354,6
18	1,82	2,69	350,0	354,5
19	1,23	3,02	349,9	354,1
20	1,34	3,14	349,4	354,0
21	0,62	2,60	348,7	351,5
22	1,76	3,33	348,0	351,2
23	1,39	3,72	345,8	350,7
24	0,66	2,99	345,2	348,3
25	1,09	3,56	344,7	347,8
26	0,82	3,28	344,3	346,8
27	2,45	3,91	343,1	346,5
28	0,56	3,42	339,1	343,3
29	2,15	3,61	337,4	341,2
30	2,39	3,80	335,8	340,5

Çizelge A.2 : 60 adet Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.

Örnekleme noktası (LHS) adedi	h [cm]	l [cm]	T _{max} [K] (1. mertebe)	T _{max} [K] (2. mertebe)
1	1,27	1,01	382,3	393,6
2	1,78	1,13	382,2	381,4
3	1,69	1,28	379,7	378,4
4	1,47	1,21	378,5	376,5
5	1,64	1,85	376,1	374,7
6	0,97	1,16	371,2	372,2
7	0,82	1,07	371,0	370,8
8	1,92	1,46	369,3	370,2
9	2,16	1,56	368,9	368,1
10	1,08	1,40	368,4	367,9
11	1,62	1,62	368,3	367,1
12	0,76	1,45	365,2	364,3
13	1,18	1,80	364,9	363,9
14	0,79	1,54	364,6	363,2
15	1,26	1,89	364,1	362,2
16	0,88	1,72	363,4	361,9
17	1,52	2,09	363,1	361,7
18	1,97	1,77	362,9	360,5
19	1,40	2,24	361,8	359,5
20	1,72	2,29	361,2	358,9
21	1,58	2,37	361,0	358,9
22	0,53	1,67	360,0	358,5
23	0,72	2,01	359,0	357,7
24	2,26	1,99	358,3	357,3
25	0,57	1,93	357,6	357,2
26	0,96	2,55	356,7	356,2
27	1,43	3,02	356,6	355,3
28	1,56	3,05	356,5	355,1
29	2,07	2,33	356,0	354,8
30	0,61	2,16	355,8	354,4
31	1,12	2,84	355,6	354,2
32	1,03	2,74	355,5	354,1
33	1,32	3,11	355,3	353,9
34	2,31	3,92	354,9	353,7
35	1,15	2,98	354,8	353,6
36	2,42	2,13	354,3	353,1
37	1,95	2,43	353,9	352,9
38	1,34	3,48	352,8	352,8
39	2,37	3,79	352,8	352,3
40	0,90	2,92	352,5	352,1
41	2,27	2,48	352,4	351,3
42	1,43	3,88	351,3	350,8
43	1,75	2,79	350,9	350,7
44	1,81	3,96	350,0	349,2
45	1,22	3,70	350,0	349,1
46	0,85	3,17	349,4	348,1
47	2,04	2,86	349,2	347,8
48	0,53	2,67	349,1	347,8
49	1,05	3,62	348,3	347,8
50	2,46	2,64	346,7	347,8
51	2,48	2,60	346,7	347,1
52	0,64	3,22	345,2	347,0
53	1,88	3,39	345,1	343,9
54	2,12	3,29	344,5	343,2
55	2,22	3,82	344,4	342,8
56	2,00	3,65	344,3	342,5
57	1,86	3,50	344,3	342,4
58	2,18	3,41	343,4	341,8
59	2,34	3,35	342,4	341,0
60	0,70	3,60	342,2	340,8

Çizelge A.3 : 120 adet Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.

