

**T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇUKUR VE TÜMSEK PLAKALARDA ÇOKLU ÇARPAN JETLER İÇİN ISI
VE AKIŞ KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

PERİHAN ÇULUN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

**TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Kazım PIHTILI**

**İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Nevin ÇELİK**

BİNGÖL-2020



REPUBLIC OF TURKEY
BİNGÖL UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE



INVESTIGATION OF HEAT AND FLOW CHARACTERISTICS FOR MULTIPLE-IMPINGING JETS IN CONVEX AND CONCAVE PLATES

This dissertation, created by Perihan ÇULUN under supervision of Prof. Dr. Kazım PIHTILI and Prof. Dr. Nevin ÇELİK, was accepted as a Master thesis in department Mechanical Engineering- Thermodynamics and Heat Technique Discipline by the following committee on 15/ 05/ 2020 with the vote unity

Head of examining committee:	Prof. Dr. Kazım PIHTILI	Signature :
Member	: Prof. Dr. Kadir BİLEN	Signature :
Member	: Prof. Dr. Ramazan MERAL	Signature :
Member	: Doç. Dr. Ömer Faruk CAN	Signature :
Member	: Dr. Öğr. Üyesi M. Salih CELLEK	Signature :

This result has been approved on / / with the decision of/.....
by Board of Directors of the Science Institute.

Assoc. Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Director of the institute

This study was supported within the scope of Bingol University Scientific Research Projects Department.

Project No: BAP-MMF.2017.00.003

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.



T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ÇUKUR VE TÜMSEK PLAKALARDA ÇOKLU ÇARPAN JETLER
İÇİN ISI VE AKIŞ KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Kazım PIHTILI ve Prof. Dr. Nevin ÇELİK danışmanlığında, Perihan ÇULUN tarafından hazırlanan bu çalışma 15/05/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Termodinamik ve Isı Tekniği Bilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Kazım PIHTILI	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Kadir BİLEN	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Ramazan MERAL	İmza	:
Üye	: Doç.Dr. Ömer Faruk CAN	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi M. Salih CELLEK	İmza	:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BÜBAP) Birimi kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: BAP-MMF.2017.00.003

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖNSÖZ

Üzerinde çalıştığımız “Çukur ve tümsek plakalarda çoklu çarpan jetler için ısı ve akış karakteristiğinin incelenmesi” başlıklı tez, ağırlıklı olarak sayısal incelenmiş, ancak elde edilen sonuçların doğrulanmasının sağlanması amacıyla uzun süreli deneysel çalışmalar da yapılmıştır. Deneysel çalışmalar için Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünün Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarının alt yapısı ve laboratuarda bulunan ekipman ve cihazlar ile Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri(BÜBAP) biriminin sağlamış olduğu destek ile alınan ölçüm cihazları kullanılarak, bu tez çalışmasına temel teşkil edecek gerekli deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, sayısal analiz sonuçları ile mukayese edilerek çalışmaya yön verilmiştir. Bu konuda ilgili desteklerinden dolayı Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne ve Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BÜBAP) Birimine teşekkür ederim.

Deneysel ve sayısal sonuçların elde edilmesi kıyaslanması, analiz ve sonuçların elde edilmesi, değerlendirilmesi gibi tüm aşamalarda teknik ve bilimsel desteklerini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Kazım PIHTILI ve Prof. Dr. Nevin ÇELİK’e teşekkürü bir borç bilirim.

Perihan ÇULUN
Bingöl 2020

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xxii
ÖZET	xxiv
ABSTRACT	xxv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
2.1. Çarpan Jetlerin Fiziksel Yapısı	12
2.2. Çoklu Çarpan Jetler	14
2.3. Çoklu Jetlerin Uygulama Alanları	18
2.4. Çarpan Jetlerde Genel Korunum Denklemleri	20
2.4.1. Laminer Akış için Korunum Denklemleri	20
2.4.2. Türbülanslı Akış için Korunum Denklemleri	21
3. MATERYAL VE YÖNTEM	24
3.1. Deneysel Çalışma	24
3.1.1. Deney Düzeneği	24
3.1.2. Deneysel Verilerin Hesaplanması	28

3.1.2.1. Işınım ile Kaybedilen Isı Miktarı	30
3.2. Sayısal Çalışmanın Tanıtılması.....	33
3.2.1. Fiziksel Model ve HAD Analizinin Genel Tanıtımı	33
3.2.2. Ağ Yapısı	40
3.2.3. Türbülans Model Seçimi	43
3.2.4. Temel Bünye Denklemleri	47
3.2.5. Analiz Sonuçlarının Grafikselsel Gösterimi.....	48
3.3. Deneysel ve Literatür ile Doğrulama Çalışmaları.....	52
3.3.1. Deneysel doğrulama çalışması	52
3.3.2. Literatürle Doğrulama Çalışmaları	54
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	57
4.1. Maksimum Çapraz Akış için Sayısal Bulgular	57
4.1.1. Çoklu Jetin Düz Plakaya Çarpması.....	58
4.1.2. Çoklu Jetin Tümsek Şekilli Plakaya Çarpması	67
4.1.3. Çoklu Jetin Çukur Şekilli Plakaya Çarpması	75
4.1.4. Maksimum Çapraz Akışta Plaka Türlerinin Karşılaştırılması	80
4.2. Minimum Çapraz Akış için Sayısal Sonuçlar	96
4.2.1. Çoklu Jetin Düz Plakaya Çarpması.....	96
4.2.2. Çoklu Jetin Tümsek Şekilli Plakaya Çarpması	101
4.2.3. Çoklu Jetin Çukur Şekilli Plakaya Çarpması	106
4.2.4. Minimum Çapraz Akışta Plaka Türlerinin Karşılaştırılması	110
4.3. Maksimum ve Minimum Çapraz Akış Etkilerinin Karşılaştırılması	122
4.3.1. Düz Plakaya Çarpma Durumu	122
4.3.2. Tümsek Şekilli Plakaya Çarpma Durumu.....	125
4.3.3. Çukur Şekilli Plakada Farklı Çapraz Akışın Etkisi.....	129
4.4. Farklı Pürüzlülük Oranının (D_a/D_j) Etkisi.....	134

4.4.1. Tümsek Şekilli Plakada Farklı Prüzlülük Oranının Etkisi	134
4.4.2. Çukur Şekilli Plakada Farklı Prüzlülük Oranının Etkisi	139
4.5. İstatistiksel Regresyon Analizi.....	145
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	152
KAYNAKLAR	157
EKLER	162
Ek A Deneysel Veriler	162
Ek B Sayısal Doğrulama Verileri.....	177
Ek B1. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Re = 8565$	181
Ek B2. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Re = 20000$	184
Ek B3. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Re = 20000$	189
Ek B4. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$, $Re = 8565$	195
Ek B5. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu,.....	200
$D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$, $Re = 20000$	200
Ek B6. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akış ağ doğruluğu, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$, $Re = 20000$	206
Ek B7. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğrulamaları, ...	211
$D_d/D_j = 1.43$, $t/D_d = 0.25$, $Re = 20000$	211
Ek B8. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğrulamaları, ...	215
$D_d/D_j = 0.57$, $t/D_d = 0.25$, $Re = 20000$	215
Ek B9. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu,.....	220
$Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	220
Ek B10. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, ...	225
$Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	225

Ek B11. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, ...	230
$Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$	230
Ek B12. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, ...	235
$Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$	235
ÖZGEÇMİŞ	240



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A_c	: Islak alan (m^2)
A_r	: Çarpan jetlerde relatif alan (m^2)
D_d	: Pürüzlülük çapı (m)
D_h	: Hidrolik çap (m)
D_j	: Jet çapı (m)
W	: Slot jet genişliği (m)
Nu_{Ort}	: Ortalama Nusselt sayısı
$Nu_{x ort}$	: Sıra ortalamalı Nusselt sayısı
Nu_{Yerel}	: Yerel Nusselt sayısı
p	: Akışkan basıncı (Pa)
P	: Elektrik gücü (W)
Re	: Reynolds sayısı
S	: Islak çevre (m)
U, u	: X yönündeki hız bileşenleri (m/s)
V, v	: Y yönündeki hız bileşenleri (m/s)
W, w	: Z yönündeki hız bileşenleri (m/s)
X_n	: X yönündeki jet merkezleri arası mesafe (m)
X_n/D_j	: X yönünde jet merkezleri arası boyutsuz mesafe
Y_n	: Y yönündeki jet merkezleri arası mesafe (m)
Y_n/D_j	: Y yönünde jet merkezleri arası boyutsuz mesafe
Z_n	: Orifis plaka - hedef plaka arası mesafe (m)
Z_n/D_j	: Orifis plaka hedef plaka arası boyutsuz mesafe
q_t	: Toplam ısı akısı (W/m^2)
q_c	: İletim ile ısı akısı (W/m^2)
q_{nat}	: Doğal taşınım ısı akısı (W/m^2)
q_{rad}	: Işınımla ısı akısı (W/m^2)

ε	: Işınım katsayısı
σ	: Stefan Boltzmann sabiti
T_{∞}	: Çevre ortam sıcaklığı (°C)
T_b	: Film sıcaklığı (°C)
u_j	: Orifis plakada jet çıkışında akışkanın ortalama hızı (m/s)
N	: Jet sayısı
$\dot{m}$	: Jetlerden çıkan akışkanın kütleli debisi (kg/s)
g	: Yer çekimi ivmesi (m²/s)
κ	: Türbülans kinetik enerjisi (m²/s²)
ε	: Türbülans kinetik enerjisi yayılma hızı (m²/s³)
ω	: Türbülans kinetik enerjisi yayılma hızı (m²/s³)
P_{κ}	: Türbülans kinetik enerji (κ) üretim oranı
σ_{κ}	: Türbülans kinetik enerji(κ) için difüzyon parametresi
$\sigma_{\omega 1}$	: Türbülans kinetik enerjisi yayılma hızı (ω) için difüzyon parametresi
F_1	: Standart κ - ε modeliyle Wilcox κ - ω modelini harmanlama fonksiyonu
S	: Kayma gerilmesi mutlak değeri (Pa)
A, β	: Türbülans modeli sabitleri
ρ	: Akışkan yoğunluğu (kg/m³)
μ	: Dinamik viskozite (kg/ms)
μ_t	: Türbülans dinamik viskozitesi (kg/ms)
k	: Akışkan ısı iletim katsayısı (W/mK)
k_t	: Türbülans ısı iletim katsayısı (W/mK)
Pr	: Boyutsuz Prandl sayısı
Pr_t	: Türbülans boyutsuz Prandl sayısı
a	: Türbülans dinamik viskozite sabiti
α	: Difüzyon katsayısı (m²/s)
C_p	: Akışkan özgül ısısı (J/kgK)
C_f	: Akışkan sürtünme katsayısı
Δy	: Kademeli ağda ilk düğümün(nod) yüzeye uzaklığı(m)
U_0	: Akışkanın ilk hızı (m/s)
U_s^*	: Boyutsuzlaştırılmış hız
τ_w	: Hedef plaka bölgesinde kayma gerilmesi (Pa)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Tekli jet fiziksel yapısı.....	13
Şekil 2.2. Çoklu jet fiziksel yapısı	15
Şekil 2.3. Çoklu çarpan jetin geometrik parametreleri.....	16
Şekil 2.4. Taşınım ve çarpam jet ile soğutma	16
Şekil 2.5. Çapraz akış formları.....	17
Şekil 2.6. Gaz türbin kanadının soğutulması (Florschuetz et al. 1981)	18
Şekil 2.7. Çoklu çarpan jet ile elektronik bir cihazın soğutulması.....	19
Şekil 3.1. Deney düzeneği.....	25
Şekil 3.2. Deney düzeneği tasarımı.....	26
Şekil 3.3. Deney düzeneği test detayı	27
Şekil 3.4. Sıcaklık ölçüm noktaları	27
Şekil 3.5. Sıcak tel anemometre ile jet hızlarının ölçümü.....	28
Şekil 3.6. Sayısal akış modeli	35
Şekil 3.7. Sayısal analizde uygulanan fiziksel akış alanı ve parametreler	36
Şekil 3.8. Düz hedef plaka için çapraz akış fiziksel yapısı	37
Şekil 3.9. Farklı çapraz akış için oluşturulan akış modelleri	38
Şekil 3.10. Genel ağ yapısı.....	42
Şekil 3.11. Minimum çapraz akış, düz plaka, $Z_n/D_j = X_n/D_j = 2$	42
Şekil 3.12. Türbülans modeli doğrulama, maksimum çapraz akış düz plaka, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 4, Re = 16550$	44
Şekil 3.13. Maksimum çapraz akış, düz plaka, $Z_n/D_j = X_n/D_j = 2, Re = 20000$	45
Şekil 3.14. Minimum çapraz akış, düz plaka, $Z_n/D_j = X_n/D_j = 2, Re = 20000$	46
Şekil 3.15. Maksimum çapraz akış, tümsek şekilli plaka, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 3,$ $Re = 8565$	46
Şekil 3.16. Yerel ve sıra ortalamalı Nusselt için esas alınan veri hatları	50
Şekil 3.17. Maksimum çapraz akış sıra ortalamalı Nusselt grafik örneği.....	50

Şekil 3.19. Deneysel doğrulama akış modeli	52
Şekil 3.20. Sayısal akış alanı.....	53
Şekil 3.21. Doğrulama sonuçları	54
Şekil 3.22. Yong et al. (2015) için kullanılan kademeli ağ yapısı	55
Şekil 3.23. Literatür ile doğrulama, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = Y_n/D_j = 4$	56
Şekil 3.24. Literatür ile doğrulama, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = Y_n/D_j = 4$	56
Şekil 4.1. Düz plakada maksimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $Re = 8565$	58
Şekil 4.2. Düz plakada maksimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $Re = 8565$	59
Şekil 4.3. Düz plaka maksimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $Re = 20000$	61
Şekil 4.4. Düz plakada maksimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $Re = 20000$	62
Şekil 4.5. Düz plakada maksimum çapraz akışta Reynolds sayısının etkisi	63
Şekil 4.6. Düz plakada maksimum çapraz akışta sıcaklık dağılımlı akım çizgileri, $Re = 20000$	65
Şekil 4.7. Düz plakada maksimum çapraz akışta sıcaklık dağılımlı kontur diyagramları, $Re = 20000$	66
Şekil 4.8. Tümsek şekilli plaka maksimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $Re = 8565$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	68
Şekil 4.9. Tümsek şekilli plakada, maksimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $Re = 8565$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	69
Şekil 4.10. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	71
Şekil 4.11. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	72
Şekil 4.12. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta Reynolds sayısının etkisi, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	73
Şekil 4.13. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta sıcaklık dağılımlı akım çizgileri, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	74
Şekil 4.14. Tümsek şekilli plaka maksimum çapraz akışta sıcaklık dağılımlı akım çizgileri, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	75
Şekil 4.15. Çukur şekilli plaka maksimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$, ...	76
Şekil 4.16. Çukur şekilli plaka maksimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $Re = 20000$	78

Şekil 4.17. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta sıcaklık dağılımlı akım çizgileri, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	79
Şekil 4.18. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta sıcaklık dağılımlı konturler, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	80
Şekil 4.19. Maksimum çapraz akışta farklı plakaların sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	82
Şekil 4.20. Maksimum çapraz akışta farklı plakaların sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	83
Şekil 4.21. Maksimum çapraz akışta farklı plakaların sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	84
Şekil 4.22. Maksimum çapraz akışta farklı plakaların akım çizgileri, $Z_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	86
Şekil 4.23. Maksimum çapraz akışta farklı plakaların akım çizgileri, $Z_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	87
Şekil 4.24. Maksimum çapraz akışta farklı plakaların akım çizgileri, $Z_n/D_j = 4$, $Re = 20\ 000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	88
Şekil 4.25. Maksimum çapraz akışta düz plakada hız diyagramları, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	90
Şekil 4.26. Maksimum çapraz akışta tümsek şekilli plakada hız diyagramları, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	91
Şekil 4.27. Maksimum çapraz akışta çukur şekilli plakada hız diyagramları, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	92
Şekil 4.28. Hız diyagramları, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	93
Şekil 4.29. Hız diyagramları, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	94
Şekil 4.30. Hız diyagramları, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	95
Şekil 4.31. Düz plakada minimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $Re = 20000$	97
Şekil 4.32. Düz plakada minimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $Re = 20000$	98
Şekil 4.33. Düz plakada minimum çapraz akışta akım çizgileri, $Re = 20000$	99
Şekil 4.34. Düz plakada minimum çapraz akışta sıcaklık konturleri, $Re = 20000$	100

Şekil 4.35. Minimum çapraz akışta düz plakada Reynolds etkisi, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$	101
Şekil 4.36. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$, $Re = 20000$	102
Şekil 4.37. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$, $Re = 20000$	103
Şekil 4.38. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta akım çizgileri, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$, $Re = 20000$	105
Şekil 4.39. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta sıcaklık konturleri, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$, $Re = 20000$	106
Şekil 4.40. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$, $Re = 20000$	107
Şekil 4.41. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $t/D_d = 0.25$, D_d/D_j $= 1$, $Re = 20000$	108
Şekil 4.42. Çukur şekilli plaka minimum çapraz akışta akım çizgileri, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	109
Şekil 4.43. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta sıcaklık konturleri, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	110
Şekil 4.44. Minimum çapraz akışta farklı plakaların sıra ortalamlı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	111
Şekil 4.45. Minimum çapraz akışta farklı plakaların sıra ortalamlı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	113
Şekil 4.46. Minimum çapraz akışta farklı plakaların sıra ortalamlı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	114
Şekil 4.47. Düz plakada minimum çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri, $Re = 20000$	117
Şekil 4.48. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	118
Şekil 4.49. Çukur şekilli plakada, minimum çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	119
Şekil 4.50. Farklı plakaların minimum çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri, $Z_n/D_j = 2$, $X/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	121

Şekil 4.51. Farklı plakaların minimum çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 2, Re = 20000, D_d/D_j = 1, t/D_d = 0.25$	121
Şekil 4.52. Düz plakada çapraz akışın etkisi, $Z_n/D_j = 2, Re = 20000$	122
Şekil 4.53. Düz plakada çapraz akışın etkisi, $Z_n/D_j = 3, Re = 20000$	123
Şekil 4.54. Düz plakada çapraz akışın etkisi, $Z_n/D_j = 4, Re = 20000$	124
Şekil 4.55. Tümsek şekilli plakada sıra ortalama Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 2,$ $Re = 20000, D_d/D_j = 1, t/D_d = 0.25$	126
Şekil 4.56. Tümsek şekilli plakada sıra ortalama Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 3,$ $Re = 20000, D_d/D_j = 1, t/D_d = 0.25$	127
Şekil 4.57. Tümsek şekilli plakada sıra ortalama Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 4,$ $Re = 20000, D_d/D_j = 1, t/D_d = 0.25$	128
Şekil 4.58. Çukur şekilli plakada sıra ortalama Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 2,$ $Re = 20000, D_d/D_j = 1, t/D_d = 0.25$	130
Şekil 4.59. Çukur şekilli plakada çapraz akışın etkisi, $Z_n/D_j = 3, Re = 20000,$ $D_d/D_j = 1, t/D_d = 0.25$	131
Şekil 4.60. Çukur şekilli plakada çapraz akışın etkisi, $Z_n/D_j = 4, Re = 20000,$ $D_d/D_j = 1, t/D_d = 0.25$	132
Şekil 4.61. Farklı çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 2,$ $Re = 20000, D_d/D_j = 1, t/D_d = 0.25,$	134
Şekil 4.62. Tümsek şekilli plakada sıra ortalama Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 2,$ $Re = 20000, t/D_d = 0.25$	136
Şekil 4.63. Tümsek şekilli plakada sıra ortalama Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 3,$ $Re = 20000, t/D_d = 0.25$	137
Şekil 4.64. Tümsek şekilli plakada sıra ortalama Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 4,$ $Re = 20000, t/D_d = 0.25$	138
Şekil 4.65. Çukur şekilli plakada sıra ortalama Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 2,$ $Re = 20000, t/D_d = 0.25$	140
Şekil 4.66. Çukur şekilli plakada sıra ortalama Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 3,$ $Re = 20000, t/D_d = 0.25$	141
Şekil 4.67. Çukur şekilli plakada sıra ortalama Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 4,$ $Re = 20000, t/D_d = 0.25$	142
Şekil 4.68. Minimum çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri, $Z_n/D_j = 4,$ $X_n/D_j = 2, Re = 20000, D_d/D_j = 0.57, t/D_d = 0.25$	143

Şekil 4.69. Maksimum çapraz akım çukur şekilli plaka (Denklem 4.1)	147
Şekil 4.70. Minimum çapraz akış tümsek şekilli plaka (Denklem 4.1)	147
Şekil 4.71. Maksimum çapraz akış düz plaka sonuçları	149
Şekil 4.72. Maksimum çapraz akış tümsek şekilli plaka sonuçları.....	149
Şekil 4.73. Minimum çapraz akış düz plaka sonuçları.....	150
Şekil 4.74. Minimum çapraz akış tümsek şekilli plaka sonuçları	151
Şekil 4.75. Minimum çapraz akış çukur şekilli plaka sonuçları	151
Şekil A1.Sıcak tel anemometre ve probu	165
Şekil A2. Hedef plakaya termokulpların yerleşimi	166
Şekil A3. Folyo tipi ısıtıcı ve termokulpların yerleştirilmesi.....	167
Şekil A4. İzolasyon detayı	168
Şekil A5. Sabit ısı akısı için kullanılan varyak	169
Şekil A6. Ampermetre ve voltmetre bağlantısı	170
Şekil A7. Deney seti komple elektrik bağlantısı	171
Şekil A8. Termokulpların kanal seçiciye bağlanması.....	172
Şekil A9. Orifis plaka yapısı	173
Şekil A10. Anemometrede akışkan hızı ve sıcaklığının ölçümü	174
Şekil A11. Kompresör çıkışı basınç ölçümü.....	175
Şekil A12. Rotametre ile debi ölçümü	176
Şekil B1.1. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 8565$	181
Şekil B1.2. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 8565$	181
Şekil B1.3. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 8565$	182
Şekil B1.4. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 8565$	182
Şekil B1.5. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 8565$	183
Şekil B1.6. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 8565$	183
Şekil B1.7. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 8565$	184

Şekil B2.1. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$	184
Şekil B2.2. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$	185
Şekil B2.3. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$	185
Şekil B2.4. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$	186
Şekil B2.5. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$	186
Şekil B2.6. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$	187
Şekil B2.7. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$	187
Şekil B2.8. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$	188
Şekil B2.9. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$	188
Şekil B3.1. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$	190
Şekil B3.2. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$	190
Şekil B3.3. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$	191
Şekil B3.4. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$	191
Şekil B3.5. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$	192
Şekil B3.6. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$	192
Şekil B3.7. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$	193

Şekil B3.8. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$	193
Şekil B3.9. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$	194
Şekil B4.1. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	195
Şekil B4.2. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	195
Şekil B4.3. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	196
Şekil B4.4. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	196
Şekil B4.5. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	197
Şekil B4.6. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	197
Şekil B4.7. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	198
Şekil B4.8. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	198
Şekil B4.9. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	199
Şekil B5.1. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	200
Şekil B5.2. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	200
Şekil B5.3. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	201
Şekil B5.4. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	201
Şekil B5.5. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$	202

Şekil B5.6. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	202
Şekil B5.7. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	203
Şekil B5.8. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	203
Şekil B5.9. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	204
Şekil B5.10. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta türbülans model doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	204
Şekil B6.1. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	206
Şekil B6.2. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	206
Şekil B6.3. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	207
Şekil B6.4. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	207
Şekil B6.5. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	208
Şekil B6.6. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	208
Şekil B6.7. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	209
Şekil B6.8. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	209
Şekil B6.9. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	210
Şekil B7.1. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	211
Şekil B7.2. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	211

Şekil B7.3. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	212
Şekil B7.4. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	212
Şekil B7.5. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	213
Şekil B7.6. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	213
Şekil B7.7. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	214
Şekil B7.8. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	214
Şekil B8.1. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	215
Şekil B8.2. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	215
Şekil B8.3. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	216
Şekil B8.4. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.5$	216
Şekil B8.5. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	217
Şekil B8.6. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	217
Şekil B8.7. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	218
Şekil B8.8. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	218
Şekil B8.9. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	219
Şekil B9.1. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	220

Şekil B9.2. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	220
Şekil B9.3. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	221
Şekil B9.4. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	221
Şekil B9.5. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	222
Şekil B9.6. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	222
Şekil B9.7. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	223
Şekil B9.8. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	223
Şekil B9.9. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	224
Şekil B10.1. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	225
Şekil B10.2. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	225
Şekil B10.3. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	226
Şekil B10.4. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	226
Şekil B10.5. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	227
Şekil B10.6. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	227
Şekil B10.7. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	228
Şekil B10.8. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	228

Şekil B10.9. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1$	229
Şekil B11.1. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	230
Şekil B11.2. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	2300
Şekil B11.3. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	231
Şekil B11.4. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	231
Şekil B11.5. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	232
Şekil B11.6. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	232
Şekil B11.7. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	233
Şekil B11.8. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	233
Şekil B11.9. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 1.43$	234
Şekil B12.1. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	235
Şekil B12.2. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	235
Şekil B12.3. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	236
Şekil B12.4. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	236
Şekil B12.5. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	237
Şekil B12.6. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	237

Şekil B12.7. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 2, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	238
Şekil B12.8. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 3, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	238
Şekil B12.9. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 4, Re = 20000, t/D_j = 0.25, D_d/D_j = 0.57$	239



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Düz plakada maksimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	60
Tablo 4.2. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	70
Tablo 4.3. Çukur şekilli plaka maksimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	77
Tablo 4.4. Maksimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	85
Tablo 4.5. Düz plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	97
Tablo 4.6. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	104
Tablo 4.7. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	109
Tablo 4.8. Minimum çapraz akışta farklı plaka türlerinde alan ortalama Nusselt sayısı	115
Tablo 4.9. Düz plakada farklı çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	125
Tablo 4.10. Tümsek şekilli plakada, farklı çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	129
Tablo 4.11. Çukur şekilli plakada farklı çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	133
Tablo 4.12. Tümsek şekilli plakada alan ortalama Nusselt sayısı	139
Tablo 4.13. Çukur plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	143
Tablo 4.14. Farklı plaka türlerinde alan ortalama Nusselt sayısı	144
Tablo 4.15. Farklı plaka türlerinde alan ortalama Nusselt sayısı	144
Tablo 4.16. Denklem 4.1 için regresyon analiz sonuçları	146
Tablo 4.17. Denklem 4.2 için regresyon analiz sonuçları	148
Tablo 4.18. Denklem 4.3 için regresyon analiz sonuçları	150
Tablo A1. Film sıcaklığı için sıcaklık ölçüm değerleri	162
Tablo A2. Soğutma sonrası sıcaklık ölçüm değerleri	164
Tablo A3. Jet hızı ölçüm değerleri	164

Tablo A3. (Devamı) Jet hızı ölçüm değerleri.....	165
Tablo B1. Maksimum çapraz akış modelleri	177
Tablo B1. (Devamı): Maksimum çapraz akış modelleri	178
Tablo B2. Minimum çapraz akış modelleri.....	178
Tablo B2. (Devamı): Minimum çapraz akış modelleri	179
Tablo B3. Farklı D_d/D_j parametresi için modeller	179
Tablo B3. (Devamı): Farklı D_d/D_j parametresi için modeller	180
Tablo B2.1. Düz plaka maksimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	189
Tablo B3.1 Düz plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	194
Tablo B4.1. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu	199
Tablo B5.1. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu	205
Tablo B6.1. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	210
Tablo B8.1. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu	219
Tablo B9.1. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	224
Tablo B10.1. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akış, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$	229
Tablo B11.1. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu	234
Çukur şekilli plaka, Minimum çapraz akış	234
Tablo B12.1. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı	239

ÇUKUR VE TÜMSEK PLAKALARDA ÇOKLU ÇARPAN JETLER İÇİN ISI VE AKIŞ KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında çoklu çarpan jetler tümsek ve çukur şekilli pürüzlü yüzeylere ve kıyas amacıyla düz yüzeye çarptırılmıştır. Çalışmada tümsek şekiller düz bir plakanın üst yüzeyinde farklı çaplarda çıkıntılar (bombe) açılarak elde edilmiştir. Benzer şekilde oluşturulan başka bir plakanın ters-yüz edilmesi durumu tümsek şekillerin çukur haline dönüşmesi durumudur ve çukur şekilli pürüzlü yüzeyler bu şekilde oluşturulmuştur. Düz, tümsek ve çukur şekilli plakalara çarpan çoklu jetler karşılıklı konumlandırılırken üst, alt ve kenarlardan akışın çevreye çıkış durumları sınırlandırılmıştır. Şöyle ki, tek bir çıkış verilmesi durumu maksimum çapraz akış, dört çıkış verilmesi durumu ise minimum çapraz akış olarak adlandırılmış ve bu durumlar altındaki akış karakteristiği incelenmiştir. Bunlara ek olarak, her plaka için ayrı ayrı jetler arası boyutsuz mesafe (X_n/D_j), plakalar arası boyutsuz mesafe (Z_n/D_j) ve Reynolds (Re) sayısının da etkisine bakılmıştır. Çalışmanın ısı transferi sonuçları sıra ortalamalı, alan ortalamalı ve yerel Nusselt sayıları cinsinden sunulmuştur. Akış karakteristiği ise çeşitli hız ve akım çizgileri sunumlarıyla gösterilmiştir.

Çoklu çarpan jetlerde ısı ve akış karakteristiğini etkileyen pek çok parametre olması ve deneysel çalışmada bu durumun yüksek maliyet ve zaman gerektirmesi çalışmayı sayısal olarak incelemeye yöneltmiştir. Ancak, yapılan sayısal çalışmada yüksek doğruluk elde edebilmek amacıyla bazı referans deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel Nusselt sayısı ile muadil akış modeli için bulunan sayısal Nusselt sayısı arasında %4.67 hata payı bulunmuştur. Deneysel doğrulama dışında, ağ, iterasyon ve yakınsama doğruluğu gibi sayısal çalışmanın çeşitli doğrulama analizleri yapılmıştır.

Geniş parametrik spektrum altında gerçekleştirilen çalışmada ısı transferini ve akış karakteristiğini etkileyen en önemli parametrenin çapraz akış türü olduğu anlaşılmıştır. Diğer tüm parametrelerden farklı olarak özellikle minimum çapraz akış durumunda en iyi ısı transferinin sağlandığı tespit edilmiştir. Maksimum çapraz akış sonuçları minimuma çapraz akışa göre çok düşük çıkmıştır. Diğer parametrelerin etkisi ise her plaka için ayrı ayrı ele alınmıştır. Maksimum çapraz akışta en iyi ısı transferi düşük plaka mesafesi ($Z_n/D_j = 2$) ve yüksek jet mesafesinde ($X_n/D_j = 4$) elde edilmiştir. Minimum çapraz akışta en iyi ısı transferinin genel olarak düşük jet mesafesinde ($X_n/D_j = 2$) elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çarpan jet, çoklu çarpan jetler, pürüzlü yüzey, ısı transferi, akış analizi, sayısal analiz, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD), çapraz akış.

INVESTIGATION OF HEAT AND FLOW CHARACTERISTICS FOR MULTIPLE-IMPINGING JETS IN CONVEX AND CONCAVE PLATES

ABSTRACT

In this thesis, multiple impinging jets were impinged to convex and concave dimpled shaped surfaces and flat surface for comparison. In the study, convex shapes were obtained by opening ridges (bumps) of different diameters on the upper surface of a flat plate. Inversion of another similarly formed plate is when bumps turn into a pit, and concave shaped surfaces are formed in this way. Multiple jets impinging to flat, convex and concave shaped plates are positioned opposite each other, while the flow to the environment from the top, bottom and edges are limited. That is, the state of giving a single output is called maximum cross flow, and the situation of giving four outputs is called minimum cross flow and the flow characteristics under these conditions are examined. In addition to these, the effect of the dimensionless distance between the jets (X_n / D_j), the dimensionless distance between the plates (Z_n / D_j) and Reynolds (Re) were investigated for each plate. Heat transfer results of the study are presented in line average, area average and local Nusselt numbers. The flow characteristic is shown by various speed and stream line presentations.

The study is considered as a numerical study in terms of the fact that there are many parameters affecting the heat and flow characteristics of multi jets and that it is both costly and time consuming to investigate all of them experimentally. However, some reference experimental studies have been conducted to determine the accuracy of the numerical study. According to the results obtained with the experimental measurement and numerical results for the equivalent flow model, Nusselt numbers were close to each other with an error margin of 4.67%. In addition the corresponding mesh accuracy, iteration accuracy, convergence accuracy were obtained for all other parameters.

In the study carried out under a wide parametric spectrum it was understood that the most important parameter affecting the heat transfer and flow characteristic is the cross flow effect. Unlike all other parameters, it is determined that the best heat transfer is provided especially in the case of minimum cross flow. The effect of other parameters is handled separately for each plate. The best heat transfer at maximum cross flow was obtained at low plate distance ($Z_n / D_j = 2$) and high jet distance ($X_n / D_j = 4$). It was found that the best heat transfer at minimum cross flow was generally achieved at low jet distance ($X_n / D_j = 2$)

Keywords: Impinging jet, multiple impinging jets, dimpled surfaces, heat transfer, Nusselt number, flow analysis, numerical analysis, computational fluid dynamics (CFD), cross flow.

1. GİRİŞ

Akış hareketleri ile birlikte, ısı transferi işlemlerinin önemli olduğu birçok bilimsel çalışmalarda, akışkan özelliklerinde meydana gelen değişimlere bağlı olarak ısı transferindeki değişimlerin, oluşacak etkilerin teorik ve deneysel çalışmalarla belirlenmesi ve elde edilen sonuçlara göre tasarıma geçilmesi önemli bir araştırma ve mühendislik faaliyetidir. Yapılan araştırmaların temel amacı akış hareketlerine bağlı olarak mevcut enerji ile daha iyi ısı transferinin sağlanmasıdır. Özellikle taşınım ile ısı transferinin olduğu her uygulamada akış hareketlerine bağlı olarak ısı transferinin incelenmesi daha fazla önem kazanır. Bu durum özellikle taşınım ile ısı transferinin olduğu her uygulama için geçerlidir. Çünkü taşınım ile ısı transfer katsayısı birçok parametreye bağlı olarak değişebilmektedir. Taşınım katsayısı genel olarak, ele alınan akışkanın özelliklerine (sıcaklık, iletim katsayısı, akışkan hızı), akışkanın temas halinde olduğu ortama, akışın Reynolds sayısına bağlı olarak değişir. Dolayısı ile taşınım katsayısı bir bütün olarak akış karakteristiği ile yakından ilgilidir. Akış hareketleri ile birlikte ısı geçiş işlemlerinin önemli olduğu uygulamalara örnek olarak çarpan jetli sistemler, eşanjörler, kalorifer kazanları, ısıtma, soğutma sistemleri, HVAC grupları, kurutma sistemleri vb. uygulamalar örnek gösterilebilir.

Taşınım ile ısı transferinin en önemli örneklerini kapsayan ve de bu tezin ana konusu olan çarpan çoklu jetler, tekli jetlere ve ısı transfer alanlarında kullanılan diğer yöntemlere göre yüksek ısı ve kütle transferi sağlamaları nedeni ile tercih edilmektedir (Han et al. 2001). Başta havacılık olmak üzere birçok endüstriyel alanda, ısı ve kütle transfer uygulamalarında yarı (slot) ve dairesel şekilli çoklu jet dizileri kullanılmaktadır. Metal ve kayışların tavlama, cam levhaların temperlenmesi, kâğıt tekstil ürünlerinin kurutulması, gaz türbinlerinde türbin kanatlarının soğutulması, havacılıkta kullanılan tahrik jeti - kanat etkileşimi gibi uygulamalar çarpan jetlerin kullanım alanlarına örnektir (Buchlin 2011; Trinh et al. 2016).

Ayrıca kompakt ısı değiştiricileri ve otomotiv sektöru yoğun şekilde dizilmiş (düşük jet mesafeli) çarpan jetlerin en çok kullanıldığı alanlar olarak karşımıza çıkmaktadır (Weigand and Spring 2009). Çoklu çarpan jetlerin elektronik çiplerin soğutulması gibi mikro ölçeekte kullanılan uygulamaları da mevcuttur.

Çoklu çarpan jetlerde ısı transferini etkileyen parametreler tekli çarpan jetlere göre daha fazladır. Tekli çarpan jetlerde ısı transferine etki eden parametreler ileride bahsedileceğı üzere, jet geometrisi, jet-hedef plaka arası mesafe (Z_n/D_j), akışkan türü (Pr), Reynolds sayısı (Re) vb. iken; çoklu çarpan jetlere bu parametrelerin yanı sıra jetlerin birbirine olan düşey ve yatay konumları (Y_n/D_j , X_n/D_j) de eklenir. Parametrik analizin akış üzerinde büyük etki oluşturması hasebiyle çarpan çoklu jetlerin derinlemesine incelenmesi gerekir. Bu konuda yapılan deneysel ve sayısal araştırmalar mevcut olmakla birlikte, genel bir kanıya varılabilmesi bakımından yetersizdir. Dolayısıyla bu tez çalışması literatürdeki önemli bir açığı kapatmak amacıyla gerçekeştirilmiştir.

Doktora eğitimi aşamasında gerçekeştirilen bu tez çalışmasında, çoklu çarpan jetlerin hedef plaka üzerinde özel olarak oluşturulmuş tümsek ve çukur şekle sahip (bombeli) pürüzlü yüzeylere çarptırılması sonucunda; akış hareketlerindeki ve ısı transferindeki parametrelerin değişimleri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Hemen vurgulanmalıdır ki, incelenen parametrelerin boyutsuzlaştırılmasına büyük özen gösterilmiş, boyutsuzlaştırma işleminde çoklu jeti oluşturan her bir dairesel jetin çapı ($D_j = 1.75 \text{ mm}$) kullanılmıştır. Çoklu çarpan jetlerde ısı transferine ve akış karakteristiğıne etki ettiğı düşünölen parametreler bu tezin kapsamında detaylı bir şekilde incelenmiştir. Tez boyunca yapılan parametrik analiz şu şekilde sıralanabilir:

✓ Mevcut tez çalışmasında çarpan çoklu jetler pürüzlü ve düz yüzeylere uygulanmıştır. Pürüzlölük etkisi plakanın altından ve üstünden oluşturulan çukur ve tümsek şekilli yüzey alanları (bombeler) ile sağılanmıştır. Plakanın üstünde oluşturulan tümsek şekillere sahip bombeli pürüzlü yüzeyler tez içerisinde “**tümsek şekilli plaka**”, plaka yüzeyinin altında oluşturulmuş çukurlu şekillere sahip bombeli pürüzlü yüzeyler “**çukur şekilli plaka**” şeklinde adlandırılmıştır. Bombelerin çapı üç ayrı değerde test edilmiştir ve çoklu çarpan jetteki her bir jetin dairesel çapı arasındaki oran, boyutsuz pürüzlölüğü vermek için kullanılmıştır; $D_d/D_j = 0.57, 1$ ve 1.43 şeklinde alınmıştır.

- ✓ Mevcut çalışmada çarpan çoklu jetler düz, tümsek şekilli ve çukur şekilli plakalara çarptırılırken jetlerin her birinin yatayda (X_n) ve düşeyde (Y_n) birbirine olan mesafesi üç ayrı değerde incelenmiştir ($X_n/D_j = 2, 3, 4$ ve $Y_n/D_j = 2, 3, 4$). Aynı şekilde orifis plaka ile çarpma plakası arasındaki mesafe üç ayrı değerde incelenmiştir ($Z_n/D_j = 2, 3, 4$).
- ✓ Çoklu jetin çıkışı da diyebileceğimiz orifis plakasından çıkan havanın karşına yerleştirilen plakaya çarptıktan sonra kenarlardan dışarı yayılma durumuna göre ısı transferi ve akışkan akışı sonuçları farklılık gösterecektir. Bu tez çalışmasında orifis plaka ile çarpma yüzeyi dik doğrultuda karşı karşıya getirilmiş ve jetin alt, üst ve yanlardan etrafa yayılıp yayılmama durumu dikkate alınmıştır. Jetin çarpma sonrası alt üst ve yanlardan çevreye yayıldığı durum “minimum çapraz akış” olarak adlandırılırken, çevreye sadece tek bir yönden çıkış verilmiş hali “maksimum çapraz akış” olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada tüm parametreler minimum ve maksimum çapraz akışlara maruz bırakılmıştır.
- ✓ Çalışmada Reynolds sayısı 4000 - 30000 arasında değişmiştir. Akışkan olarak sadece hava ($Pr = 0.7$) kullanıldığı için Pr sayısı etkisine bakılmamıştır.

Çalışma ağırlıklı olarak sayısal analiz şeklinde gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz, Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) yazılımı olan ANSYS-CFX ticari paket programı yardımıyla yürütülmüştür. Doğrulama amaçlı yapılan deneysel çalışmada sınırlı sayıda parametre incelenmiştir. Deneysel çalışma için Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği laboratuvarının imkânları kullanılmış olup, bazı ölçüm cihazları Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimi tarafından tedarik edilmiştir. Analizler sonucunda en önemli çıktı olarak ısı transferine bakılmıştır. Isı transferi boyutsuz Nusselt sayısı cinsinden ifade edilmiş, buna ilaveten gerekli yerlerde hız dağılımı ve sıcaklık değişimi de sunulmuştur.

Beş bölümden oluşan bu çalışmanın Giriş bölümü olan birinci bölümünde çarpan çoklu jetlerin önemi, kullanım alanları vb. hakkında genel bilgi sunulmuştur. Kaynak Özetleri olarak adlandırılan ikinci bölümde çoklu çarpan jetlerin genel literatür araştırmaları, literatür çalışmaları esas alınarak çarpan jetlerin fiziksel yapısı ve ilgili denklemler hakkında genel bilgi sunulmuştur. Materyal ve Yöntem başlıklı üçüncü bölümde deneysel

ve sayısal çalışma hakkında genel bilgiler verilmiş, sayısal kontroller yapılarak, çözümün yakınsaması, türbülans modelin uygunluğu, korunum denklemlerinin sağlanması, hücre bağımsızlığı, y^+ kontrolü, çözümün deneysel çalışma ve literatürle kıyası verilmiştir. Bulgular ve Tartışma bölümü olan dördüncü bölümde maksimum çapraz akış ve minimum çapraz akış için elde edilen sonuçlar yorumlanarak sunulmuştur. Yine maksimum ve minimum çapraz akış için bulunan sonuçlar farklı plakalar için karşılaştırılmış, her plaka için maksimum ve minimum çapraz akış etkisine bakılmıştır. Aynı bölümde istatistiksel regresyon analizleri sunulmuştur. Sonuçlar ve Öneriler bölümü olan beşinci bölümde elde edilen sonuçlar özet şeklinde değerlendirilmiş ve ilgili önerilerde bulunulmuştur. Tez içerisinde fazla yer kaplayacağı düşünülen deney fotoğrafları, tabloları, sayısal çalışmanın doğrulaması için elde edilen tablo ve grafikler Ekler kısmında sunularak tez tamamlanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Zorlanmış taşınım ile ısı transferi bakımından etkin ısı transfer oranını sağladığı için, çarpan jet ile soğutma/ısıtma en önemli ısı transfer türlerinden birini oluşturur (Rhee et al. 2003; Kanokjarovijit et al. 2005; Onstad et al. 2009; Chougule et al. 2011). Çarpan jet uygulamaları içerisinde tekli dairesel jetler, yarık jetler ve çoklu jetler literatürde en sık karşılaşılan üç ayrı jet uygulamalarıdır (Penumadu et al. 2017).

Onstad et al. (2009) daha yüksek ve daha üniform ısı transferi sağladığından çarpan çoklu jet soğutma sistemlerinin çarpan tekli jet soğutma sistemlerine tercih edilebileceğini savunmuştur. Literatüre göre çoklu jetlerde daha etkili ısı transferi elde edilmesindeki temel neden, komşu jetlerin yüzeye çarpmadan önce ve çarptıktan sonra etkileşim içine girmesi ve çapraz akış etkisi oluşturmalarıdır (Rhee et al. 2003; Chang et al. 2007; Yong et al. 2015; Penumadu et al. 2017).