Örnekleme noktası (LHS) adedi	h [cm]	l [cm]	T _{max} [K] (1. mertebe)	T _{max} [K] (2. mertebe)	Örnekleme noktası (LHS) adedi	h [cm]	l [cm]	T _{max} [K] (1. mertebe)	T _{max} [K] (2. mertebe)
1	1,77	4,00	344,5	346,4	61	1,06	3,91	341,7	343,2
2	1,30	3,48	347,0	348,7	62	1,29	2,55	353,8	355,8
3	2,50	1,87	353,6	354,9	63	1,44	1,77	362,5	364,2
4	2,01	1,09	386,6	387,8	64	0,86	2,29	354,3	355,9
5	2,37	2,05	352,1	353,4	65	1,20	3,90	343,2	344,8
6	0,93	2,07	357,0	358,7	66	1,04	3,22	347,2	348,9
7	2,32	1,81	357,3	358,8	67	1,56	3,86	337,7	339,9
8	2,20	1,95	354,5	356,2	68	1,88	2,46	352,6	354,8
9	1,64	3,20	348,1	350,0	69	2,41	3,81	335,8	337,5
10	0,56	1,79	357,3	358,6	70	1,08	1,24	368,9	370,2
11	1,26	2,82	351,5	353,5	71	1,76	2,49	353,4	355,4
12	2,42	2,15	349,9	351,2	72	2,24	1,73	358,9	360,6
13	2,39	2,85	339,6	341,4	73	2,38	2,12	350,8	352,2
14	2,11	2,27	349,3	351,1	74	1,59	3,14	349,5	351,4
15	0,70	1,93	357,2	358,5	75	1,03	1,66	362,4	364,0
16	0,62	3,16	342,8	344,0	76	1,80	2,02	357,6	359,5
17	1,53	2,52	354,1	356,1	77	0,96	1,99	358,0	359,8
18	1,96	1,62	362,2	363,7	78	0,52	1,59	359,1	360,2
19	0,98	3,51	344,1	345,6	79	0,91	1,69	361,4	362,9
20	0,85	2,37	353,3	355,0	80	0,76	2,19	354,7	356,2
21	2,34	3,70	336,3	338,1	81	1,00	2,87	349,9	351,6
22	2,18	3,31	338,2	340,0	82	0,79	1,30	365,3	366,6
23	1,84	3,70	341,3	343,1	83	1,33	3,39	347,7	349,5
24	1,93	2,95	347,1	349,5	84	0,53	3,45	338,3	339,4
25	1,00	2,93	349,4	351,1	85	2,14	2,38	347,5	349,4
26	0,81	2,08	356,2	357,7	86	1,86	1,92	359,9	361,8
27	2,08	2,88	342,4	344,4	87	1,40	1,51	366,1	367,7
28	1,37	3,74	345,6	347,4	88	1,91	3,63	339,4	341,1
29	1,36	1,63	363,3	365,1	89	1,58	2,25	356,4	358,4
30	1,17	1,53	364,2	365,8	90	1,22	2,42	354,8	356,8
31	2,06	1,25	375,6	377,1	91	1,34	2,55	354,0	356,0
32	1,70	2,77	349,3	351,2	92	2,03	2,20	350,8	352,8
33	1,24	2,69	352,6	354,5	93	1,72	1,37	373,6	375,4
34	1,14	3,37	346,6	348,5	94	0,73	2,43	351,9	353,4
35	0,94	2,79	350,1	351,8	95	2,44	3,61	335,6	337,4
36	2,26	2,64	343,6	345,5	96	1,40	1,42	368,2	369,8
37	1,11	3,30	347,1	348,8	97	1,50	1,11	381,6	383,3
38	0,82	1,44	363,8	365,1	98	0,51	1,19	363,9	364,9
39	1,99	2,61	346,1	348,3	99	1,81	2,70	350,5	352,5
40	1,68	1,04	391,7	393,4	100	2,48	3,85	341,6	343,0
41	2,31	1,85	356,9	358,4	101	1,51	3,54	347,3	349,1
42	2,28	3,05	338,9	340,8	102	0,62	1,56	360,5	361,7
43	2,46	1,32	374,9	376,4	103	0,64	2,91	345,7	347,1
44	0,59	3,03	343,8	345,1	104	2,16	3,78	337,0	338,8
45	1,54	3,67	346,6	348,4	105	2,23	2,66	343,4	345,4
46	1,20	2,34	355,5	357,4	106	1,70	3,23	348,9	351,0
47	1,13	3,09	348,8	350,7	107	2,29	3,46	337,0	338,9
48	0,88	2,16	355,8	357,5	108	0,70	3,34	342,3	343,6
49	1,16	1,71	362,5	364,1	109	2,04	1,06	388,8	390,0
50	0,57	1,88	356,3	357,6	110	1,46	3,59	346,9	348,7
51	1,27	3,11	349,4	351,3	111	2,10	2,58	345,7	347,6
52	1,66	1,39	373,5	375,3	112	1,89	3,96	336,2	338,0
53	0,74	3,93	336,9	338,1	113	2,12	2,75	343,5	345,5
54	1,62	1,01	391,9	393,8	114	1,09	1,49	364,8	366,3
55	1,94	3,75	337,1	338,9	115	1,74	3,26	348,5	350,6
56	1,48	3,57	347,1	348,8	116	0,77	1,34	341,1	342,4
57	0,66	1,21	365,4	366,5	117	0,68	3,42	364,6	365,9
58	2,20	3,02	340,0	341,9	118	1,98	1,13	384,0	385,1
59	1,62	1,47	369,3	371,1	119	1,83	1,17	380,4	381,6
60	0,88	2,32	354,3	356,0	120	1,42	2,98	350,8	352,8

Çizelge A.4 : 240 adet Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.

Örnekleme noktası (LHS) adedi	h [cm]	l [cm]	Tmax [K] (1. mertebe)	Tmax [K] (2. mertebe)	Örnekleme noktası (LHS) adedi	h [cm]	l [cm]	Tmax [K] (1. mertebe)	Tmax [K] (2. mertebe)
1	2,44	1,09	394,7	396,2	61	1,53	1,93	360,7	362,5
2	1,76	1,05	394,7	396,5	62	2,01	1,68	360,6	362,2
3	2,30	1,06	392,8	394,4	63	0,62	1,56	360,5	361,8
4	1,69	1,08	390,1	391,9	64	0,57	1,52	360,4	361,7
5	1,62	1,14	383,9	385,6	65	1,63	1,96	360,2	362,0
6	1,64	1,17	382,6	384,2	66	1,60	1,97	360,1	362,0
7	1,52	1,15	380,2	381,8	67	1,17	1,93	360,1	361,7
8	1,55	1,20	379,1	380,8	68	0,72	1,70	360,0	361,4
9	2,26	1,24	378,0	379,6	69	1,76	1,87	359,9	361,8
10	2,32	1,27	377,6	379,2	70	2,25	1,71	359,6	361,3
11	1,33	1,12	377,0	378,4	71	1,47	1,94	359,6	361,6
12	1,78	1,34	376,9	378,9	72	1,93	1,74	359,4	361,1
13	2,07	1,25	375,5	377,1	73	2,00	1,73	358,9	360,6
14	1,67	1,37	373,6	375,4	74	2,41	1,71	358,9	360,2
15	2,06	1,29	373,6	375,2	75	1,91	1,76	358,9	360,4
16	1,64	1,38	372,8	374,6	76	1,08	2,00	358,5	360,4
17	1,80	1,44	372,5	374,4	77	1,29	2,10	357,9	359,8
18	1,49	1,34	371,0	372,6	78	0,97	2,06	357,3	359,1
19	1,16	1,28	369,0	370,4	79	0,95	2,08	356,9	358,7
20	1,21	1,30	369,0	370,4	80	1,83	2,04	356,9	358,8
21	1,03	1,23	368,8	370,1	81	1,08	2,16	356,8	358,6
22	1,72	1,53	368,7	370,6	82	1,00	2,12	356,8	358,6
23	0,83	1,10	368,6	369,8	83	1,36	2,23	356,7	358,8
24	2,16	1,42	368,3	369,9	84	1,43	2,25	356,6	358,5
25	0,81	1,15	367,8	368,9	85	1,27	2,24	356,5	358,5
26	2,03	1,44	367,3	368,9	86	0,59	1,88	356,4	357,7
27	1,20	1,38	367,1	368,6	87	2,34	1,86	356,3	357,7
28	2,29	1,49	366,7	368,3	88	2,38	1,84	356,1	357,6
29	1,42	1,49	366,6	368,2	89	1,30	2,34	355,7	357,6
30	1,66	1,59	366,4	368,4	90	1,29	2,38	355,2	357,2
31	0,76	1,21	366,4	367,5	91	0,76	2,14	355,1	356,6
32	2,13	1,47	366,4	368,0	92	1,28	2,40	355,1	357,0
33	0,74	1,21	366,1	367,3	93	1,31	2,62	355,0	356,5
34	0,61	1,11	366,1	367,1	94	0,71	2,15	354,6	356,1
35	2,27	1,51	366,0	367,8	95	1,00	2,36	354,6	356,3
36	1,07	1,40	365,9	367,4	96	1,57	2,45	354,5	356,5
37	1,84	1,66	365,0	367,0	97	0,66	2,11	354,5	355,9
38	0,98	1,40	365,0	366,4	98	1,23	2,46	354,5	356,5
39	0,78	1,32	365,0	366,3	99	1,05	2,42	354,2	356,1
40	1,02	1,45	364,9	366,4	100	1,48	2,55	354,0	356,1
41	0,61	1,19	364,8	366,0	101	1,77	2,42	354,0	355,9
42	0,79	1,32	364,8	366,0	102	1,88	2,33	353,9	356,1
43	1,46	1,60	364,7	366,3	103	1,59	2,53	353,8	355,7
44	1,12	1,56	364,1	365,7	104	1,96	2,02	353,7	355,6
45	1,25	1,60	364,1	365,7	105	0,89	2,39	353,5	355,2
46	2,02	1,58	362,9	364,8	106	1,97	2,05	353,2	355,2
47	1,93	1,62	362,3	363,9	107	1,71	2,58	353,1	355,3
48	0,75	1,54	362,0	363,4	108	1,41	2,67	353,1	355,1
49	1,23	1,80	361,7	363,4	109	2,33	2,01	353,1	354,5
50	1,70	1,83	361,6	363,5	110	1,72	2,59	352,9	355,1
51	1,12	1,78	361,4	363,1	111	2,22	1,99	352,9	354,7
52	1,16	1,81	361,4	363,1	112	1,61	2,62	352,9	354,9
53	0,87	1,64	361,4	362,9	113	0,99	2,53	352,8	354,6
54	1,10	1,77	361,3	363,0	114	1,22	2,65	352,8	354,8
55	1,06	1,79	361,2	362,9	115	1,75	2,60	352,6	354,8
56	1,55	1,89	361,1	362,9	116	0,57	2,20	352,4	353,7
57	2,11	1,65	360,9	362,6	117	1,56	2,75	352,3	354,3
58	1,67	1,89	360,9	362,8	118	2,05	2,09	352,2	354,0
59	1,41	1,91	360,8	362,6	119	1,09	2,67	352,2	354,1
60	2,30	1,67	360,7	362,3	120	2,37	2,06	351,9	353,3

Çizelge A.4 (devam) : 240 adet Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.