Çoklu çarpan jetlerin literatür araştırması esnasında ülkemizde hatırı sayılır oranda çalışmaya rastlanmıştır. Örneğin, İşman (2011) farklı hava hızı, hava nemi ve jet-plaka mesafesi için tekli ve ikili çarpan jet sonuçlarını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Sonuçta, çarpan tekli jet sonuçlarının ikili jet sonuçlarına göre daha iyi olduğu ve çarpan jetlerde en etkin parametrenin Reynolds sayısı olduğu vurgulanmıştır.

İpek (2012) çoklu yarık jetlerin akış yapısı ve ısı transfer durumlarını incelemiştir. Söz konusu çalışmada çoklu yarık jetlerin düz bir levhaya çarptırılması durumu deneysel ve sayısal olarak ele alınmıştır. Hem deneysel hem sayısal olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında düşük jet-plaka mesafelerinde ($Z_n/D_j < 2$) yüksek oranda akış çevrintilerinden dolayı κ - ϵ türbülans modelinin deneysel sonuçlardan uzak sonuçlar sergilediği, öte yandan $Z_n/D_j > 2$ için ise deneysel sonuçlar ile κ - ϵ sonuçlarının benzer özellikler gösterdiği belirtilmiştir.

Kaçar (2014) tarafından yapılan çalışmada gaz türbin kanatlarının çoklu çarpan jet ile soğutulması sağlanmıştır. 1500 K sıcaklık ve 800 kPa basınçlı havaya maruz kalan kanata 500 K sıcaklıkta ve 400 kPa basınçta hava jeti gönderilerek farklı parametreler için soğutma etkinliğine bakılmıştır. $Re = 10000$ ve $Z_n/D_j = 6$ için en iyi sonuçların elde edildiği belirtilmiştir.

Bölek (2017) çalışmasında farklı düzlemler üzerine çarpan jetlerin akış ve ısı transfer analizlerini farklı Reynolds sayısı için gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada orifis ve hedef plaka arası mesafenin jet çapının 6 katı için en iyi ısı transferini elde etmişlerdir. Ayrıca Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile doğru orantılı olduğunu belirtmişlerdir.

Çoklu çarpan jet çalışmalarında hedef plaka yapısı da ısı transfer büyüklüğünü etkileyen önemli parametreler arasındadır. Bu bakımdan Çalışır (2011) çalışmasında çoklu jet akışlarını farklı şekilli kanatçıklı yüzeye çarptırarak, yüzeyde ısı transfer durumunu incelemiştir. Sonuçlara göre ele alınan tüm Z_n/D_j değerlerinde ve Reynolds sayılarında kanatçıkların lülelerin tam ortasında olması durumu için hem yerel hem ortalama Nusselt sayısının artış gösterdiğini tespit etmiştir. Çalışkan (2012) doktora tez çalışmasında farklı jet ve hedef plaka özelliklerinde ısı transfer durumunu incelemiştir. Deneysel çalışmada V şekilli kanatçıklı yüzeyde düz yüzeye göre %26 'ya varan oranlarda ısı transferinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.

Çoklu çarpan jetlerde çarpan jetlerin birbirine göre mesafeleri ile orifis ve hedef plaka mesafelerinin etkisi de ısı transferini önemli derecede etkilemektedir. Gölcü vd. (2012) camın çift taraflı çoklu jetler ile soğutulması durumunu inceledikleri çalışmada jet ile cam arasındaki boyutsuz mesafeyi $Z_n/D_j = 1-10$, jetler arası boyutsuz mesafeyi ise $X_n/D_j = 2-10$ almışlardır. Sonuçlara göre Nusselt sayısı için en yüksek değer $X_n/D_j = 2$ 'de $Z_n/D_j = 4$ 'te, en düşük değer ise $X_n/D_j = 10$ ve $Z_n/D_j = 10$ 'da elde edilmiştir.

Yong et al. (2015) düzgün dağılımlı ve çapraz dağılımlı olarak düzenlenen çoklu jetleri çeşitli parametrik değişimlerle incelemişlerdir. Örneğin, jetler arası mesafeyi akış yönünde ve akışa dik yönde $X_n/D_j = Y_n/D_j = 2-4$ almışlardır. Benzer şekilde jet ile düz plaka arasındaki mesafeyi $Z_n/D_j = 2-4$ arasında; Reynolds sayısını 5000-25000 aralığında değiştirerek çarpma ile gerçekleşen ısı transferini incelemişlerdir. Çalışmada çapraz akış

etkisinin incelenebilmesi için sınırlandırılmış kanal kullanılmıştır (akışkan tek yönden çıkışa maruz bırakılmıştır ki bu durum maksimum çapraz akış durumudur). Ortalama Nusselt, yerel Nusselt ve sıra ortalamalı Nusselt sayısı bulunmuş, farklı parametrelerin bu değerlere etkisi araştırılmıştır.

Parida et al. (2011) yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmada çoklu jetlerin düz plakaya çarpması tasarım ve analizini yüksek ısı yoğunluklu uygulamalar için zamana bağlı olarak incelemişlerdir. Çarpan jet ile soğutma sisteminin tasarımının iyileştirilmesi için duvar etkileşimi olan bir çarpan jetin, fiziksel ve mekanik yapısı incelenmiştir. Farklı açılar için çarpan jetlerde ısı transfer davranışını incelemek amaçlı sıvı kristal test yatağı kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada 70° ve 90° için hem sayısal hem deneysel çalışmalar yapılmıştır. 64.55 maksimum ortalama Nusselt sayısı ile 70° açığa sahip jetlerin %150 ve %200 oranlarında daha iyi performans gözlemlemişlerdir. Çalışmada duvar etkileşimlerinden kaynaklanan jet girdaplarından dolayı ısı transferindeki etkiler ortaya konulmuştur. Kimi çalışmalarda düz plaka ve pürüzlü plaka arasında ısı transfer sonuçları kıyaslanmış ve her iki plaka sonuçlarının benzer olduğu görülmüştür.

Xing et al. (2010) yaptıkları deneysel çalışmada 9x9 adet çoklu jet içeren orifis plaka kullanarak, Reynolds sayısını 15000'den 35000'e kadar değiştirmiş, orifis plaka ve hedef plaka arası mesafeyi $Z_n/D_j = 3, 4, 5$ şeklinde almışlardır. Söz konusu deneysel çalışmayı üç farklı çapraz akış için gerçekleştirmişlerdir. Zamana bağlı değişim de göz önüne alınmış olup düz plaka ve pürüzlü plaka için sonuçlar kıyaslanmıştır. Minimum çapraz akış ve yoğun jet için her iki plakada da iyi bir ısı transferi elde edilmiştir. Düz plaka ve pürüzlü plaka için sonuçlar benzer çıkmıştır.

Çarpan çoklu jetlerin pürüzlü yüzeylere çarptırılması ile alakalı olarak, Azad et al. (2000) 4x12 düzgün dağılımlı jet düzenlemesi, 23x9 ve 11x5 şeklinde pürüzlü yüzey düzenlemesi ve $D_d/D_j = 1$ oranını kullanarak düz ve pürüzlü yüzey için sonuçların birbirine yakın çıktığını belirtmişlerdir.

Yapılan bazı çoklu çarpan jet çalışmalarına göre farklı D_d/D_j oranı için düz ve pürüzlü plaka sonuçlarının birbirinden farklı olduğu ortaya konulmuştur. Nitekim Kanokjaruvijit et al. (2010) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, çarpan jetin düz ve farklı D_d/D_j

büyüklüğüne sahip tümsek çıkıntılı bir yüzeye çarptırılmasını, farklı parametreler için (Reynolds sayısı, hedef plaka-orifis plaka mesafesi, küresel tümsek şeklin derinliği, jet çapının küresel tümsek şeklin projeksiyon çapına oranı vb.) araştırmışlardır. Düşük D_d/D_j oranları için ısı transferinde iyileşme gözlenmiştir. $D_d/D_j = 0.86$ 'da ısı transfer boyutsuz Nusselt sayısı $D_d/D_j = 2$ 'den daha yüksek; $D_d/D_j = 2$ değerinde elde edilen sonuçlar $D_d/D_j = 4$ 'ten daha yüksek çıkmıştır. Her değer için tümsek şekilli plakaya ait ısı transferi, düz plakadan daha yüksek çıkmıştır. Isı transferi $Re = 11500$ için tümsek plakada düz plakaya göre %51 daha yüksek iken, $Re = 8000$ ve $Re = 5000$ için ise sırasıyla %38 ve %22 daha yüksek çıkmıştır.

Robertson (2005) yaptığı deneysel ve sayısal çalışmada çoklu çarpan jetlerin düz plakaya çarptırılması durumunda plakada meydana gelen ısı transferini incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmada ısı transferinin incelenmesi için sıvı kristal tekniği kullanılmıştır. İlgili Reynolds sayısı ve durma noktası ısı transferi için oluşturulan korelasyonların daha önceki korelasyonlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Penumadu et al. (2017) çapraz akış etkisi ve Reynolds etkisine bakılmaksızın düzgün ve çapraz dağılımlı çarpan çoklu jetleri karşılaştırarak jet dağılımlarının etkisini incelemiştir. Genel olarak düzgün dağılımlı çarpan jetlerin çapraz dağılımlı jetlere göre daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir.

Ekkad and Kontrovitz (2002) çalışmasında pürüzlü yüzeylerin patlama durumuna sebep olmasından ötürü çarpan jet yapısında ısı transfer durumunu negatif olarak etkileyebileceği belirtilmiştir. Nitekim yaptıkları deneysel çalışmasında pürüzlü yüzeydeki şekillerin farklı dizilimlerini ele almışlardır. Düzgün dağılımlı (ing: *inline*) ve çapraz dağılımlı (ing: *staggered*) şekiller kullanmışlardır. Reynolds sayısı 4800 ve 14800 arasında değiştirilmiş ve pürüzlülük derinliği araştırılmıştır. Isı transfer ölçümü için sıvı kristal tekniği kullanılmıştır. Pürüzlü yüzey etkisinin net olarak görülmesi için elde edilen pürüzlü yüzey sonuçları düz yüzey sonuçları ile normalize edilmiştir. Şekillerin düzgün ya da çapraz dizilmeleri düz yüzeye göre ısı transferini azaltmıştır. Bu durum durma noktalarında oluşan patlama olayının çarpan jet yapısını bozmasına bağlanmıştır.

Çoklu çarpan jetlerin hedef plakada meydana getirdiği ısı transfer büyüklüğü, plaka yapısının dışında farklı çapraz akış modellerinden de etkilenir. Sınırlandırılmış çarpan jetlerde jet etkileşimleri daha çok üstten gelen duvar jetlerinin diğer jetlere çarpması ile meydana gelir. Bu çarpma ortalama akış momentumunun türbülansa dönüşümünü güçlendirir. Bu etkileşim dış jetten kaynaklanır, iç jetlerin çapraz akışı ile güçlenir ve girdapları oluşturur. Bu girdaplar dışarı doğru savrulmayı sınırlar. Girdapların olduğu bölge en yüksek türbülans kinetik enerjisi ile çakışır. Sonuç olarak dış jetten başlayan ve çapraz akış sonucu güçlenen akışkan etkileşimi sonucu at nalı şeklinde girdaplar oluşur ve bu girdaplar dış jetleri sınırlandırır. Geers et al. (2004) tarafından ifade edildiğine göre çoğu literatür araştırmalarında tek çıkışlı maksimum çapraz akışlı çarpan çoklu jet modellerinde elde edilen ısı transfer büyüklüğü ile her taraftan çıkış verilen minimum çapraz akış modellerinde elde edilen ısı transfer büyüklüğünün birbirinden çok farklı olduğu savunulmuştur. Çoğu literatür çalışmasında da minimum çapraz akış modellerinde daha yüksek ısı transferi elde edildiği belirtilmiştir (Xing et. al. (2010))

Kanokjarovijit et al. (2005) deneysel çalışmasında çoklu jeti pürüzlü yüzeye farklı çapraz akış koşullarında çaptırarak, çapraz akışın ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Reynolds sayısı 11500 alınmış, sıvı kristal tekniği kullanılmıştır. Orifis plaka ve hedef plaka arası mesafeler boyutsuz olarak $Z_n/D_j = 2, 4, 8$ şeklinde, jet çapının pürüzlülük çapına oranı $D_d/D_j = 1.694$ şeklinde alınmıştır. Küresel ve elips olmak üzere iki farklı pürüzlü şekiller kullanılmıştır. Tek taraflı çıkış, iki taraflı çıkış ve dört taraflı çıkış verilerek farklı çapraz akış koşulları sağlanmıştır. Aynı koşullarda düz plaka için de inceleme yapılmış ve sonuçlar normalize edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre en iyi ısı transferi pürüzlü plakada maksimum çapraz akışta $Z_n/D_j = 8$ 'de elde edilmiştir. Aynı çalışmada düşük basınç kayıpları, daha düşük bakım masrafları ve daha hafif olması bakımından pürüzlü yüzeylere çarpan jetlerin kanatlı yapılara alternatif olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Çünkü kanatlı yapıların yüksek basınç kayıpları, yüksek ağırlık, yüksek bakım giderleri gibi durumlardan dolayı dezavantajlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Chougule et al. (2011) çalışmasında 3x3 çoklu çarpan jetin düz bir duvara çarpma durumunun deneysel ve sayısal analizlerinde, SST türbülans modelinin diğer modellere göre ısı transfer ve akış analizi bakımından en iyi sonuçları verdiğini ortaya koymuşlardır. Çalışmada Reynolds sayısının etkisi, orifis plaka ile hedef plaka mesafesinin (Z_n/D_j) etkisi

de araştırılmıştır. Reynolds sayısı 7000 ile 11000 arası alınmış, $Z_n/D_j = 6-10$ arasında denenmiş, sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Reynolds artışı ile ortalama Nusselt sayısının arttığı ve Z_n/D_j sayısının 6'dan 10'a artırılması ile ortalama Nusselt sayısının azaldığı tespit edilmiştir. Çalışmada jetler arası boyutsuz mesafenin de etkisinin önem taşıdığı ve özellikle jet etkileşiminin azaltılması bakımından jetler arası mesafenin $X_n/D_j = 3-5$ aralığında olması önerilmiştir.

Geers et al. (2004) tarafından yapılan deneysel çalışmada tekli ve çoklu çarpan jet için ortalama ve dalgalı hız bileşenleri PIV hız ölçme tekniği ile sunulmuştur. Araştırmacılar, yakın duvar bölgelerini detaylandırmak için tekli jette *Lazer Doppler Anemometre* (LDA) ile hız ölçme tekniğini kullanmışlardır. Lüle plaka kalınlığı 2 mm alınmış, düz kenarlı 13 adet lüle kullanılmış bu lüleler altıgen olarak dizilmiştir. Jetler arası mesafe $X_n = 26$ mm (2D) alınmıştır. Orifis plaka ve hedef plaka arası mesafe $Z_n/D_j = 4$ şeklinde alınmıştır. Çarpma plakasının dört yanı da açık alınmıştır.

Chang et al. (2006) yaptıkları deneysel çalışmada farklı Reynolds sayıları $5000 < Re < 15000$, $0.5 < X_n/D_j < 11$ ve $E/H = 0, 0.25, 0.5$ şeklinde üç farklı jet merkezi ile tümsek-çukur şekil merkezleri arası mesafeyi temsil eden eksantriklik durumunu araştırmışlardır. Pürüzlü yüzey için bulunan sonuçlar ile düz duvar için bulunan sonuçlar normalize edilmiştir. Belirli Reynolds sayıları için normalizasyonun 1'in üstünde belirli Reynolds sayıları için ise normalizasyon sonuçlarının 1'in altında olduğu ortaya çıkmıştır. Bir takım ısı transfer korelasyonlarının elde edilmesi için regresyon analizleri yapmışlardır.

Chang et al. (2007) 4x3 şeklinde düzenlenen düzgün dağılımlı çoklu çarpan jetlerin çukur şekilli yüzeye çarptırılmasını deneysel olarak ele almışlardır. Jetler arası mesafe $0.5 < Z_n/D_j < 10$ şeklinde almışlardır. Aynı zamanda jet merkezleri ve pürüzlü şekil merkezlerinin eksantriklik oranı 0, 0.25, 0.5 şeklinde değiştirilerek eksantriklik oranlarının ısı transferine olan etkileri incelenmiştir. Söz konusu çalışmada farklı Reynolds sayıları, Z_n/D_j ve farklı eksantriklik oranlarında plaka yüzeyinde elde edilecek ortalama ve yerel Nusselt sayısının önemli derece etkilendiği savunulmuştur. Farklı eksantriklik durumlarında çarpma bölgesinde ısı transferinde iyileşme olabileceği ileri sürülmüştür.

Çoklu çarpan jetlerde araştırılan diğer bir konu ise olumsuz çapraz akış etkisini azaltan efüzyon tahliye deliklerinin kullanılmasıdır. Bu durumda çarpan jet çalışması efüzyonlu çoklu çarpan jet olarak adlandırılmaktadır. Efüzyonlu çoklu çarpan jetler üzerine Aldabbagh and Sezai (2004) yaptıkları sayısal çalışmada 3x3 adet çoklu jet lülesi için 3 boyutlu sayısal analiz yaparak laminar akışta ısı transfer incelemesi yapmışlardır. Laminer akışta jetler arası mesafenin ve lüle-hedef plaka mesafesinin farklı Reynolds sayısı için ısı transferine etkisi incelenmiştir. Lüle - hedef plaka mesafesi $0.25D - 2D$ aralığında alınmıştır. Jet mesafeleri ise $4D_j$ 'den düşük alınmıştır Çoklu jetler ısıtılmış düz bir plakaya çarptırılmıştır. Söz konusu düz plaka üzerinde efüzyon delikleri açılarak, çarpma sonrası çapraz akışı önlemek amaçlı geri kalan akışkan tahliye edilmiştir. Jet ve efüzyon delik çapları aynı boyutta alınan çalışmada sürekli, üç boyutlu, Navier - Stokes ve enerji denklemi sıkıştırılamaz şartı için çözödürölmüştür. Jet hızı ve jet uzunluğu, sırasıyla jet çıkış hızı ve jet genişliği ile boyutsuzlaştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen önemli sonuçlardan biri jetler arası mesafe $4D$ 'den küçük ve nozul-hedef plaka mesafesi $2D$ olması durumunda çarpma sonrası akışın uzaklaştırılması (efüzyon deliklerinin kullanılması) ısı transferini artırmıştır.

Rhee et al. (2003) yaptıkları araştırmada çoklu çarpan jette akışkanın hedef plakaya çarpması sonrasında efüzyon deliklerinden tahliye edilmesi ya da edilmemesi durumlarında hedef plakada ısı ve kütle transfer durumunu incelemişlerdir. Ayrıca her iki plakanın birbirine olan mesafesinin bu duruma etkisi araştırılmıştır. Konvansiyonel efüzyon deliksiz çoklu çarpan jet durumunda çapraz akışın sonuçları önemli şekilde etkilediği daha önceki çalışmalardan anlaşılmıştır. Efüzyon plakasında (orifis plaka) açılmış efüzyon delikleri sayesinde hedef plakaya çarpan akışkan bu deliklerden tahliye edilerek, aşağı yönde akışın rahatsız olması engellenmiş ve çapraz akış etkisi azaltılmıştır. Sayısal çalışma aracılığı ile efüzyon durum ve efüzyon olmayan durum için çözüm yapılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır. İnceleme sonuçlarına göre efüzyon delikleri olmadan yoğun jet aralıkları için üniform olmayan ısı transfer katsayısı elde edilmiştir. Ancak efüzyon delikli plaka kullanılması durumunda daha üniform bir ısı transfer durumu elde edilmiştir. Gözlemlenen bir diğer durum ise az yoğunluklu jet durumlarında yani jetler arası mesafenin yüksek olması durumunda çapraz akış etkisinin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca jetler arası mesafenin yüksek olması durumunda efüzyon delikli plaka da elde edilen sonuçlar ile efüzyon delikli olmayan plakada elde edilen sonuçların

benzer olduğu anlaşılmıştır. Efüzyon deliksiz plakada $Z_n/D_j < 2$ parametresi için çapraz akışın ısı ve kütle transferini önemli derece etkilediği ortaya konulmuştur.

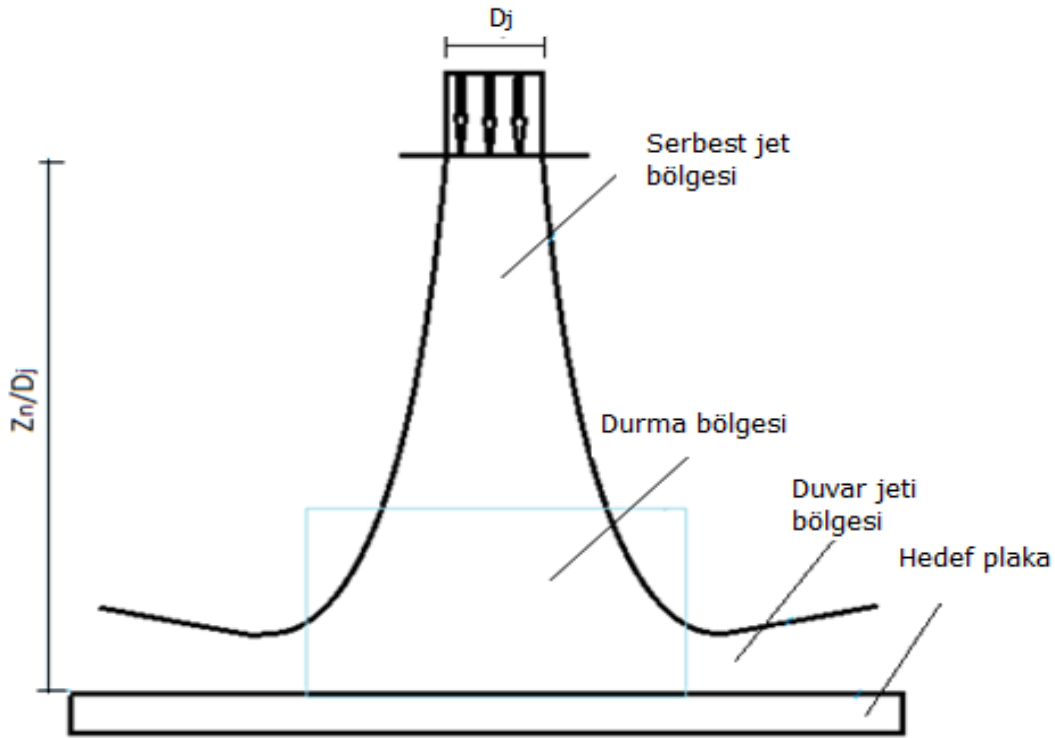
Onstad et al. (2009) çalışmasında çoklu çarpan jette çapraz akışın etkisini azaltma amaçlı tahliye delikleri (efüzyon) kullanılmıştır. Jetler arası mesafe boyutsuz olarak 2.34, plakalar arası mesafe boyutsuz olarak 1.18 alınmıştır. Küçük jet çaplarındaki jet dizilerinden yüksek ısı transferi elde edilmiştir.

Yapılan önemli araştırmalara rağmen ısı transferi bakımından çoklu çarpan jetler hala karmaşık yapısını korumaktadır (Bernard et al. 2009). Çarpma bölgesinde teorik analizin zor olması, bu hususta yeterli bilgiye ulaşılmasını zorlaştırmaktadır (Bilen 1994)Bu bakımdan çoklu çarpan jet konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasının özellikle parametre zenginliği açısından literatürdeki bu eksikliği doldurmak adına faydası olacağına inanılmaktadır.

2.1. Çarpan Jetlerin Fiziksel Yapısı

Çarpan jet sınıflandırması en genel olarak serbest yüzeye çarpma, daldırma tip çarpma, örtü altı çarpma, korunumlu ya da kapalı tip çarpma ve duvar tipi çarpma şeklinde yapılabilir (Wolf et al. 1993). Bunun yanı sıra kullanılan akışkana göre gaz jetler ve sıvı jetler; ya da jet sayılarına göre tekli jet, çoklu jet, ikiz jet şeklinde de sınıflandırmak mümkündür.

Şekil 2.1’de gösterildiği gibi çarpan tekli jet yapısı temel olarak serbest jet bölgesi, duvar jeti bölgesi ve durma bölgesi şeklinde üç temel bölgeye ayrılabilir (Viskanta et al. 1993). Serbest jet bölgesi de kendi içinde potansiyel çekirdek bölgesi, karışım bölgesi ve tam gelişmiş akış bölgesi olmak üzere üç farklı bölgeye ayrılır (Bölek 2017).



Şekil 2.1. Tekli jet fiziksel yapısı

Jet çıkışında jet çapı D_j , jet çıkışı - çarpma plakası arasındaki mesafe (Z_n) olmak üzere, jet çıkışı - çarpma plakası arası boyutsuz mesafe (Z_n/D_j) şeklinde ifade edilebilir. Farklı kesitli çarpan serbest jetlerin etrafındaki türbülans durumunu inceleyen Atsatan (2012) çalışmasında, potansiyel çekirdek bölgesinin jet hızına ve sınır tabaka kalınlığına bağlı olarak jet çapının 4 ya da 8 katı olan bölge olduğuna işaret eder. Türbülanslı tekli jetin üzerine yaptığı literatür araştırması çalışmasında Gautner et al. (1970) potansiyel çekirdek bölgesinin $6D_j$ kadar olduğunu belirtir. Aynı zamanda bu bölgede viskozitenin ihmal edilecek kadar düşük olduğunu dolayısıyla burada akışkanın viskozitesiz kabul edilebileceğini belirtir.

Geçiş bölgesi, potansiyel çekirdek ya da karışım bölgesinin bittiği yerde başlayan bölgedir bu bölgede eksenel yönde hız düşmeye başlar, türbülans durumu ise yükselir. Çarpan jet çıkışında hız maksimum iken, akışkan hedef yüzeye doğru ilerledikçe çevre ile olan momentum etkileşiminden dolayı hız düşer. Serbest jet bölgesinde potansiyel çekirdek boyunca jet merkezinde hız değeri giriş hızına eşit olur. Çarpma gerçekleştiği esnada (çarpma bölgesinde) eksen hızı aniden sıfırlanır, hedef yüzeyde basınç değeri maksimum olur. Çarpma sonrası akışkanda bozulma meydana gelir, hedef yüzey etrafına dağılan

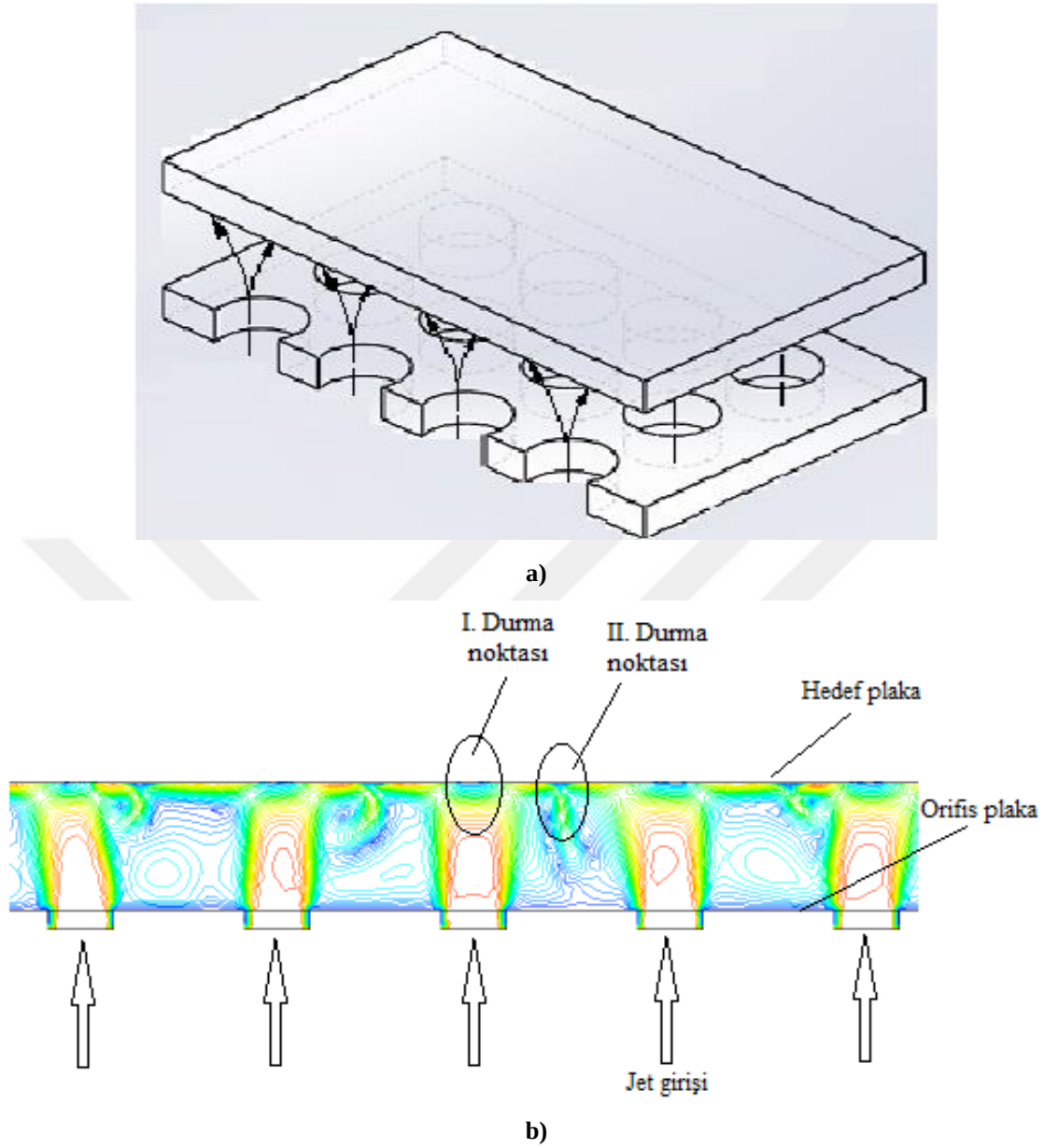
akışkan duvar jetini oluşturur. Zukerman and Lior (2005) çalışmalarında çarpan jetler için $Re < 1000$ olması durumunu laminar akış; $Re > 3000$ olması durumunu türbülanslı akış; bu iki değer arasında kalan değerleri ise geçiş bölgesi olarak değerlendirmişlerdir.

2.2. Çoklu Çarpan Jetler

Birden fazla jetin çarpması durumuna çoklu çarpan jet denir. Çoklu çarpan jetin fiziksel yapısı tekli çarpan jete göre farklılık gösterir. Özellikle birden fazla jetin birbiri ile etkileşiminin oluşturduğu potansiyel çekirdek bölgesi ve çarpma öncesi ya da sonrası jet etkileşimleri duvar jet bölgesinde sınır tabakasının kaybolmasını sağladığı için tekli jete kıyasla daha verimli sonuçlar doğurur (Chang et al. 2007). Behbahani et al. (1983) duvar jet etkileşiminin, Florschuetz et al. (1980) çapraz akış türünün, Huber et al. (1994) akışkanın çıkış koşullarının ısı transfer durumunu önemli derece etkilediklerini belirtmiştir. Jet etkileşimleri sonucu iki jet arasında akışkan birbirine çarparak ikincil durma noktalarının oluşmasına neden olur (Şekil 2.2b). Oluşan ikincil durma noktalarının ısı transfer sonuçlarını önemli derecede etkiledikleri anlaşılmıştır.

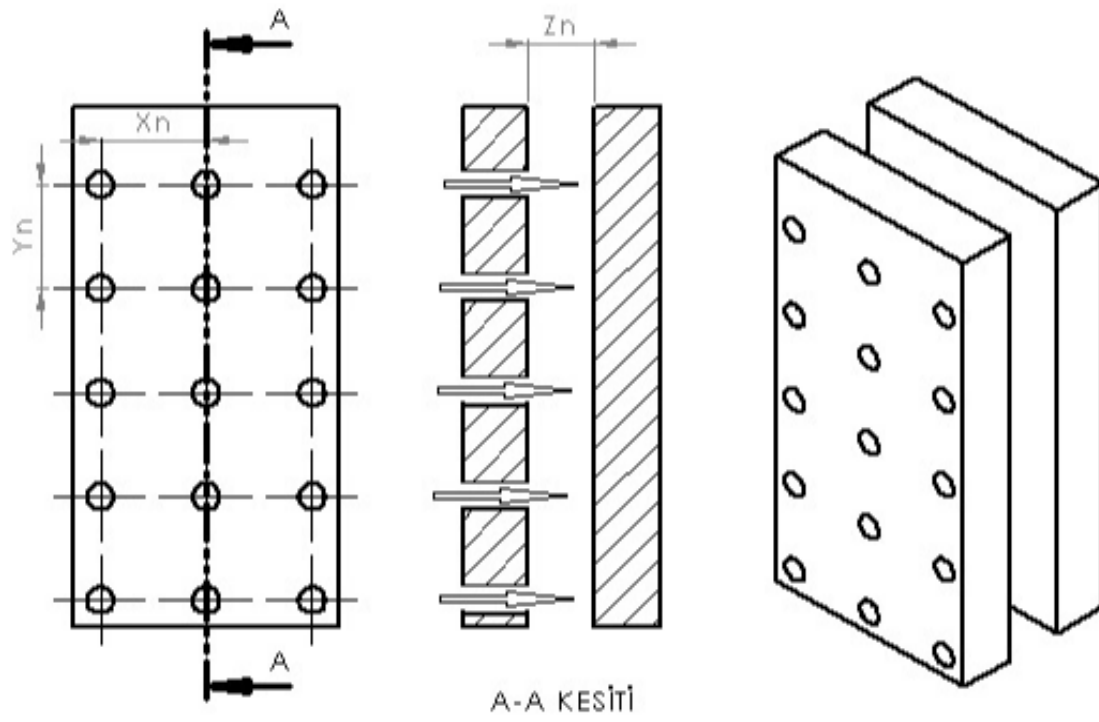
Şekil 2.2’de çoklu jet fiziksel yapısı görülmektedir. Şekil 2.2a’da çoklu jetlerin hedef plakaya çarpması, Şekil 2.2b’de belirli parametreler için çarpan jetlerin hedef plakaya çarpması sonucu akım çizgileri görülmektedir. Tekli çarpan jette tek durma noktası oluşurken, çoklu çarpan jetlerde komşu iki jet arasında akışkan etkileşimi ve akış girdaplarından dolayı oluşan ikincil durma noktaları görülmektedir. Oluşan bu ikincil durma noktaları ele alınan farklı parametreler için farklı fiziksel yapıya sahip olacaklardır. Bu bakımdan çoklu çarpan jet akışları farklı parametreler için farklı akış karakteristiğini gösterir, bu durum ise doğal olarak farklı ısı transfer büyüklüğünün oluşmasına neden olur.

Jetlerin yer aldığı plaka “orifis plaka”, jetlerin çarptırıldığı plaka “hedef plaka” olarak isimlendirilir. Şekil 2.3’te çoklu çarpan dairesel jetlerin düz hedef plakaya çarptırılması geometrik olarak gösterilmiştir. İlgili şekilde jet çapı D_j , orifis plaka- hedef plaka arası mesafe Z_n , jetler arası yatay mesafe X_n ve jetler arası düşey mesafe Y_n parametreleri ile gösterilmiştir.

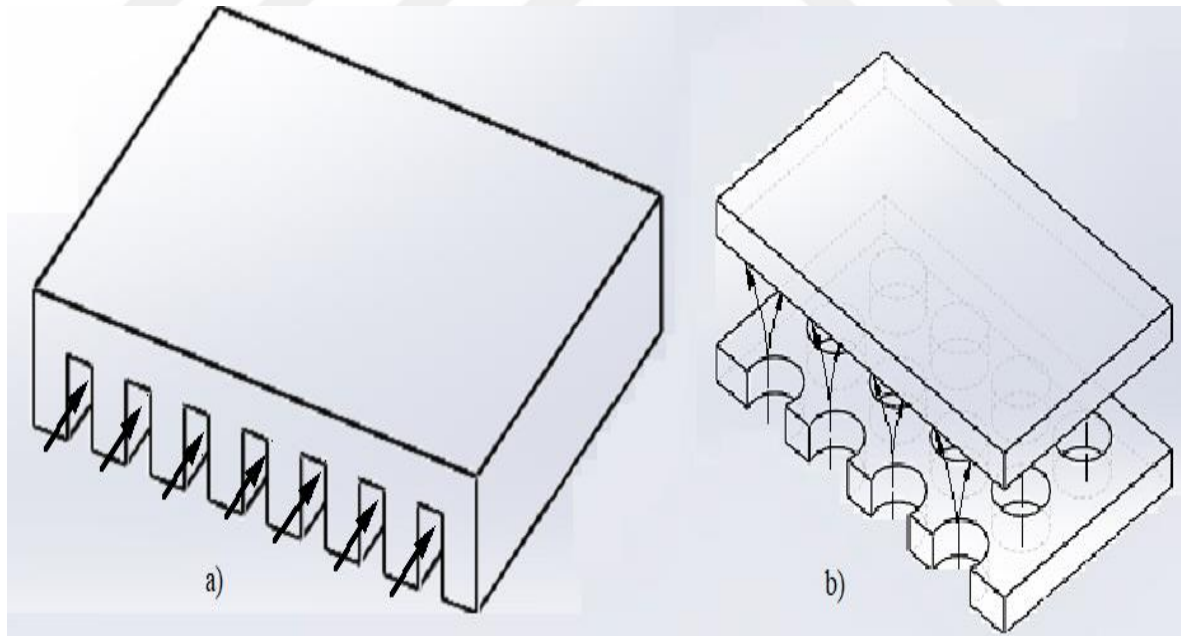


Şekil 2.2. Çoklu jet fiziksel yapısı

Çarpan jetlerde taşınım ile ısı transferi olmasına rağmen, çarpan jet yapısı, taşınım ile yapılan ısı transfer uygulamalarından biraz farklıdır. Şekil 2.4'te çoklu çarpan jet ve taşınım ile ısı transferi farkı gösterilmiştir. Şekil 2.4a taşınım ile soğutmayı, Şekil 2.4b ise çarpan jet ile soğutmayı göstermektedir. Şekil 2.4b'de çarpan bölgeye akışkan nüfuziyeti daha etkin olduğu için klasik taşınım ile soğutmaya göre daha etkin bir soğutma gerçekleşir.

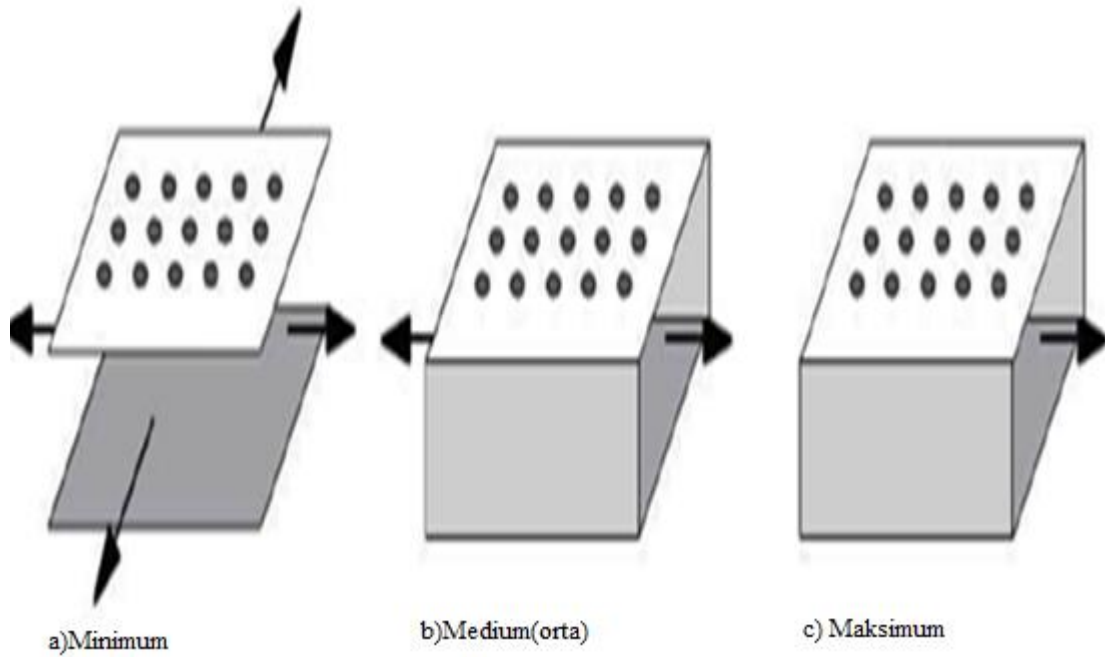


Şekil 2.3. Çoklu çarpan jetin geometrik parametreleri



Şekil 2.4. Taşınım ve çarpan çoklu jet ile soğutma

Çoklu çarpan jetlerde karşımıza çıkan önemli kavramlardan birisi çapraz akıştır. Çapraz akış bir doğrultuda giden akışa dik ya da eğik gelerek, doğrusal olan akışı rahatsız eden akışın olmasıdır. Örneğin Şekil 2.5'te çoklu çarpan jetler için çapraz akışın farklı formları gösterilmiştir. Bu farklı akış formları kuşkusuz çarpan yüzeyde ısı transfer durumunu önemli derece etkilemektedir. Bu şekilde çapraz akışın da olduğu çoklu çarpan jet uygulamalarında kullanılan hedef plakanın yüzey alanı da ısı transfer durumunun değişiminde önemli role sahip olacaktır. Şekil 2.5'te de görüldüğü gibi çarpan jetlerde çapraz akış oluşturulan modelde, akışkanın çıkış yönlerinin sayısına bağlı olarak tek çıkışlı akış modelinde maksimum çapraz akış, iki çıkışlı akış modelinde orta çapraz akış, dört çıkışlı akış modelinde ise minimum çapraz akış olarak isimlendirilir. Çoklu çarpan jetlerde çapraz akış türünün ısı transferi üzerinde önemli derece etkili olduğu geniş literatür çalışmaları ile sabittir (Metzger et al. 1979 ; Saad et al. 1980; Kim and Benson 1993; Slayzak et al. (1994) and Barata 1996).



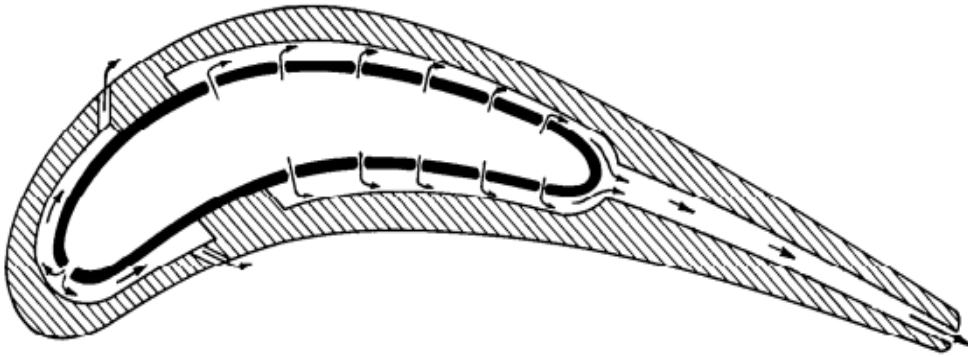
Şekil 2.5. Çapraz akış formları

Literatür çalışmalarına göre en iyi ısı transfer sonuçlarının minimum çapraz akış modelinde (Xing et al. 2010), en düşük ısı transfer sonuçlarının ise maksimum çapraz akış modelinde elde edildiğinden bahsedilmektedir (Al-Sanea 1992). Çoklu jet maksimum çapraz akışta üst jetlerin çarpmadan sonra çıkış yönünde yol alması sonucu alttaki jetler ile

etkileşiminden dolayı üniform akış yapısını bozar ve etkileşime geçtiği jetlere ait ısı transfer büyüklüğünü azaltır. Al-Sanea (1992) çapraz akışlı laminar tekli jet çalışmasında çapraz akış etkisinin varlığının ısı transferini %60 oranında düşürebileceğini belirtmiştir. Bunun yanı sıra çapraz akışın ısı transferini olumsuz etkilediği çoğu çalışmalarda belirtilmiştir (Aldabbagh and Sezai 2002; Ekkad and Kontrovitz 2002; Kanokjaruvijit and Botas 2005). Bu çalışmada çapraz akışın net etkisinin görülebilmesi için iki farklı çapraz akış modeli olan maksimum (tek çıkışlı akış) ve minimum çapraz akış (dört çıkışlı akış) kullanılmıştır.