Örnekleme noktası (LHS) adedi	h [cm]	l [cm]	Tmax [K] (1. merteye)	Tmax [K] (2. merteye)	Örnekleme noktası (LHS) adedi	h [cm]	l [cm]	Tmax [K] (1. merteye)	Tmax [K] (2. merteye)
121	1,44	2,83	351,9	353,9	181	1,85	3,40	345,7	347,7
122	0,58	2,28	351,8	353,1	182	1,80	3,54	345,5	347,3
123	1,58	2,82	351,7	353,6	183	0,83	3,20	345,3	346,8
124	1,45	2,91	351,3	353,3	184	1,37	3,78	345,3	347,1
125	1,74	2,84	351,1	353,2	185	0,67	3,00	345,3	346,7
126	1,47	2,95	351,1	353,1	186	1,15	3,58	345,1	346,8
127	1,50	2,94	351,1	353,0	187	1,26	3,71	345,0	346,7
128	0,92	2,73	350,5	352,2	188	1,79	3,78	345,0	346,8
129	1,82	2,71	350,4	352,3	189	0,93	3,36	344,8	346,5
130	1,86	2,76	350,4	352,5	190	2,23	2,55	344,8	346,7
131	1,90	2,64	350,3	352,3	191	1,33	3,85	344,6	346,3
132	0,97	2,85	350,3	351,9	192	2,04	2,72	344,5	346,6
133	1,91	2,57	350,3	352,4	193	2,35	2,51	344,4	346,1
134	0,62	2,47	350,2	351,6	194	1,98	2,79	344,3	346,4
135	1,35	3,03	350,2	352,2	195	1,31	3,89	344,2	345,9
136	1,38	3,06	350,2	352,1	196	2,45	2,49	344,1	345,7
137	1,87	2,80	350,1	352,3	197	1,14	3,76	343,7	345,4
138	1,13	2,96	350,0	351,9	198	1,66	3,73	343,7	345,4
139	2,40	2,18	349,8	351,1	199	1,69	3,48	343,1	344,9
140	1,34	3,15	349,7	351,7	200	1,84	3,30	343,0	345,0
141	0,85	2,77	349,6	351,3	201	0,69	3,25	343,0	344,3
142	2,32	2,18	349,6	351,2	202	0,89	3,53	342,9	344,5
143	1,11	2,99	349,6	351,4	203	0,84	3,47	342,9	344,3
144	1,01	2,93	349,3	351,2	204	2,06	2,88	342,7	344,7
145	2,35	2,21	349,2	350,8	205	1,93	3,28	342,4	344,5
146	0,95	2,92	349,0	350,6	206	1,05	3,82	342,3	343,8
147	2,10	2,29	348,9	350,8	207	2,17	2,87	342,0	343,8
148	1,60	3,21	348,9	350,7	208	0,68	3,35	341,9	343,2
149	1,40	3,26	348,8	350,7	209	2,43	2,69	341,3	343,0
150	0,88	2,89	348,7	350,3	210	1,89	3,56	341,3	343,1
151	2,11	2,31	348,7	350,5	211	2,00	3,13	341,0	343,1
152	2,21	2,27	348,6	350,4	212	0,80	3,62	340,9	342,3
153	1,19	3,17	348,6	350,4	213	0,91	3,80	340,7	342,1
154	2,42	2,22	348,5	349,8	214	2,19	2,98	340,4	342,3
155	2,19	2,32	348,5	350,5	215	0,90	3,83	340,3	341,8
156	1,18	3,19	348,4	350,2	216	2,14	3,10	339,8	341,8
157	2,08	2,37	348,3	350,1	217	0,86	3,87	339,3	340,6
158	1,96	2,70	348,2	350,5	218	2,15	3,15	339,1	341,1
159	1,73	3,45	347,6	349,6	219	0,65	3,57	339,0	340,2
160	1,20	3,33	347,4	349,2	220	2,09	3,27	338,7	340,5
161	1,40	3,49	347,3	349,2	221	0,70	3,69	338,6	339,9
162	1,54	3,55	347,3	349,1	222	2,31	3,04	338,6	340,5
163	2,01	2,49	347,2	349,4	223	0,63	3,60	338,5	339,7
164	1,25	3,39	347,2	349,0	224	2,18	3,23	338,5	340,4
165	0,65	2,81	347,0	348,4	225	0,67	3,66	338,4	339,6
166	1,88	3,02	346,9	349,0	226	2,24	3,18	338,4	340,3
167	1,49	3,61	346,9	348,7	227	2,13	3,41	338,0	339,9
168	0,88	3,10	346,7	348,2	228	1,98	3,51	337,9	339,8
169	1,81	3,36	346,6	348,6	229	2,12	3,49	337,9	339,8
170	2,17	2,44	346,6	348,4	230	0,60	3,63	337,5	338,7
171	1,57	3,66	346,5	348,2	231	1,94	3,68	337,5	339,3
172	0,77	3,01	346,4	347,9	232	0,72	3,84	337,4	338,6
173	1,04	3,31	346,3	348,0	233	2,28	3,44	337,1	339,0
174	0,73	3,08	346,2	347,6	234	2,21	3,75	337,0	338,7
175	0,79	3,07	346,2	347,7	235	2,23	3,81	336,8	338,6
176	1,51	3,74	346,1	347,9	236	2,37	3,32	336,6	338,5
177	0,94	3,23	346,1	347,8	237	2,40	3,43	336,2	338,1
178	1,36	3,65	346,1	347,8	238	2,38	3,89	336,2	337,9
179	0,82	3,12	346,0	347,5	239	2,41	3,39	336,1	337,9
180	1,38	3,70	345,9	347,7	240	0,96	3,91	332,1	333,0

EK A.3

Çizelge A.5 : 15 adet Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.

Örnekle noktası (LHS) adedi	h [cm]	l [cm]	Re	T _{max} [K] (1. mertebe)	T _{max} [K] (2. mertebe)
1	2,415	3,925	289	345,2	346,6
2	1,640	2,140	58	364,2	365,0
3	0,802	2,679	74	353,0	353,8
4	1,913	2,483	226	353,3	355,3
5	2,107	1,931	94	367,7	368,9
6	1,376	2,968	169	352,6	354,2
7	1,127	2,274	115	358,6	359,7
8	1,828	3,285	129	352,2	353,7
9	0,733	1,119	197	367,8	368,8
10	2,332	1,713	280	358,8	360,1
11	1,224	1,543	161	366,7	367,7
12	2,051	3,102	203	344,1	346,1
13	1,007	3,755	238	342,6	344,0
14	0,511	1,298	144	363,0	363,8
15	1,559	3,437	259	347,6	349,6

Çizelge A.6 : 30 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktaları için CFD simülasyon sonuçları.

Örnekle noktası (LHS) adedi	h [cm]	l [cm]	Re	T _{max} [K] (1. mertebe)	T _{max} [K] (2. mertebe)
1	2,453	3,912	295	344,9	347,8
2	1,837	1,945	180	360,7	364,4
3	2,080	2,072	186	359,1	358,7
4	1,477	2,889	97	356,1	358,5
5	2,032	1,227	259	376,7	379,7
6	0,937	2,725	146	352,5	354,9
7	0,660	2,987	198	345,9	348,1
8	0,713	1,423	158	363,8	365,1
9	1,008	1,180	240	369,5	371,4
10	1,816	2,691	56	359,3	360,7
11	1,392	3,723	204	346,9	350,6
12	1,234	3,024	72	354,8	356,2
13	1,128	2,205	215	357,1	360,5
14	2,150	3,608	242	337,5	342,9
15	1,086	3,564	66	349,4	350,6
16	0,561	3,419	174	339,8	341,3
17	0,823	3,284	80	347,5	348,7
18	1,925	1,517	285	363,9	367,4
19	2,275	1,717	232	359,9	363,6
20	0,615	2,599	254	348,7	351,2
21	1,513	2,444	89	354,4	361,8
22	1,760	3,334	162	351,0	354,9
23	1,205	2,131	141	359,6	362,2
24	1,342	3,137	109	353,4	355,4
25	1,649	1,839	121	365,8	367,5
26	2,203	1,359	127	393,7	385,4
27	0,895	2,312	274	354,1	357,4
28	2,389	3,804	103	339,4	342,1
29	1,610	1,046	222	389,6	392,3
30	2,326	1,687	275	359,8	362,3

Çizelge A.7 : 60 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası için CFD simülasyon sonuçları.

Örnekle noktası (LHS) adedi	h [cm]	l [cm]	Re	T _{max} [K] (1. mertebe)	T _{max} [K] (2. mertebe)
1	2,481	2,598	297	342,2	345,0
2	1,810	3,962	67	352,7	355,5
3	1,429	3,880	174	347,0	351,7
4	0,900	2,924	240	348,8	352,5
5	0,959	2,545	150	354,4	357,0
6	1,399	2,238	106	360,2	362,7
7	0,533	2,673	243	346,9	349,1
8	1,860	3,501	197	348,6	355,7
9	2,115	3,291	282	337,9	344,5
10	1,583	2,372	224	355,9	361,3
11	2,074	2,331	122	357,5	361,4
12	1,121	2,840	58	355,7	357,1
13	1,077	1,396	248	366,0	368,4
14	1,032	2,737	228	351,7	355,6
15	2,158	1,559	157	369,8	371,6
16	0,847	3,170	270	345,5	349,3
17	0,758	1,447	166	363,9	365,4
18	1,642	1,846	177	376,2	377,8
19	0,881	1,721	53	363,4	364,3
20	0,698	3,595	253	339,5	342,2
21	1,556	3,053	138	353,5	357,4
22	0,640	3,218	95	344,6	345,9
23	1,261	1,891	186	361,1	364,3
24	1,221	3,700	257	344,7	349,9
25	2,038	2,857	272	342,6	349,5
26	1,274	1,010	181	381,6	383,3
27	1,320	3,110	133	352,7	356,0
28	2,421	2,130	235	350,4	355,8
29	2,179	3,414	57	354,5	357,5
30	1,919	1,460	152	378,8	380,9
31	1,182	1,801	190	362,3	365,1
32	2,368	3,787	74	351,0	355,6
33	0,534	1,672	293	357,9	360,1
34	2,344	3,347	264	336,5	354,1
35	1,434	3,023	278	349,9	356,5
36	2,313	3,921	66	351,9	355,9
37	2,256	1,992	118	364,6	368,5
38	1,336	3,476	193	348,5	353,2
39	0,968	1,160	232	369,6	371,3
40	1,687	1,284	98	384,1	385,3
41	1,754	2,792	220	352,3	358,5
42	2,001	3,651	169	348,3	355,3
43	0,567	1,934	78	357,0	357,9
44	1,973	1,769	135	368,0	370,7
45	0,786	1,542	88	363,9	364,9
46	2,269	2,475	86	356,7	360,1
47	1,879	3,385	208	348,3	354,8
48	1,054	3,621	212	344,7	348,4
49	2,224	3,815	103	349,9	355,6
50	0,723	2,009	215	356,7	359,1
51	1,469	1,210	284	375,4	378,0
52	1,782	1,134	161	393,1	394,4
53	1,615	1,615	127	369,6	371,6
54	1,945	2,427	201	352,9	354,0
55	0,605	2,158	261	353,3	355,8
56	2,456	2,635	116	346,1	349,1
57	0,823	1,069	111	371,7	372,6
58	1,524	2,093	292	356,9	359,4
59	1,716	2,293	146	358,3	362,0
60	1,152	2,980	79	354,2	356,1

EK A.4

Çizelge A.8 : Karışık taşınım problemi için 50 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.

Örnekleme noktası (LHS) adedi	k_b [W/mK]	b [mm]	Re	T_{max} [K] (3. mertebe)
1	0,06	2,6	68	363,1
2	1,20	0,5	230	346,4
3	0,98	2,0	92	360,0
4	1,05	3,2	144	350,9
5	0,84	3,0	41	359,5
6	0,28	1,8	113	354,4
7	0,36	1,4	250	347,1
8	0,43	4,0	202	347,2
9	1,03	2,9	263	345,8
10	0,21	2,3	188	351,1
11	0,66	2,2	310	345,8
12	0,03	3,9	237	379,8
13	0,48	0,9	27	356,3
14	0,57	2,0	296	345,7
15	0,58	1,3	196	347,9
16	0,09	3,4	109	363,8
17	0,69	3,1	305	345,8
18	0,97	0,8	210	347,2
19	0,83	3,3	319	345,9
20	0,76	0,8	100	353,1
21	0,38	2,8	163	349,6
22	0,73	3,5	130	352,0
23	1,08	1,6	221	346,9
24	0,33	1,8	277	345,6
25	0,71	1,7	32	357,9
26	0,23	2,4	204	349,4
27	0,51	1,3	276	345,7
28	0,34	3,5	285	345,8
29	0,60	2,2	268	345,8
30	0,46	1,5	60	360,0
31	1,01	2,1	18	360,0
32	1,14	2,6	38	359,1
33	0,53	3,9	242	346,1
34	0,87	3,6	82	363,7
35	0,94	1,1	225	346,8
36	0,75	0,6	166	351,4
37	0,25	3,7	257	346,0
38	0,11	2,4	182	357,5
39	0,81	2,5	89	351,2
40	0,12	1,2	158	360,3
41	0,91	1,4	76	364,7
42	1,09	1,7	48	359,2
43	0,63	2,8	117	353,7
44	0,18	0,7	125	354,0
45	0,31	0,9	150	355,2
46	0,16	3,1	10	371,6
47	0,41	1,0	290	346,2
48	1,17	2,7	173	349,3
49	0,89	3,7	56	361,4
50	1,16	3,3	137	352,4

Çizelge A.9 : Karışık taşınım problemi için 100 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.