2.3. Çoklu Jetlerin Uygulama Alanları

Diğer yöntemlere göre daha düşük maliyetle daha yüksek ısı transferi sağlayan çoklu çarpan jetlerin önemli mühendislik uygulamalarından birisi gaz türbin kanatlarının soğutulmasıdır. Şekil 2.6 şematik olarak bir türbin kanadının soğutulmasını göstermektedir.

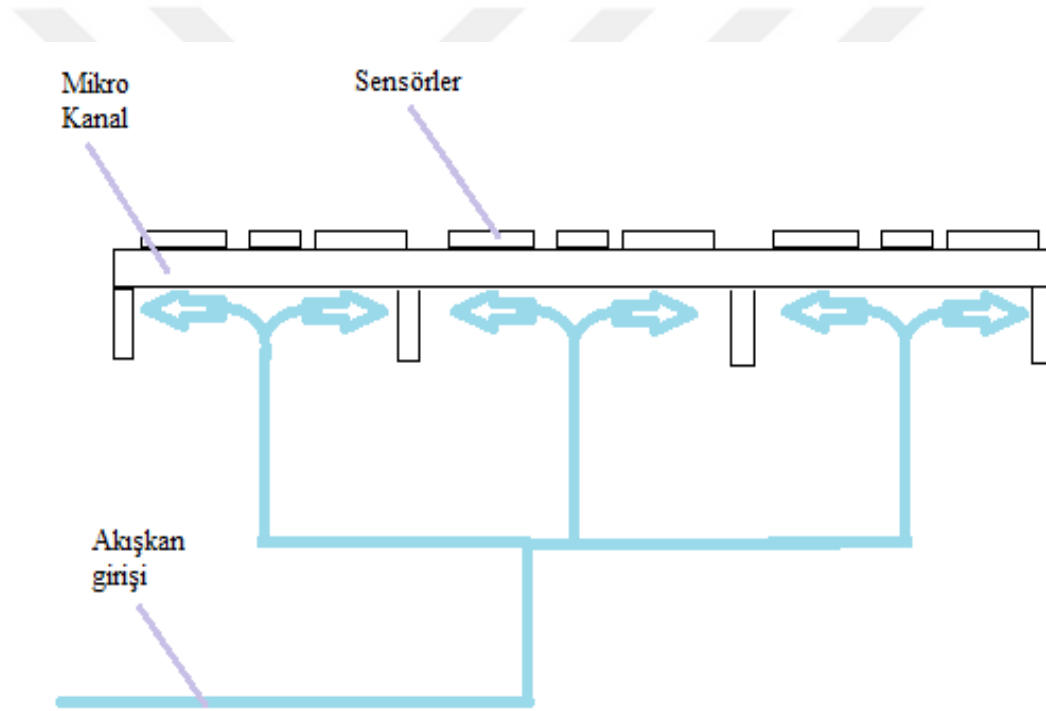


Şekil 2.6. Gaz türbin kanadının soğutulması (Florschuetz et al. 1981)

Günümüz gaz türbinleri, özellikle de daha yüksek kapasite elde edilmesi için geliştirilmeye çalışılan türbin kanatları yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Bu durumda doğal olarak daha etkili soğutma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Gaz türbinlerinde yakıtın yanması sonucu elde edilen sıcak gazlar, türbin çarkını terk ederken yaklaşık olarak türbin kanatlarının erime sıcaklığına ulaşır. Bilindiği gibi gaz türbinlerinde gücü ve verimi artırmak için türbine giren gaz sıcaklığının artırılması gerekmektedir. Bu durum ise kullanılan malzemenin dayanımını olumsuz etkiler. Gelişmiş gaz türbinlerinde gazın

türbine giriş sıcaklığı 1500 °C'ye kadar çıkmaktadır. Bu sıcaklığın kanat malzemelerinin erime sıcaklığını aşmaması, dolayısıyla deformasyonun olmaması için ilgili bölgede etkili soğutma yapılması gereklidir.

Bir diğer çarpan jet uygulaması ise elektronik cihazların soğutulmasıdır. Çarpan jet ile elektronik bir cihazın soğutma işlemi Şekil 2.7.'de gösterilmektedir. İlerleyen teknolojiye paralel olarak elektronik cihazların kapasitelerinin artması, kapasite artırımına karşın cihazların boyutlarının küçülmesi, söz konusu cihaz çipleri, işlemcilerinin aşırı ısınmasına dolayısıyla zamanla yetersiz soğumadan dolayı cihazların istenen performansta çalışamamasına sebep olmaktadır.



Şekil 2.7. Çoklu çarpan jet ile elektronik bir cihazın soğutulması

Artan kapasite ve cihaz boyutlarının küçülmesi ile birlikte yüksek ısınma oluşmakta ve ilgili ısının ortamdan uzaklaştırılması zorlaşmaktadır. Bu ısının ortamdan tahliye edilmemesi durumunda cihazın çalışması aksamakta ve çalışma yavaşlamaktadır. Bu sebeple yüksek kapasiteli elektronik cihazlarda aşırı ısınmanın zararlarını önleme amaçlı olarak uygun soğutma metodunun kullanılması gerekecektir. Bu amaçla kullanılan klasik soğutma yöntemlerinin yanı sıra son dönemlerde daha iyi ısı transferi sağlayan çarpan jetler

ile soğutma sistemleri kullanılmaktadır. Özellikle çoklu çarpan jet ile soğutma sistemlerinde kullanılan sıvı ya da gaz akışkan ile yüzeyde ince bir sınır tabaka oluşturulacağı için yüksek ısı transferi sağlanacaktır.

2.4. Çarpan Jetlerde Genel Korunum Denklemleri

2.4.1. Laminer Akış için Korunum Denklemleri

Taşıyım ile ısı transfer incelemelerinde önemli olan üç adet korunum denklemleri olarak bilinen kütle, momentum ve enerji korunum denklemleridir. Newton tipi, sıkıştırılamaz, sabit yoğunluklu, sabit viskoziteli ve sabit ısı iletim katsayılı akış için korunum denklemleri aşağıdaki gibidir (Çengel ve Cimbala 2007).

Kütlenin korunumu (süreklilik):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

x- momentum:

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2.2)$$

y- momentum:

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (2.3)$$

z- momentum:

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (2.4)$$

Enerji denklemi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (uT)}{\partial x} + \frac{\partial (vT)}{\partial y} + \frac{\partial (wT)}{\partial z} = \frac{k}{\rho C_p} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (2.5)$$

2.4.2. Türbülanslı Akış için Korunum Denklemleri

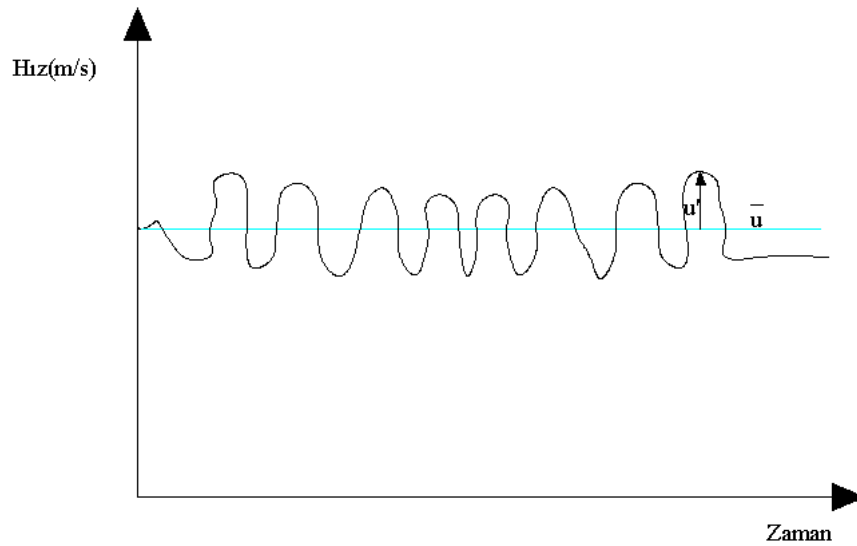
Türbülanslı akış olması durumunda hız ve basınç değerleri zamana bağlı olarak değişir. Bu durumda kullanılan Navier-Stokes momentum denklemlerinde bu yeni hız değerlerinin esas alınması gerekir. Zamana bağlı değişimler aritmetik ortalama esas alınarak hesaplanabilir.

Örneğin Şekil 1.8'deki gibi x yönünde hızın zamanla değişim grafiğine bakıldığında, anlık değişim (çalkantı hızı) u' ve zaman ortalamalı hız $\bar{u}$ şeklinde gösterilirse, bu durumda x yönünde hız ifadesi Denklem (2.6) ile gösterilir (White 2016).

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.6)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (2.7)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (2.8)$$



Şekil 1.8. Hızın zamanla değişimi

Zaman ortalamalı hız ifadeleri Denklem (2.9)'daki gibi yazılabilir.

$$\bar{u} = \frac{1}{t} \int_0^t u dt, \quad \bar{v} = \frac{1}{t} \int_0^t v dt, \quad \bar{w} = \frac{1}{t} \int_0^t w dt \quad (2.9)$$

Bu son ifadeler kullanılarak hareket denklemleri olan süreklilik ve Navier - Stokes denklemleri yeniden düzenlenir ve gerekli kısaltmalar yapılırsa. Denklem (2.1) ile gösterilen süreklilik denklemi şu hale gelir:

$$\rho \left[\frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v} + v')}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{w} + w')}{\partial x} \right] = 0 \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial t} + (\bar{u} + u') \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial x} + (\bar{v} + v') \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial y} + (\bar{w} + w') \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial z} \right] &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \\ \mu \left[\frac{\partial^2(\bar{u} + u')}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\bar{u} + u')}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\bar{u} + u')}{\partial z^2} \right] & \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial(\bar{v} + v')}{\partial t} + (\bar{u} + u') \frac{\partial(\bar{v} + v')}{\partial x} + (\bar{v} + v') \frac{\partial(\bar{v} + v')}{\partial y} + (\bar{w} + w') \frac{\partial(\bar{v} + v')}{\partial z} \right] &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \\ \mu \left[\frac{\partial^2(\bar{v} + v')}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\bar{v} + v')}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\bar{v} + v')}{\partial z^2} \right] & \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial(\bar{w} + w')}{\partial t} + (\bar{u} + u') \frac{\partial(\bar{w} + w')}{\partial x} + (\bar{v} + v') \frac{\partial(\bar{w} + w')}{\partial y} + (\bar{w} + w') \frac{\partial(\bar{w} + w')}{\partial z} \right] &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \\ \mu \left[\frac{\partial^2(\bar{w} + w')}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\bar{w} + w')}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\bar{w} + w')}{\partial z^2} \right] & \end{aligned} \quad (2.13)$$

(2.11), (2.12) ve (2.13) denklemlerinin yeniden düzenlenmesi ile

x-momentum:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \rho \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \rho \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} + \left[\frac{\partial \sigma_{xx'}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy'}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz'}}{\partial z} \right] \quad (2.14)$$

y-momentum:

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \rho \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \rho \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \rho \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} + \left[\frac{\partial \sigma_{yx'}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy'}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz'}}{\partial z} \right] \quad (2.15)$$

z-momentum:

$$\rho \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \rho \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \rho \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \rho \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} + \left[\frac{\partial \sigma_{zx'}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy'}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz'}}{\partial z} \right] \quad (2.16)$$

Bu denklemlerde Reynolds gerilme değerleri x , y ve z yönü için (2.17), (2.18), (2.19) denklemlerinde olduğu gibidir.

$$\sigma_x = \left[\frac{\partial \sigma_{xx'}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy'}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz'}}{\partial z} \right] \quad (2.17)$$

$$\sigma_y = \left[\frac{\partial \sigma_{yx'}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy'}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz'}}{\partial z} \right] \quad (2.18)$$

$$\sigma_z = \left[\frac{\partial \sigma_{zx'}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy'}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz'}}{\partial z} \right] \quad (2.19)$$

Enerji Denklemi:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u} C_p \bar{T})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v} C_p \bar{T})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \bar{w} C_p \bar{T})}{\partial z} = \frac{\partial(k+k_t)}{\partial x} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \frac{\partial(k+k_t)}{\partial y} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} + \frac{\partial(k+k_t)}{\partial z} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \quad (2.20)$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneysel Çalışma

3.1.1. Deney Düzeneği

Üzerinde çalıştığımız konu, ağırlıklı olarak sayısal incelenmiş; ancak elde edilen sonuçların doğrulanması için, Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında bulunan ekipman ve cihazlar ile Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından satın alınan ölçüm cihazları kullanılarak deney seti oluşturulmuş, deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu konuda hazırlanan çoklu çarpan jet deney düzeneğinin bazı ekipmanları Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de görülmektedir. Düzenekte 3-11 bar aralığında çalışan hava kompresörü kullanılmıştır. 500 lt kapasiteli tanka sahip olan kompresör, 7 bar’da otomatik devreye girmektedir. Kompresörün kendinden soğutmalı özelliği sayesinde sıkıştırılan havanın artan sıcaklığı düşürülerek sürekli debi ve sabit akış sıcaklığı (30 °C) sağlanmıştır. Doğrulama deneyi için 20 m³/h debide sürekli hava akışı kullanılmıştır.

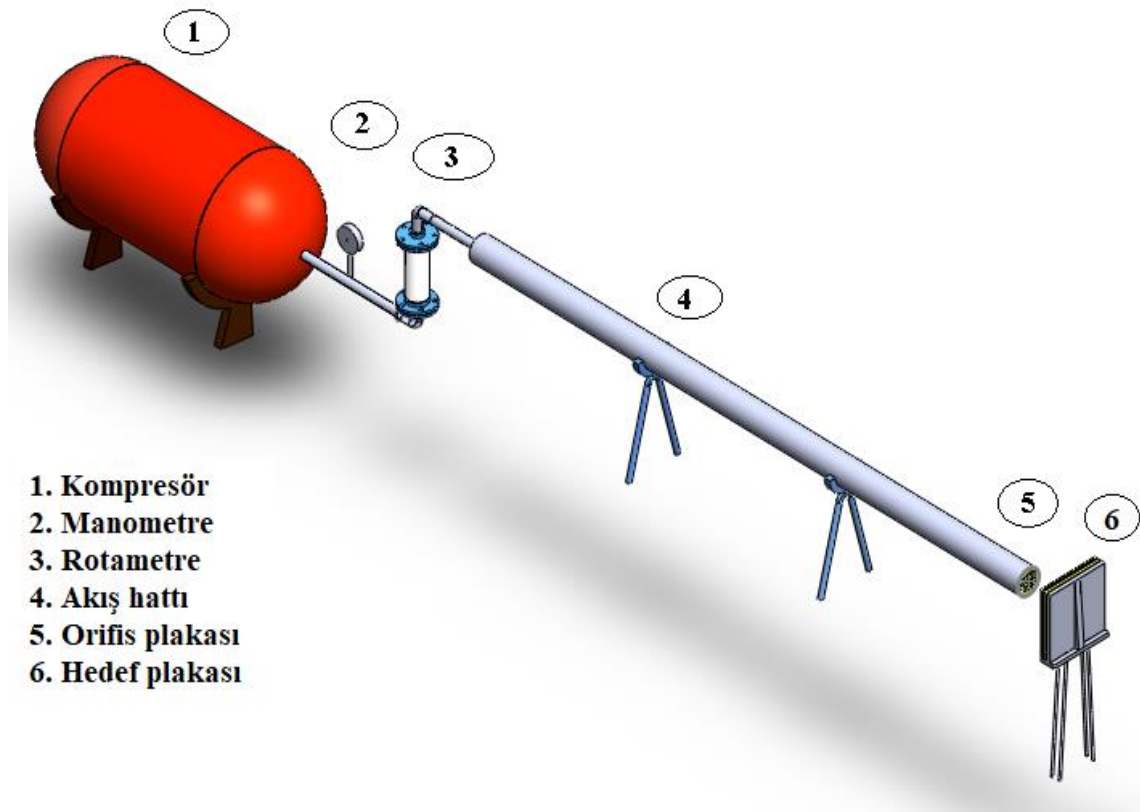
Orifis plakası 0.5 mm kalınlıklı, 5x5 adet düzgün dağılımlı 14 mm çaplı jet bulunduran galvaniz sacdan imal edilmiştir. Hedef plakası 30 cm x 30 cm boyutlarında, 1 mm kalınlıkta düzgün yüzeyli bakır sacdır. Sabit ısı akısının üretimi için 30 cm x 30 cm boyutunda folyo tipi rezistanslı elektrikli ve yapışkan özellikli ısıtıcı plakanın arkasına yapıştırılmıştır. Hedef plaka ve orifis plaka arası boyutsuz mesafe $Z_n/D_j = 5.14$ olarak ele alınmıştır. Akış hattının tam gelişmiş akış özelliğini sağlaması için 142 cm çaplı boru boyu 5 m uzunlukta tutulmuştur.



Şekil 3.1. Deney düzeneği

Deney düzeneğinde test bölgesi detayı Şekil 3.3'te görüldüğü gibidir. Test bölgesi bir adet orifis plaka, hedef plaka, ısıtıcı ve yalıtım malzemesinden oluşmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi orifis plakadan ortalama bir hız ve T_j akışkan sıcaklığında çıkan hava, T_w ortalama yüzey sıcaklığına sahip düz hedef plakaya çarpmaktadır. Akış bölgesi dört tarafından (sınırlanmamış) serbest sınır şartına sahiptir. Dolayısıyla akışkan plakaya çarptıktan sonra dört yönde serbest bir şekilde çevre havaya karışmaktadır. Hedef plaka olarak kullanılan düz bakır plaka, arkasına yapıştırılmış ısıtıcı tarafından sabit ısı akısında

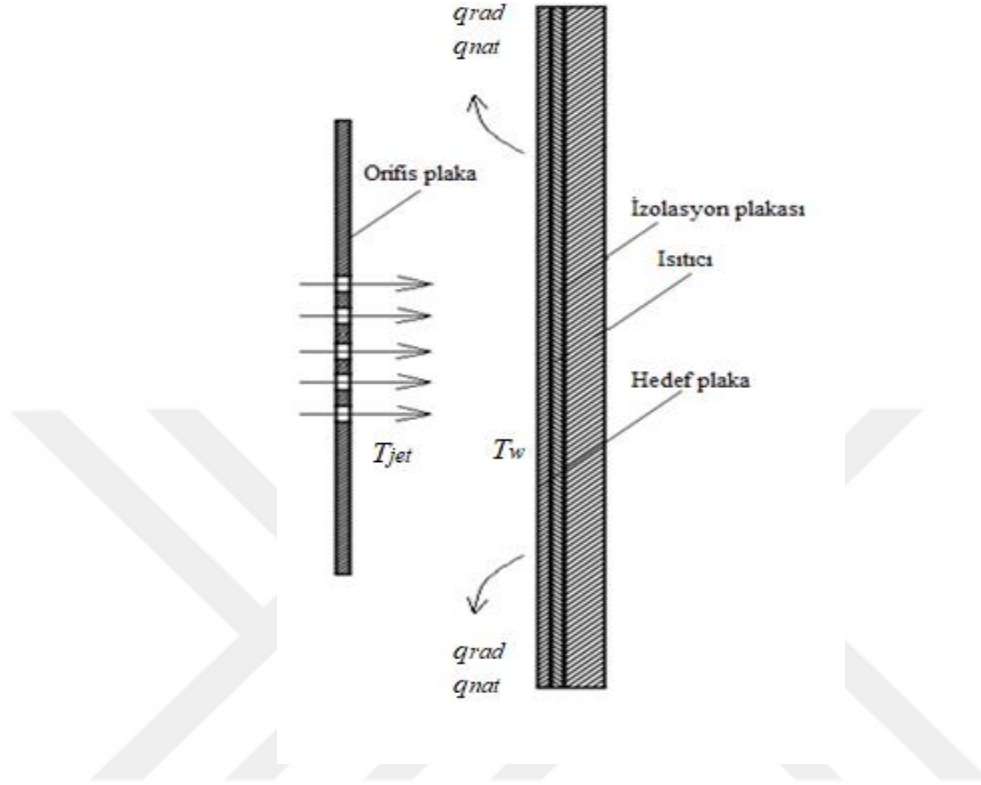
ısıtılmaktadır. Sabit ısı akısı ile ısıtılan plakada belirli bir süre sonunda üniform bir yüzey sıcaklığına ulaşıldıktan sonra kompresör devreye girmekte ve ısınmış olan hedef plakayı soğutmaktadır. Hedef plaka ön yüzeyinde doğal taşınım ve ışıınım ile olan ısı transferi sırasıyla q_{rad} , q_{nat} şeklinde gösterilmiştir. Soğutma işlemi sonunda plaka üzerinde belirlenen bir hat boyunca sıcaklık ölçümleri yapılmış ve diğer parametrelerde göz önüne alınarak plakada meydana gelen taşınımla ısı transferi hesaplanmıştır.



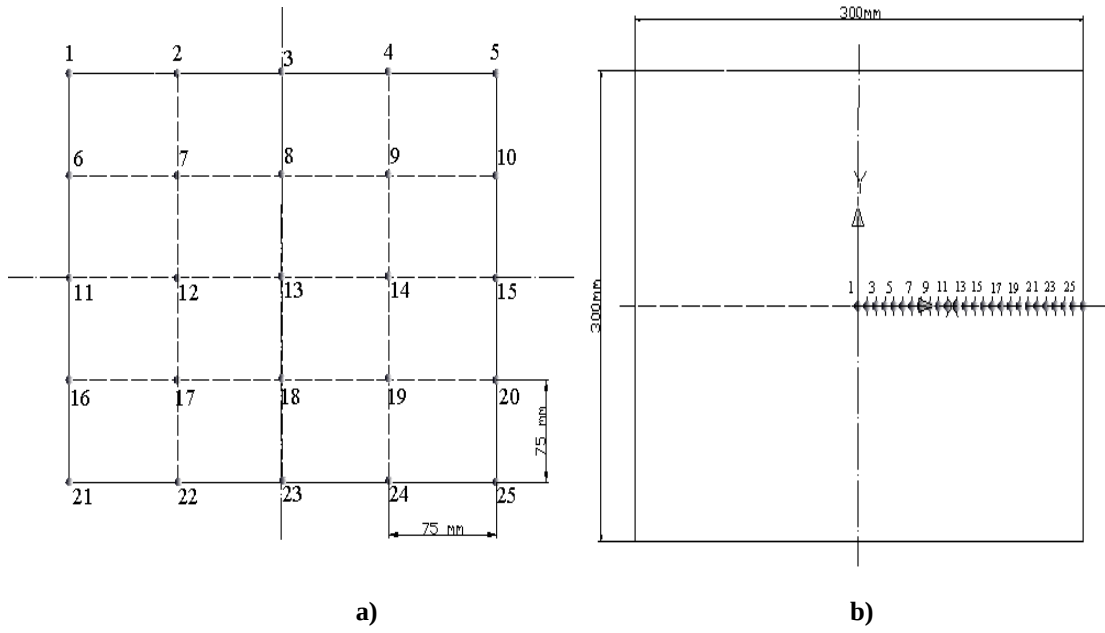
Şekil 3.2. Deney düzeneği tasarımı

En başta ısıtıcı bir varyağa bağlanarak sabit ısı akısı ile ısıtılmıştır. Plaka yüzeyinde üniform ve sabit yüzey sıcaklığı sağlanıncaya kadar yaklaşık (45 dk) beklenilmiştir. Daha sonra plaka yüzeyindeki Şekil 3.4a'da gösterilen sıcaklık ölçüm noktalarından belirli aralıklar ile sıcaklık ölçülmüş ve bu değerlerin ortalaması alınarak çarpma öncesi plakanın ortalama yüzey sıcaklığı bulunmuştur. Isıtılan plaka yüzeyinde üniform bir sıcaklık dağılımı elde edildikten sonra kompresör çalıştırılarak soğutma işlemi başlatılmıştır. Çarpan jetler hedef plakaya çarpmalarının akabinde hedef plakada sıcaklık düşmüştür. Sıcaklık düşümü sürekli hale geldikten sonra Şekil 3.4b'de gösterilen noktalar için sıcaklık

ölçüm değerleri alınmıştır. Deneysel hız, sıcaklık ölçüm verileri ve deney düzeneği fotoğraf detayları Ek A'da sunulmuştur.

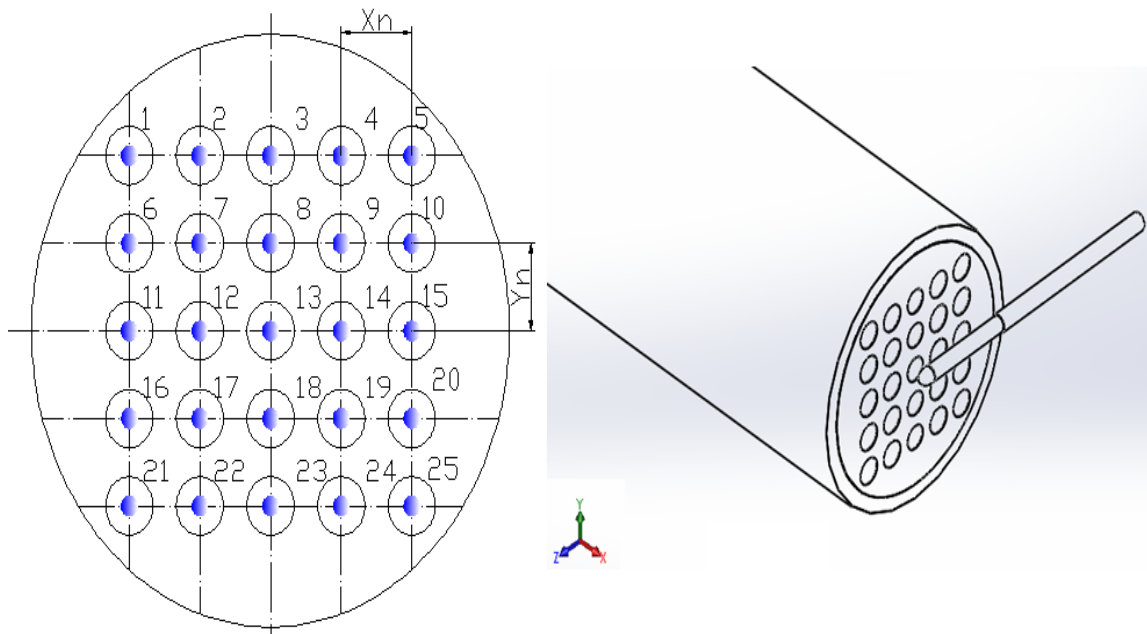


Şekil 3.3. Deney düzeneği test detayı



Şekil 3.4. Sıcaklık ölçüm noktaları

Orifis plakada jet çıkışlarında hava hızı ve hava sıcaklığı, sıcak tel anemometre yardımı ile tespit edilmiştir. *CEM-DT 8880* model sıcak tel anemometresi 210 x 75 x 50 mm boyutlarında, 0-50 °C sıcaklık aralığına, 0.1-25 m/s hız ölçüm aralığına sahiptir. Anemometrenin ölçüm belirsizlik oranı cihaz kataloğundan hız ölçümü için $\pm\%5$, sıcaklık ölçümü için $\pm 1^\circ\text{C}$ olarak tespit edilmiştir. Jet çıkışlarında hız ölçümü Şekil 3.5'te gösterilen noktalar için alınmıştır. Kompresörden çıkan havanın debisi 20 m³/h sabit değerde tutulmuştur. Tek tek her nokta için alınan hız değerleri belirli aralıklar ile tekrarlanmıştır. Akışkanın Reynolds sayısı hesaplanırken ortalama hız değeri kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Sıcak tel anemometre ile jet hızlarının ölçümü

Hesaplamalar yapılırken çalışmayı yönlendiren kabuller yapılmıştır. Plakanın çevre ortama açık olan kenarları hava ile temasta olduğundan burada iletimle ısı transferi taşınım ile ısı transferine oranla küçük olacağı için ihmal edilmiştir. Farklı zamanlarda alınacak ölçümlerde çevre sıcaklığı değişmekle birlikte ortalama bir değer olan 28 °C esas alınmıştır. Ortalama akışkan sıcaklığı 30 °C alınmıştır.

3.1.2. Deneysel Verilerin Hesaplanması

Çarpan jet çalışmamızda işleme başlamadan önce; üniform olarak ısıtılan plaka sıcaklığı çevre sıcaklığının üzerinde olduğu için, çevre ortam ile plaka arasında doğal taşınım ışıınım ve iletim ile ısı transferi olacaktır. Plaka et kalınlığı plaka yüzey alanına göre çok ince olduğu için yüzeyden iletimle olan ısı transfer doğal taşınım ile olan ısı transferinin yanında ihmal edilecektir. Soğutma işlemi başlatıldıktan sonra doğal taşınım, zorlanmış taşınım ve ışıınım ile ısı transferi bir arada görülecektir. Çalışmamızda sadece çarpan jetlerin sağlamış olduğu soğutma işlemi inceleneceğinden dolayı buradaki doğal taşınım ve ışıınım ile olan ısı transferi, kayıplar olarak değerlendirilecektir.

Toplam ısı 30x30 cm boyutlarında elektrikli rezistanslı ısıtıcı ile sağlanmış olup, istenen ısı akısının sürekli olarak elde edilmesi için ısıtıcı değişken dirence bağlanmıştır. İlgili elektrik bağlantı detayı ekler bölümünde yer almaktadır. Sadece hedef plakanın ısıtılmasının sağlanması için, ısıtıcı plakanın arka tarafı cam yünü kullanılarak yalıtım yapılmıştır. Isıtıcı gücü (P) ve toplam sabit ısı akısı(q_t) sırasıyla (3.1) ve (3.2) denklemleri ile ifade edilmiştir.

$$P = VI \quad (3.1)$$

$$q_t = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

Daha önce de bahsedildiği gibi çarpma plakasında iletim (q_c), taşınım (q_{nat}) ve bir miktar da ışıınımla (q_{rad}) kaybolan ısı transferi mevcuttur. Bu tür çarpan jet çalışmalarında taşınımla ısı transferinin yanında iletim ve ışıınımın önemsenmeyecek kadar küçük olduğu benzer literatür çalışmalarında (Bouchez and Goldstein 1975; Goldstein et al. 1986; Can 1988) belirtilmiştir. Mevcut çalışmada iletimle ısı akısı toplam ısı akısının %1'inden daha az olduğu için ihmal edilmiştir. Işıınım ve taşınım ile olan ısı transfer hesapları dikkate alınmıştır. Bu durumda net ısı miktarı (q_{net}) 3.3, kayıp ısı miktarı (q_l) 3.4 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$q_{net} = q_t - q_l \quad (3.3)$$

$$q_l = q_{rad} + q_{nat} \quad (3.4)$$

3.1.2.1. Işınım ile Kaybedilen Isı Miktarı

Düşey levhada ışıınım ile kaybedilen ısı akısı (3.5) bağıntısı ile gösterilmiştir.

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_\infty^4) \quad (3.5)$$

$$q_{rad} = (0.64)(5.67 \times 10^{-8})[(39 + 273)^4 - (28 + 273)^4] = 46 \text{ W/m}^2$$

Burada ε bakır plaka ışıınım katsayısını, σ Stefan Boltzmann sabitini, T_∞ ise çevre hava sıcaklığını göstermektedir.

3.1.2.2. Doğal Taşınım ile Kaybedilen Isı Miktarı

Doğal taşınımında kullanılacak akışkan özellikleri film sıcaklığına göre alınmıştır. Film sıcaklığı yüzey sıcaklığı ile akışkan sıcaklığının ortalamasıyla bulunmuştur. Akabinde film sıcaklığına bağlı olarak akışkanın termodinamik özellikleri tespit edilmiştir.

$$T_b = \frac{T_j + T_w}{2} = \frac{30 + 39}{2} = 35^\circ\text{C}$$

$T_b = 35^\circ\text{C}$ için akışkanın yoğunluğu (ρ), özgül ısısı (C_p), iletim katsayısı (k), difüzyon katsayısı (α), dinamik viskozitesi (μ), kinematik viskozitesi (ϑ) aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} \rho &= 1.145 \text{ kg/m}^3 & C_p &= 1007 \text{ J/kgK} & k &= 0.02625 \text{ W/mK} \\ \alpha &= 2.277 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} & \mu &= 1.895 \times 10^{-5} \text{ kg/ms} & \vartheta &= 1.655 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

Düz dikey bir plakaya çarpan akışta plaka yüzeyinde doğal taşınım ile meydana gelen ısı transferinde Nusselt sayısı (Nu_{nat}) ampirik bir bağıntı olan 3.6 bağıntısı (Çengel ve Ghajar 2012) ile bulunur:

$$Nu_{nat} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{(1/6)}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.6)$$

Denklem içerisinde geçen boyutsuz sayılar ve ısı özellikler bulunarak Nu_{nat} hesaplanır.

$$Ra_L = Gr.Pr \quad , \quad Gr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad , \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad , \quad \beta = \frac{1}{T_b} = \frac{1}{308K} = 3.246 \times 10^{-3}$$

$$Ra_L = \frac{9.81 \times 3.246 \times 10^{-3} (39 - 28) \times 0.3^3}{1.655 \times 10^{-5} \times 2.632 \times 10^{-5}} = 21711513$$

Rayleigh sayısı yerine koyulduğunda;

$$Nu_{nat} = 36 \text{ çıkar.}$$

$$Nu_{nat} = \frac{h_{nat}L}{k} \quad (3.7)$$

Isı taşınım katsayısı:

$$h_{nat} = \frac{Nu_{nat}k}{L} = \frac{(36)(0.02625)}{0.3} = 3.22 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

ısı akısı:

$$q_{nat} = h_{nat}(T_w - T_\infty) = 3.22 (39 - 28) = 35.42 \text{ W/m}^2$$

$$q_l = q_{rad} + q_{nat} = 46 + 35.42 = 81.42 \text{ W/m}^2$$

Zorlanmış taşınım ile ısı transferi:

$$q_{net} = q_t - q_l = 548 - 81.42 = 466.6 \text{ W/m}^2$$

Net ısı miktarı çoklu çarpan jetlerin çarptırılması sonucu plakada meydana gelecek zorlanmış taşınım ile ısı transferini (q_{fc}) ifade eder:

$$q_{fc} = q_{net} = h_x(T_w - T_j) \quad (3.8)$$

Yerel ısı taşınım katsayısı (h_x) ve boyutsuz Nusselt sayısı :

$$h_x = \frac{q_{fc}}{\Delta T} = \frac{q_{fc}}{(T_w - T_j)} \quad \text{ve} \quad Nu = \frac{h_x D_j}{k} \text{ şeklinde hesaplanır.}$$

Çarpan çoklu jetler için Reynolds sayısı (3.9) ile gösterilebilir.

$$Re = \frac{u_j D_j}{\vartheta} = \frac{4 \dot{m}}{N \pi D_j \mu} \quad (3.9)$$

Burada u_j orifis plakada jet çıkışında jetlerden çıkan akışkanın ortalama hızı, N jet adedini, $\dot{m}$ jetlerden çıkan akışkanın kütleli debisini göstermektedir.

Dairesel çarpan jetlerde Reynolds sayısı 3000'den küçük olması durumunda jet akışının laminar; 3000 üzerinde olması durumunda ise jet akışının tam türbülanslı olduğu belirtilmektedir (Viskanta et al. 1993). Yine Han and Goldstein (2001) Reynolds sayısının 3000 üzerinde olması durumunda serbest jetin türbülans olarak düşünülebileceğini belirtmişlerdir. Zukerman and Lior (2005) çalışmalarında çarpan jetler için $Re < 1000$ olması durumunda laminar akış $Re > 3000$ olması durumunda türbülanslı akış, bu iki değer arasında ise geçiş bölgesi olacağını öne sürmektedirler.

3.2. Sayısal Çalışmanın Tanıtılması

Bu bölümde HAD analizi detaylarıyla tanıtılacaktır. Ayrıca sayısal analiz ön çalışması olarak da nitelendirilebilecek olan doğrulama ve kontrol analizleri (deneysel sonuçlarla doğrulama, model, ağ, iterasyon kontrolleri, literatürle doğrulama vs.) sunulacaktır.

3.2.1. Fiziksel Model ve HAD Analizinin Genel Tanıtımı

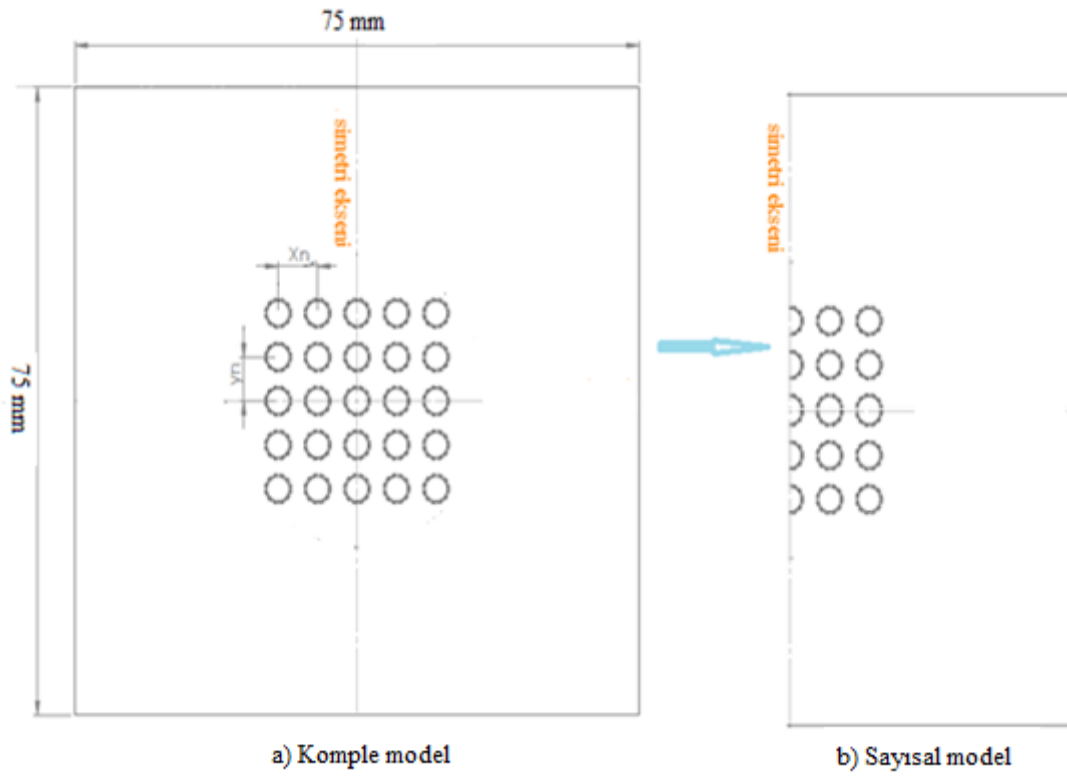
Giriş bölümünde de vurgulandığı gibi sonlu hacimler (elemanlar) analizi esaslı ANSYS-CFX ticari paket programı kullanılarak çalışmaya temel teşkil eden sayısal analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. ANSYS-CFX programı akışkanlar mekaniği problemlerini çözerken sonlu hacimler yöntemini kullanır. Akışkan problemlerinde sonlu hacimler yönteminin kullanılmasının temel sebebi, akış problemlerinde hesaplanması gereken momentum (hız), enerji ve kütle korunum denklemlerinin noktasal olarak değil de hacimsel olarak ele alınmasının daha iyi sonuçlar vermesindendir. Sonlu hacimler yöntemini diğer yöntemlerden üstün kılan özelliklerden birisi, gerekli bilgisayar hafızası bakımından avantajlı olması, yüksek hızlı, türbülanslı ve çok geniş akış alanları için hızlı ve pratik çözüm sunmasıdır. Ayrıca bu konuda yapılan ilk çalışmalarda akış alanına uygun ağ yapısı ataması gerekirken, kontrol hacmi kullanılması durumunda yapısal olmayan ağlardan da yüksek hassasiyette çözüm almak mümkün olmuştur. Bu bakımdan kontrol hacim dengesinin hücre yapısından bağımsız olduğu anlaşılmıştır (Bakker 2002).

Uygulanan jet merkezi ve pürüzlü şekil merkezleri çakışık alınmıştır. Kullanılan akışkan gaz akışkan olduğundan Mach sayısı da önemli olup çalışmada $Ma < 0.3$ kabul edildiğinden akışkan sıkıştırılmaz alınmıştır.

Akışkanın termo-fiziksel özellik değişimi yerel ısı transfer sayılarında belli oranlarda artış sağlamasına rağmen Buchlin (2011) ve Geçim vd. (2008) çarpan jet düzeninde akışın sıkıştırılmaz olarak kabul edilebileceği belirtilmiştir. Çalışmamızda da bu durumu doğrulama amaçlı olarak farklı film sıcaklıkları için sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar farklı film sıcaklıklarının sonuçları ihmal edilebilecek kadar az etkilediğini göstermiştir. Sürekli koşullar esas alınarak türbülanslı akış rejiminde üç boyutlu durum için analiz yapılmıştır. Sayısal analiz çalışmasında üniform giriş hız sınır şartı kullanılmış, giriş hız büyüklüğü $Re = 4000-30000$ aralığı için bulunmuştur. Hedef plakanın $q = 1000 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısına tabi tutulduğu dikkate alınarak gerekli uygulamalar yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan modelin küçültülmesi için plakanın merkez eksen simetri eksen olarak alınmıştır. Bu sınırın dışında kalan plaka yüzeyleri yalıtımlı yüzey olarak kabul edilmiştir. Analiz yapılan her modelde ağ yapısının türbülans modelinin yakınsama ve iterasyon doğruluğu araştırılıp uygun olanı tespit edilmiştir.

Daha önce de vurgulandığı gibi tek çıkışlı akış modeli kullanılan durumlarda maksimum çapraz akış; dört çıkışlı akış modeli (çevre şartlara açık akış modeli) kullanılan durumlarda minimum çapraz akış ifadesi kullanılmıştır. Çözüm süresinin kısılması bakımından söz konusu modeller merkezden simetrik olma özellikleri kullanılarak Şekil 3.6'daki gibi modelin merkezden simetrik olanın yarısı için çözüm yapılmıştır. Bu şekilde çözümün gerekli hassasiyette yapılabilmesi ve çözüm süresinin kısılması sağlanmıştır. Şekil 3.6a ele alınan komple modeli, Şekil 3.6b ise modelin simetri ekseninden itibaren yarısını göstermektedir. Her iki çapraz akış modellerinde de Şekil 3.6b'deki yarım model kullanılmıştır.



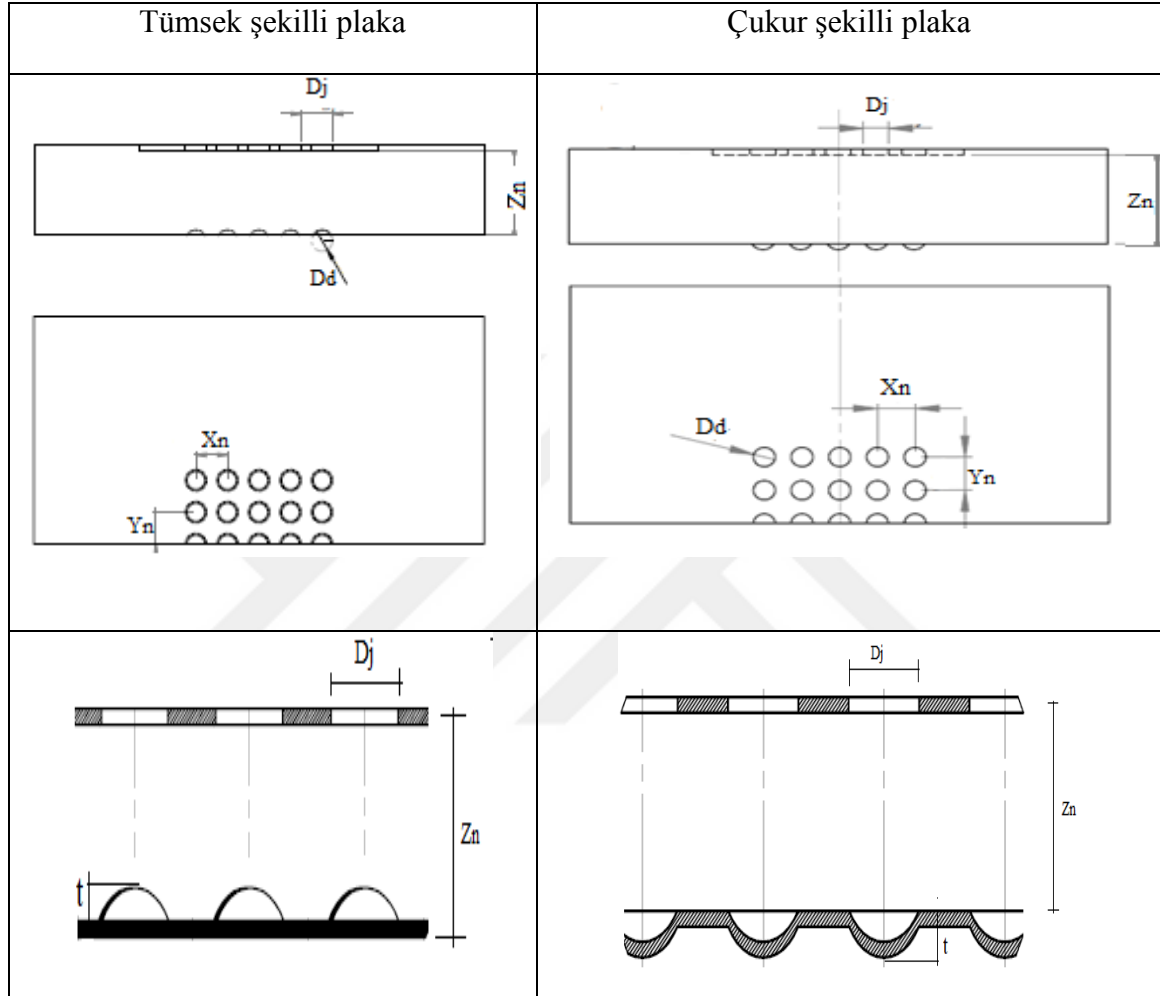
Şekil 3.6. Sayısal akış modeli

Sayısal analiz için oluşturulan akış modellerinin fiziksel yapıları ve parametreleri Şekil 3.7’de görülmektedir. Giriş bölümünde de vurgulandığı üzere parametreler jet çapı D_j ile boyutsuzlaştırılmıştır. Kısaca hatırlatacak olursak, jetler arası yatay mesafe X_n , jetler arası dikey mesafe Y_n olarak ifade edilmiştir. Orifis plaka ile hedef plaka arası mesafe Z_n olarak sembolize edilmiştir. Hem orifis plaka–hedef plaka arası boyutsuz mesafe (Z_n/D_j), hem de jetler arası boyutsuz mesafe (X_n/D_j) ve (Y_n/D_j) eşit üç değerdedir: $Z_n/D_j = 2, 3, 4$; $X_n/D_j = 2, 3, 4$ ve $Y_n/D_j = 2, 3, 4$.

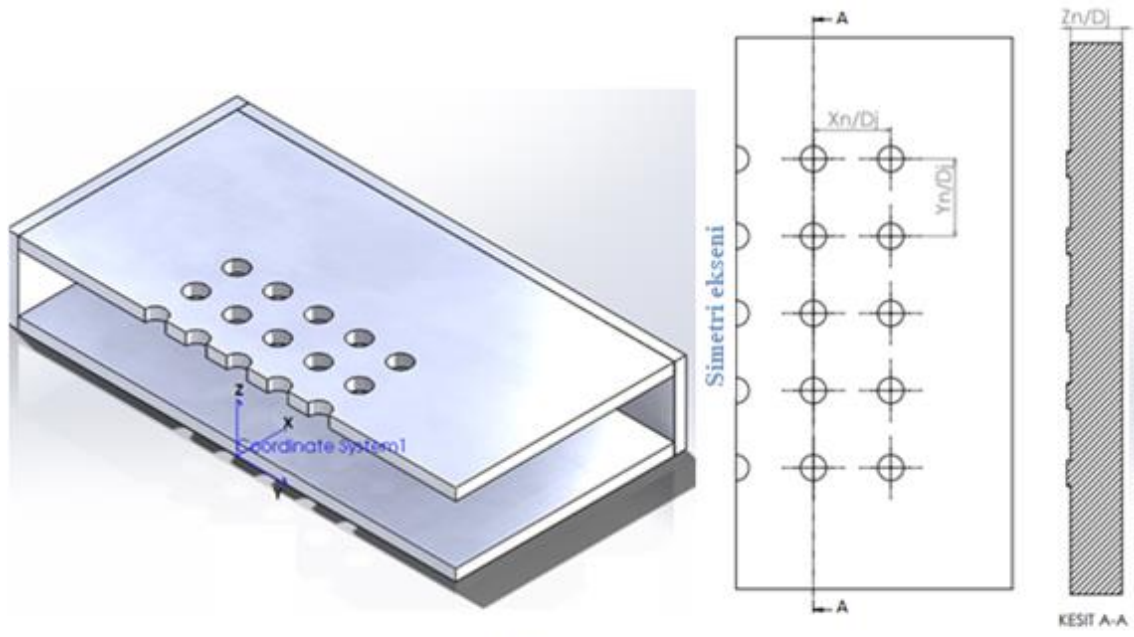
Çalışmanın genelinde pürüzlülük (tümsek ya da çukur şekilli plaka) oluşturan bombe merkezleri çarpan jet merkezleri ile çakışıktır. Pürüzlülüğe neden olan tümsek ya da çukur şekilli bombelerin taban esaslı çapı D_d üç ayrı değerde test edilmiş olup $D_d/D_j = 0.57, 1$ ve 1.43 olarak ele alınmıştır. Bombe yüksekliğinin (t) bombe çapına (D_d) oranı her durumda eşit yani tek değere sahiptir ($t/D_d = 0.25$)

Düz plakada maksimum ve minimum çapraz akış durumunda plakaların 3D konumları ve akışkanın korunum durumları Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Şekil 3.8a’da maksimum çapraz

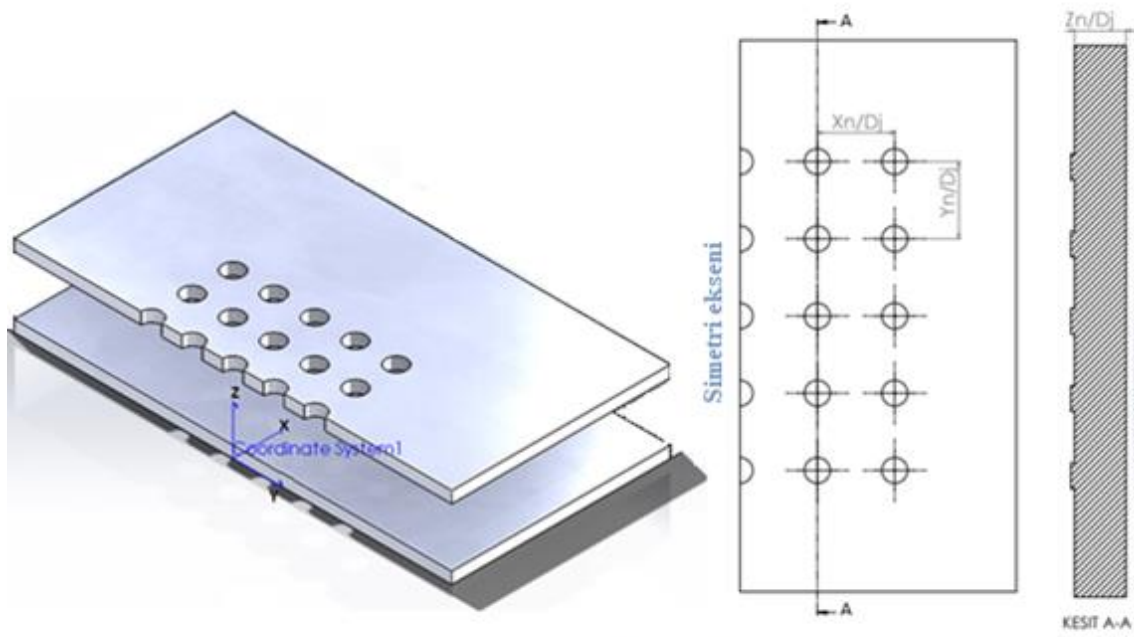
akış(tek çıkış), Şekil 3.8b’de ise minimum çapraz akış(serbest çıkışlı model) görülmektedir. Maksimum ve minimum çapraz akış şartları için oluşturulan akış modelleri tümsek şekilli plaka ve çukur şekilli plaka için Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Sayısal analizde uygulanan fiziksel akış alanı ve parametreler

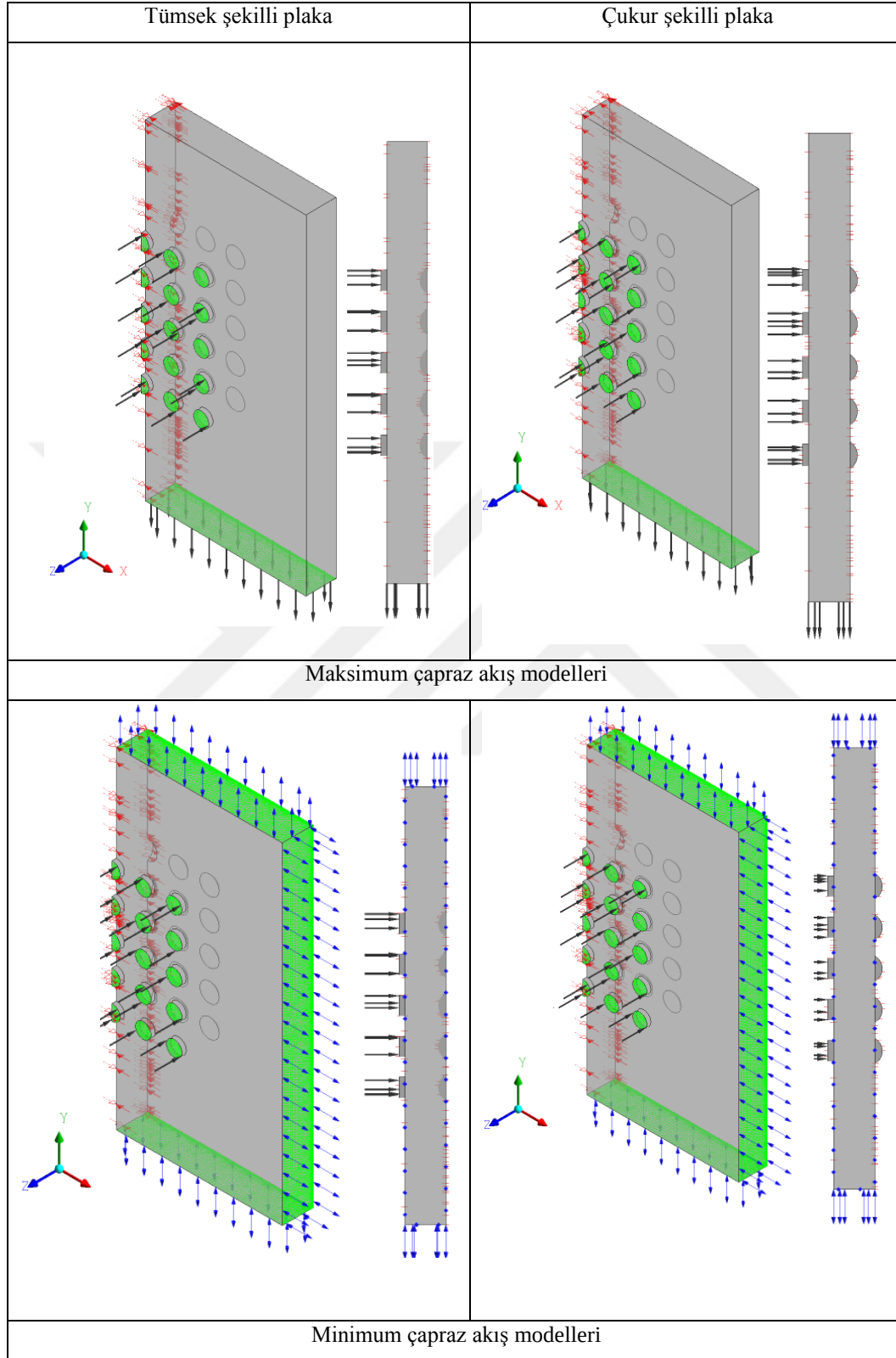


a) Tek çıkışlı model



b) Serbest çıkışlı model

Şekil 3.8. Düz hedef plaka için çapraz akış fiziksel yapısı



Şekil 3.9. Farklı çapraz akış için oluşturulan modeller

Ekler bölümünde Tablo B1, Tablo B2, Tablo B3'te tez boyunca farklı parametreler için çoklu jetin tüm durumları gösterilmiştir. Bu tabloları da göz önünde bulundurarak bundan sonraki bölümün daha iyi anlaşılması için sayısal çalışma boyunca parametre değişimleri de dâhil yapılan işlemleri listelemekte fayda olacaktır. Şöyle ki;

- ✓ Bu çalışmanın başında ve çalışma boyunca deneysel çalışmaya ilaveten birtakım ön araştırma ve doğrulama çalışmaları yapıldı. Örneğin ağ yapısı çalışılan tüm durumlar için en az iki kez değiştirildi.
- ✓ Bir ağ yapısının yeterli düğüm sayısında olabilmesi için her gradyen en az bir eleman içermelidir. Bu durum sayısal çalışmalarda y^+ doğrulaması olarak da adlandırılır. Test edilen her farklı durum için $y^+ \leq 1$ doğruluğu araştırıldı (Ek B).
- ✓ Çalışmanın genelinde türbülans modeli olarak SST kullanılsa da, başlangıçta uygun model bulabilmek için κ - ϵ ve κ - ω çözümleri yapılarak model uygunluğu araştırıldı.
- ✓ HAD çalışmalarında iterasyon sayısı elde edilen sonuçlar üzerinde etkili olan parametreler arasındadır. Bu bakımdan aynı model, aynı ağ yapısı ve aynı koşullar için farklı iterasyonların sonuçları nasıl etkilediğine bakılmıştır.
- ✓ Çalışmada üç farklı çarpma yüzeyi olduğu kabul edilmiştir. Bunlar yüzeyde tümsek şekilli ve çukur şekilli bombelerin olduğu pürüzlü plaka durumları ve düz plaka da denilen pürüzsüz yüzey durumudur.
- ✓ Tümsek ve çukur şeklindeki pürüzlülükler üç farklı bombe çapındadır. Boyutsuz pürüzlülük oranı $D_d/D_j = 0.57, 1$ ve 1.43 olarak ele alınmıştır.
- ✓ Çoklu jetlerin olduğu orifis ile çarpma yüzeyi dik pozisyonda karşı karşıya yerleştirilmiştir. Jetin çarpma sonrası kenarlardan sınırlandırılmayıp serbest olarak etrafa yayıldığı durum minimum çapraz akım olarak adlandırılmıştır. Üst ve yan kenarların kapalı tutulup sadece alt kenardan akışa çıkış verilen duruma maksimum çapraz akış denilmiştir. Tümsek ve çukur şekilli plakaların üç farklı pürüzlülük değeri ve düz plaka için minimum çapraz akış sınırlarında analizler yapılmıştır.

- ✓ Maksimum çapraz akış durumu sadece tümsek ve çukur şekilli plakaların $D_d/D_j = 1$ değerinde ve düz plakada test edilmiştir.
- ✓ Plaka şekli ve pürüzlülük değeri, akış sınırlılık şekli vs. fark etmeksizin tüm durumlarda orifis-hedef plaka mesafesi $Z_n/D_j = 2, 3$ ve 4 değerlerinde alınırken $X_n/D_j = Y_n/D_j = 2, 3$ ve 4 olarak alınmıştır.
- ✓ Maksimum ve minimum çapraz akışta düz ve tümsek şekilli plakalarda Reynolds sayısı 8565 ve 20000 olarak değiştirilmiştir.
- ✓ Minimum çapraz akış durumunda düz plakada Reynolds sayısı 4000, 8000, 16000, 20000 ve 30000 alınarak Reynolds sayısının etkisine bakılmıştır.

3.2.2. Ağ Yapısı

Sayısal çalışmaların doğruluğunda önemli rol oynayan parametrelerden biri akışkan alanına uygulanan ağ yapısıdır. Sonuçların istenen doğrulukta olmasını düğüm ya da eleman sayıları, eleman boyutları, uygun metotların seçilmesi, ağ yapısının yapısal olması ya da olmaması durumları yakından etkiler. Ağ yapısı, fiziksel akış alanını daha küçük akış alanlarına ya da hücrelere bölünmesini temsil eder. Ağ yapısı bir sayısal çalışmada çözümün yakınsamasını ya da yakınsamamasına etki edebileceği gibi, sonucun yanlış çıkmasına da sebep olabilir. Bu anlamda bir sayısal çalışmada ağ yapısının doğrulanması büyük öneme sahiptir.

Ağ yapısı kritik alanlarda yeterince büyük olan sıcaklık, hız, basınç gradyanlerini yakalayabilmelidir. Bir ağ yapısının yeterli düğüm sayısında olabilmesi için her gradyan en az bir eleman içermelidir. Bu durum sınır tabakaların olduğu bölgelerin hassas çözülmesini gerektirir. Bu bakımdan çarpan jet çalışmalarında sayısal sonuçların kabul edilebilir doğrulukta olması için $y^+ \leq 1$ değerinde olmasını gerektirir (Smith 2012, Çalışkan vd. 2014). El Gharbi et al. (2009) viskoz alt tabakada iyi bir sayısal sonucun elde edilebilmesi için yakın duvar mesafesinde $y^+ = 1$ değerinin sağlanmasının gerekli olduğunu belirtir. İlgili çalışmada tüm modeller için elde edilen çözümlerin ağ doğrulukları $y^+ \leq$

1 değeri için elde edilmiştir. y^+ hesabı (3.10)-(3.15) denklemleri ile belirtilmiştir. Tüm sayısal doğrulama sonuçları EK B’de yer almaktadır.

Örnek olması bakımından Şekil 3.10’da ağ yapısı verilen düz bir plakada $Z_n/D_j = X_n/D_j = 2$ parametresine sahip plakanın, minimum çapraz akış modeli için elde edilen çözümünde, farklı y^+ değerlerindeki sonuçları Şekil 3.11’de karşılaştırılmıştır. Neticede $y^+ \leq 1$ için tüm sonuçların yakın değer gösterdiği görülmektedir.

$$y^+ = \frac{\Delta y U_s^*}{\vartheta} \quad (3.10)$$

$$U_s^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.11)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U_0^2 \quad (3.12)$$

Dış akış için sürtünme katsayısı;

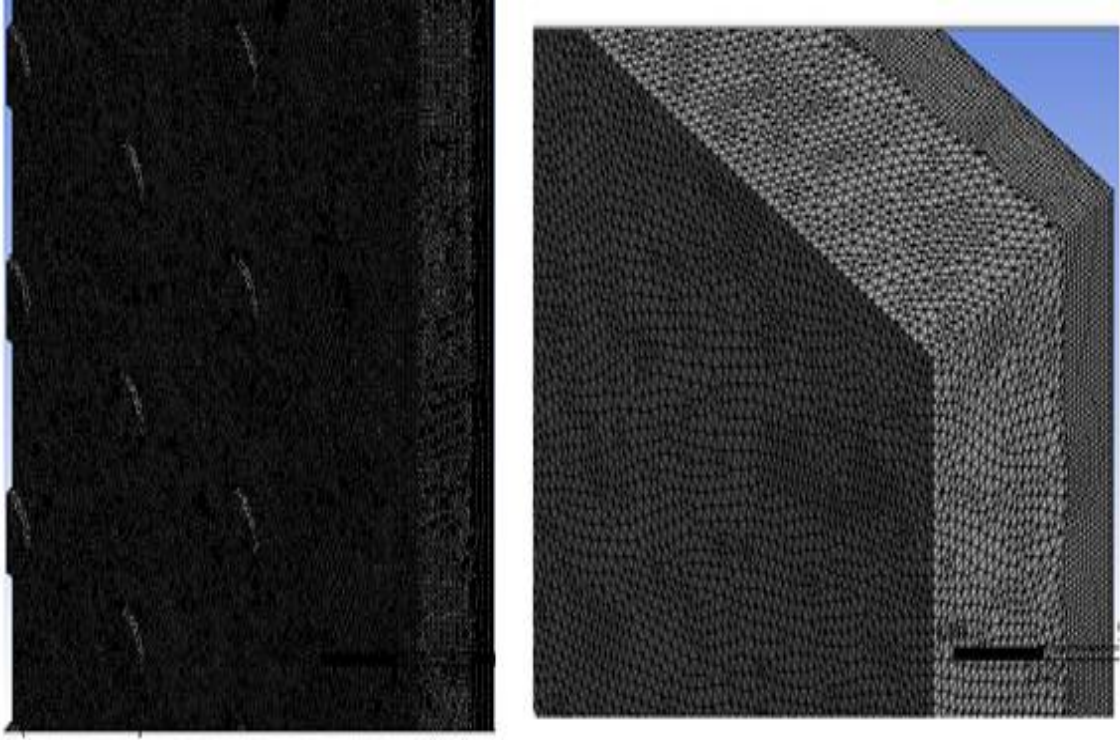
$$C_f = 0.079 Re^{-0.2} \quad (3.13)$$

İç akış için sürtünme katsayısı;

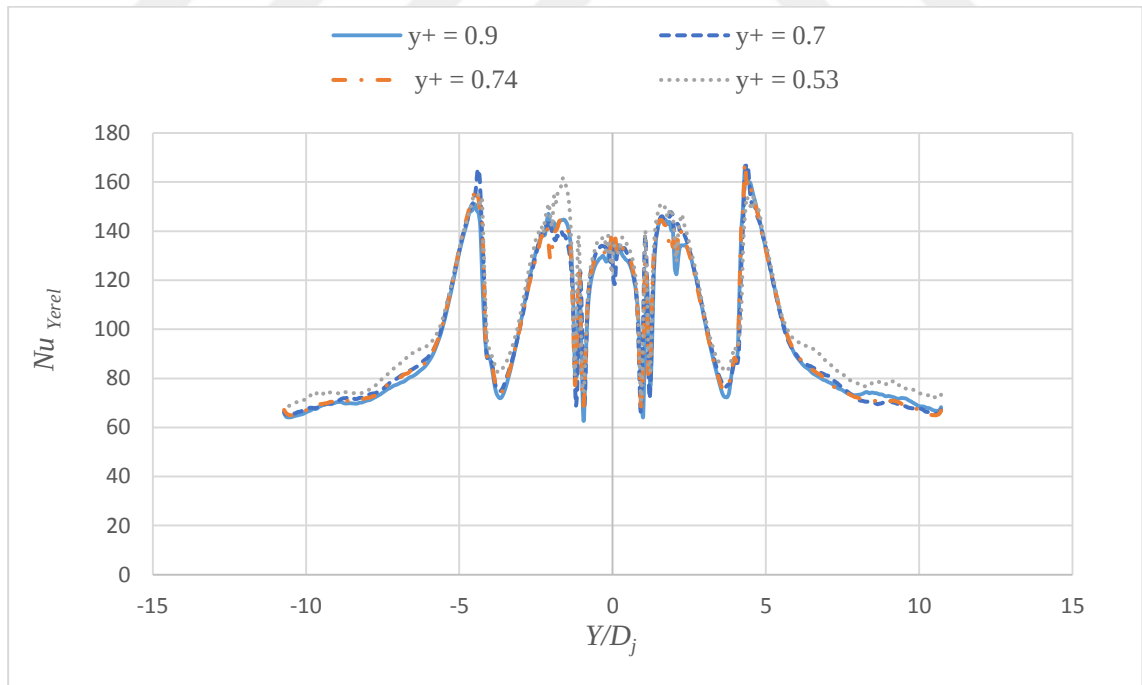
$$C_f = 0.079 Re^{-0.25} \quad (3.14)$$

$$Re = \frac{\rho u_j D_j}{\mu} \quad (3.15)$$

Burada ρ ve μ sırasıyla akışkan yoğunluğunu ve dinamik viskozitesini ifade eder.



Şekil 3.10. Genel ağ yapısı



Şekil 3.11. Minimum çapraz akış, düz plaka, $Z_n/D_j = X_n/D_j = 2$

3.2.3. Türbülans Model Seçimi

HAD çalışmalarında yapılacak bir başka doğrulama ise türbülans modelleri için olmalıdır. Çünkü farklı fiziksel modellerde farklı türbülans modelleri daha iyi performans gösterebilmektedir. Örneğin akışkanın serbest bölgesinde κ - ϵ pratik ve doğru sonuçlar verirken; akışkanın duvar ile temas ettiği durumda SST ve κ - ω türbülans modeli daha doğru sonuçlar verecektir (Negi et al. 2015; Çulun vd. 2017). Türbülanslı akış modellemesinde κ - ϵ türbülans modeli duvar fonksiyonlarını kullanmamaktadır. Bu bakımdan çarpan jetlerde daha farklı bir türbülans modeline ihtiyaç duyulmaktadır (Çalışır vd. 2017).

Türbülans model doğruluğunu inceleme amaçlı olarak deneysel bir çalışma olan Yong et al. (2015) sonuçları aynı parametreler için sayısal olarak çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak hazırlanan Şekil 3.12’de sunulmuştur.

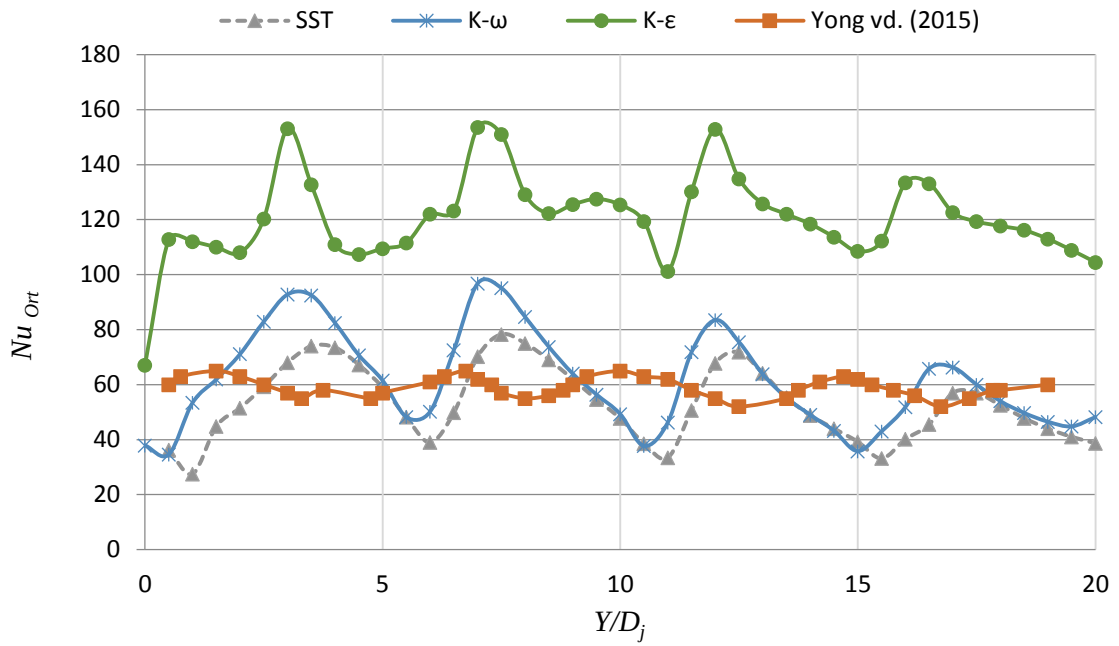
Sayısal analizde literatürde yaygın olarak kullanılan üç farklı türbülans modeli olan κ - ϵ , κ - ω ve SST kullanılmıştır. Düz plakada ($Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$) maksimum çapraz akış için hazırlanmış grafikte κ - ϵ sonuçları diğer modellere göre daha yüksek çıkmıştır. Diğer iki model olan κ - ω ve SST de ise sonuçlar az bir fark ile deneysel çalışma (Yong et al. 2015) ile çakışmıştır.

Bilindiği gibi κ - ϵ türbülans modeli serbest akışlarda kullanıldığında daha doğru değerleri vermektedir. Bu bakımdan κ - ϵ türbülans modeli serbest akışlarda (duvar etkilerinin uzak olduğu bölgelerde) daha geçekçi sonuçlar verebilir. Yapılan literatür çalışmalarına bakıldığı zaman çarpan jet akışlarında duvar etkisinin önemli olması durumunda κ - ω ve SST türbülans modeli κ - ϵ ‘a göre daha iyi ve deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği anlaşılmıştır (Türker 2006).

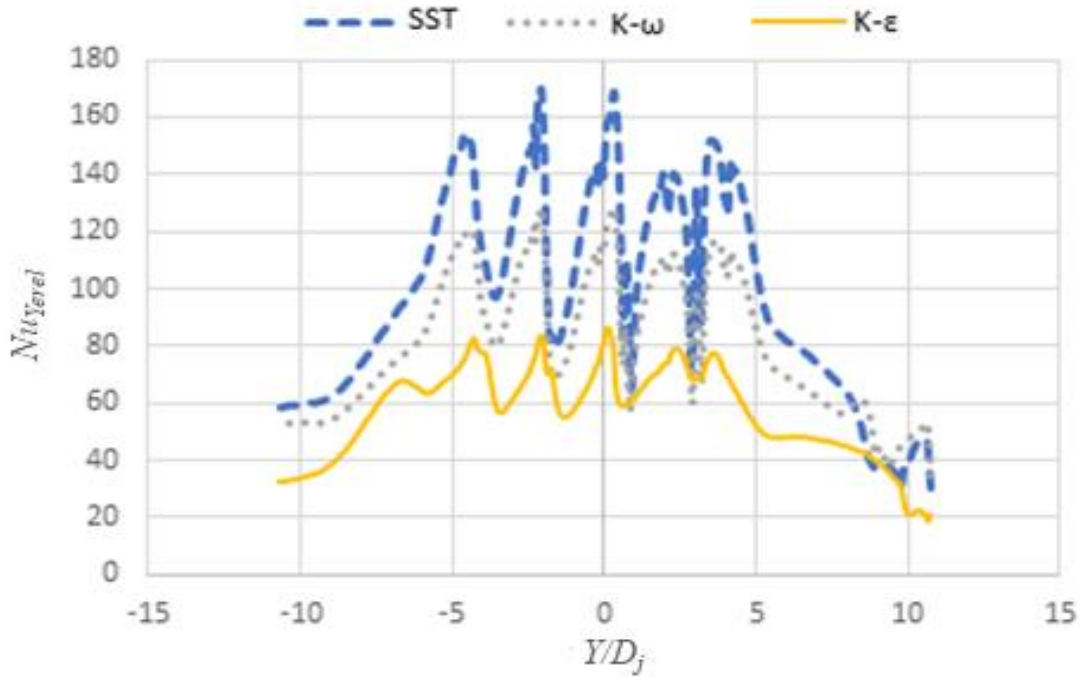
Düşük plaka ve jet mesafelerinde türbülans modellerinin etkisinin görülmesi için Şekil 3.13’te düz plakada ($Z_n/D_j = X_n/D_j = 2$) çapraz akış için modellenen çoklu çarpan jet akışında κ - ω , SST ve κ - ϵ türbülans model sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.12’deki gibi

κ - ω ve SST sonuçları birbirine yakın değerler alırken, κ - ε bunlardan önemli derece uzak değerler göstermiştir.

Şekil 3.12'ye göre düz plaka ($Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 16550$) ilgili parametreler için κ - ε türbülans modeli diğer modellerden daha yüksek ortalama değer alırken, Şekil 3.13'e göre düz plakada $Z_n/D_j = X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$ parametreleri için en düşük ortalama değeri almıştır.

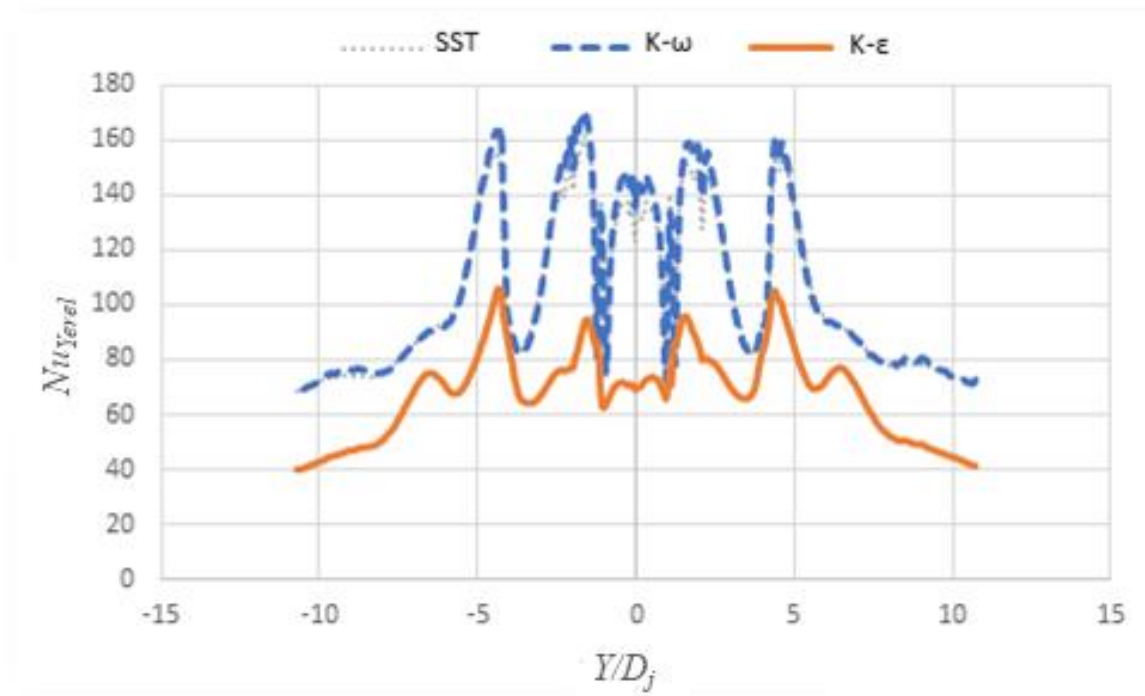


Şekil 3.12. Türbülans modeli doğrulama, maksimum çapraz akış düz plaka, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 16550$

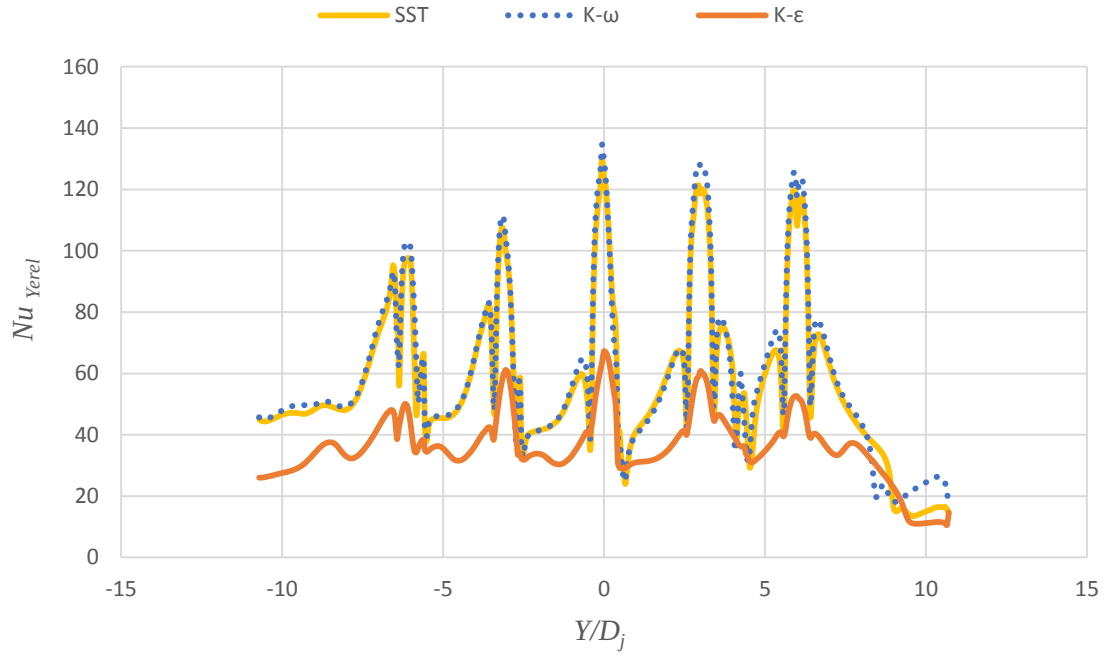


Şekil 3.13. Maksimum çapraz akış, düz plaka, $Z_n/D_j = X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$

Minimum çapraz akış durumunda türbülans modellerinin etkisinin görülebilmesi bakımından Şekil 3.14'te düz plakada $Z_n/D_j = X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$ parametreleri için farklı türbülans modellerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. İlgili grafiğe göre SST ve $\kappa-\omega$ sonuçlarının hemen hemen aynı olduğu, $\kappa-\epsilon$ sonuçlarının bunlardan çok farklı (daha düşük) değerler aldığı görülmektedir. Daha önce Chougule et al. (2011) SST türbülans modelinin diğer modellere göre ısı transfer ve akış analizi bakımından en iyi sonuçları verdiğini belirtmişlerdir. Şekil 3.15 maksimum çapraz akışta tümsek şekilli plakada $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$ parametreleri için farklı türbülans modeli sonuçları karşılaştırılmıştır. Pürüzlü yüzey olan tümsek şekilli plakada da düz plakaya benzer olarak $\kappa-\omega$ ve SST türbülans modelleri yaklaşık olarak çakışırken, $\kappa-\epsilon$ türbülans modeli bunlardan oldukça farklı sonuçlar sergilemiştir. Bu durumda çarpan jet uygulamalarında $\kappa-\omega$ ve SST modellerinin birbirinin yerine rahatlıkla kullanılabileceği söylenebilir. Çarpan jetlerde $\kappa-\epsilon$ türbülans modelinin kullanımı önemli derecede hatalı sonuçlara yol açacaktır. Bu bakımdan bu çalışmada ele alınan tüm modeller için SST türbülans modelinin uygunluğu kabul edilmiş ve kullanılmıştır.



Şekil 3.14. Minimum çapraz akış, düz plaka, $Z_n/D_j = X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$



Şekil 3.15. Maksimum çapraz akış, tümsek şekilli plaka, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 8565$

3.2.4. Temel Bünye Denklemleri

HAD analizi boyunca CFX tarafından çözülen denklemler, süreklilik denklemi, Reynolds ortalama Navier-Stokes momentum denklemleri, SST türbülans model denklemleri ve enerji denklemdir. Bölüm 2’de çarpan jetler konusu anlatılırken süreklilik ve momentum denklemlerine değinilmişti. Detaylarıyla yeniden bünye denklemlerini sunmakta fayda olacaktır.

Reynolds ortalama Navier Stokes denklemleri genel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$\rho \left(u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad j = 1, 2, 3 \quad (3.16)$$

Denklem 3.16’ da geçen μ_t türbülanslı viskozitedir. Süreklilik denklemi aşağıda gösterildiği gibidir:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.17)$$

Türbülans modeli olarak kullanılan SST (kayma gerilmesi iletimi) modeli Menter (1994) tarafından geliştirilmiş olan bir modeldir. SST denklemleri iki transport denkleminde oluşur, birincisi türbülanslı kinetik enerji (κ) denklemi, diğeri de türbülans yıkımının özgül oran denklemdir (ω). Her iki denklem aşağıda verilmiştir:

$$\frac{\partial(\rho u_i \kappa)}{\partial x_i} = P_\kappa - \beta_1 \rho \kappa \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right] \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = A \rho S^2 - \beta_2 \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega_1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\sigma_{\omega_2} \omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (3.19)$$

SST denklemlerinde yer alan ω türbülans yıkımı özgül oranını, P_κ türbülanslı kinetik enerji olan κ ’nın üretim oranını göstermektedir. σ_κ , σ_{ω_1} , σ_{ω_2} ile gösterilen terimler κ ve ω için difüzyon parametreleridir. F_1 harmanlama fonksiyonu olup standart κ - ϵ modeliyle Wilcox

κ - ω modelini birleştirme olanağı sunar. S terimi kayma gerilmesinin mutlak değeri, A ve β terimleri ise model sabitleridir.

Denklem (3.18) ve (3.19) çözüldüğünde κ ve ω değerlerini verirler, böylece türbülanslı viskozite μ_t bulunabilir:

$$\mu_t = \frac{a\rho k}{\max(a\omega, SF_2)} \quad (3.20)$$

Burada F_2 türbülanslı viskozite değerini duvar bölgesinde sınırlamaya yardımcı olur. a bir sabittir ve S Denklem 3.19'da ifade edilen terimdir. SST modelinin detayları Menter (1994) in çalışmasından incelenebilir.

Isı transferi problemi için çözülen uygun enerji denklemi:

$$\rho c_p \left(u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3.21)$$

Bu denklemde k moleküler ısı iletkenlik, k_t ise türbülanslı ısı iletkenliktir. Bu değerlerle türbülanslı Prandtl sayısı hesaplanacak olursa;

$$Pr_t = \frac{c_p \mu_t}{k_t} \quad (3.22)$$

ve böylece türbülanslı ısı iletkenlik bulunur:

$$k_t = \frac{\mu_t}{c_p} Pr_t \quad (3.23)$$

Pr_t için 0.9 değeri seçilmiştir.

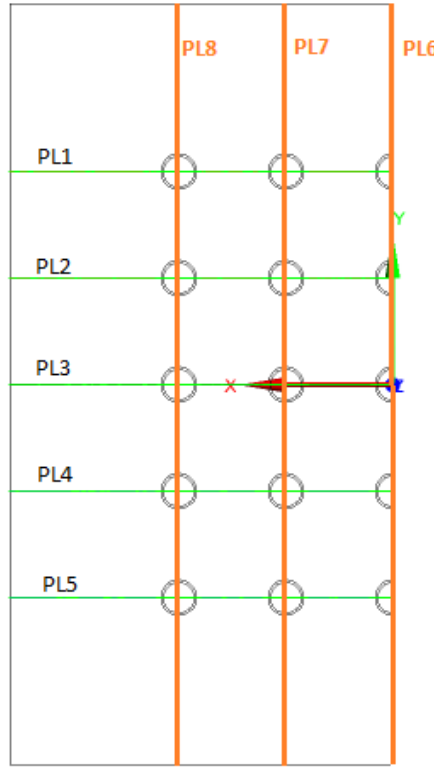
3.2.5. Analiz Sonuçlarının Grafiksel Gösterimi

Çukur ve tümsek şekilli bombe açılmış farklı pürüzlülükteki plakaların ısı transferine etkisi hakkında yorum yapılabilmesi için öncelikle standart olarak kullanılan düz plaka için

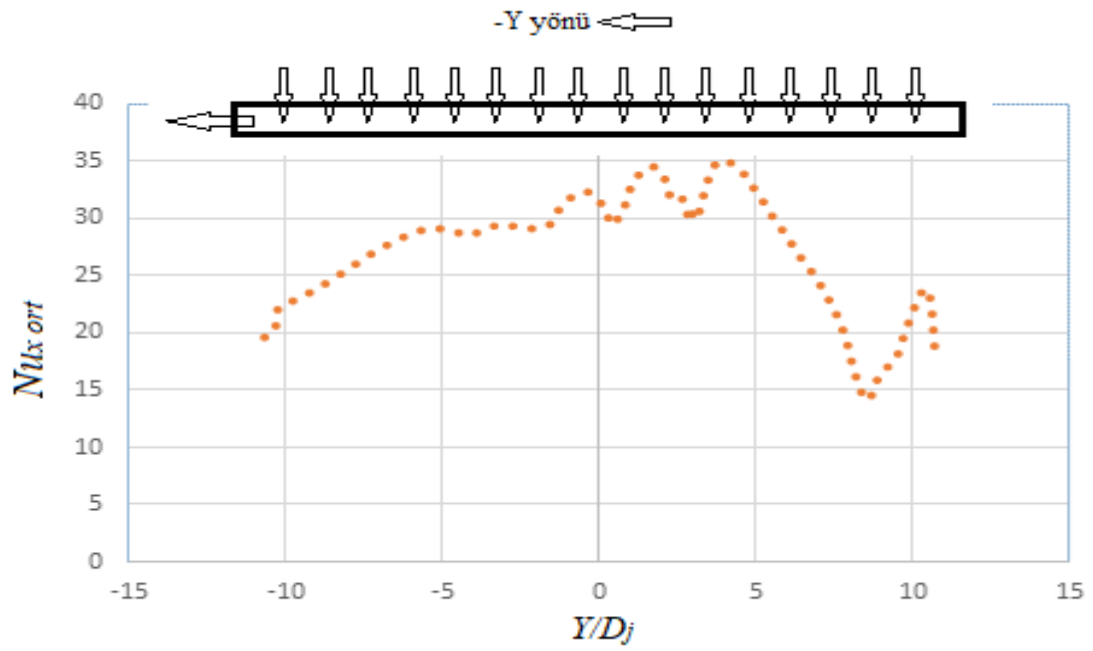
benzer modellerde ısı transfer sonuçlarının ne olduğuna bakılması gereklidir. Bu bakımdan söz konusu çalışmada çukur ve tümsek şekilli plakaların da benzer modelleri için elde edilen sonuçlar düz plaka sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Tüm modeller için elde edilen sonuçlar genel olarak yerel ve ortalama Nusselt sayısı bakımından iki farklı şekilde sunulmuştur. Yerel Nusselt sayısı hem maksimum hem minimum çapraz akış modellerinde plaka simetri eksenini boyunca ağ doğruluğunun gösterilmesi amaçlı olarak kullanılmış olup ilgili doğrulama grafiklerinde (Ek B) gösterilmiştir. Ortalama Nusselt sayısı ise plaka yüzeyinde alan ortalama Nusselt ve bir yönde ele alınan hatların ortalama Nusselt değerleri (sıra ortalama Nusselt) alınarak elde edilmiştir. Sıra ortalama Nusselt sayısı $Nu_{x,ort}$ şeklinde ifade edilmiştir. Plaka üzerinde yerel Nusselt sayısı, merkezdeki simetri ekseninde yer alan *PL6 (polyline)* hattı için alınmıştır. Sıra ortalama Nusselt sayısı hesaplanırken Şekil 3.16’da gösterilen 0.25 mm aralıklı yatay *PL* hatları üzerinde 1000 adet noktanın Nusselt sayılarının ortalaması alınmıştır. Ağ doğrulaması için kullanılan yerel Nusselt sayısı için plaka simetri ekseninde *PL6* hattı kullanılmıştır. Sıra ortalama Nusselt sayısının Y/D_j parametresine göre değişimine bakılması amaçlı olarak X eksenine paralel 0.25mm aralıklar ile alınan *PL* hatlarının (X eksenine paralel olan *PL1, ... PL5* hatları gibi 0.25mm aralıklar ile çoklu hatlar esas alınmıştır.) her bir hat üzerinde yer alan 1000 adet noktanın ortalama Nusselt sayısı bulunmuştur. Bu şekilde Y/D_j parametresine göre değişen sıra ortalamlı Nusselt sayısı bulunmuştur.