Örnekleme noktası (LHS) adedi	k_b [W/mK]	b [mm]	Re	T_{max} [K] (3. mertebe)	Örnekleme noktası (LHS) adedi	k_b [W/mK]	b [mm]	Re	T_{max} [K] (3. mertebe)
1	0,33	2,1	261	345,3	51	0,12	1,0	240	356,4
2	1,08	2,8	282	345,4	52	0,61	1,5	213	346,5
3	0,22	2,2	81	355,3	53	0,38	2,4	37	359,0
4	0,25	2,7	58	361,3	54	0,09	2,3	34	358,8
5	0,52	0,7	218	349,1	55	0,66	2,1	313	345,3
6	1,10	3,7	139	351,7	56	0,86	1,7	231	345,9
7	0,46	2,0	248	345,5	57	0,96	0,7	258	345,3
8	0,92	3,4	13	367,9	58	0,71	1,4	187	347,9
9	0,18	1,9	147	355,2	59	1,06	2,2	295	345,2
10	0,54	3,2	151	350,4	60	0,69	3,8	15	364,2
11	0,79	1,0	88	354,4	61	0,04	1,8	42	359,5
12	0,03	1,9	207	375,7	62	0,35	2,6	65	362,1
13	0,67	4,0	250	345,5	63	0,72	1,9	179	348,5
14	0,89	3,1	302	345,6	64	0,78	2,7	116	354,7
15	1,04	1,7	86	355,1	65	0,96	3,4	38	359,8
16	0,81	1,4	52	359,5	66	0,62	0,5	202	349,9
17	0,98	1,5	234	345,9	67	0,89	2,6	137	352,2
18	0,73	2,4	124	353,5	68	1,17	3,5	237	345,7
19	0,12	3,6	294	349,9	69	1,16	0,8	104	351,6
20	0,14	2,5	157	355,7	70	0,56	0,8	270	340,2
21	0,40	2,7	126	353,1	71	0,21	3,8	174	350,0
22	0,42	1,7	46	359,1	72	0,75	1,9	273	345,4
23	0,32	3,7	265	345,5	73	0,29	1,3	301	346,1
24	0,56	1,6	307	345,2	74	0,50	1,0	114	349,0
25	0,27	3,9	18	361,7	75	0,83	3,5	309	345,6
26	0,47	3,4	168	349,1	76	1,12	0,5	97	353,6
27	1,12	1,1	276	345,2	77	0,23	3,0	182	361,1
28	0,65	1,5	154	350,7	78	1,01	0,6	48	358,2
29	0,07	1,2	264	359,6	79	0,20	2,4	142	354,0
30	0,44	3,3	68	359,0	80	1,02	1,1	108	350,8
31	1,08	2,3	315	345,6	81	0,25	2,1	205	348,9
32	0,16	2,5	197	352,0	82	1,20	1,3	32	357,8
33	0,95	0,9	162	350,0	83	0,39	3,2	99	356,8
34	0,93	3,0	209	346,6	84	1,18	2,3	23	358,1
35	0,34	2,7	55	360,9	85	1,15	1,2	292	345,2
36	1,13	2,0	102	351,1	86	0,17	0,7	280	353,5
37	0,36	1,0	128	355,0	87	0,43	2,9	161	349,5
38	0,31	1,6	192	349,4	88	0,85	3,1	227	346,0
39	0,91	1,7	217	346,3	89	0,99	1,8	230	346,0
40	1,21	0,8	76	355,5	90	0,64	3,6	221	346,1
41	0,74	2,8	170	349,0	91	0,53	0,9	193	349,2
42	0,10	4,0	244	353,6	92	1,00	2,5	318	345,5
43	0,05	3,3	145	369,1	93	0,48	3,5	78	357,1
44	0,83	3,0	131	352,7	94	0,70	1,2	171	349,0
45	0,76	3,7	287	345,4	95	0,08	2,9	185	360,3
46	1,06	3,9	284	345,4	96	0,58	2,2	28	357,9
47	0,51	3,4	60	362,1	97	0,27	2,9	110	355,0
48	0,88	3,1	71	358,3	98	0,41	3,2	253	345,5
49	0,57	3,9	92	358,1	99	0,60	1,4	22	357,5
50	0,15	0,6	73	360,5	100	0,80	1,3	122	354,3

Çizelge A.10 : Karışık taşınım problemi için 250 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.