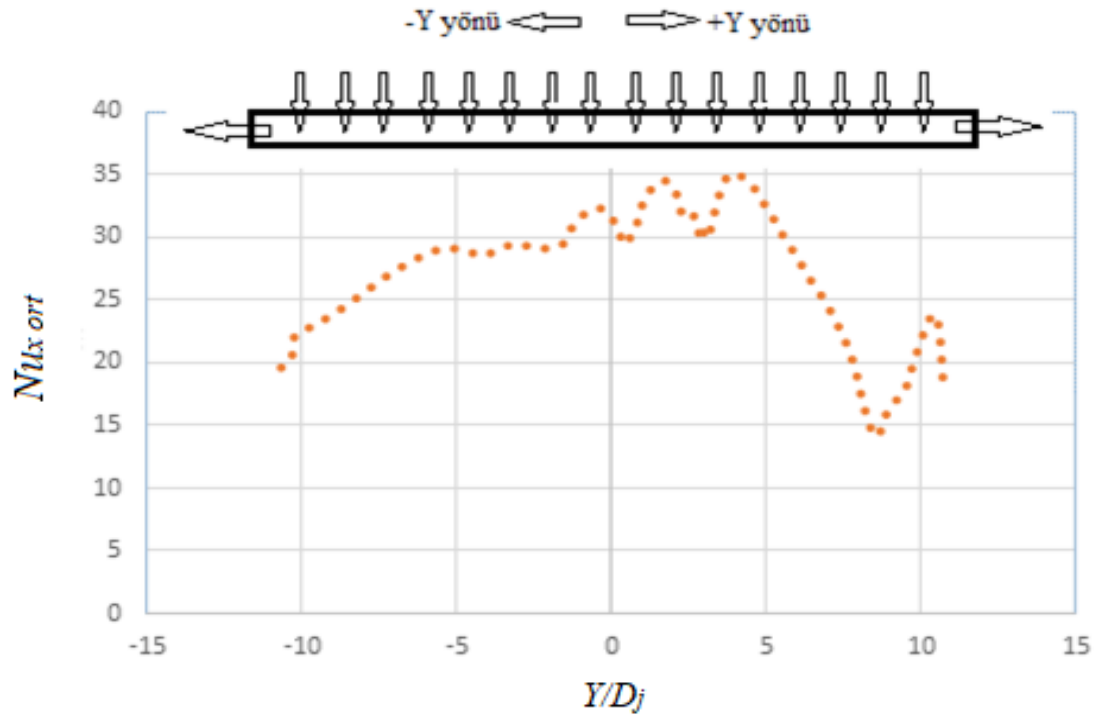
Maksimum çapraz akış ve minimum çapraz akış için bulunan sıra ortalama Nusselt sayısı sonuçları örnek grafik olarak sırasıyla Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Plaka merkez bölgesinde $Y/D_j = 0$ ’dır. Maksimum çapraz akış modellerinde akışın çıkış yönü negatif Y yönünde alınmıştır. Minimum çapraz akışta çıkış $+Y, -Y, +X, -X$ olmak üzere dört yönde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.16. Yerel ve sıra ortalamalı Nusselt için esas alınan veri hatları



Şekil 3.17. Maksimum çapraz akış sıra ortalamalı Nusselt grafik örneği

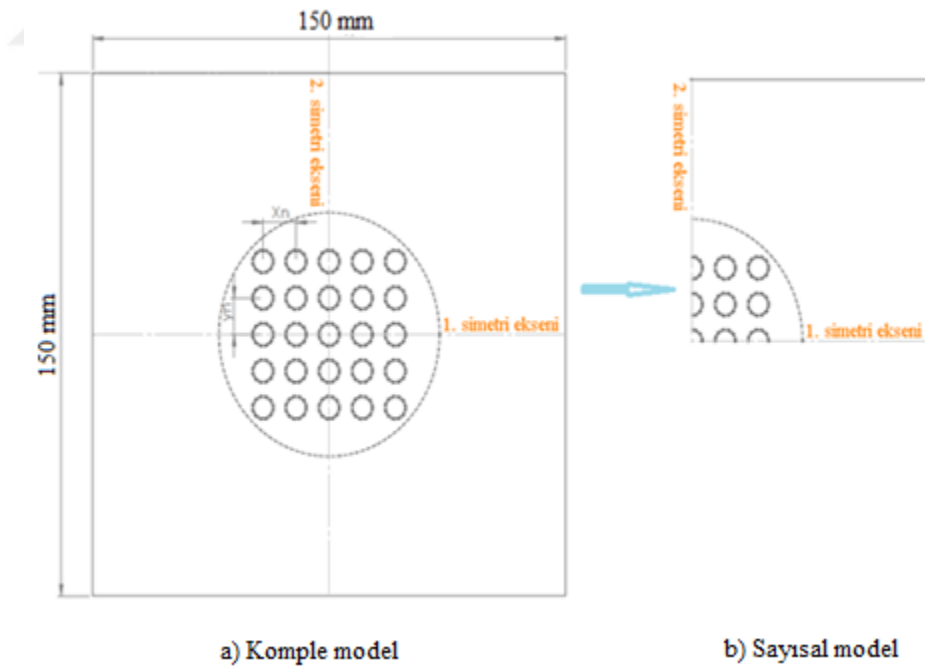


Şekil 3.18. Minimum çapraz akış sıra ortalamalı Nusselt grafik örneği

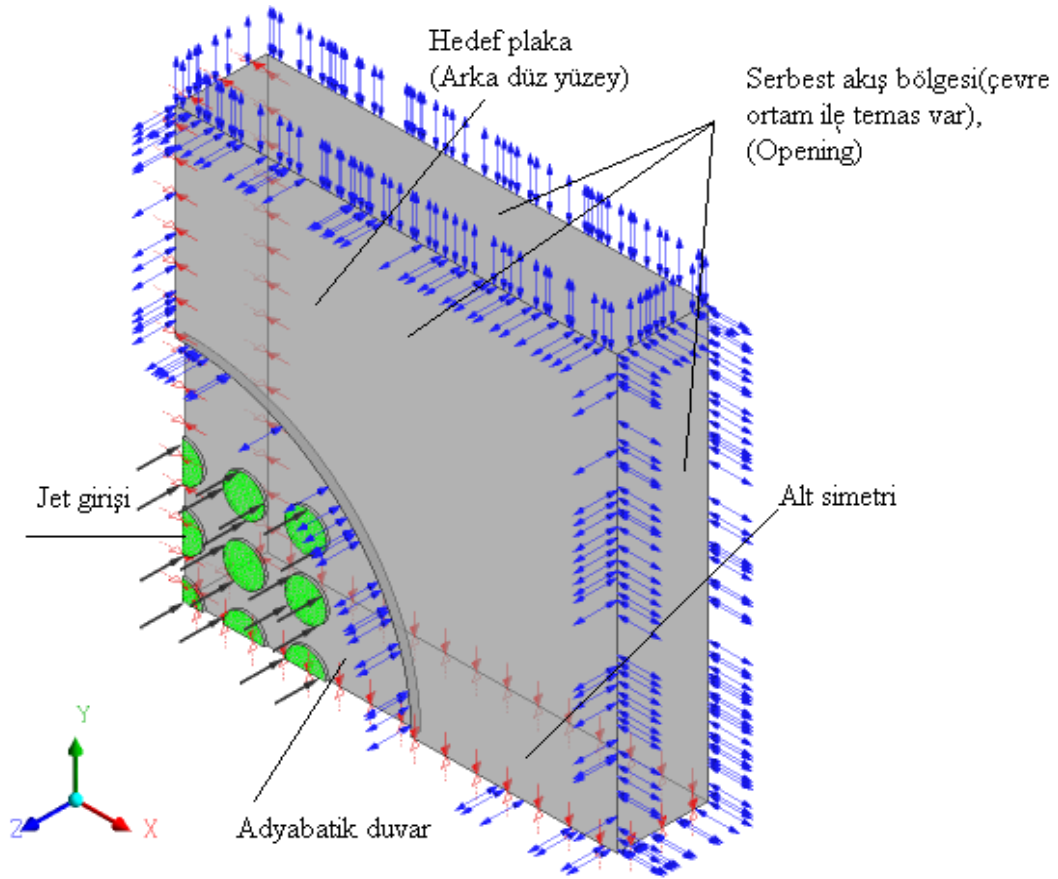
3.3. Deneysel ve Literatür ile Doğrulama Çalışmaları

3.3.1. Deneysel doğrulama çalışması

Deneysel doğrulama amaçlı olarak kullanılan sayısal modelde çarpma plakası Şekil 3.19’da gösterildiği gibi 30x30 cm boyutlarındaki düz yüzeyli plakanın dörtte biri olup (15x15 cm) alınmıştır. Ayrıca, $Z_n/D_j = 5.14$, X_n/D_j ise 1.5 alınmıştır. Akış alanında kullanılan akışkan özellikleri 35 °C film sıcaklığı için tablodan alınmıştır. Jet hızı olarak deneysel ölçümlerde alınan değerin ortalaması alınmış, üniform hız girişi kullanılmıştır. Şekil 3.20’de de görüldüğü gibi akış bölgesi sınır koşulları jet girişlerinde üniform hız girişi, hedef plakada sabit ısı akısı, dikey ve yatayda simetri eksenleri, orifis plaka üzerinde jet girişleri dışında kalan alan adyabatik duvar olarak kabul edilmiştir. Akış alanı 10^{-6} yakınsama kriteri için uygun ağ yapısında çözödürölmüştür.

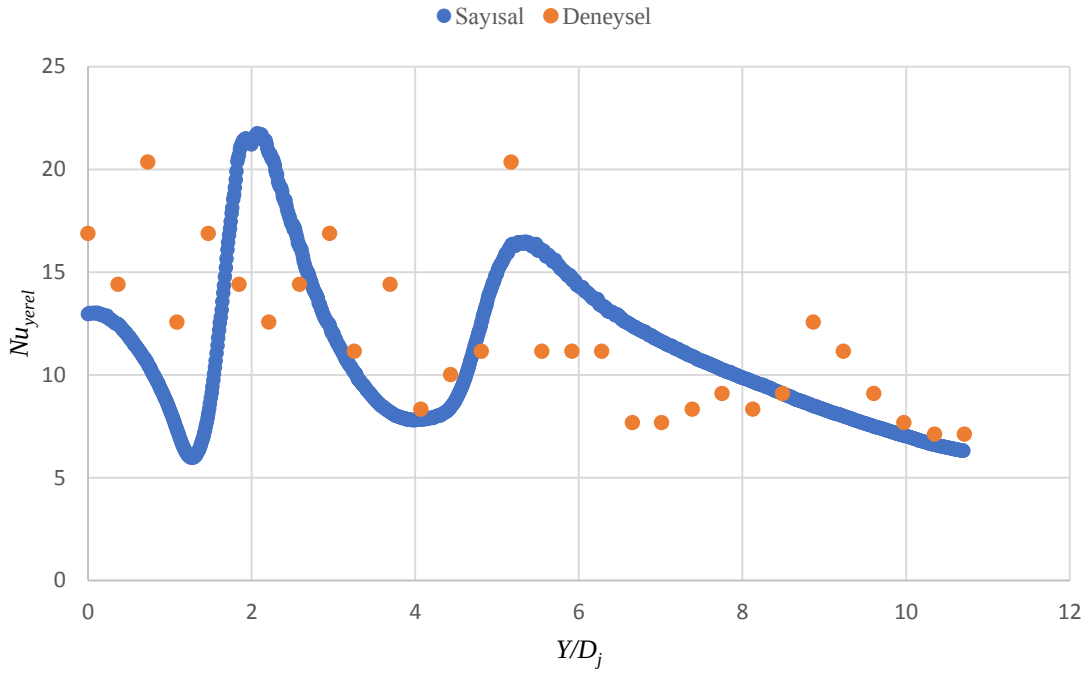


Şekil 3.19. Deneysel doğrulama akış modeli



Şekil 3.20. Sayısal akış alanı

Gerekli ağ doğruluğu ve türbülans model doğruluğu sağlanan akış için, bulunan sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması Şekil 3.21 ile gösterilmiştir. Esas alınan hat boyunca ortalama Nusselt sayısı bakımından sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki fark %4.67 çıkmıştır. Yapılan benzer literatür çalışmasında deneysel ve sayısal sonuçlarının ± 5 oranında uyumlu olduğu belirtilmiştir (Chougule et al. 2011).

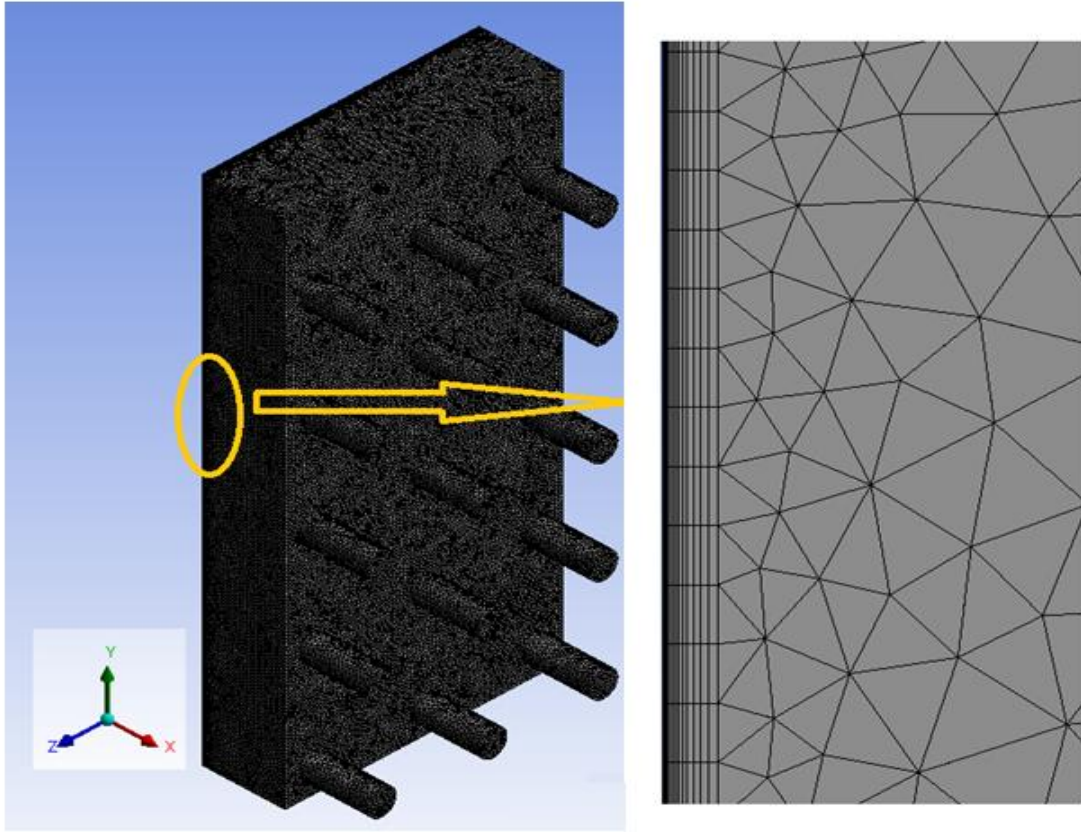


Şekil 3.21. Doğrulama sonuçları

3.3.2. Literatürle Doğrulama Çalışmaları

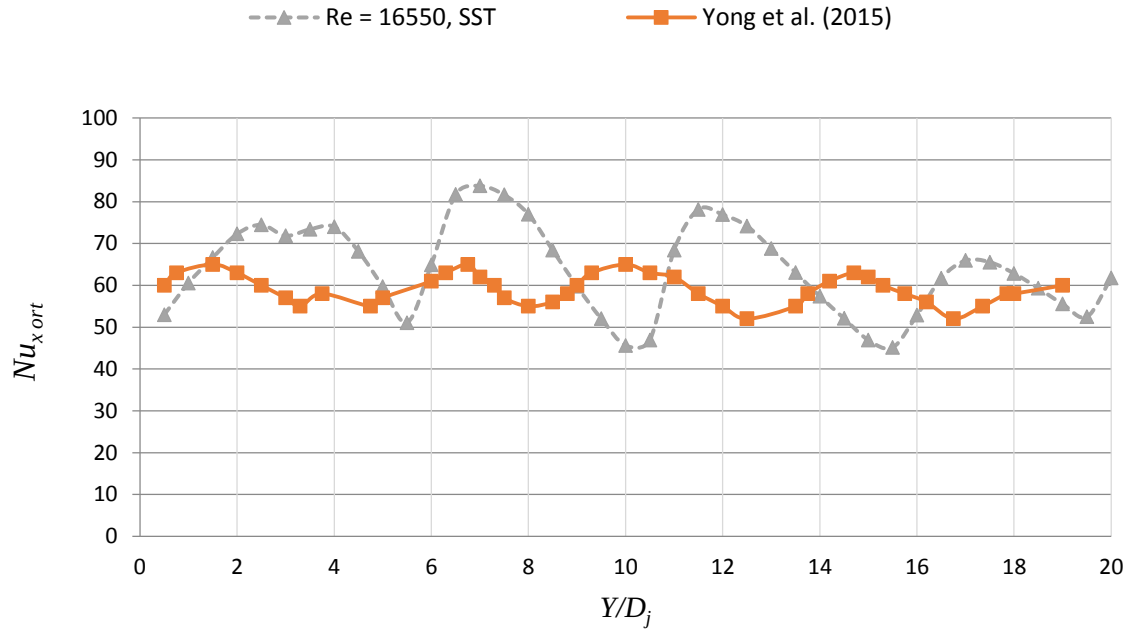
Sayısal çalışma sonuçlarının sağlıklı bir şekilde değerlendirilebilmesi için geniş literatür doğrulamasına ihtiyaç vardır. Bu bakımdan Yong et al. (2015) korunumlu çoklu jetin düz bir plakaya çarpması ile ilgili yaptıkları deneysel çalışma sonuçları esas alınarak bir doğrulama çalışması yapılmıştır. Doğrulamada kullanılan ağ yapısı Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Söz konusu ağda hedef plakada y^+ değeri 0.5 olacak şekilde kademeli ağ kullanılmıştır.

Çıkan sonuçlar Şekil 3.23’te gösterilmiştir. Maksimum çapraz akış için yapılan Yong et al. (2015) ile mevcut çalışma arasındaki fark ortalama Nusselt sayısı açısından %6.2 çıkmıştır. Doğrulamada kullanılan sayısal sonuçlar SST ile çözülmüştür. Esas alınan hat boyunca alınan sıra ortalamalı Nusselt sayısının sayısal ve deneysel sonuçlarının birbirine yakın olduğu anlaşılmaktadır.

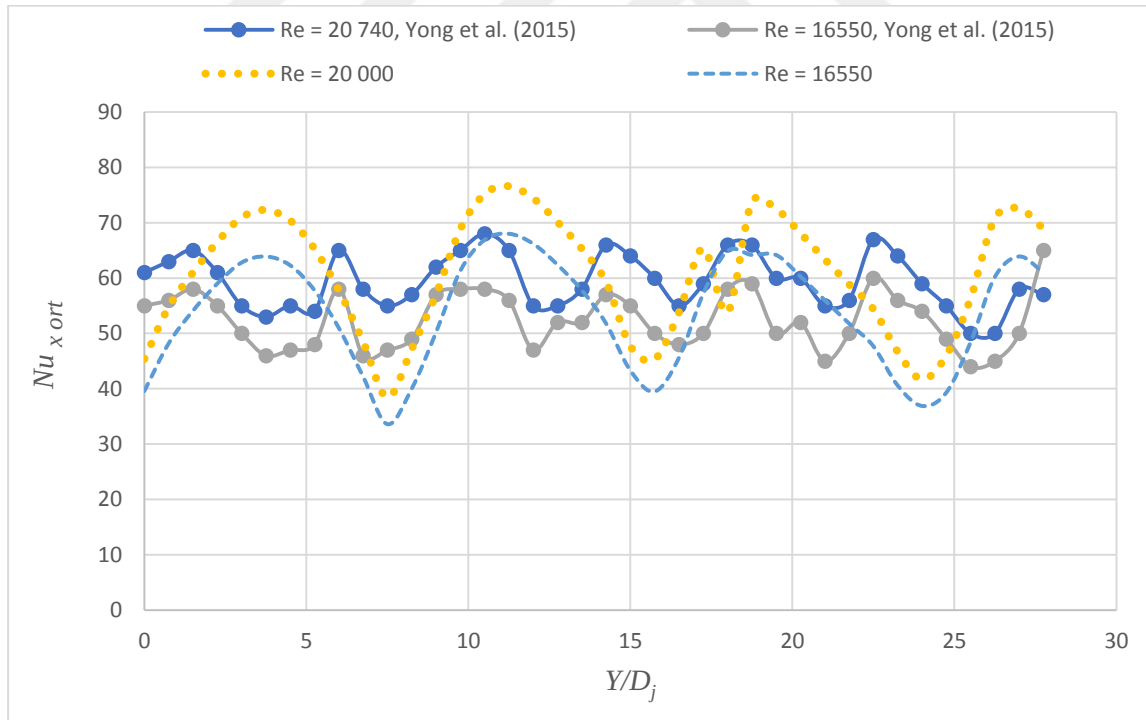


Şekil 3.22. Yong et al. (2015) için kullanılan kademeli ağ yapısı

Yong et al. (2015) ile yapılan bir diğer doğrulama ise Şekil 3.24’te verilmiştir. Söz konusu şekilde farklı Reynolds sayıları için sayısal sonuçlar ve deneysel sonuçlar kıyaslanmıştır. $Re = 20000$ ve $Re = 16550$ için sayısal çözüm yapılmış, bu sayısal sonuçlar Yong et al. (2015)’in bulduğu deneysel sonuçlar olan $Re = 20740$ ve $Re = 16550$ ile kıyaslanmıştır.



Şekil 3.23. Literatür ile doğrulama, $Z_n/D_j=3$, $X_n/D_j = Y_n/D_j = 4$



Şekil 3.24. Literatür ile doğrulama, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = Y_n/D_j = 4$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

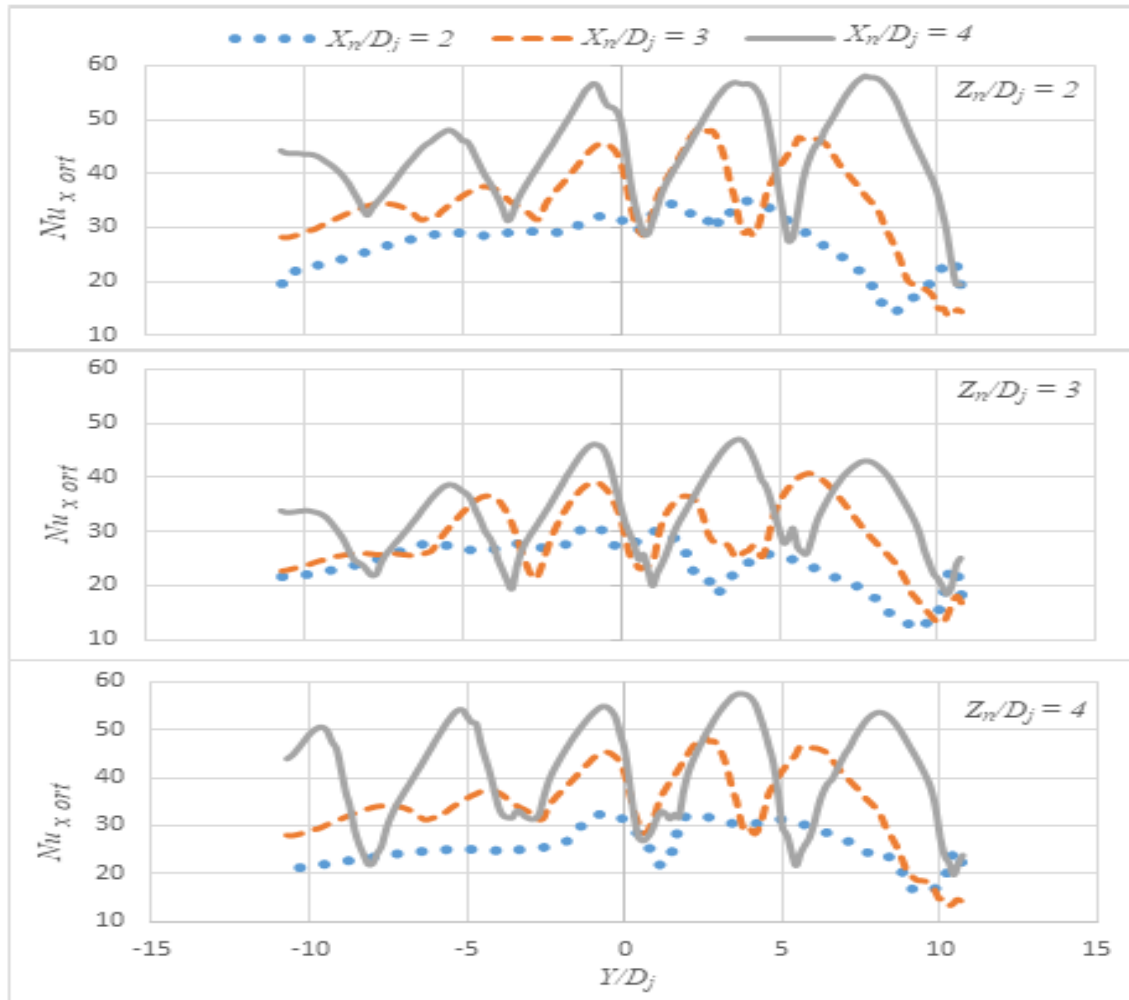
4.1. Maksimum Çapraz Akış için Sayısal Bulgular

Çapraz akış durumu ısı transferini ve akış karakteristiğini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Daha önce birinci bölümde de tanımlandığı gibi çapraz akış normal kendi yolunda akmaya devam eden bir akışkanı rahatsız ederek bu akışkana dik yönde ya da belli bir açı ile gelerek, bu akışkanın kendi yolundan sapmasına ve çeşitli girdapların oluşmasına sebep olur. Çarpan jetlerde oluşacak çapraz akış, bazı durumlarda ısı transferini olumlu yönde etkilerken bazı durumlarda ise tam tersi etkiye sebep olabilir (Bayraktar 2008). Bu bakımdan çarpan jetlerde çapraz akış etkisinin hangi parametrelerde olumlu, hangi parametrelerde olumsuz sonuçlara sebep olduğunu tespit edebilmek için farklı çapraz akış türlerinin incelenmesi gerekmektedir. Söz konusu akış modelinde akış hızı, oluşan girdaplar ve ilgili bölgelerdeki ısı transferinin nasıl etkilendiği yakından incelenmelidir. Birinci bölümde de bahsedildiği gibi oluşturulan modelde akışkanın çıkış yönlerinin sayısına bağlı olarak tek çıkışlı akış modelinde maksimum çapraz akış, iki çıkışlı akış modelinde orta (*medium*) çapraz akış, dört çıkışlı akış modelinde ise minimum çapraz akış oluşur. Bu çalışmada çapraz akışın etkisinin görülebilmesi için iki farklı çapraz akış modeli olan maksimum (tek çıkışlı akış modeli) ve minimum çapraz akış (dört çıkışlı akış modeli) durumları incelenmiştir.

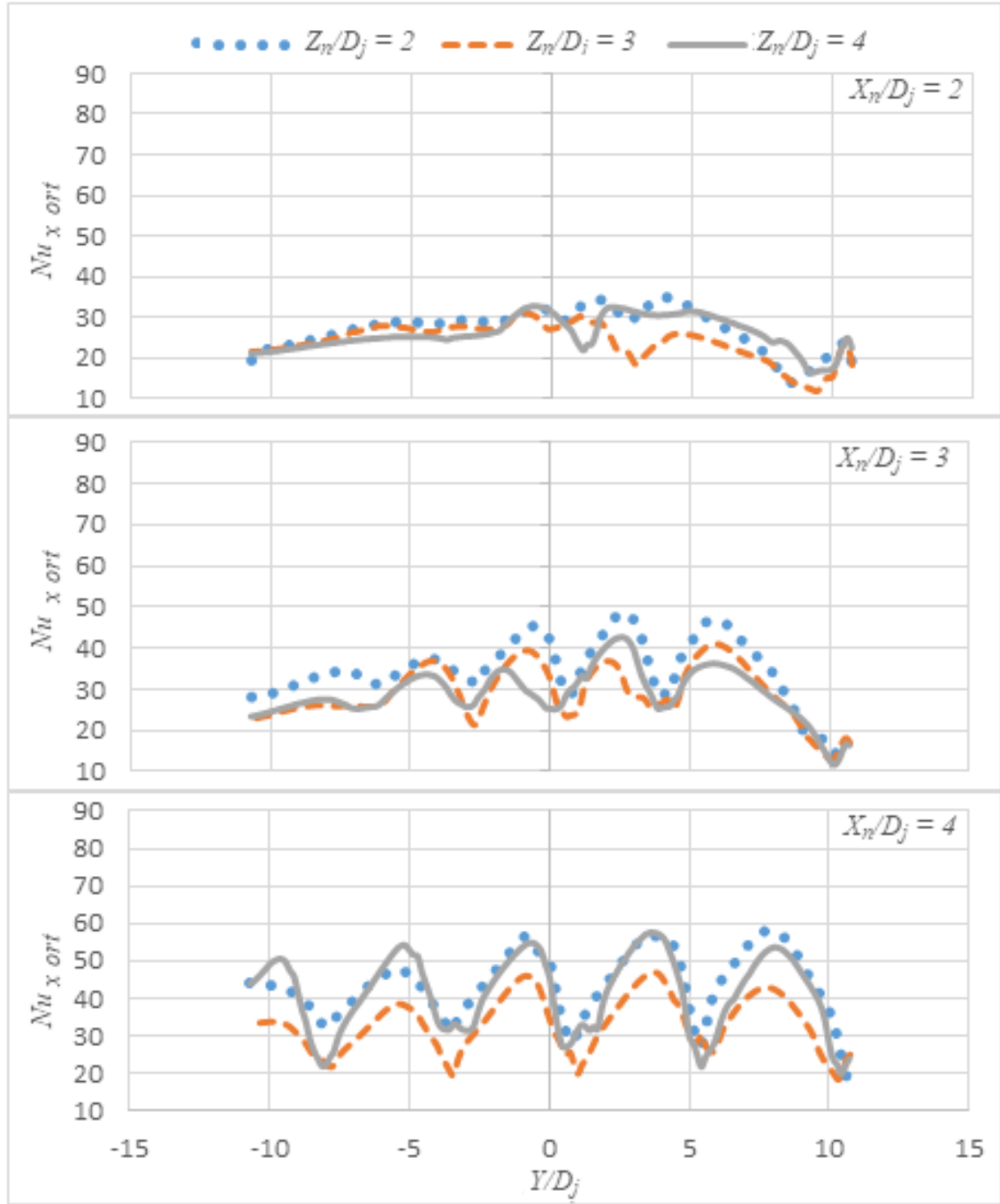
Bu kısımda ısıtılmış hedef plakalar, çoklu jetlerden çıkan maksimum çapraz akışa maruz bırakılmıştır. Çalışmada ele alınan hedef plaka ve orifis plaka arası boyutsuz mesafe $Z_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklindedir. Jetler arası boyutsuz mesafe $X_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde olup, bombe çapının (D_d) jet çapına (D_j) oranı $D_d/D_j = 1$ ve bombe derinlik oranı $t/D_d = 0.25$ olarak ele alınmıştır. Reynolds sayısı 8565 ile 20000 olarak değiştirilmiştir.

4.1.1. Çoklu Jetin Düz Plakaya Çarpması

Düz plakaya çoklu jetten çıkan maksimum çapraz akışın çarpması şartlarında farklı X_n/D_j ve Z_n/D_j değerleri için sıra ortalamalı Nusselt sayısının Y/D_j parametresine göre değişimi Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. İlgili şekillerden tüm Z_n/D_j değerlerinde $X_n/D_j = 4$ için pik noktaları en belirgin iken, $X_n/D_j = 3$ için pik noktaları daha az belirgin, $X_n/D_j = 2$ için ise pik noktaları düzleşmiştir. Başka bir deyişle, jetler arası mesafe azaldıkça, jetler birbirine yaklaştığı için potansiyel çekirdek bölgeleri birbirlerine karışmış ve jetler ayrı ayrı etki etmektense, bütünleşerek tek bir jet etkisi yapmaya meyletmişlerdir.



Şekil 4.1. Düz plakada maksimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $Re = 8565$



Şekil 4.2. Düz plakada maksimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $Re = 8565$

Orifis plaka-hedef plaka arası mesafeye bakıldığında, $X_n/D_j = 4$ için $Z_n/D_j = 4$ ' te en düşük ortalama Nusselt sayısı tespit edilmiştir. X_n/D_j 'in aynı değerinde ancak $Z_n/D_j = 2$ ve $Z_n/D_j = 3$ iken nispeten daha yüksek ortalama Nusselt sonuçları elde edilmiştir. Nitekim Tablo 4.1'de verilen alan ortalama Nusselt sayılarına bakılırsa, en yüksek ortalama Nusselt sayısının $Z_n/D_j = 2$ ve $X_n/D_j = 4$ için elde edildiği görülmektedir. Bu durum ele

alınan iki farklı Reynolds sayısı için de sağlanmıştır. Orifis plaka ile hedef plaka arasındaki mesafe uzadıkça, soğutma etkisinin ve ısı transferinin azalacağı şaşırılacak bir sonuç değildir.

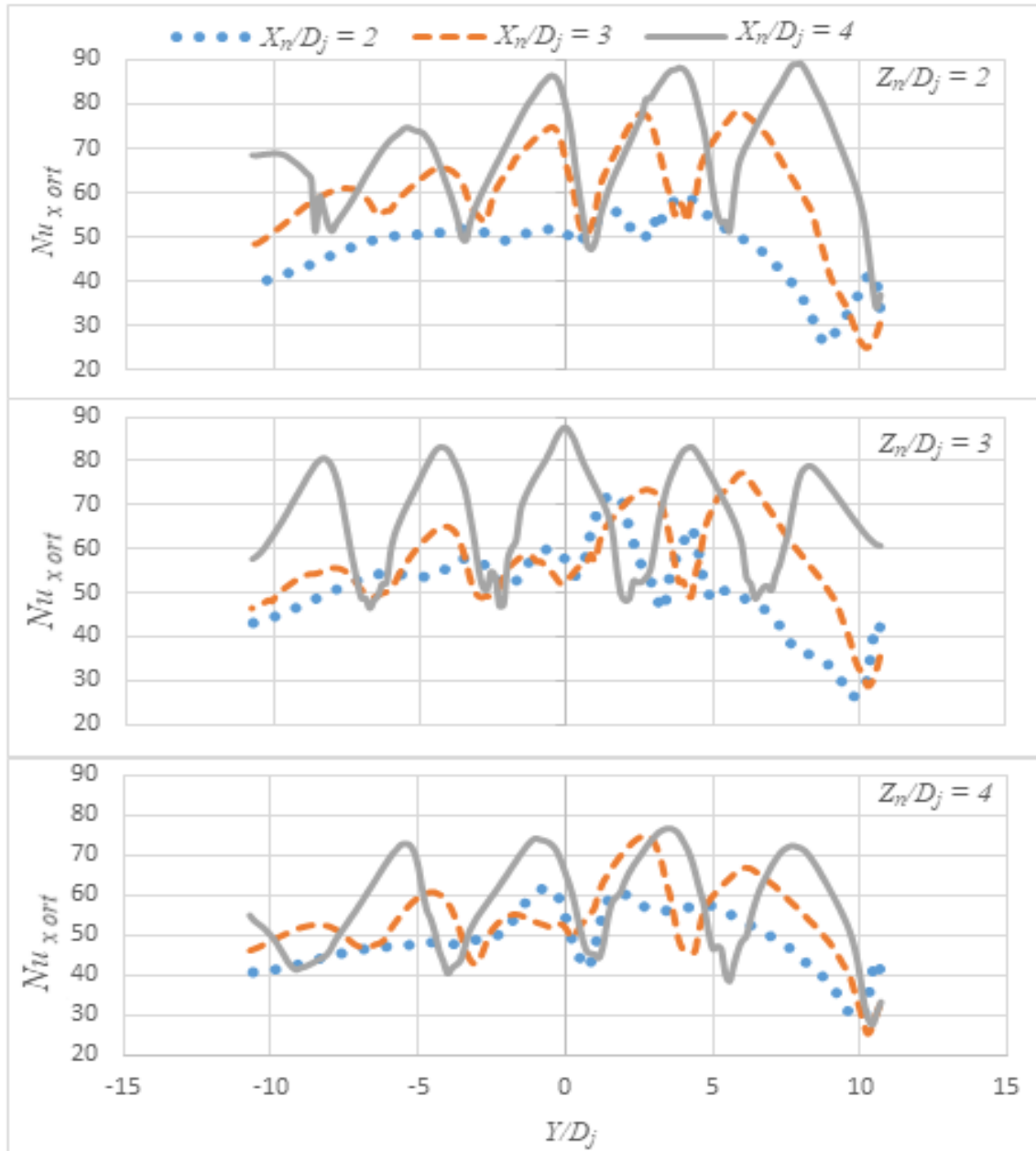
Şekil 4.1 ve 4.2’de jetler arası mesafe $X_n/D_j = 2$ iken, tüm Z_n/D_j değerlerinde üniform Nusselt sayısı (durma noktası etkisinin olmaması durumu) oluştuğu görülmektedir. $X_n/D_j = 3$ ve 4 olması durumlarında tüm Z_n/D_j değerlerinde durma noktasının belirgin hale geldiği gözlenmiştir (Şekil 4.1- 4.4). $Re = 20000$ için de benzer durum tespit edilmiştir.