Örnekleme noktası (LHS) adedi	k_b [W/mK]	b [mm]	Re	T_{max} [K] (3. mertebe)	Örnekleme noktası (LHS) adedi	k_b [W/mK]	b [mm]	Re	T_{max} [K] (3. mertebe)
1	0,52	3,9	198	347,6	51	0,66	2,1	112	356,6
2	0,06	2,2	56	360,7	52	0,40	2,4	36	358,8
3	0,18	1,5	246	351,4	53	0,87	1,3	49	358,8
4	0,64	3,4	185	348,6	54	0,34	0,6	30	356,1
5	0,59	2,2	202	347,7	55	0,13	2,2	199	355,0
6	0,31	1,5	50	358,9	56	0,26	1,8	146	353,4
7	1,08	2,3	105	357,1	57	0,19	1,8	304	348,5
8	0,10	3,0	207	357,0	58	0,35	1,2	73	361,6
9	0,48	3,5	106	356,8	59	0,95	2,7	241	346,4
10	0,25	2,7	318	346,0	60	1,15	2,3	147	351,7
11	0,25	3,2	161	350,7	61	0,04	1,2	128	355,1
12	1,18	1,3	95	358,7	62	0,08	3,1	29	359,3
13	0,72	2,4	191	348,1	63	1,05	2,8	177	349,1
14	0,92	0,9	201	347,8	64	0,67	1,7	139	353,6
15	0,99	1,1	58	359,7	65	0,82	1,0	249	346,0
16	0,44	2,9	298	345,9	66	0,69	2,6	206	347,3
17	0,76	1,3	99	358,1	67	0,16	1,0	223	355,1
18	0,03	0,6	122	355,4	68	0,07	3,3	258	359,6
19	0,13	0,9	79	360,3	69	1,07	3,0	54	360,7
20	0,78	2,8	60	361,3	70	0,13	2,0	188	355,7
21	1,08	3,6	320	345,9	71	0,97	3,2	13	366,5
22	0,62	2,0	144	352,0	72	0,09	1,1	170	362,6
23	0,59	3,6	71	362,5	73	0,27	0,7	235	352,8
24	1,10	3,8	273	345,8	74	0,36	1,5	180	350,2
25	0,64	2,8	286	345,8	75	0,79	2,3	151	351,1
26	0,91	2,1	289	345,8	76	0,46	3,7	77	361,5
27	0,96	1,0	190	348,4	77	0,52	0,7	20	356,8
28	0,48	2,6	96	358,4	78	0,50	1,1	18	359,3
29	1,14	2,9	267	345,9	79	0,60	1,5	214	347,0
30	0,64	2,8	294	345,8	80	0,21	3,8	22	359,3
31	0,91	1,1	152	352,5	81	1,09	2,8	12	368,8
32	0,70	2,3	204	347,6	82	0,18	1,6	248	351,2
33	0,79	2,4	294	345,8	83	0,94	1,3	287	345,8
34	0,28	1,1	34	357,3	84	0,74	2,2	167	349,9
35	0,75	3,2	153	350,8	85	0,95	1,4	169	349,9
36	0,10	3,7	201	356,5	86	0,86	1,9	83	360,5
37	0,62	1,8	90	359,4	87	0,23	3,7	68	363,1
38	0,21	2,1	19	359,6	88	0,37	3,7	275	345,9
39	0,27	3,1	103	357,1	89	0,63	3,8	309	345,9
40	0,84	0,8	141	353,7	90	0,08	2,1	78	361,3
41	0,66	3,4	238	346,3	91	0,69	2,7	224	346,8
42	0,49	3,6	226	346,6	92	0,22	1,8	97	358,0
43	0,33	2,7	158	350,3	93	0,20	1,6	278	349,4
44	0,26	3,5	120	354,1	94	0,76	1,6	32	357,8
45	0,89	1,2	205	347,5	95	1,01	3,8	292	345,8
46	0,56	1,6	239	346,3	96	0,89	3,3	301	345,8
47	0,54	1,2	313	345,7	97	1,12	2,6	241	346,4
48	0,39	1,1	126	355,0	98	1,03	1,8	114	356,6
49	0,46	2,3	155	350,8	99	0,07	3,9	283	359,8
50	0,68	2,2	75	361,6	100	0,41	0,8	255	348,6

Çizelge A.10 (devam) : Karışık taşınım problemi için 250 Latin Hiperküp Örneklem (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.