Tablo 4.1. Düz plakada maksimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı

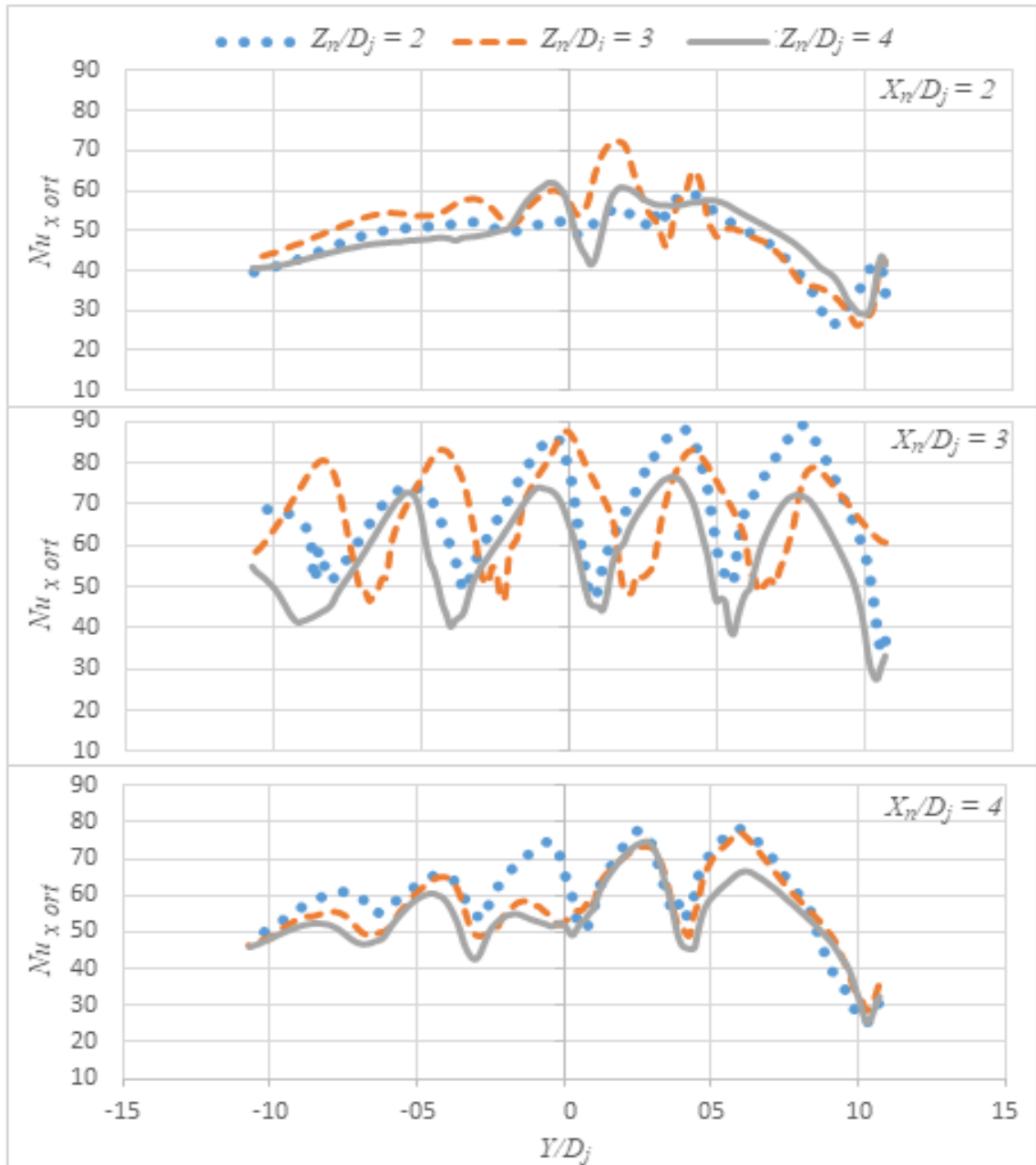
Z_n/D_j	X_n/D_j	$Re = 8565$	$Re = 20000$	Ortalama Nusselt artışı (%)
2	2	26.0	46	77
	3	32.5	57.5	77
	4	42.3	67.3	59
3	2	24.2	48.8	102
	3	27.2	55.6	104
	4	31.7	54.6	72
4	2	26.4	47.6	80
	3	27.7	52.5	90
	4	38.7	55.6	44

Şekil 4.3’te $Re = 20000$ iken, X_n/D_j değeri arttıkça çarpma bölgesinde ortalama Nusselt sayısının daha belirginleştiği görülmektedir. Nitekim $X_n/D_j = 4$ için durma noktası Nusselt sayısı en yüksek, $X_n/D_j = 3$ için orta, $X_n/D_j = 2$ için ise minimum değerini almıştır. Bu durum tüm Z_n/D_j değerleri için benzer karakter göstermiştir. Ayrıca Tablo 4.1’den de X_n/D_j değerinin 2, 3, 4 şeklinde arttıkça alan ortalama Nusselt sayısının da artış gösterdiği görülmektedir. Her iki Reynolds sayısında artan jetler arası mesafede durma noktası etkisinin güçlendiği anlaşılmaktadır. Nitekim Tablo 4.1’de tüm Z_n/D_j değerleri için artan jet mesafesi ile ısı transferi artmıştır. Örneğin sabit $Z_n/D_j = 2$ için $X_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde arttıkça alan ortalama Nusselt sayısı $Re = 8565$ için 26, 32.5, 42.3 şeklinde; $Re = 20000$ için ise sırasıyla 46, 57.5, 67.3, şeklinde artmıştır. $Z_n/D_j = 3$ için $X_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde arttıkça alan ortalama Nusselt sayısı $Re = 8565$ için 24.2, 27.2, 31.7 şeklinde; $Re = 20000$ için ise sırasıyla 48.8, 55.6, 54.6, şeklinde artmıştır. Son olarak $Z_n/D_j = 4$ için $X_n/D_j = 2, 3,$

4 şeklinde arttıkça alan ortalama Nusselt sayısı $Re = 8565$ için 26.4, 27.7, 38.7 şeklinde; $Re = 20000$ için ise sırasıyla 47.6, 52.5, 55.6 şeklinde artmıştır. Benzer çalışmalar da bu durumu doğrulamaktadır. Nitekim 3x3 çoklu çarpan jetin düz bir duvara çarpma durumunun deneysel ve sayısal olarak incelendiği benzer literatür çalışmasında, jetler arası boyutsuz mesafenin azalması durumunda çapraz akış etkisinin ısı transferini azalttığı, jetler arası mesafenin $X_n/D_j = 3-5$ aralığında olması durumunda jetler arası etkileşimi azaltması bakımından daha iyi bir ısı transferi oluşturacağı belirtilmiştir (Chougule et al. 2011)



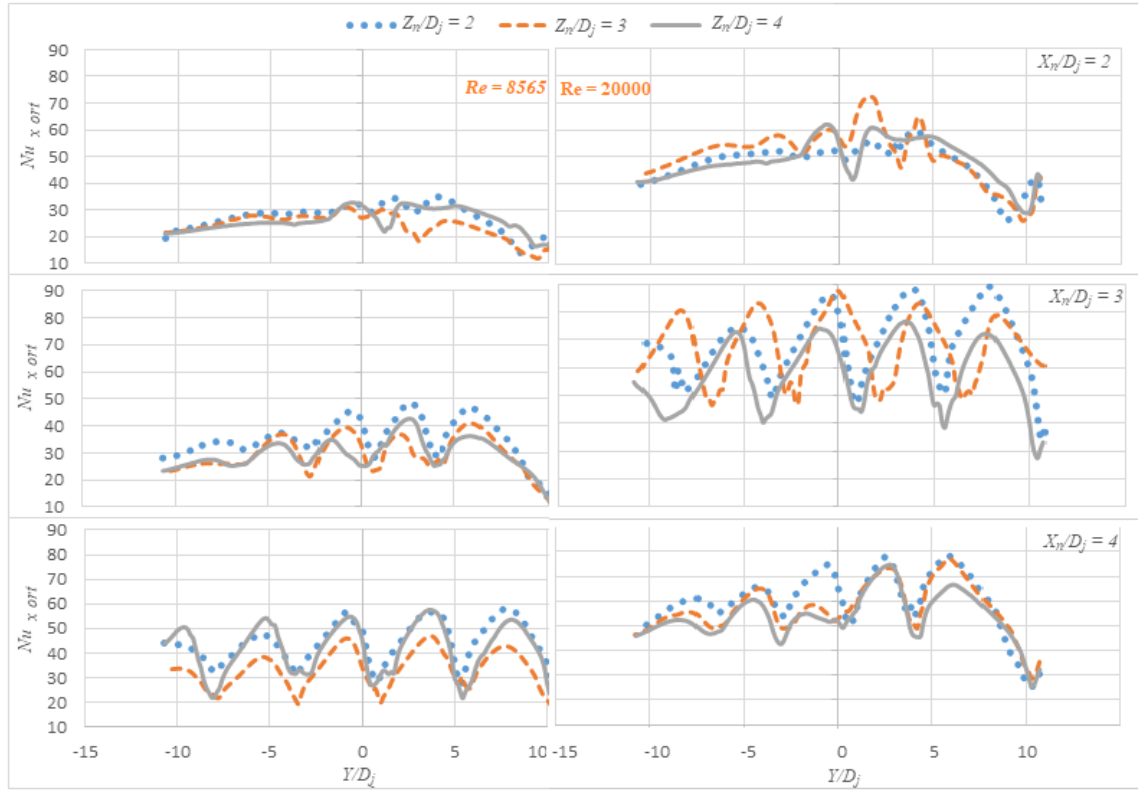
Şekil 4.3. Düz plaka maksimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $Re = 20000$



Şekil 4.4. Düz plakada maksimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $Re = 20000$

$Re = 20000$ için elde edilen sonuçlara göre Şekil 4.4'te en düşük ısı transferinin $Z_n/D_j = 4$ 'te elde edildiği görülmektedir. Bu durum esas alınan tüm jet mesafeleri için de benzer çıkmıştır. Tablo 4.1'den $Re = 20000$ için en yüksek ısı transferinin $Z_n/D_j = 2$ 'de elde edildiği; $Z_n/D_j = 3$ ve 4'te sonuçların nispeten azaldığı görülmektedir.

Genel olarak düz plakada maksimum çapraz akış grafiklerine göre $X_n/D_j = 3$ ve 4' te $Z_n/D_j = 2$ ve 3'te nispeten daha yüksek ısı transfer durumu elde edilmiştir. Ele alınan parametreler kapsamında jetler arası mesafe arttıkça ısı transferi artarken, orifis- hedef plaka arası mesafe arttıkça ısı transferinde düşüş olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.5. Düz plakada maksimum çapraz akışta Reynolds sayısının etkisi

Şekil 4.5'te farklı Reynolds sayısının etkisinin görülebilmesi amaçlı olarak $Re = 8565$ ve $Re = 20000$ için sonuçlar karşılaştırılmıştır. Maksimum çapraz akış için elde edilen farklı Reynolds sonuçlarına bakılırsa, artan Reynolds sayısında ortalama Nusselt sayısının önemli derecede arttığı gözlenmiştir. Tablo 4.1'e göre tüm X_n/D_j ve Z_n/D_j değerleri için artan Reynolds sayısı ile ortalama Nusselt sayısının artış gösterdiği görülmektedir. Reynolds sayısının 8565'ten 20000'ye değiştirilmesi ile $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2, 3, 4$ parametreleri için ortalama Nusselt sırasıyla %77, 77, 59 oranlarında değişmiştir. Benzer şekilde $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2, 3, 4$ parametreleri için artış sırasıyla %102, 104, 72'dir. Son olarak, $Z_n/D_j = 4$ 'te, $X_n/D_j = 2, 3, 4$ parametreleri için artış yüzdesi sırasıyla % 80, 90, 44'tir. Her iki Reynolds sayısı için maksimum ortalama Nusselt sayısı $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$ parametrelerinde elde edilmiştir. Dolayısı ile maksimum çapraz akışta düz plakada plakalar

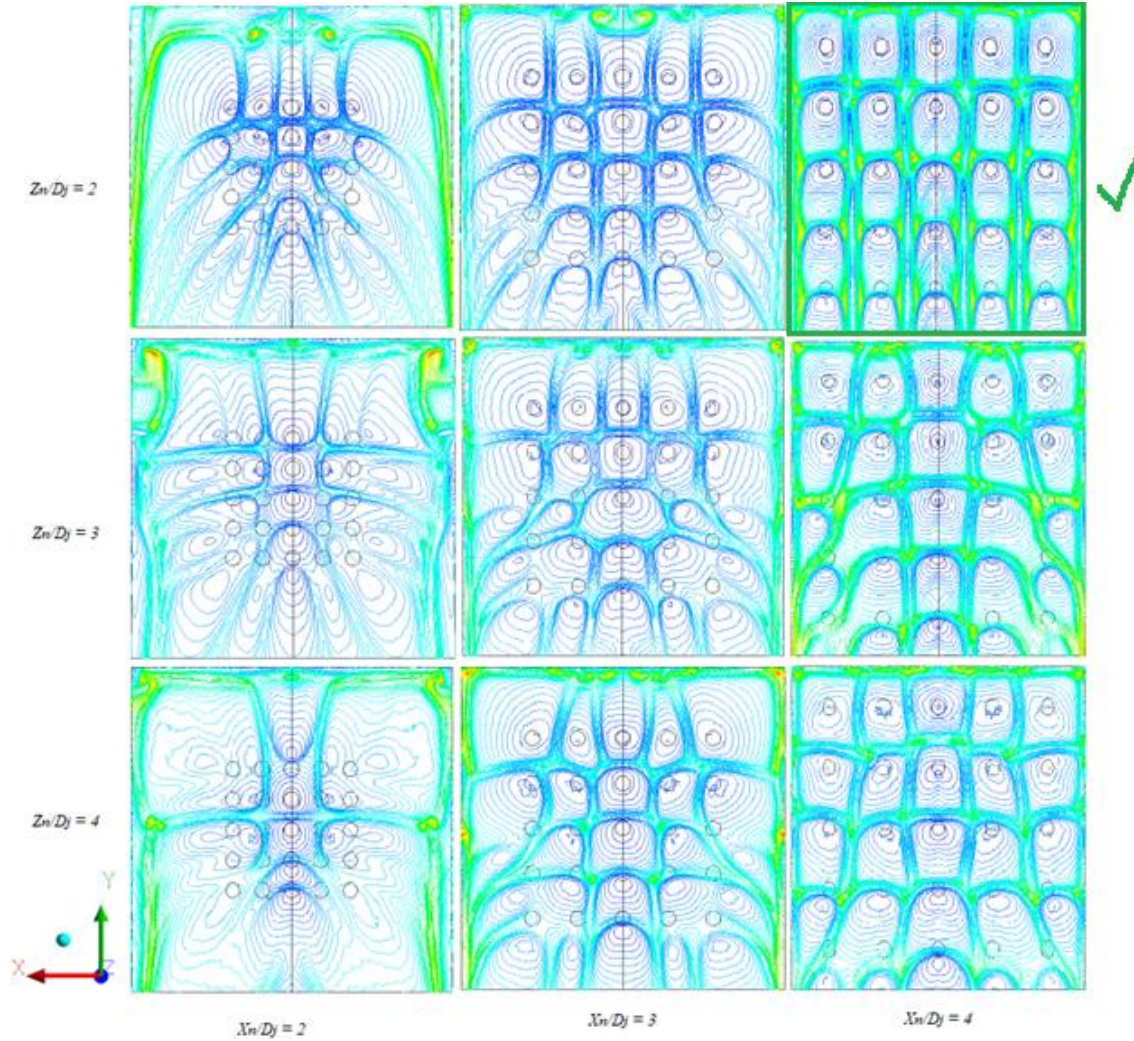
arası mesafe minimum ($Z_n/D_j = 2$), jetler arası mesafe maksimum iken ($X_n/D_j = 4$) en iyi ısı transferi sağlanmıştır.

Jetler arası mesafe $X_n/D_j = 2$ 'de yani yoğun jet durumunda en düşük ısı transferi meydana gelmiştir. Bu durum daha önce de belirtildiği gibi, birbirine daha yakın olan jetler arası etkileşimin maksimum olması ve bu etkileşimin ısı transferini olumsuz etkilemesinden kaynaklanmıştır. Jetler arası mesafe arttıkça bu etkileşim azaldığından ısı transferi iyileşmiştir. Nitekim Yong et al. (2015) yoğun jetlerde meydana gelen jet etkileşimlerinin, jet akışlarının hedef plakaya nüfuziyetini azalttığını ve çarpmadan ziyade kanal akışı meydana geldiğini dolayısıyla ısı transferinin bu durumdan olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir. Oysa jetler arası mesafe arttıkça çarpma etkisi de belirginleştikinden ısı transferi de iyileşmiştir. Öte yandan aynı çalışmada sabit jet mesafesinde plakalar arası mesafe azaldıkça ısı transferi iyileşmiştir. Nitekim hem referans çalışmada hem de mevcut çalışmada en iyi ısı transferi $Z_n/D_j = 2$ 'de elde edilmiştir.

Şekil 4.6 'da düz plaka maksimum çapraz akışta çarpan jet sonrası sıcaklık dağılımlarını gösteren akım çizgileri görülmektedir. Herhangi bir Z_n/D_j değerinde $X_n/D_j = 2$ ve 3 için genel olarak plaka merkez bölgesinde düşük sıcaklık, plaka kenarlarında ise yüksek sıcaklık değeri görülmektedir. Daha yoğun jet etkisinden dolayı kanal akışı hâkim olmuş ve merkez bölgede iyi bir ısı transferi elde edilirken kenarlarda ısı transferi zayıf kalmıştır. Görüldüğü gibi bu parametrelerde üniform bir ısı transferinden bahsedilemez. Böylece, kanal akışı etkisi en çok $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$ parametreleri için tespit edilirken, en üniform görünümlü akış $X_n/D_j = 4$ 'te gözlenmiştir. Herhangi bir Z_n/D_j değerinde $X_n/D_j = 4$ olması durumunda jetler plaka geneline dağıldığı için plaka genelinde daha üniform ve daha yüksek ısı transferi sağlanmıştır. $X_n/D_j = 3$ için nispeten üniform ve yüksek Nusselt değerleri elde edilmiştir. En düşük Nusselt değeri ise yoğun jet durumlarında ($X_n/D_j = 2$) elde edilmiştir.

Şekil 4.6'da görülen diğer belirgin özellik ise çapraz akış etkisidir. Akış alanının çıkışına yakın bölgede jet merkezlerine çarpması gereken çoklu jetler, jet merkezlerinin altında çarpma gerçekleştirmiştir. Bu durum ise çapraz akış etkisinin bir sonucudur. Çünkü akış alanının çıkışına yaklaştıkça çapraz akış etkisi büyür, hedef plakaya çarpacak olan bir sonraki çarpan jet, daha önce çarpmış olan üst jetin akışından etkilenir ve bu etkileşim

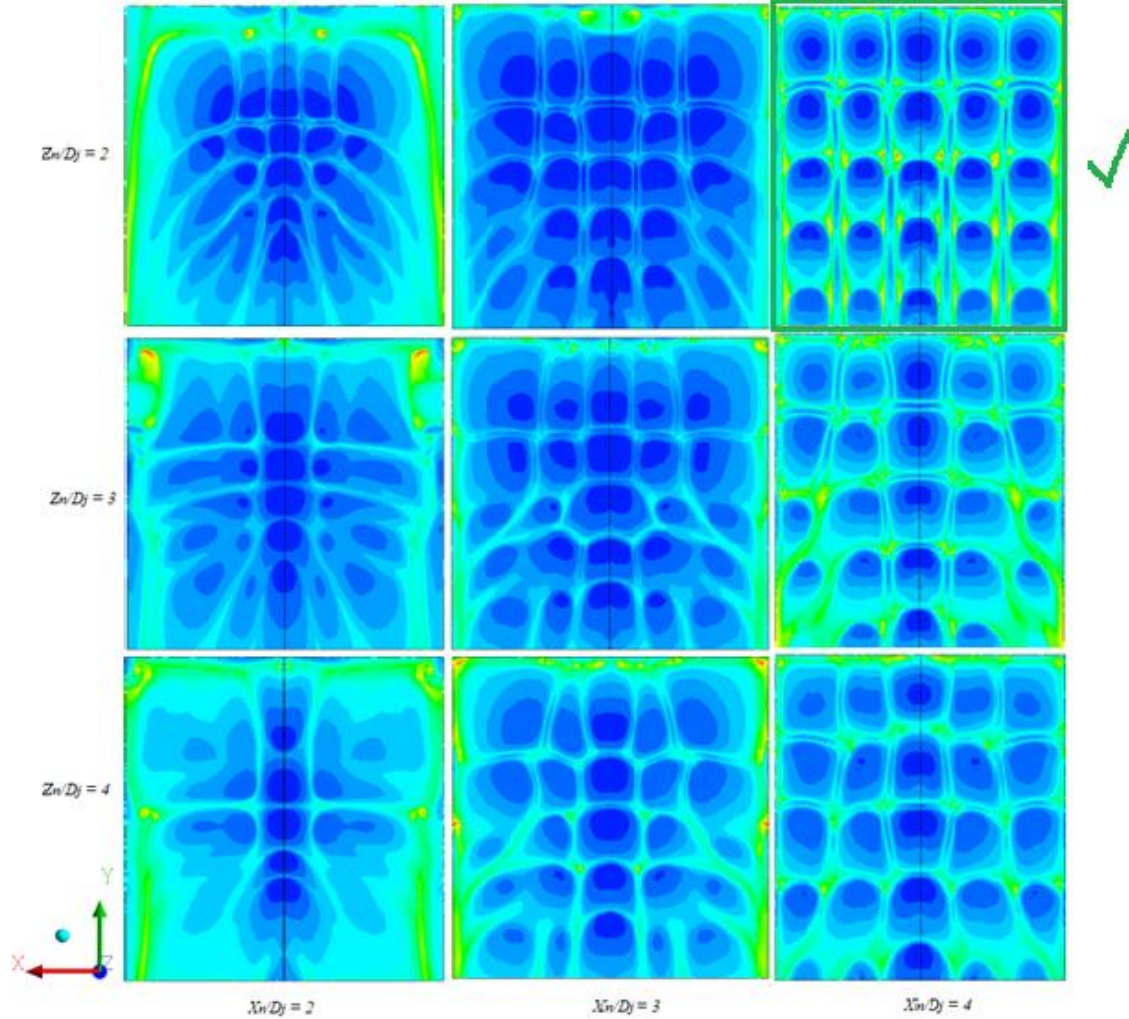
çıkışa yaklaştıkça büyür. Şekil 4.7’de aynı parametreler için düz plakada çapraz akış kontur diyagramları verilmiştir. Kontur diyagramlarında da açıklanan benzer durumlar net bir şekilde görülebilir.



Şekil 4.6. Düz plakada maksimum çapraz akışta sıcaklık dağılımlı akım çizgileri, $Re = 20000$

Şekil 4.7 incelendiğinde, $Z_n/D_j = 2$ ’de çarpan jetlerin plakaya nüfuziyetlerinin $Z_n/D_j = 3$ ve 4’e göre daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla orifis ve hedef plakalar birbirine yaklaştıkça çarpan çoklu jetlerin plakaya nüfuziyetleri artmaktadır. Ayrıca yüksek jet mesafelerinde çarpan çoklu jetlerin durma bölgesindeki etkisi daha belirgin iken, düşük jet mesafelerinde ($X_n/D_j = 2$ ve 3) çoklu jetlerin hedef plakaya çarpma bölgesi daha siliktir. Bu durum temel olarak birbirine yaklaşan jetlerde hedef plakaya çarpan akışkanın diğer

jetlerden gelen akışkandan daha fazla etkilenmesinden kaynaklanmaktadır. Bu jet etkileşimleri ilgili parametreler için ısı transferini düşürmüştür. Nitekim daha öncede bahsedildiği gibi Tablo 4.1'den en düşük ortalama Nusselt sayısı, en yakın jet mesafesi olan $X_n/D_j = 2$ için elde edilirken; en yüksek Nusselt değeri ise en uzak jet mesafesi olan $X_n/D_j = 4$ için elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Düz plakada maksimum çapraz akışta sıcaklık dağılımlı kontur diyagramları, $Re = 20000$

Düz plaka maksimum çapraz akış genel sonuçlarına göre ele alınan tüm Z_n/D_j parametreleri için ($Z_n/D_j = 2, 3, 4$), Z_n/D_j değeri sabit tutulduğunda artan X_n/D_j değeri ile birlikte ortalama Nusselt sayısı da artmıştır. Düz plakada birim alanda yoğunlaştırılan jetlerde komşu jet etkileşimi yoğun olacağından dolayı iki jet arasında akışkanlar çarpışarak vorteksler meydana getirmekte ve bu vorteksler ile birlikte akışkanın hedef plaka teması nispeten azalmakta dolayısıyla ısı transferi de olumsuz etkilenmektedir. Dolayısıyla ele alınan sabit

Z_n/D_j için jetler arası mesafe artırılarak ısı transferi iyileştirilebilmektedir. Z_n/D_j etkisine bakıldığında ise en iyi sonuçların $Z_n/D_j = 2$ 'de elde edildiği görülmektedir.

Tablo 4.1'den de, $Z_n/D_j = 3$ ve 4'te sonuçların birbirine yakın olduğu, ancak $Z_n/D_j = 2$ 'de daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum artan plaka mesafelerinde (Z_n/D_j) akışkan hedef plakaya çarpmadan önce ayrılmalara maruz kalmakta dolayısıyla Z_n/D_j değeri arttıkça akış ayrılmaları da artacağından dolayı plakaya temas edecek akışkan debisi azalmakta ve bunun doğal sonucu olarak ısı transferi azalmaktadır. Kanal akışının maksimum olduğu parametrelerde ($Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$) ısı transferi minimum çıkmıştır. Şekil 4.6, 4.7 ve Tablo 4.1'den görüleceği gibi en iyi ısı transferi $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$ 'te elde edilmiştir. Ayrıca Re sayısının artışıyla birlikte ısı transferi önemli derecede artış göstermiştir.

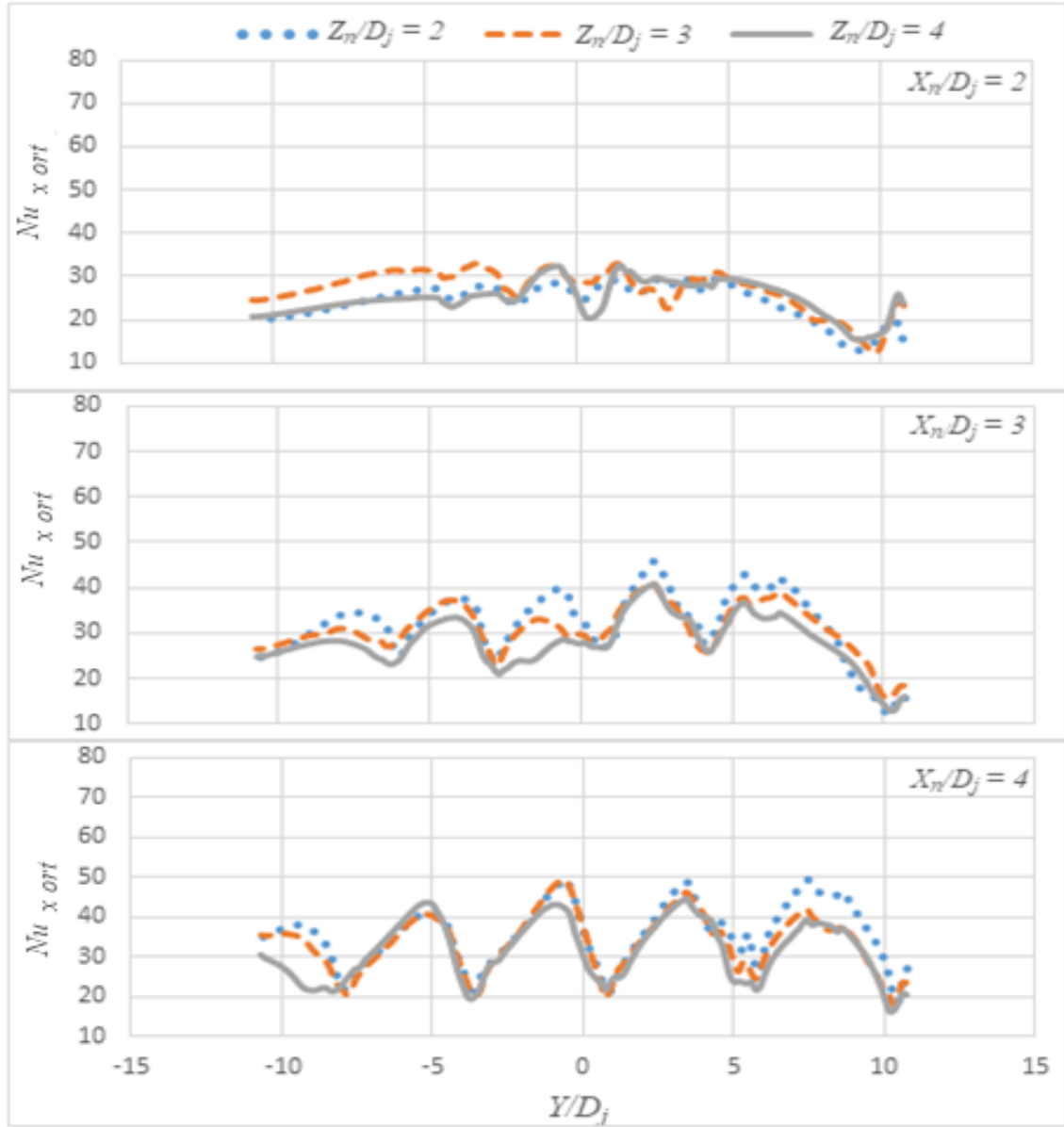
4.1.2. Çoklu Jetin Tümsek Şekilli Plakaya Çarpması

Tümsek şekilli bombeler oluşturulan plakaya, çoklu çarpan jetin maksimum çapraz akışla çarpması $Re = 8565$ için Şekil 4.8 ve 4.9'da, $Re = 20000$ için Şekil 4.10' ve 4.11'de verilmiştir.

$Re = 8565$ için tüm Z_n/D_j değerlerinde X_n/D_j değerinin $X_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde artması ile durma noktaları daha belirgin hale gelmiştir. Nitekim $X_n/D_j = 2$ için durma noktasında sıra ortalamalı Nusselt sayısı belirgin değil iken, $X_n/D_j = 3$ ve $X_n/D_j = 4$ için durma noktalarında Nusselt sayısı maksimum değerini almıştır. Bu durum esas alınan tüm Z_n/D_j değerleri için benzer karakter göstermiştir. $Z_n/D_j = 2$ ve 3 için yüksek jet mesafelerinde ($X_n/D_j = 3, 4$ 'te) ortalama Nusselt sayısı nispeten daha yüksekken $Z_n/D_j = 4$ 'de en düşük değerdedir. Bu durum düz plaka ile benzer özellik göstermiştir. Nitekim çapraz akış düz plaka sonuçların da en düşük Nusselt sayısı $Z_n/D_j = 4$ için elde edilirken, $Z_n/D_j = 2, 3$ 'te ve $X_n/D_j = 3, 4$ 'te daha yüksek değer almıştır. Bu durumun olası sebebi düz plakada detaylı olarak açıklanmıştır.

Şekil 4.9'da $Re = 8565$ için her X_n/D_j için değişen Z_n/D_j değerinde sonuçlar benzer karakterde çıkmıştır. Örneğin $X_n/D_j = 2$ 'nin hemen hemen tüm Z_n/D_j değerlerinde sonuçlar benzer karakteristik göstermiştir. Yani $X_n/D_j = 2$ 'nin tüm Z_n/D_j değerlerinde durma bölgesi

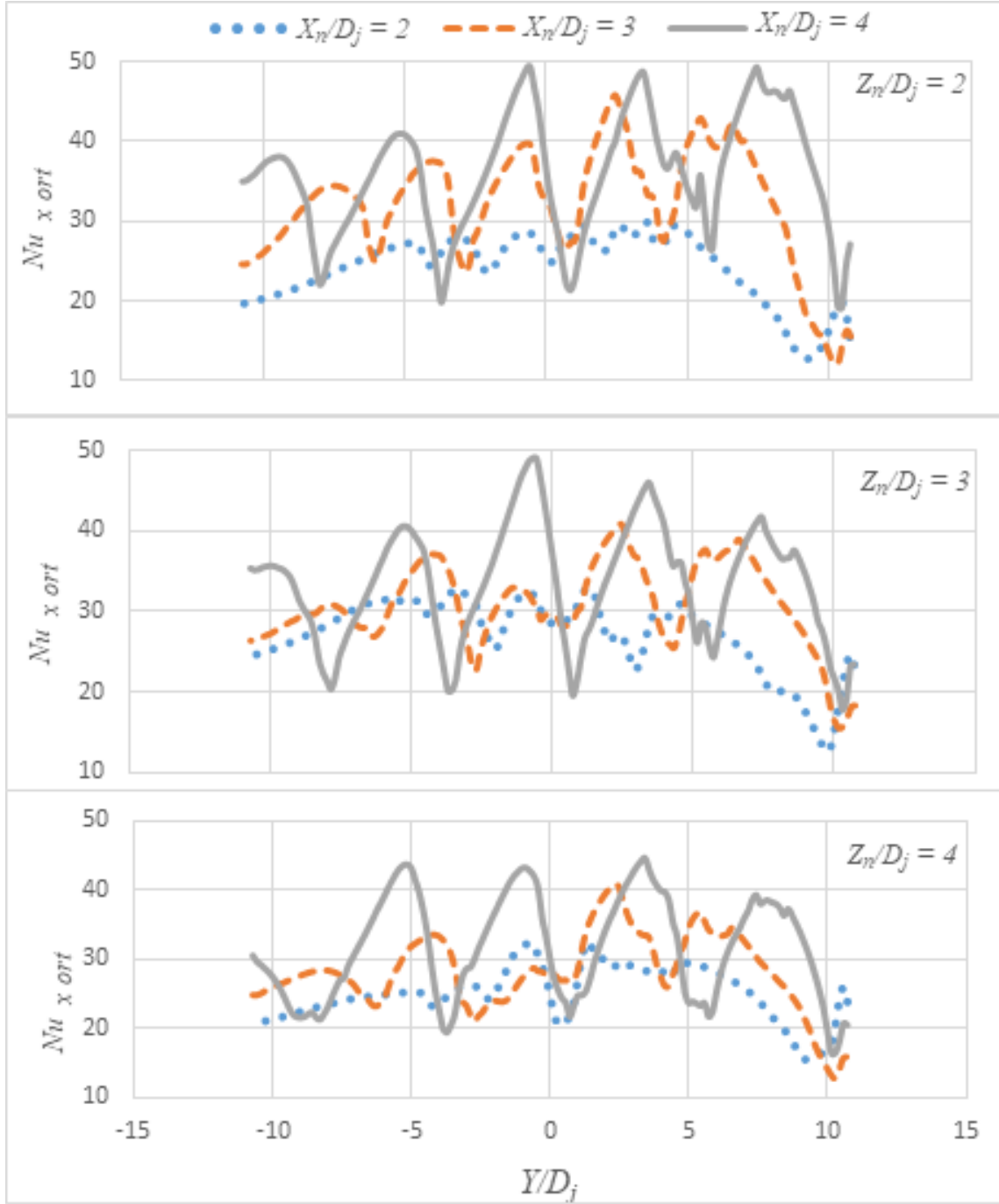
belirgin olmayıp, plaka genelinde ortalama Nusselt sayısı birbirine yakın çıkmıştır. Plaka orta bölgesinde hafif dalgalanma görülse de plaka genelinde durma noktaları fazla belirgin değildir.



Şekil 4.8. Tümsek şekilli plaka maksimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $Re = 8565$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

Şekil 4.9’da durma noktalarında maksimum ısı transfer tepe noktalarının oluşumu Z_n/D_j parametresinden bağımsız olduğu, X_n/D_j parametresine bağlı olduğu görülmektedir. $Re = 20000$ için tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akış sonuçları Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de görülmektedir. $Re = 20000$ için tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akış

sonuçlarının $Re = 8565$ sonuçları ile benzer olduğu anlaşılmaktadır. Her iki Reynolds sayısı için de jetler arası boyutsuz mesafenin X_n/D_j en düşük değerinde ($X_n/D_j = 2$) durma noktası etkisi azalırken, en yüksek değerinde ($X_n/D_j = 4$) durma noktası etkisi belirginleşmekte ve Nusselt sayısı maksimum değerini almaktadır. Öte yandan Şekil 4.10



Şekil 4.9. Tümssek şekilli plakada, maksimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $Re = 8565$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

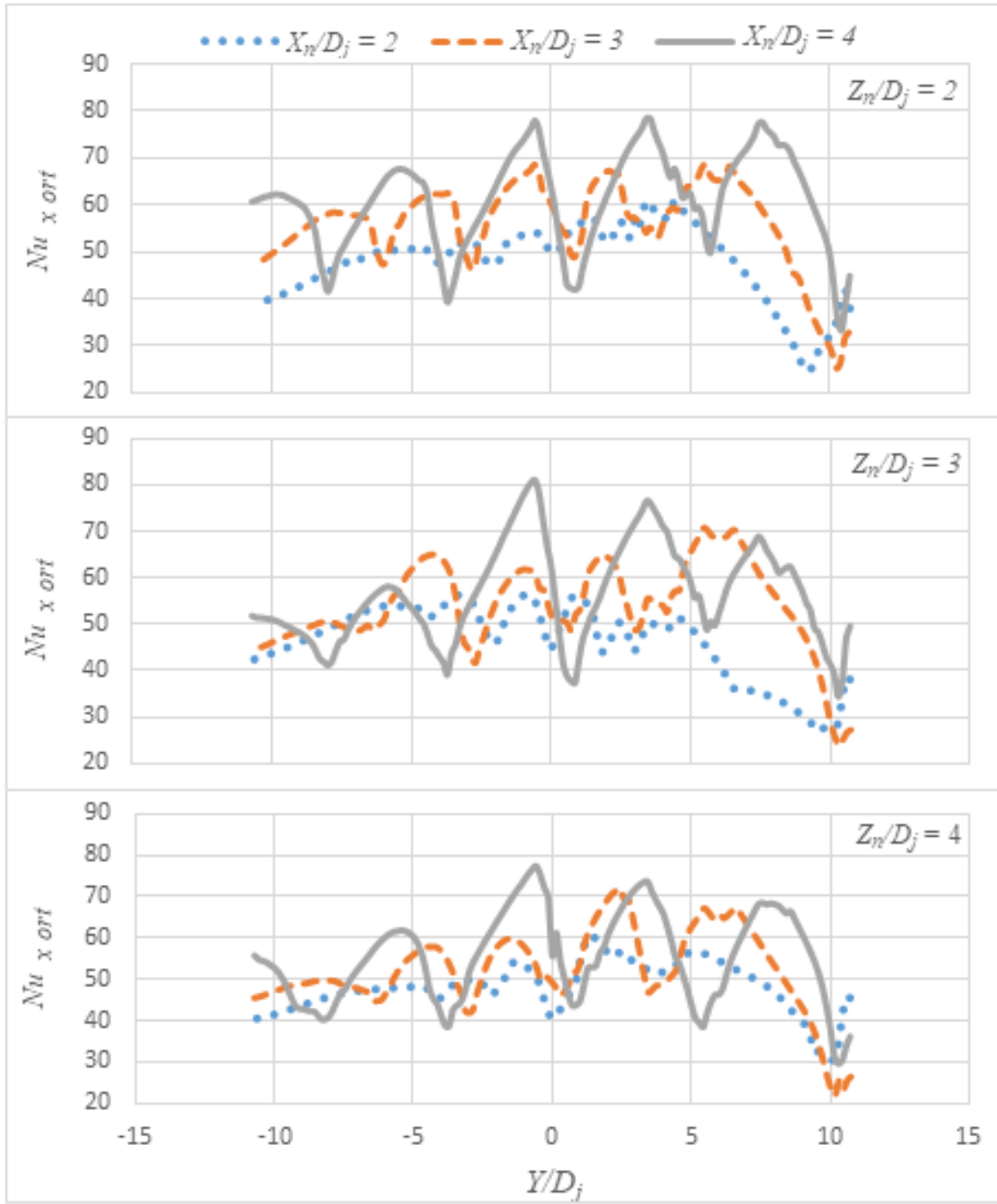
Tablo 4.2. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta alan ortalamalı Nusselt sayısı

$D_d/D_j = 1, t/D_d = 0.25$				
Z_n/D_j	X_n/D_j	$Re = 8565$	$Re = 20000$	Ortalama Nusselt artışı (%)
2	2	24.8	47	89.5
	3	30.4	54.6	79.6
	4	35.1	60.1	71.2
3	2	26.6	45.4	70.7
	3	27.8	52.1	87.4
	4	32.4	55.6	71.6
4	2	24.7	47.3	91.5
	3	27.4	50.9	85.8
	4	30.2	52.9	75.2

ve 4.11’de değişen orifis plaka - hedef plaka (Z_n/D_j) arası mesafede sonuçların benzer karakterde olduğu, ancak Tablo 4.2’den de anlaşılabacağı gibi, artan Z_n/D_j değerlerinde ortalama ısı transferinin azaldığı anlaşılmaktadır. Nitekim Şekil 4.11’de herhangi X_n/D_j değeri için tüm Z_n/D_j değerlerinin hemen hemen çakıştığı görülmektedir. $Re = 8565$ sonuçlarına benzer olarak yüksek jet mesafeleri ($X_n/D_j = 3$ ve 4) ve düşük plaka mesafelerinde ($Z_n/D_j = 2$ ve 3) daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.2’de maksimum çapraz akış için tümsek şekilli plakanın sayısal analiz sonuçları farklı X_n/D_j , Z_n/D_j ve farklı Reynolds sayısı için sunulmuştur. Tabloda elde edilen alan ortalamalı Nusselt sayıları daha önce sunulan grafik sonuçları ile uyumlu çıkmıştır. Burada Z_n/D_j arttıkça ortalama Nusselt değerinin azaldığı, X_n/D_j arttıkça ortalama Nusselt değerinin arttığı görülmektedir.

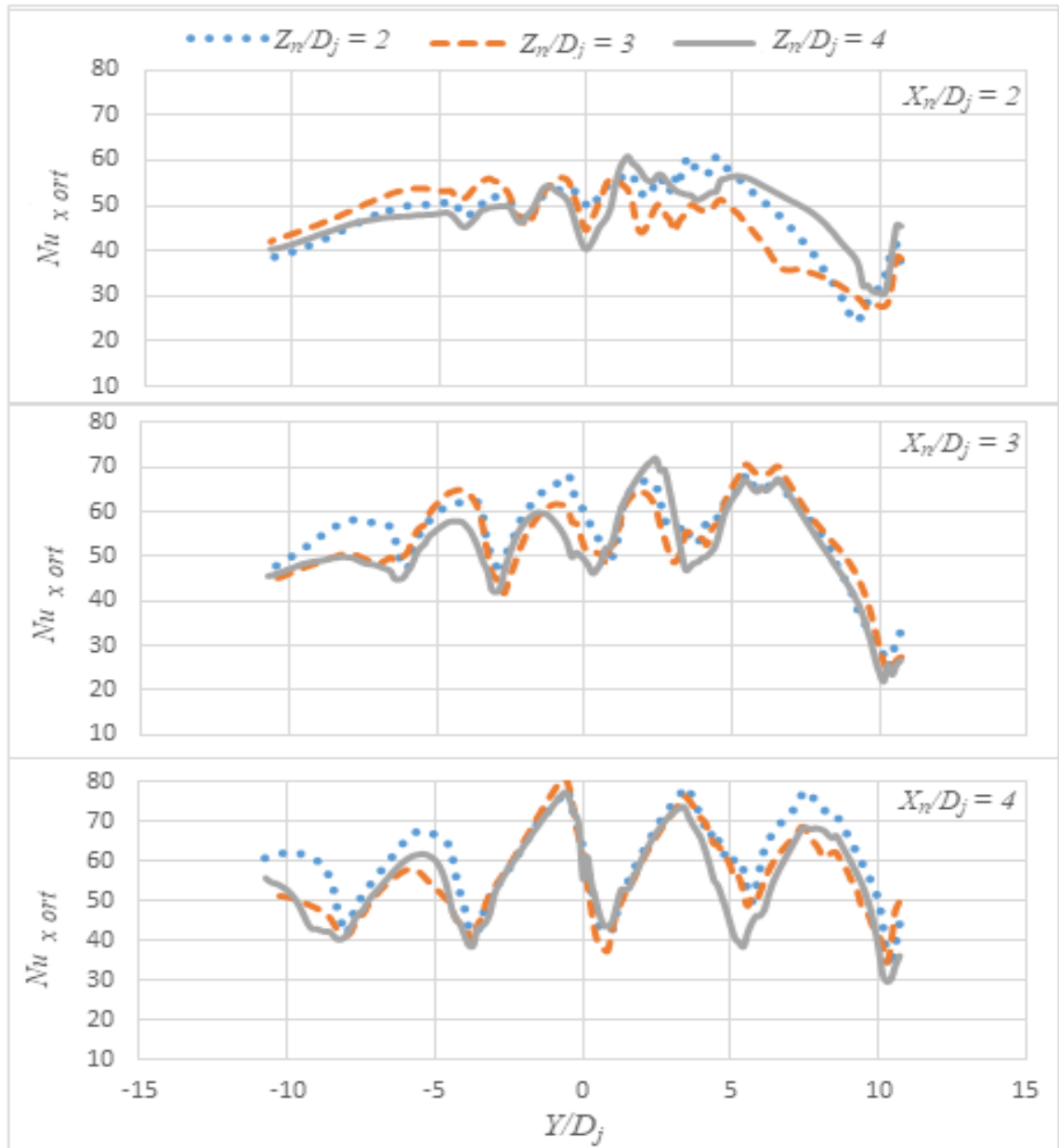
Söz konusu tabloda sabit Z_n/D_j değeri için artan jet mesafelerinde ortalama Nusselt sayısının arttığı görülmektedir. Örneğin, $Re = 8565$ ’de $Z_n/D_j = 2$ iken $X_n/D_j = 2, 3, 4$ değişimi boyunca ortalama Nusselt sayısı sırasıyla 24.8, 30.4 ve 35.1 şeklindedir. $Z_n/D_j = 3$ ve $X_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde değişirken ortalama Nusselt sayısı sırasıyla 26.6, 27.8, 32.4 şeklinde; $Z_n/D_j = 4$ ’te $X_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde değişirken ortalama Nusselt sayısı sırasıyla 24.7, 27.4, 30.2 şeklinde artış göstermiştir. Benzer bağlantı $Re = 20000$ için de görülmektedir.