Örneklem noktası (LHS) adedi	k_b [W/mK]	b [mm]	Re	T_{max} [K] (3. mertebe)	Örneklem noktası (LHS) adedi	k_b [W/mK]	b [mm]	Re	T_{max} [K] (3. mertebe)
101	0,22	2,5	131	354,3	151	0,50	1,6	88	359,4
102	0,36	2,7	91	359,1	152	0,75	3,6	221	346,6
103	0,58	1,0	194	349,1	153	0,82	0,8	80	359,9
104	0,22	0,6	268	353,7	154	0,90	1,9	251	346,2
105	0,97	2,3	155	351,2	155	0,93	3,7	263	345,8
106	0,65	2,7	28	358,2	156	0,57	1,4	183	348,8
107	1,09	3,5	229	346,8	157	1,06	3,9	119	354,4
108	0,11	0,5	86	357,8	158	0,81	1,2	144	353,3
109	0,73	1,9	42	358,8	159	0,93	1,7	195	348,1
110	0,83	2,5	227	346,6	160	0,74	2,8	260	346,0
111	0,53	2,5	103	357,5	161	0,32	1,7	14	363,8
112	1,02	2,9	312	345,9	162	0,58	2,0	218	346,9
113	0,06	0,9	221	346,3	163	1,06	3,4	109	356,1
114	0,05	3,5	306	363,8	164	1,16	3,9	270	345,8
115	1,04	1,4	128	355,0	165	0,87	0,5	70	360,4
116	1,19	2,4	311	346,1	166	0,95	2,3	73	362,0
117	1,17	1,6	24	357,1	167	0,50	3,0	284	346,0
118	0,15	2,6	215	352,5	168	0,49	3,4	62	362,2
119	0,34	3,8	125	353,6	169	0,43	0,6	119	355,1
120	0,77	1,1	252	346,0	170	0,30	0,7	85	358,9
121	0,85	2,0	142	352,9	171	0,71	3,0	242	346,3
122	0,12	1,0	300	354,9	172	0,86	0,6	245	347,3
123	0,24	2,7	186	350,2	173	1,04	3,3	42	359,8
124	0,38	3,9	25	358,3	174	0,47	2,9	237	346,4
125	0,38	2,2	278	345,8	175	1,12	2,0	232	346,7
126	1,00	3,4	187	348,3	176	0,42	4,0	315	346,1
127	0,81	0,9	36	357,5	177	0,17	3,9	63	363,1
128	0,84	1,3	40	358,2	178	0,80	3,7	213	347,1
129	0,51	3,5	165	349,8	179	0,87	1,0	17	360,5
130	0,71	1,4	135	352,9	180	0,65	1,0	16	361,0
131	0,67	2,4	261	346,2	181	1,12	1,6	295	345,8
132	0,33	1,8	133	353,9	182	0,43	3,8	276	346,0
133	1,05	3,2	64	362,1	183	0,77	2,9	243	346,1
134	0,41	0,7	115	355,8	184	0,17	1,5	38	357,9
135	1,18	3,5	250	346,0	185	0,40	1,4	167	350,6
136	0,94	2,6	308	345,8	186	0,47	0,8	59	359,0
137	0,30	3,1	290	345,9	187	1,16	1,3	84	360,4
138	1,13	0,6	175	350,4	188	0,59	3,6	44	360,1
139	1,02	0,9	268	345,9	189	0,55	1,9	262	346,0
140	0,35	3,5	182	348,6	190	0,73	2,4	317	345,9
141	0,70	3,2	254	346,2	191	0,15	0,8	159	351,9
142	0,60	2,5	11	370,6	192	0,54	1,9	66	361,4
143	0,08	2,7	53	361,0	193	0,35	3,3	315	346,0
144	0,61	3,6	230	346,6	194	0,29	0,7	48	357,8
145	0,10	0,7	134	354,6	195	0,98	2,9	110	356,4
146	1,15	3,3	100	357,7	196	0,14	2,4	181	354,6
147	0,81	3,7	135	352,5	197	0,92	0,8	217	347,0
148	0,83	3,3	171	349,6	198	0,88	2,9	118	355,4
149	0,12	2,1	157	357,9	199	0,32	0,5	281	351,8
150	0,85	3,1	257	346,1	200	1,00	1,9	47	359,5

Çizelge A.10 (devam) : Karışık taşınım problemi için 250 Latin Hiperküp Örnekleme (LHS) noktası ve bu parametre değerlerinde gerçekleştirilen CFD analizlerinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri.

Örnekleme noktası (LHS) adedi	k_b [W/mK]	b [mm]	Re [-]	T_{max} [K] (3. mertebe)
201	0,99	0,9	111	356,5
202	0,89	0,6	211	347,8
203	0,51	2,8	149	351,3
204	0,46	3,7	189	348,2
205	0,53	4,0	303	345,8
206	0,90	1,8	66	361,6
207	0,78	4,0	162	350,0
208	0,11	2,6	232	355,1
209	0,63	3,0	23	358,3
210	0,72	0,9	271	345,7
211	0,98	3,1	27	358,3
212	1,20	3,2	82	360,6
213	0,24	3,9	129	353,0
214	0,16	3,1	259	349,6
215	1,20	0,7	307	345,7
216	1,06	1,2	280	345,8
217	0,31	2,1	87	359,5
218	1,13	0,8	164	351,6
219	1,14	1,7	69	362,2
220	0,23	2,5	284	346,6
221	0,96	1,9	225	346,8
222	1,11	1,2	302	345,8
223	1,03	3,4	233	346,7
224	0,14	2,0	290	350,8
225	0,68	3,0	265	346,0
226	1,14	3,1	39	359,5
227	1,00	3,4	209	347,4
228	0,74	3,0	137	352,5
229	0,31	1,4	192	350,6
230	0,56	2,5	175	349,3
231	0,04	2,0	124	355,2
232	0,61	1,2	115	355,9
233	0,79	2,2	165	350,1
234	0,20	1,5	297	349,1
235	0,40	1,7	150	351,9
236	0,55	3,9	33	359,6
237	0,28	3,2	219	346,9
238	0,44	3,6	210	347,1
239	1,03	1,8	52	359,9
240	1,10	1,7	46	359,0
241	0,37	3,8	273	346,0
242	0,56	0,7	173	350,3
243	1,09	1,5	92	358,9
244	0,42	1,6	178	349,2
245	0,39	2,1	138	352,8
246	0,05	2,6	101	357,9
247	0,45	1,7	107	356,8
248	1,18	1,3	56	359,9
249	0,19	3,2	94	358,4
250	0,27	2,5	196	348,9

ÖZGEÇMİŞ



Alpay Akgüç 1985’de Zonguldak’da doğdu. TED Zonguldak Koleji Vakfı Özel Lisesi’nden 2003’de mezun oldu. 2007’de Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden mezun olarak lisans öğrenimini tamamladı. 2007’de başladığı İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi’nin Isı-Akışkan Programı yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir. Aynı zamanda 2009 Kasım ayından itibaren Yeditepe Üniversitesi’nde uzman makine mühendisi olarak görev yapmaktadır.

Yayın Listesi:

- Güneş H., Çadırcı S., Akgüç A., 2008: Tasarımla Isı Transferinin Kriging-Benzetilmiş Tavlama ile Modellenmesi ve Optimizasyonu, Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu (BUMAT), Osmangazi Üniversitesi – Eskişehir.