Şekil 4.10. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

Benzer şekilde Z_n/D_j parametresinin ortalama Nusselt sayısını nasıl etkilediğine bakılması amaçlı olarak sabit X_n/D_j ve sabit Reynolds sayısında Z_n/D_j değişimi ile Nusselt sayıları karşılaştırılabilir. Nitekim $Re = 8565$ 'te $X_n/D_j = 2$ ve $Z_n/D_j = 2, 3, 4$ iken ortalama Nusselt sayısı sırasıyla 24.8, 26.6, 24.7 şeklindedir. $X_n/D_j = 3$ için, $Z_n/D_j = 2, 3, 4$ ise ortalama Nusselt sayısı sırasıyla 30.4, 27.8, 27.4'tür. $X_n/D_j = 4$ ve $Z_n/D_j = 2, 3, 4$ için ortalama

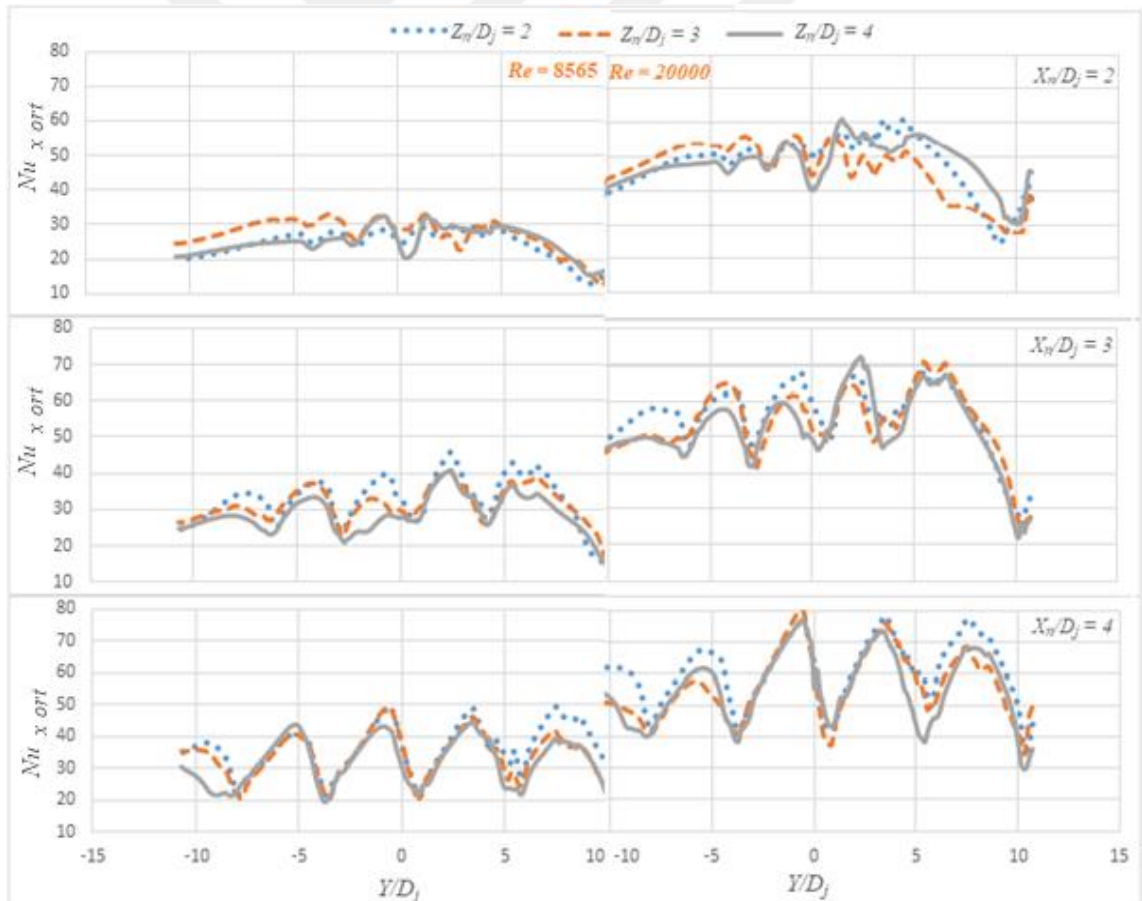
Nusselt sayısı sırasıyla 35.1, 32.4, 30.2 şeklinde azalma göstermiştir. Aynı tablodan $Re = 20000$ için de benzer sonuca varılabilir. Dolayısıyla düz plakada olduğu gibi tümsek şekilli plakada da Reynolds sayısından bağımsız olarak en yüksek ortalama Nusselt sayısı $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$ olması durumunda elde edilmiştir. Görüldüğü gibi plakalar arası mesafenin azalması ve jetler arası mesafenin artması ile ısı transferi artmıştır. Bu durum Reynolds sayısından bağımsız olmuştur. Nitekim söz konusu durum her iki Reynolds sayısı için de



Şekil 4.11. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

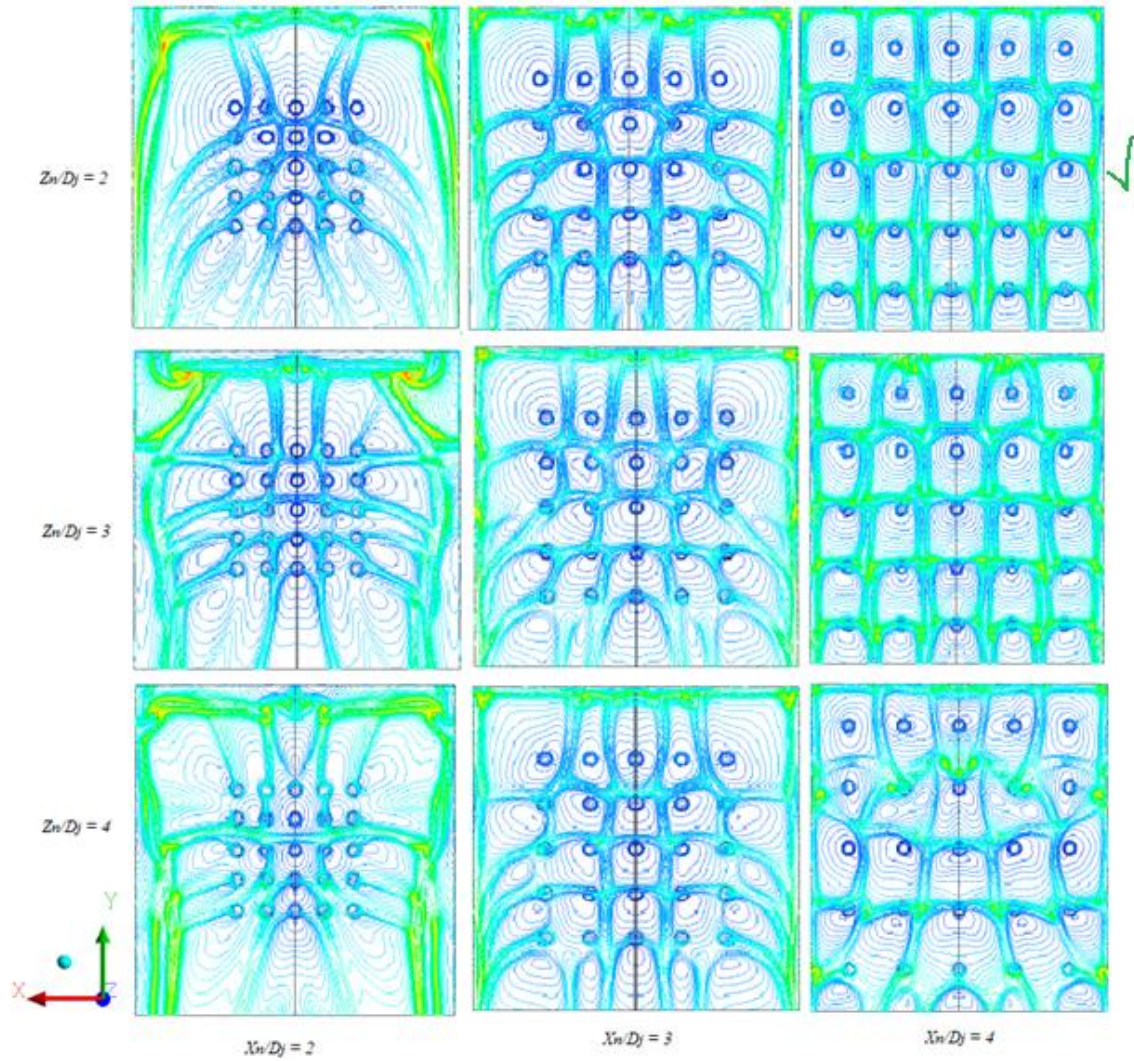
geçerlidir. Aynı tablodan Reynolds sayısına bakıldığında ise tüm X_n/D_j ve Z_n/D_j parametrelerinde ortalama olarak %80 dolaylarında Nusselt artışı sağlandığı görülmektedir.

Şekil 4.12’de tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta Reynolds sayısının etkisinin görülmesi amaçlı olarak Reynolds = 8565 ve 20000 için elde edilen sonuçlar farklı Z_n/D_j , X_n/D_j parametreleri için karşılaştırılmıştır. Sabit tüm X_n/D_j mesafelerinde de Reynolds sayısının 20000 şeklinde artması ile sıra ortalamalı Nusselt sayısının da artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte Reynolds sayısının bu değerlerde artış göstermesi ile sonuçların karakteristiği değişmemiştir. Sadece Nusselt sayısında artış gerçekleşmiştir. Tablo 4.2’de de Reynolds sayısının artması ile ortalama Nusselt sayısının da önemli derecede arttığından bahsedilmiştir.



Şekil 4.12. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta Reynolds sayısının etkisi, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

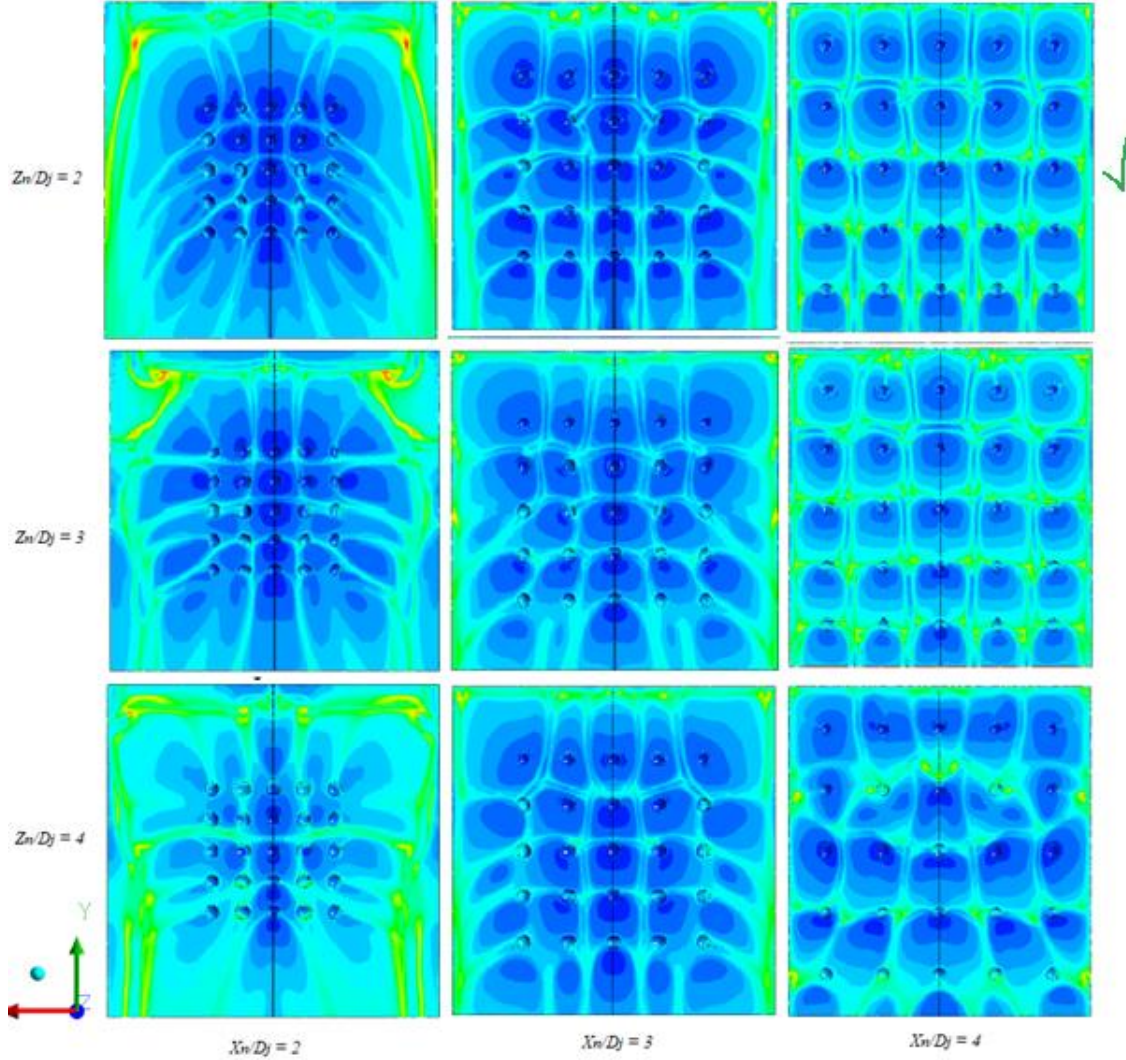
Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te düşük jet mesafelerinde kanal akışı etkisinin ön plana çıktığı görülmektedir. Özellikle $X_n/D_j = 2$ 'nin tüm Z_n/D_j değerlerinde kanal akışı barizdir. $X_n/D_j = 3$ 'ün tüm Z_n/D_j değerlerinde kanal akışı etkisi daha az belirgin, $X_n/D_j = 4$ 'ün tüm Z_n/D_j değerlerinde kanal akışı etkisi minimum düzeye inmiştir. Çarpan jetlerin çarpma etkisi artan Z_n/D_j değerlerinde azalmıştır. Örneğin $Z_n/D_j = 2$ 'de çarpma etkisi daha belirgin iken $Z_n/D_j = 3$ ve 4'te azalmış ve renk konturları daha silik çıkmıştır. Bu durumun doğal sonucu olarak artan Z_n/D_j değerlerinde ortalama Nusselt sayısı azalmıştır.



Şekil 4.13. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta sıcaklık dağılımlı akım çizgileri, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

Daha önce Tablo 4.2'de bahsedildiği gibi en yüksek ortalama Nusselt değeri düşük plaka mesafesi ($Z_n/D_j = 2$) ve yüksek jet mesafesinde ($X_n/D_j = 4$), elde edilmiştir. Bu durum şekil

4.13 ve Şekil 4.14'te de görüldüğü gibi $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$ parametrelerinde çapraz akış etkisi minimuma inmesi ve daha üniform bir akış dağılımının sağlanmasının bir sonucudur.

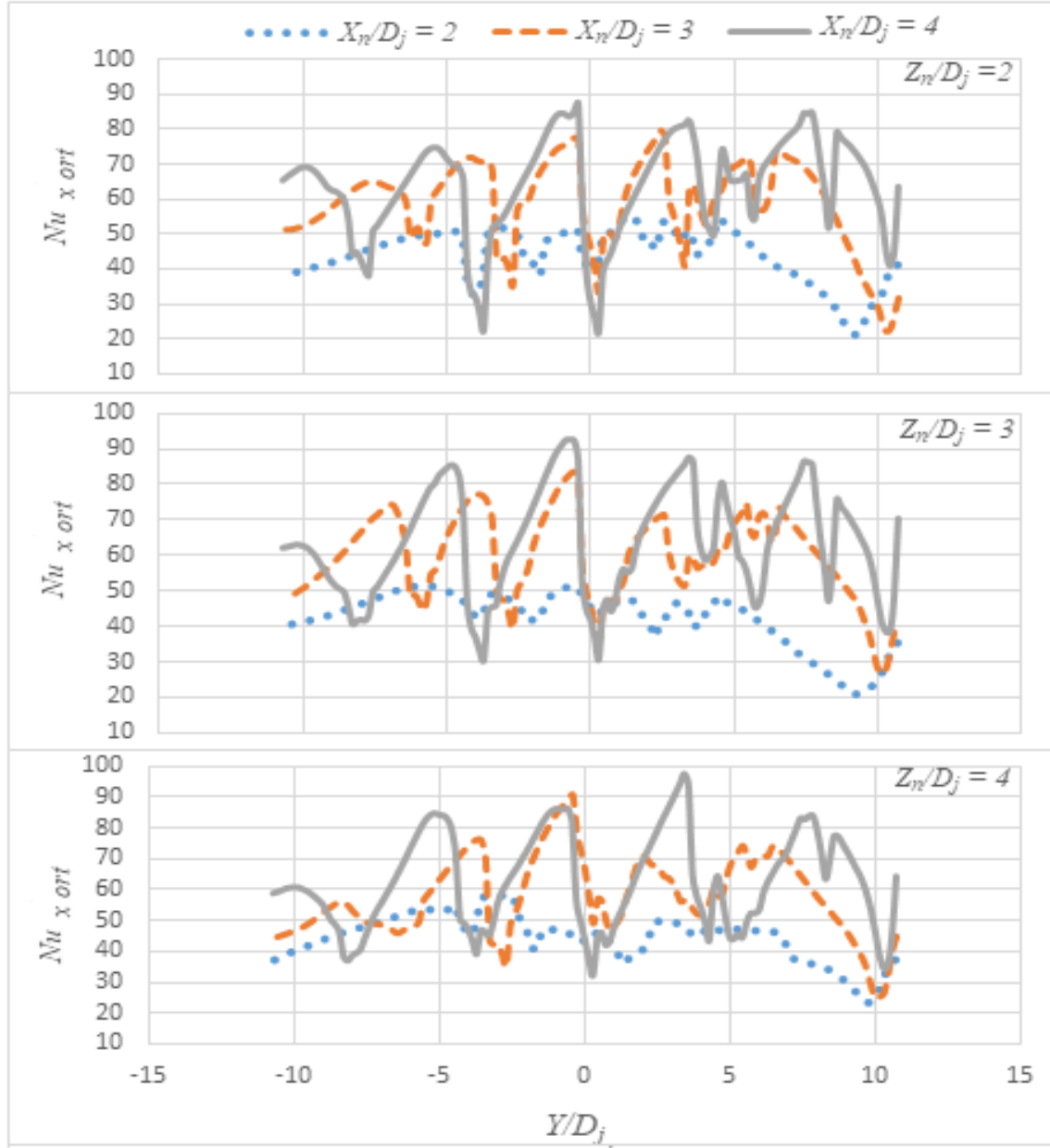


Şekil 4.14. Tümsek şekilli plaka maksimum çapraz akışta sıcaklık dağılımlı akım çizgileri, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

4.1.3. Çoklu Jetin Çukur Şekilli Plakaya Çarpması

Çukur şekilli bombe açılmış plakada maksimum çapraz akış için elde edilen sıra ortalamalı Nusselt sonuçları Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da görülmektedir. Şekil 4.15'te $X_n/D_j = 2$ 'nin tüm Z_n/D_j değerlerinde durma noktalarında Nusselt sayısının belirgin olmadığı, sonuçların daha üniform olduğu anlaşılmaktadır. $X_n/D_j = 3$ ve $X_n/D_j = 4$ için ise sonuçların birbiri ile

benzer olduğu ve tüm Z_n/D_j değerlerinde de durma noktası Nusselt sayısının maksimum değerlerini aldığı ve tepe noktaları oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 4.15. Çukur şekilli plaka maksimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$,

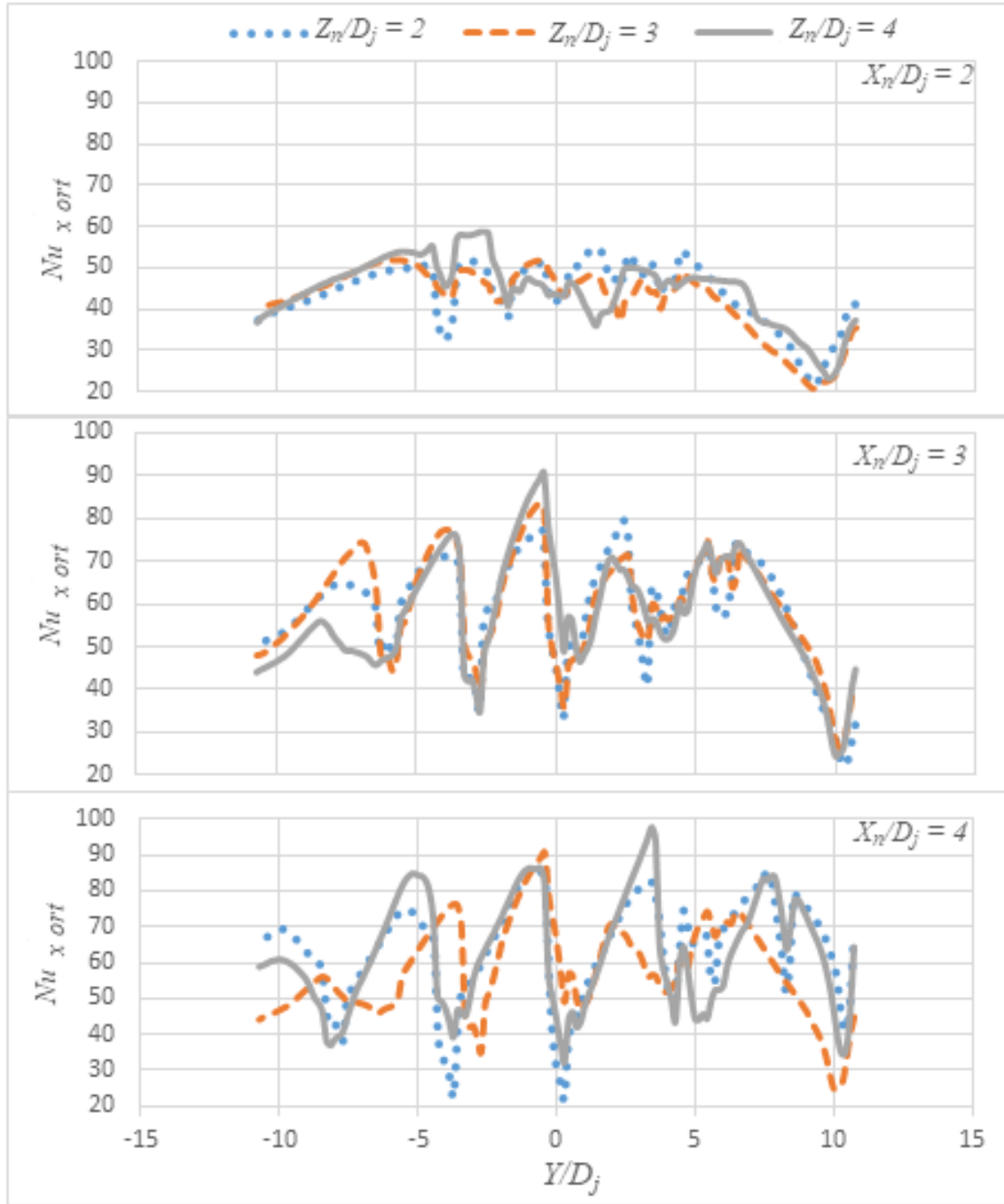
Herhangi bir Z_n/D_j değerinde yüksek jet mesafelerinde ($X_n/D_j = 3, 4$) Nusselt sayısının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum düz ve tümsek şekilli plaka sonuçlarında da mevcuttu. Özellikle Şekil 4.16'da Z_n/D_j etkisinin ihmal edilecek kadar küçük olduğu görülmektedir. Nitekim ele alınan herhangi bir X_n/D_j değerinde tüm Z_n/D_j sonuçlarının düşük farklar ile çakıştığı görülmektedir.

Tablo 4.3'te çukur şekilli plakada maksimum çapraz akış durumunda farklı X_n/D_j , Z_n/D_j parametreleri ve $Re = 20000$ için alan ortalamalı Nusselt sonuçları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi $Z_n/D_j = 2$ değerinde jetler arası mesafenin $X_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde artırılması ile ortalama Nusselt sayısı sırasıyla 43.9, 58.5, 66 şeklinde; $Z_n/D_j = 3$ için Nusselt sayısı 41.7, 59.5, 64.1 şeklinde; $Z_n/D_j = 4$ için Nusselt sayısı 43.9, 56, 61.7 şeklinde artış göstermiştir.

Tablo 4.3. Çukur şekilli plaka maksimum çapraz akışta alan ortalamalı Nusselt sayısı

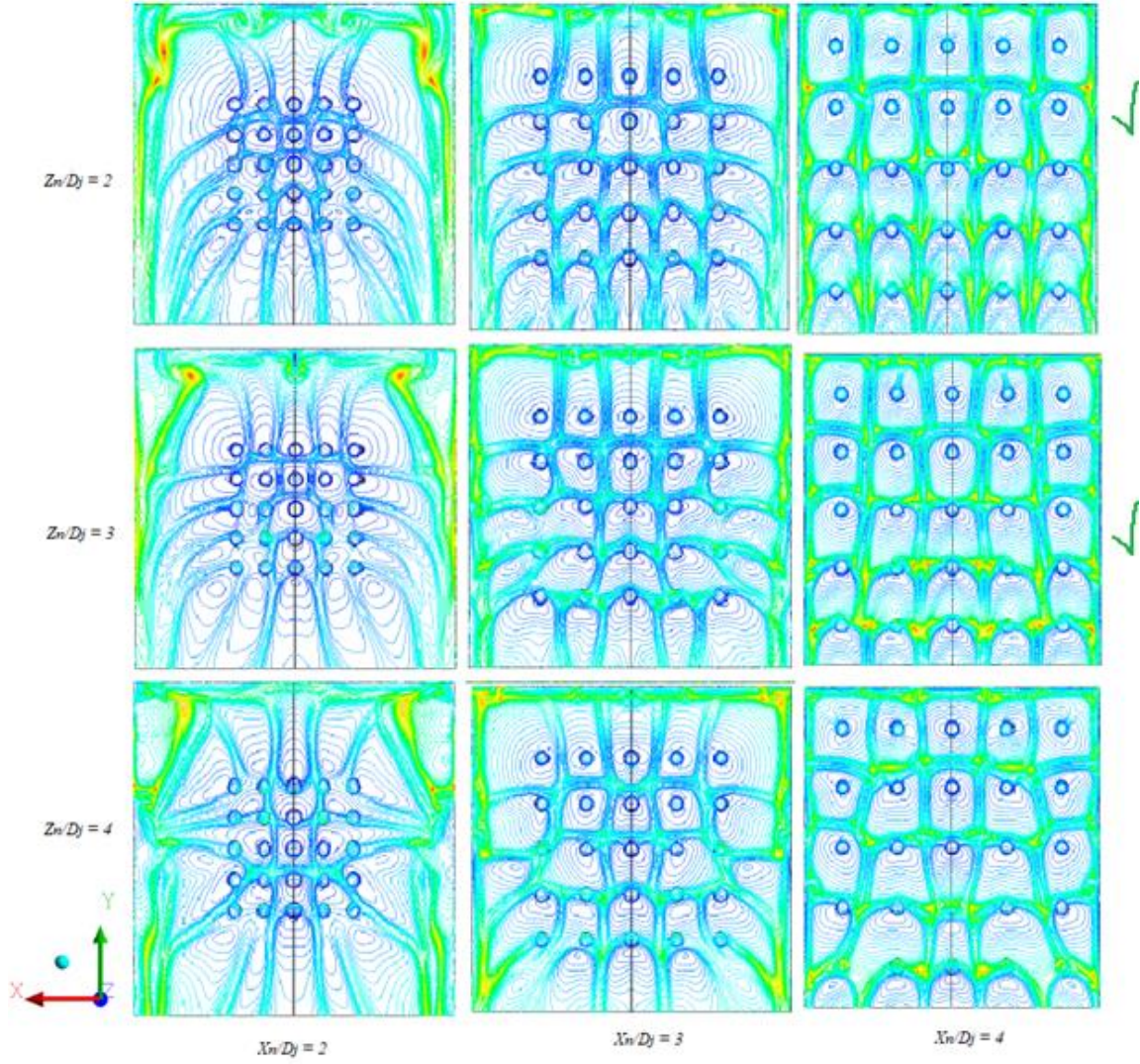
$Re = 20000, D_d/D_j = 1, t/D_d = 0.25,$		
Z_n/D_j	X_n/D_j	Nu_{ort}
2	2	43.9
	3	58.5
	4	66.0
3	2	41.7
	3	59.5
	4	64.1
4	2	43.9
	3	56
	4	61.7

Tablo 4.3'te görüldüğü üzere diğer düz ve tümsek şekilli plakalarda olduğu gibi çukur şekilli plakada da sabit Z_n/D_j değerinde jetler arası mesafenin artışı ile ortalama Nusselt sayısı istikrarlı bir şekilde artmıştır. Ancak Z_n/D_j 'in sonuçlar üzerindeki etkisi ihmal edilecek kadar az olduğu görülmektedir. Nitekim sabit jet mesafesi $X_n/D_j = 2$ 'de plakalar arası mesafe $Z_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde artırılması ile Nusselt sayısı 43.9, 41.7, 43.9 şeklinde; $X_n/D_j = 3$ için 58.8, 59.9, 56 şeklinde $X_n/D_j = 4$ için ortalama Nusselt sayısı sırasıyla 66, 64.1, 61.7 şeklinde yakın değerler almıştır. Görüldüğü gibi ele alınan tüm X_n/D_j parametreleri için Z_n/D_j 'nin değişimi ihmal edilecek kadar az olmuştur. Tablo 4.3'e göre en iyi sonuçlar $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 4$ ve $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 4$ parametreleri için elde edilmiştir.



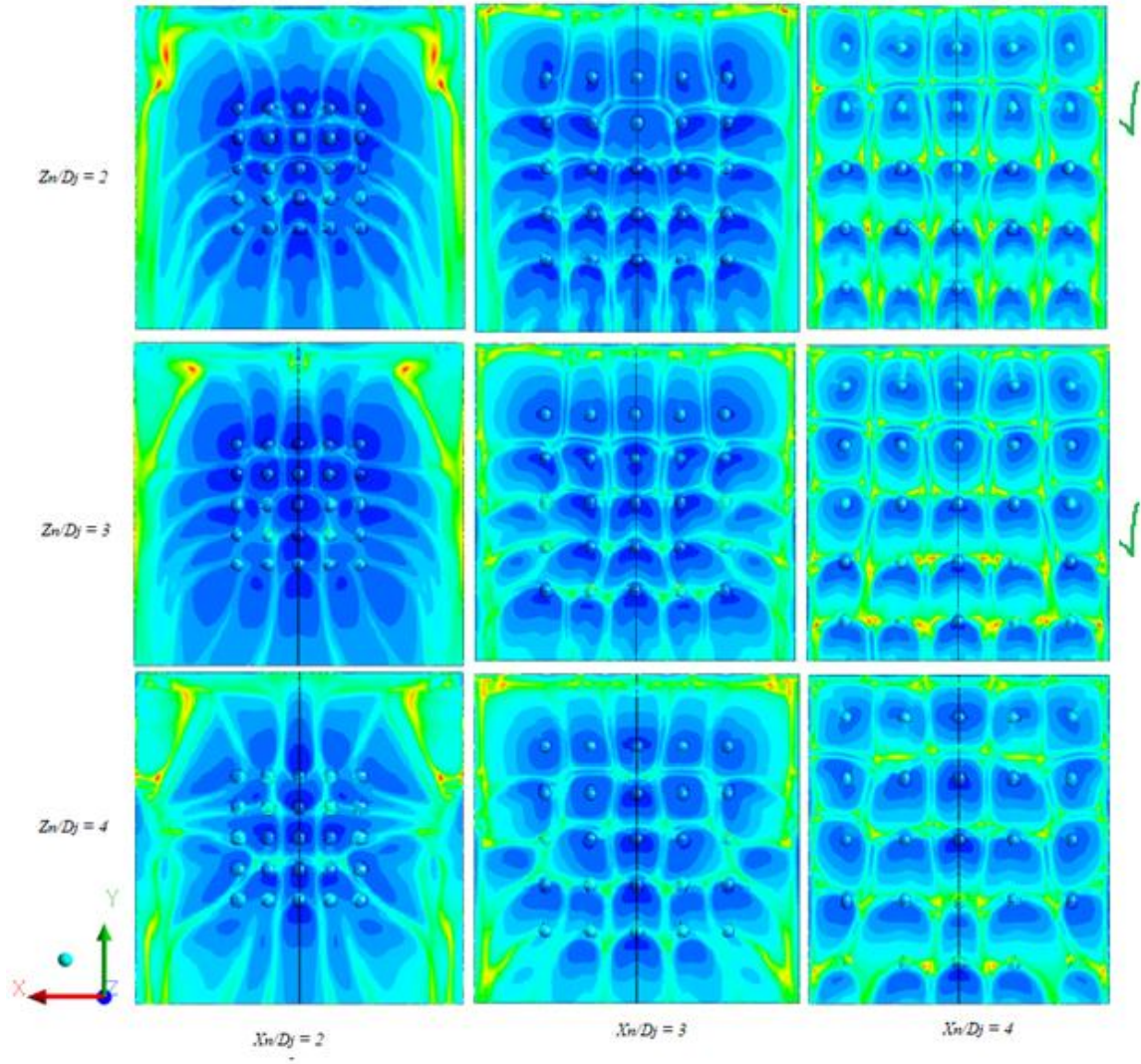
Şekil 4.16. Çukur şekilli plaka maksimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $Re = 20000$

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de çukur şekilli plakaya çarptırılan çoklu çarpan jetlerin sayısal analiz sonuçları kontur diyagramları şeklinde verilmiştir. Şekil 4.17’de sıcaklık ölçekli akım çizgileri, Şekil 4.18’de ise sıcaklık kontur diyagramı şeklinde verilmiştir.



Şekil 4.17. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta sıcaklık dağılımlı akım çizgileri,
 $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

Her iki şekilden de $X_n/D_j = 2$ sabit değeri için tüm Z_n/D_j değerlerinde kanal akışı etkisi görülmektedir. Kanal akışında jetler arası mesafe düşük olduğundan jet etkileşimleri ve çapraz akış etkisi daha belirgindir. Bu durum ısı transferinin bariz bir şekilde azalmasına sebep olmuştur. Öte yandan jetler arası mesafe $X_n/D_j = 3, 4$ şeklinde arttıkça plaka genelinde daha üniform bir sıcaklık dağılımı görülmektedir. Bu durum akışkanın plaka ile temasını iyileştirmiş ve dolayısı ile ısı transferini artırmıştır.



Şekil 4.18. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta sıcaklık dağılımlı konturler, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

4.1.4. Maksimum Çapraz Akışta Plaka Türlerinin Karşılaştırılması

Maksimum çapraz akışta farklı plakaların ısı transferine etkisinin anlaşılması için $Re = 20000$ 'de üç farklı plaka olan düz, tümsek şekilli ve çukur şekilli plaka sonuçları Şekil 4.19'da sıra ortalamalı Nusselt sayısı için karşılaştırılmıştır. Şekil 4.19'da $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$ parametre sonuçlarına göre tümsek şekilli ve düz plakada Nusselt sayısı çukur şekilli plakaya göre daha yüksek çıkmıştır. Çukur şekilli plakada bu Nusselt sayısı düşüşü özellikle çarpma bölgesinde ön plana çıkmıştır. Söz konusu parametre grubu için tümsek şekilli ve düz plaka sonuçları merkez bölgede daha üniform iken, çukur şekilli plaka durma noktası etkisi daha belirgin olmuştur. $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$ 'te çukur şekilli ve düz plaka

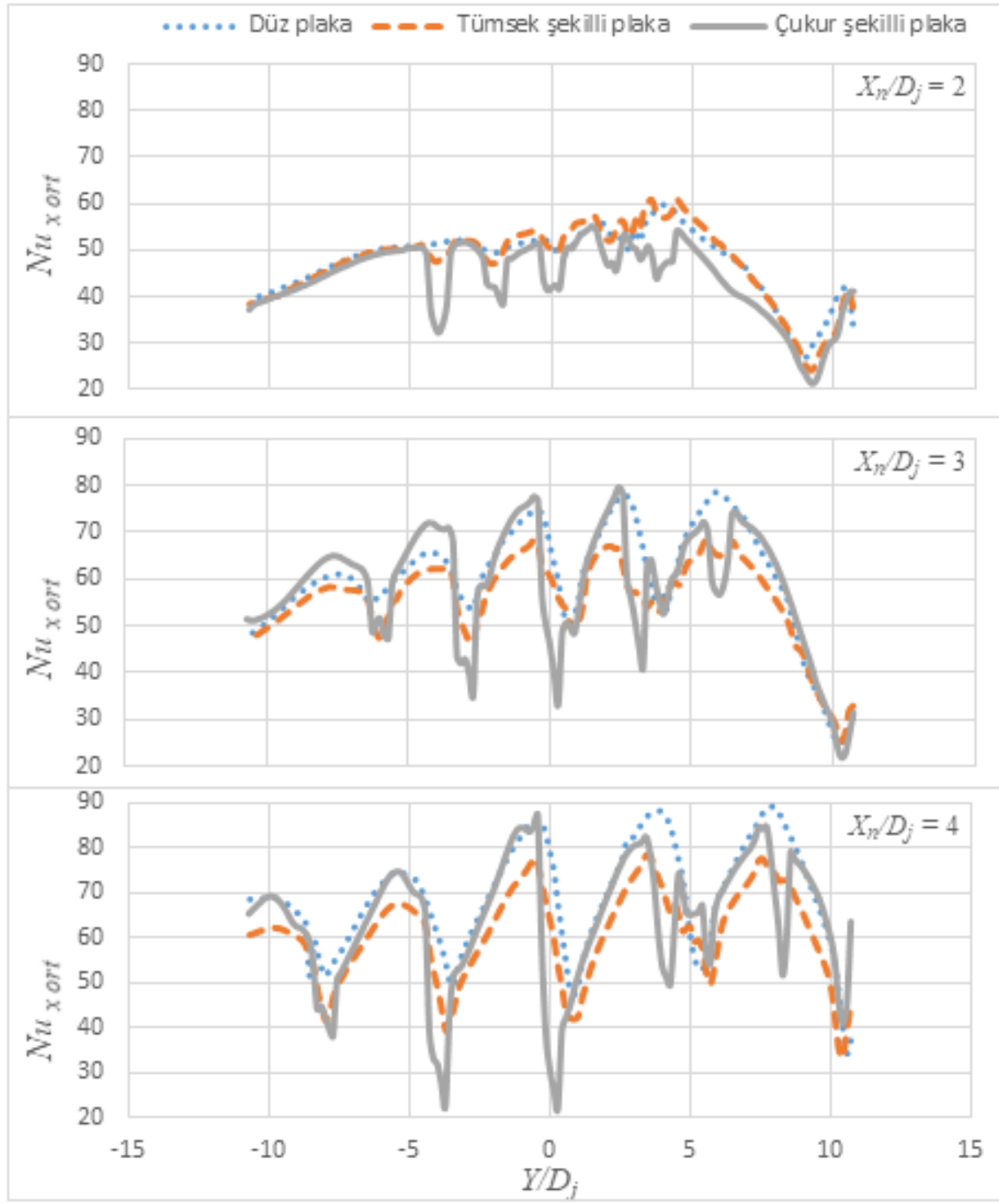
sonuçları birbirine yakın iken, tümsek şekilli plaka sonuçları bunlara göre daha düşük değerlerde bir grafik çizmiştir. Şekil 4.19’da sıra ortalamalı Nusselt sayısına göre $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2, 3, 4$ ’te genel olarak en yüksek ortalama değerler düz plakaya ait iken en düşük değerler ise tümsek şekilli plakaya ait çıkmıştır.

Şekil 4.20’de sabit $Z_n/D_j = 3$ için karşılaştırılan sıra ortalamalı Nusselt sonuçlarına göre $X_n/D_j = 2$ ’de en yüksek Nusselt değeri sırasıyla düz, tümsek ve çukur şekilli plaka için elde edilmiştir. $X_n/D_j = 3$ ve 4’te Çukur şekilli plaka sonuçları diğer plaka sonuçlarına göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum ortalama Nusselt sayısını gösteren Tablo 4.4’te de görülmektedir.

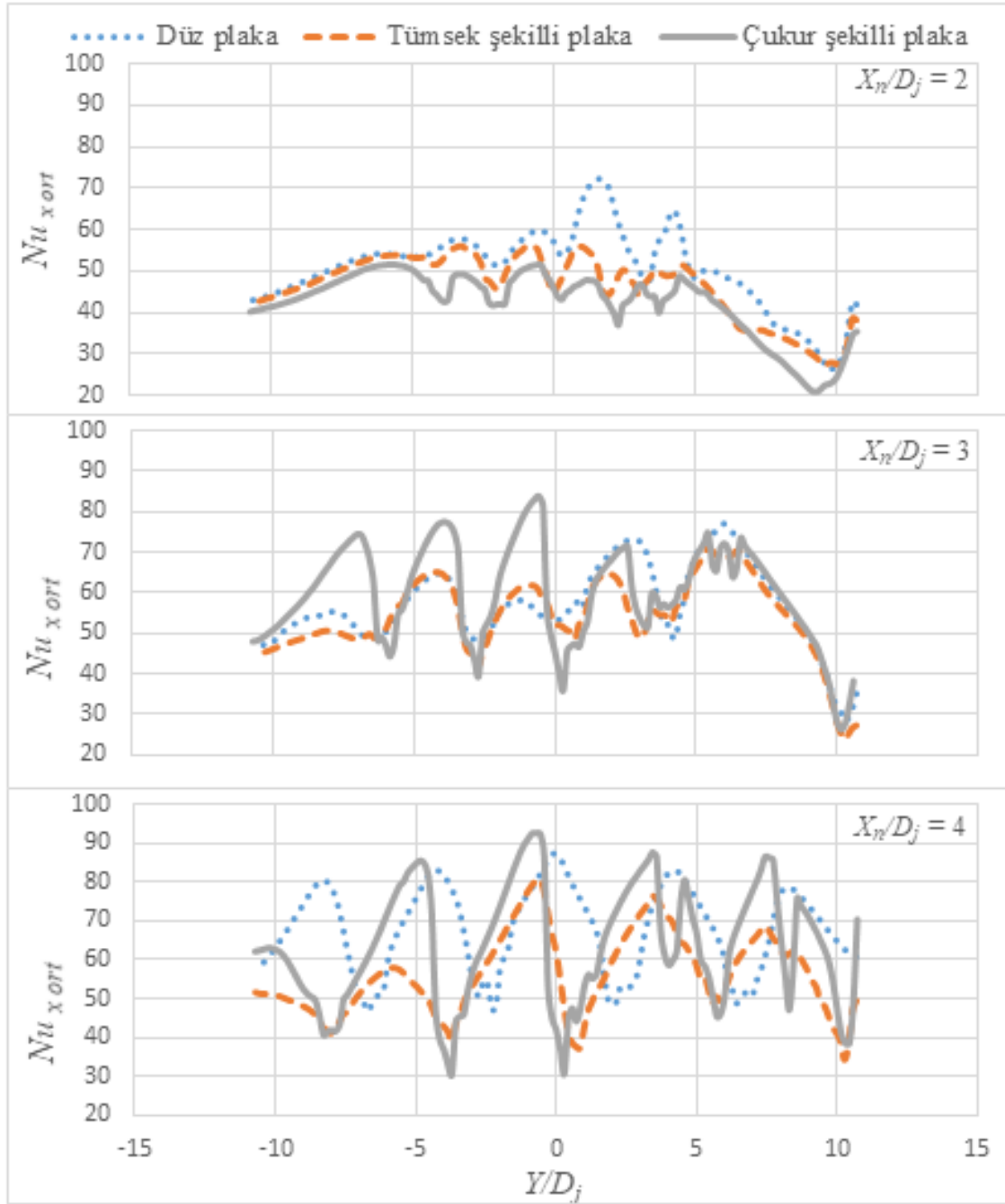
Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de $Z_n/D_j = 3, 4$ ve $X_n/D_j = 3, 4$ ’te sıra ortalamalı Nusselt sonuçlarına göre çukur şekilli plaka sonuçları düz ve tümsek şekilli plaka sonuçlarına göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum Tablo 4.4’te sıra ortalamalı Nusselt sayısı için de görülmektedir.

Maksimum çapraz akışta her üç plaka için bulunan alan ortalamalı Nusselt sonuçları Tablo 4.4’te gösterilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi $Z_n/D_j = 3$ ve 4, $X_n/D_j = 3$ ve 4 ‘te çukur şekilli plaka sonuçları daha yüksek çıkmıştır. Bunun dışındaki parametrelerde bazı durumlarda düz ve tümsek şekilli plaka sonuçları yakın değer olsa da ilgili parametrelerde en yüksek değerler düz plakaya ait çıkmıştır. Örneğin düşük plaka mesafesinde $Z_n/D_j = 2$ ’de tüm jet mesafelerinde ($X_n/D_j = 2, 3, 4$) düz plaka sonuçları en yüksek değerini almıştır. Bunundışında da $Z_n/D_j = 3$ ve 4’te düşük jet mesafelerinde ($X_n/D_j = 2$) yine düz plaka sonucu en yüksek çıkmıştır.

Sıra ortalamalı Nusselt sayılarını gösteren ilgili şekiller ve alan ortalamalı Nusselt tablolarından varılan genel sonuca göre maksimum çapraz akış çoklu çarpan jet çalışmasında yüksek plaka mesafelerinde çukur şekilli plaka sonuçlarının diğer plaka türlerine göre daha iyi değerler almıştır.



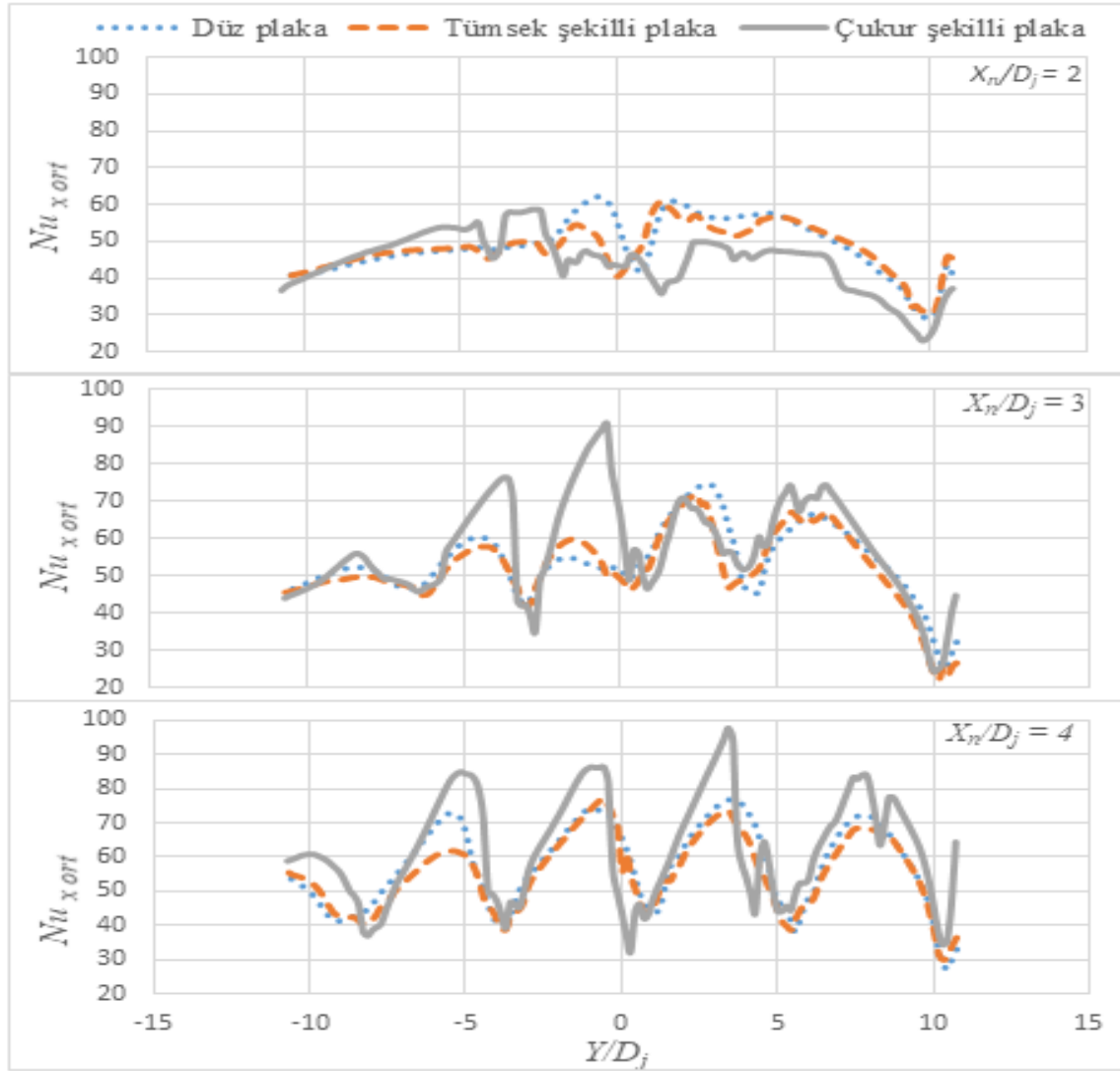
Şekil 4.19. Maksimum çapraz akışta farklı plakaların sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$



Şekil 4.20. Maksimum çapraz akışta farklı plakaların sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

Genel olarak $Z_n/D_j = 3, 4$ ve $X_n/D_j = 3, 4$ iken çukur şekilli plaka sonuçları düz ve tümsek şekilli plaka sonuçlarına göre daha yüksek çıkmıştır. Örneğin Tablo 4.4'e göre $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$ ve 4'te 59.5 ve 64.1 alan ortalamalı Nusselt sayısı ile çukur şekilli plaka daha yüksek Nusselt değerini almıştır. Yine $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$ ve 4'te 56 ve 61.7 alan ortalamalı Nusselt değeri ile çukur şekilli plaka hem düz hem de tümsek şekilli plakaya

göre daha yüksek değer almıştır. Düşük plaka mesafesi $Z_n/D_j = 2$ ve $X_n/D_j = 3, 4$ jet mesafelerinde düz ve çukur şekilli plaka tümsek plakaya göre nispeten yüksek değer almıştır.



Şekil 4.21. Maksimum çapraz akışta farklı plakaların sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te maksimum çapraz akışta $Z_n/D_j = 2, 3$ ve 4 için her üç hedef plaka türü için yüzeyde sıcaklık kontur diyagramları karşılaştırılmıştır. Her üç plakada da düşük jet mesafesinde kanal akışının etkisi baskın olmasından dolayı bireysel çarpma bölgeleri belirsiz iken jet mesafesi artınca ($X_n/D_j = 4$) kanal akışının etkisinin

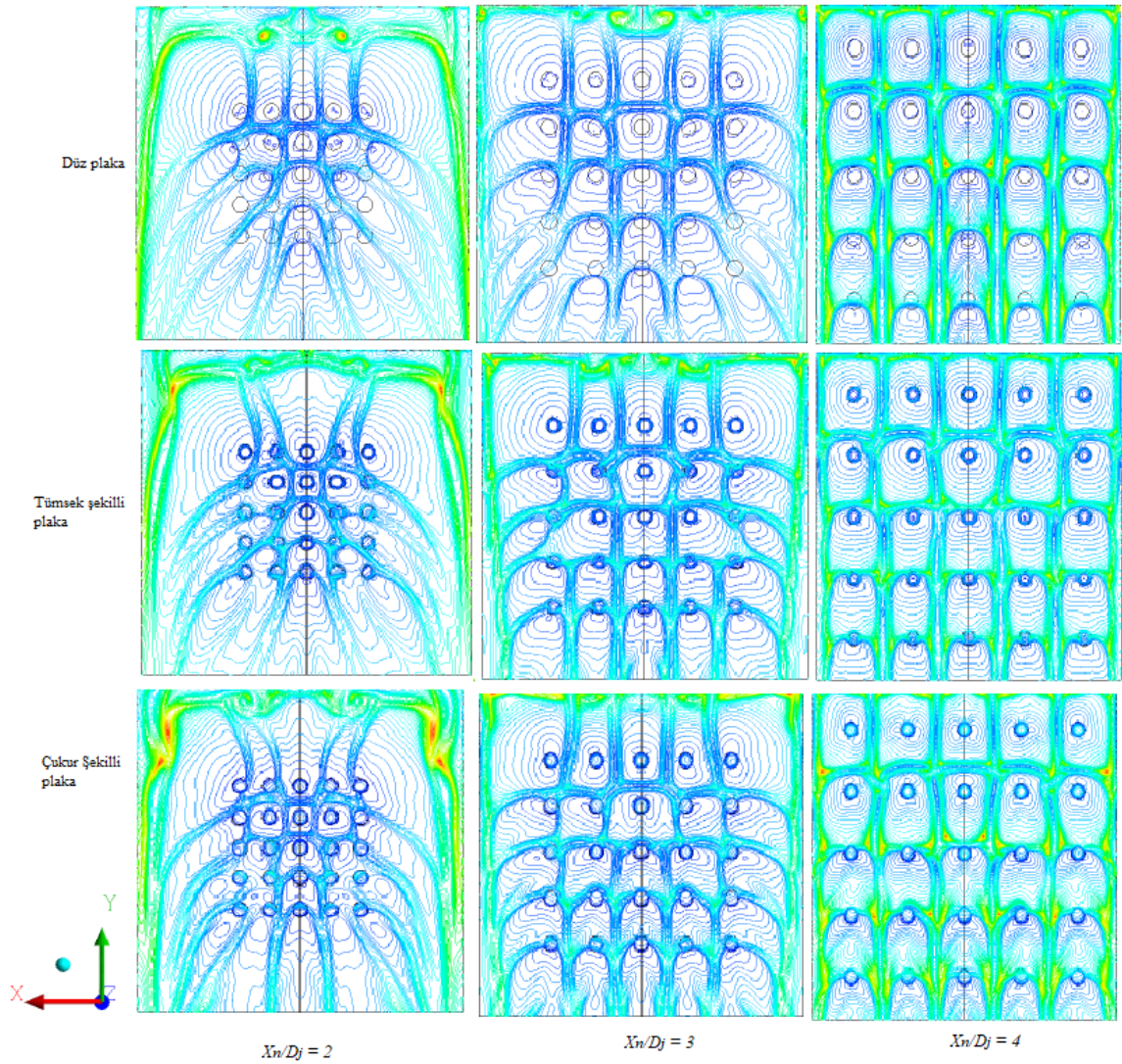
azalmasının yanında bireysel çarpma bölgeleri de belirginleşmiştir. Dolayısıyla Nusselt sayısı daha üniform hale gelmiştir.

Tablo 4.4. Maksimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı

Z_n/D_j	X_n/D_j	$t/D_d = 0.25, D_d/D_j = 1, Re = 20000$		
		Düz plaka	Tümsek şekilli plaka	Çukur şekilli plaka
2	2	46.0	47.0	43.9
	3	57.5	54.6	58.5
	4	67.3	60.1	66.0
3	2	48.8	45.4	41.7
	3	55.6	52.1	59.5
	4	54.6	55.6	64.1
4	2	47.6	47.3	43.9
	3	52.5	50.9	56.0
	4	55.6	52.9	61.7

$Z_n/D_j = 2$ için verilen Şekil 4.22'ye göre çukur şekilli plakada $X_n/D_j = 2$ 'de akış alanı kenar bölgesinde sıcaklık daha yüksektir diğer plakalara göre, bu durum ise ilgili parametrelerde ($Z_n/D_j = 2$ ve $X_n/D_j = 2$ 'de) çukur plakada ortalama Nusselt sayısının daha düşük çıkmasına sebep olmuştur. Aynı şekilden tüm jet mesafeleri için ($X_n/D_j = 2, 3, \text{ve } 4$ 'te) düz plakada çıkışa doğru çarpan jetler asıl çarpması gereken bölgenin altında plakaya çarpmış iken, tümsek ve çukur plakada ise jetler asıl çarpması gereken bölgede çarpmışlardır. Özellikle çukur şekilli plakada bu durum daha belirgindir. Bu durum özellikle $X_n/D_j = 3, 4$ değerlerinde çukur şekilli plakada alan ortalama Nusselt sayısının daha yüksek çıkmasının olası sebebidir. Benzer durum $Z_n/D_j = 3$ için hazırlanmış olan Şekil 4.23'te de karşımıza çıkmaktadır. Tablo 4.4'e göre $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 3$ ve 4 'te en iyi ortalama Nusselt sayısının çukur plakaya ait çıkması bu durumdan kaynaklandığını göstermektedir. Nitekim Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de her üç plakanın akım çizgilerinde öne çıkan en önemli fark çarpan jetlerin çarpma bölgeleridir. Söz konusu parametrelerde düz plakada jeter çarpması gereken jet merkezlerinin altında çarpmışlardır. Oysa çukur plakada ise jetler kendi merkezinde çarpma gerçekleştirmişlerdir. Özellikle Şekil 4.24'te görüldüğü gibi çukur şekilli plakada $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 4$ 'te çarpan jet dağılımları diğer plakalara göre daha üniform olduğu görülmektedir.

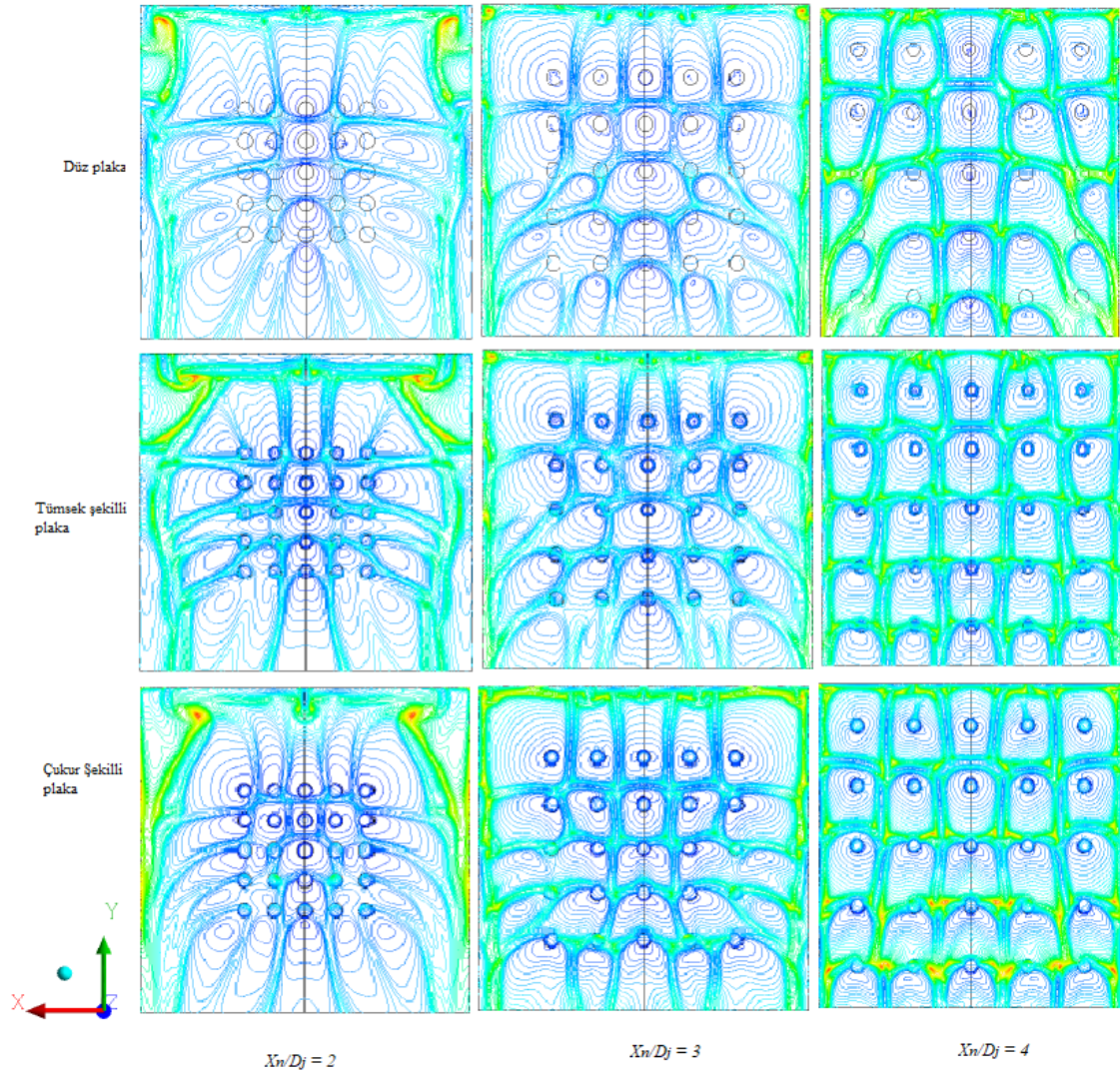
Çoklu çarpan jetlerde birim alanda yoğunlaştırılan jetlerden dolayı komşu jet etkileşimi yoğun olur ve iki jet arasında akışkanlar çarpışarak çevrinti (girdapları) meydana getirir. Bu çevrıntiler ile birlikte akışkanın hedef plaka teması nispeten azalır dolayısıyla ısı transferi de olumsuz etkilenir. Ele alınan sabit Z_n/D_j için jetler arası mesafe artırılarak ısı transferinin iyileştirilmesi mümkündür. Maksimum çapraz akışta düz plaka için verilen hız kontur diyagramında (Şekil 4.25'te) tüm X_n/D_j ve Z_n/D_j parametreleri için simetri eksenindeki hız kontur diyagramları görülmektedir. Şekle göre jetler arası mesafe



Şekil 4.22. Maksimum çapraz akışta farklı plakaların akım çizgileri, $Z_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

arttıkça türbülans durumu azalmakta, çevrinti etkisi azalarak akışkanın plakaya teması artmakta dolayısıyla ısı transferi artmaktadır. İlgili şekilde farklı jet mesafeleri için

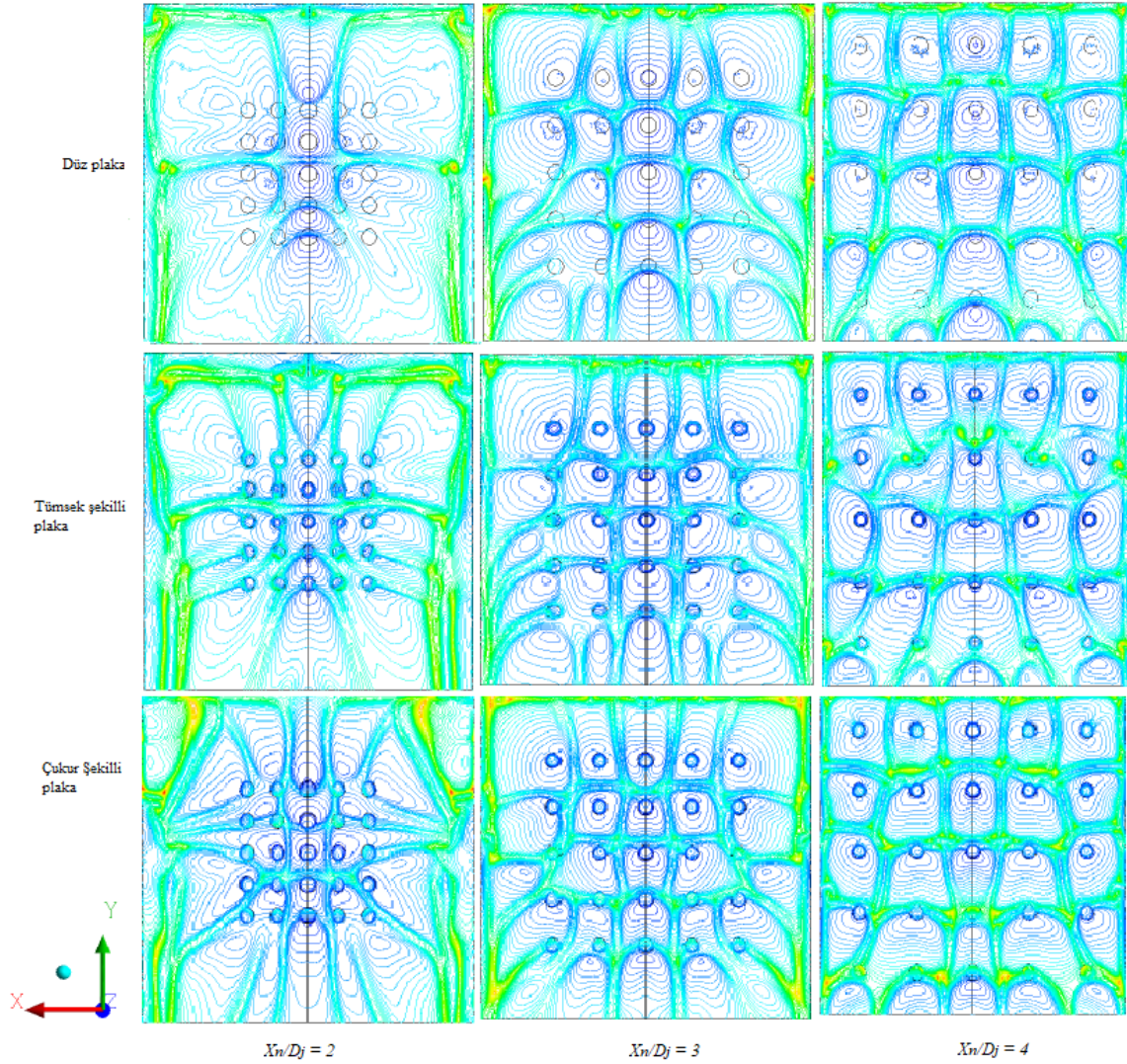
işaretlenen türbülans durumuna bakılırsa, jetler arası mesafe $X_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde arttıkça jetler arasındaki çalkantı oranı azalmıştır. Bariz bir şekilde görülmektedir ki, $X_n/D_j = 2$ için iki jet arası çalkantı daha yüksek, $X_n/D_j = 3$ ve 4 için nispeten daha azalmıştır. Mevcut çalışmada bu durum ele alınan tüm Z_n/D_j değerleri için de tespit edilmiştir. Benzer bir çalışmada İpek (2012) düşük Z_n/D_j (<2) mesafelerinde yüksek oranda akış çevrintilerinin meydana geldiğini belirtmiştir.



Şekil 4.23. Maksimum çapraz akışta farklı plakaların akım çizgileri, $Z_n/D_j = 3$, $Re = 20000$ $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

Daha önce de bahsedildiği gibi artan plaka mesafesi ile ısı transferi azalmıştır. Nitekim $Z_n/D_j = 2$ 'de en iyi ısı transferi, $Z_n/D_j = 4$ 'te en düşük ısı transferi tespit edilmiştir. Düz plakada artan plaka akışkan hedef plakaya çarpmadan önce ayrılmalara maruz kalmakta

dolayısıyla Z_n/D_j değeri arttıkça akış ayrılmaları da artmaktadır. Plakaya çarpmadan önce gerçekleşen akış ayrılmalarından dolayı plakaya temas edecek akışkan debisi azalmakta ve bunun doğal sonucu olarak ısı transferi azalmaktadır. Artan jet mesafesi ile ısı transferinin artması ikincil çarpma noktaları ile de ilişkilendirilebilir. Nitekim düz plaka hız diyagramından da görüldüğü gibi jetler arası etkileşimden dolayı plakaya yakın bölgelerde



Şekil 4.24. Maksimum çapraz akışta farklı plakaların akım çizgileri, $Z_n/D_j = 4$, $Re = 20\,000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

oluşan çevrıntiler ikincil çarpma bölgelerini meydana getirmektedir. Düşük jet mesafesinde yüksek türbülans şiddetinden dolayı ikincil çarpma noktası etkisi az, jet mesafesi arttıkça ikincil çarpma noktası etkisi bariz hale gelmiştir. Bu da artan jet mesafesinde ısı transferinin artışının bir başka sebebi olarak düşünülmektedir.

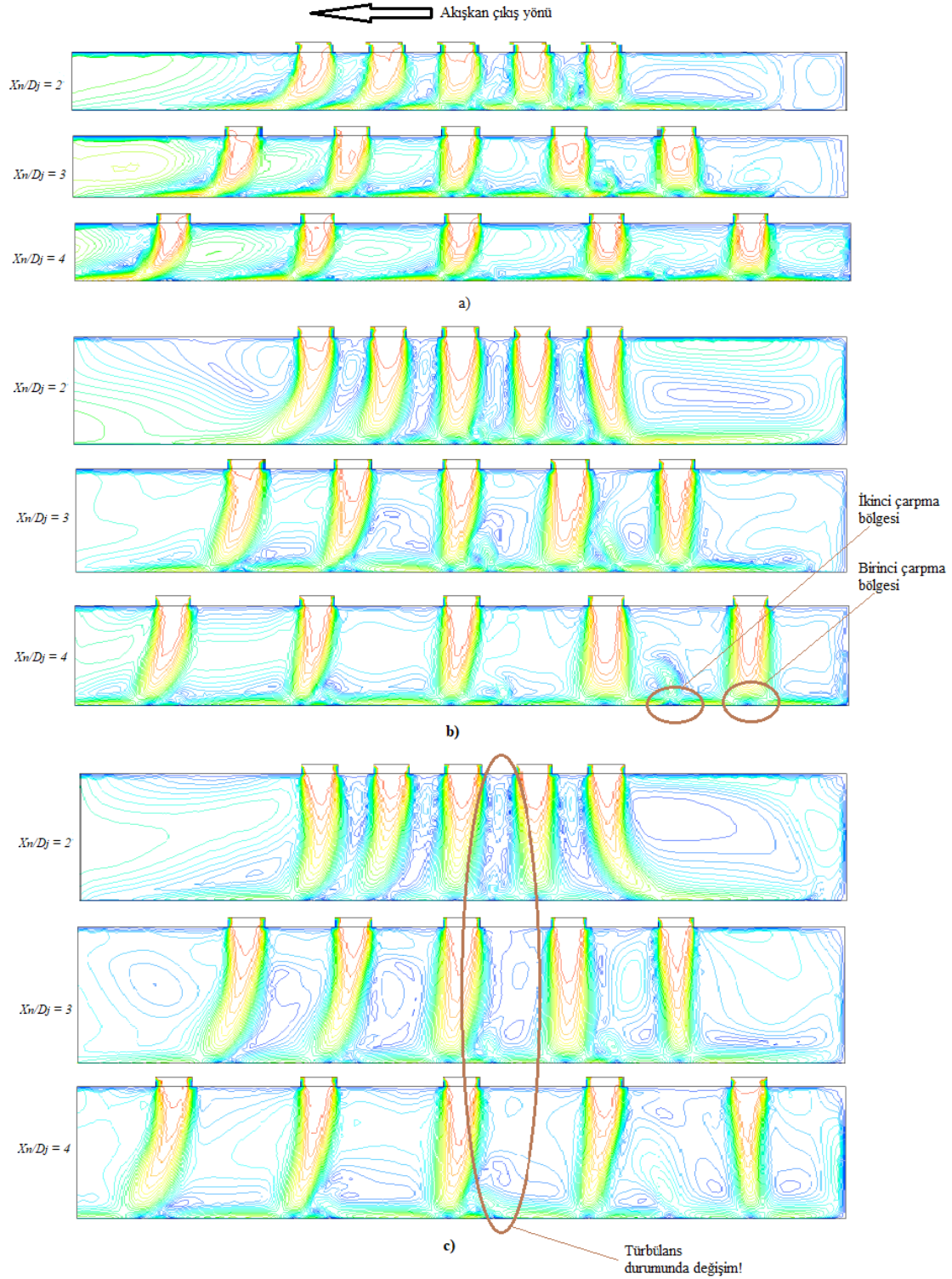
Düz plakaya çarpma durumunda $Z_n/D_j = 2$ ve 3 için akış yönündeki jetlerde çapraz akış etkisinden dolayı çarpma esnasında bozulma gerçekleşmekte iken, ilk iki jette böyle bir bozulma görülmemektedir. Yani $Z_n/D_j = 2$ ve 3'te ilk iki jette çarpma olması gereken bölgede gerçekleşmektedir. Akış tek çıkışa maruz kaldığı için akış yönündeki diğer jetlerde akış yönünde bozulma gerçekleşmekte ve jetler çarpması gereken bölgenin biraz ilerisinde çarpmaktadırlar. Daha sonra bahsedileceği gibi serbest çıkışlı bir modelde, plakaların birbirine göre yakın mesafede konumlanması durumunda jetler olması gereken yere çarparken, akış alanının tek çıkışlı olması akışkanın tek bir çıkışa zorladığı için çarpma sonrası akışkan yön değiştirerek diğer jetleri rahatsız etmekte ve çıkış yönüne yakın jetler daha fazla deformasyona uğramaktadır.

$Z_n/D_j = 4$ 'te plakalar birbirine göre daha uzak olduğu için çarpma öncesi akış ayrılması daha nettir. Bu bakımdan tüm jetlerde deformasyon gerçekleşmiştir. Nitekim $Z_n/D_j = 4$ 'te ilk iki jette de sağ tarafa doğru bir eğilim meydana gelirken, akış yönündeki diğer jetlerde ise sola meyil söz konusudur. Benzer şekilde Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de tümsek ve çukur şekilli plakalar için hız kontur diyagramları verilmiştir. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'e göre genel olarak tümsek ve çukur şekilli plaka için de düz plaka ile benzer sonuçlar tespit edilmiştir.

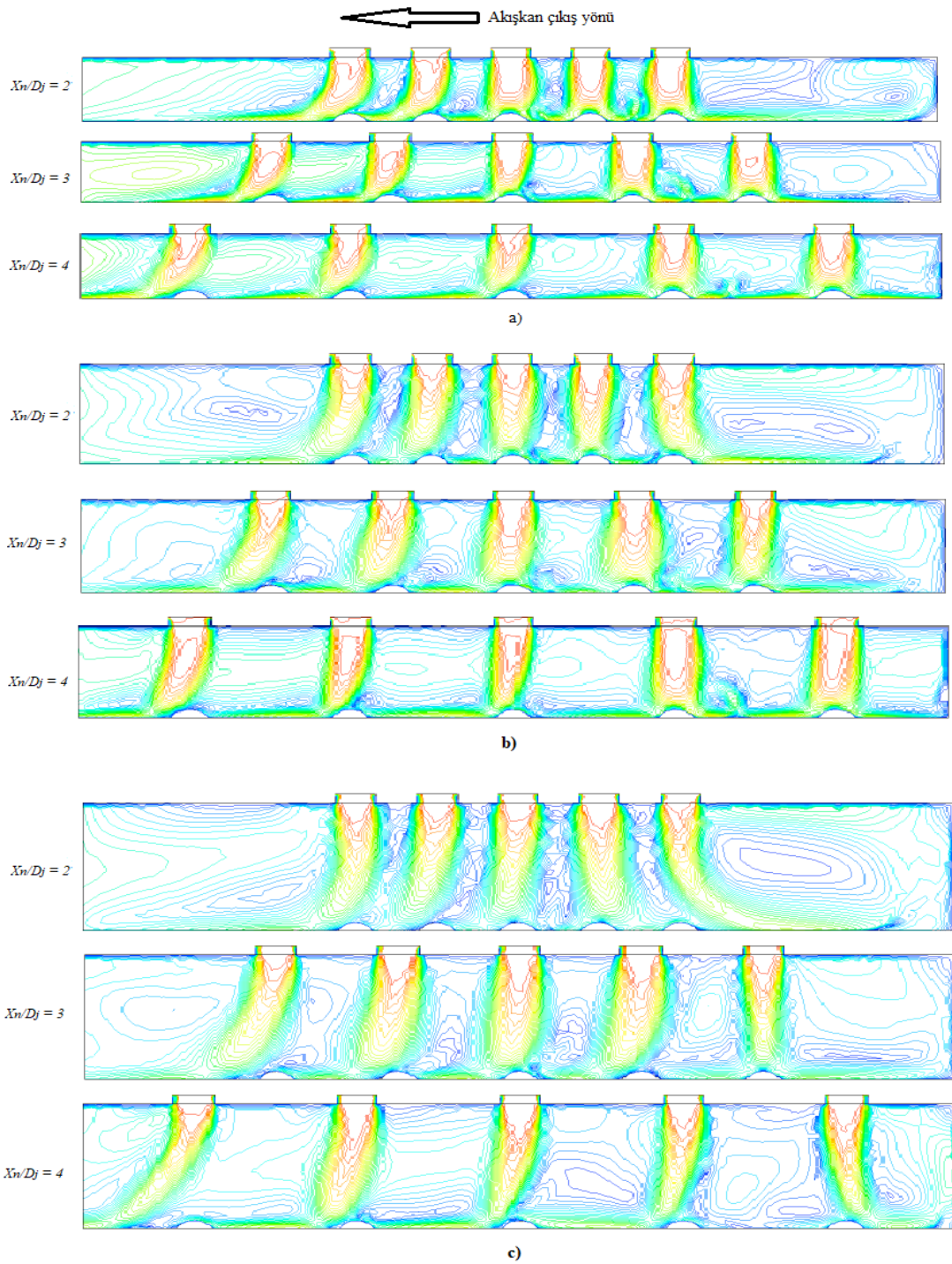
Şekil 4.28'de farklı plaka türleri için $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$ 'deki sonuçlara bakılırsa, sıra ortalamalı Nusselt sayısı düz ve tümsek şekilli plakada benzer değerler alırken, çukur şekilli plakada en düşük değeri almıştır. Üç farklı plaka için akış hız diyagramları düz, tümsek ve çukur şekilli plaka için Şekil 4.28a, b ve c'de sırasıyla verilmiştir.

Daha önce de bahsedildiği gibi ısı transferi düz ve tümsek şekilli plakada benzer iken, çukur şekilli plakada daha düşüktü. Şekil 4.28'e göre bu durum çukur şekilli plaka hız diyagramında durma noktalarından hemen önce görülen çevrıntilerin olumsuz etkisidir. Akışın tek yönde çıkış yapmasına zorlanması çukur bölgelerde çevrıntilerin daha belirgin olmasına ve daha yüksek akış deformasyonuna sebep olmuştur. Nitekim ilgili şekilde de görüldüğü gibi iki jet arası çalkantı ve çevrıntiler çukur plakada daha güçlü bir şekilde etkimektedir. Bu durum ise söz konusu plaka için söz konusu parametrelerde daha düşük ısı transferinin olası sebebidir.

$Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$ ve $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$ parametrelerinde, kısacası düşük jet mesafesinde düz ve tümsek şekilli plaka sonuçları benzer karakterde olup, daha yüksek değer alırken, çukur şekilli plaka sonuçları daha düşük çıkmıştır. Şekil 4.29'da $Z_n/D_j = 2$,

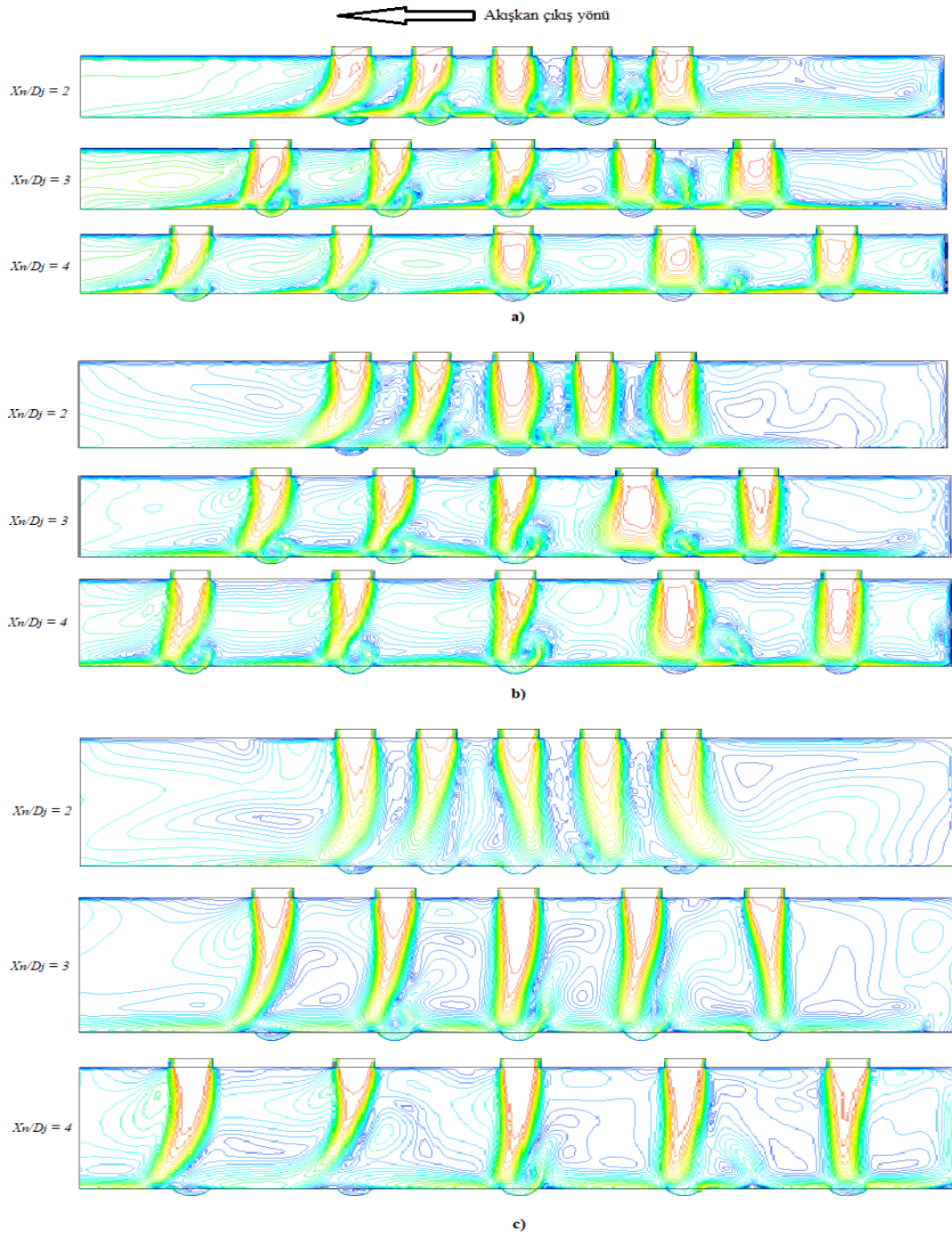


Şekil 4.25. Maksimum çapraz akışta düz plakada hız diyagramları, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$



Şekil 4.26. Maksimum çapraz akışta tümsek şekilli plakada hız diyagramları, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

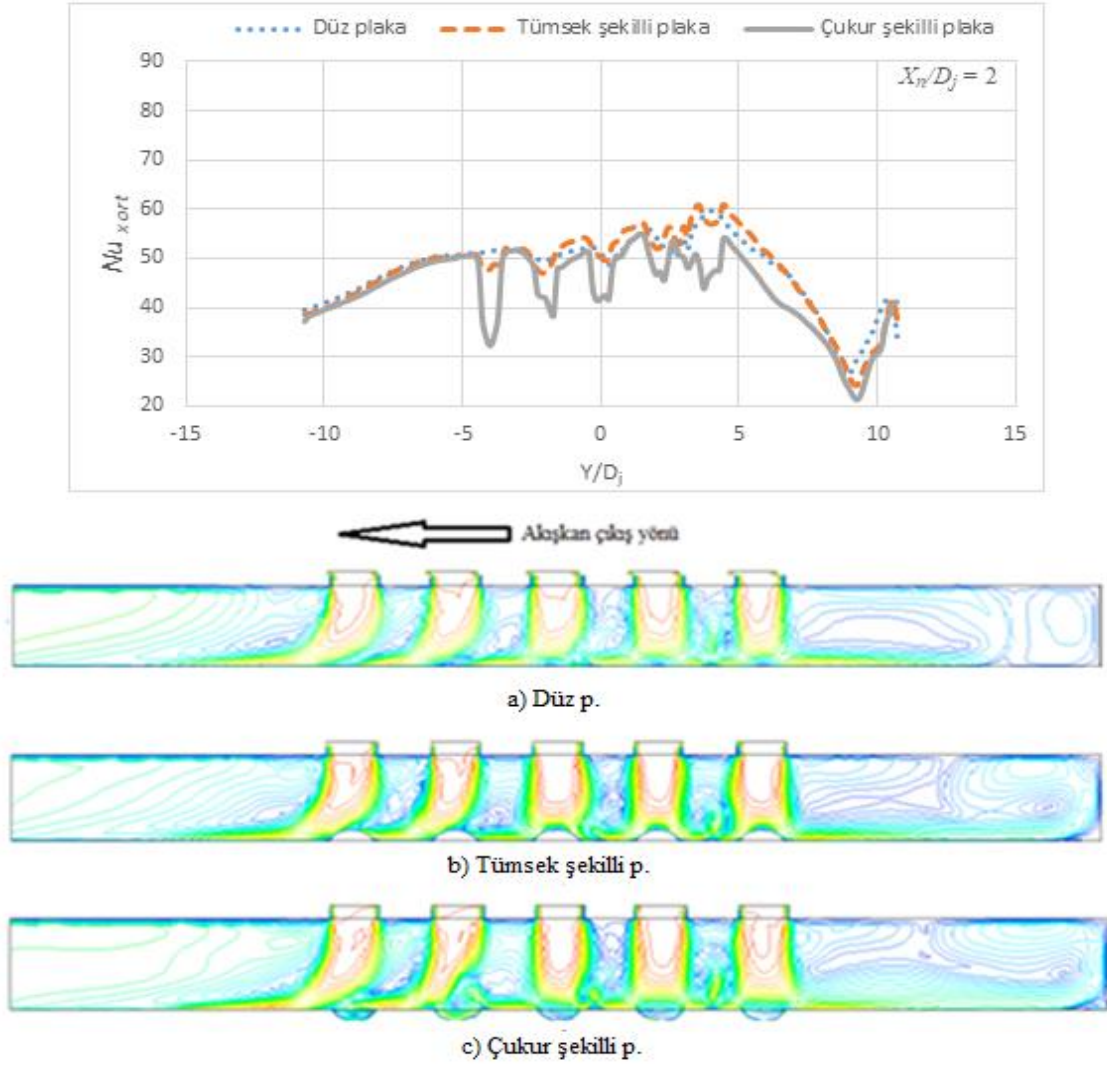
$X_n/D_j = 3$ parametresi için üç plakanın sıra ortalamalı Nusselt sayısı ve hız sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekilden anlaşıldığına göre çarpma bölgesinde düz plaka ve çukur şekilli plakada sonuçlar hemen hemen çakışmıştır. Ancak çukur şekilli plakada çarpma



Şekil 4.27. Maksimum çapraz akışta çukur şekilli plakada hız diyagramları, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

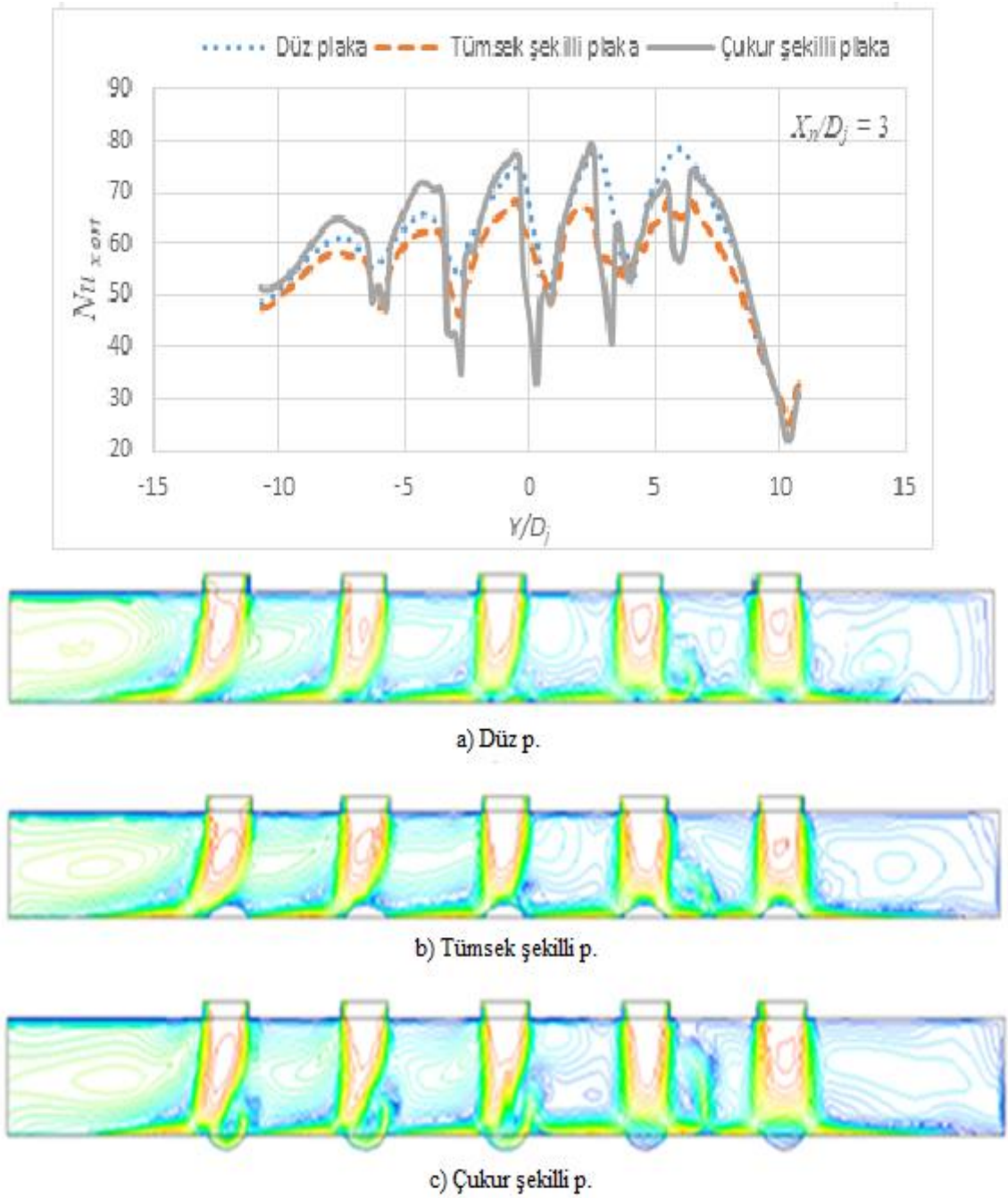
bölgesinden hemen önce meydana gelen şiddetli çevrıntilerden dolayı (Şekil 4.29c) sıra ortalama Nusselt sayısı ilgili bölgede önemli derecede düşüş göstermiştir. Bu durum Tablo 4.4'te ortalama Nusselt tablosunda da görülmektedir. Nitekim, Tablo 4.4'te en yüksek ortalama Nusselt değeri düz plakada, ara değer çukur şekilli plakada, en düşük değer ise

tümsek şekilli plakada tespit edilmiştir. $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$ parametresi için de ortalama Nusselt sonuçları ve hız kontur diyagramları benzer karakteristik göstermiştir.

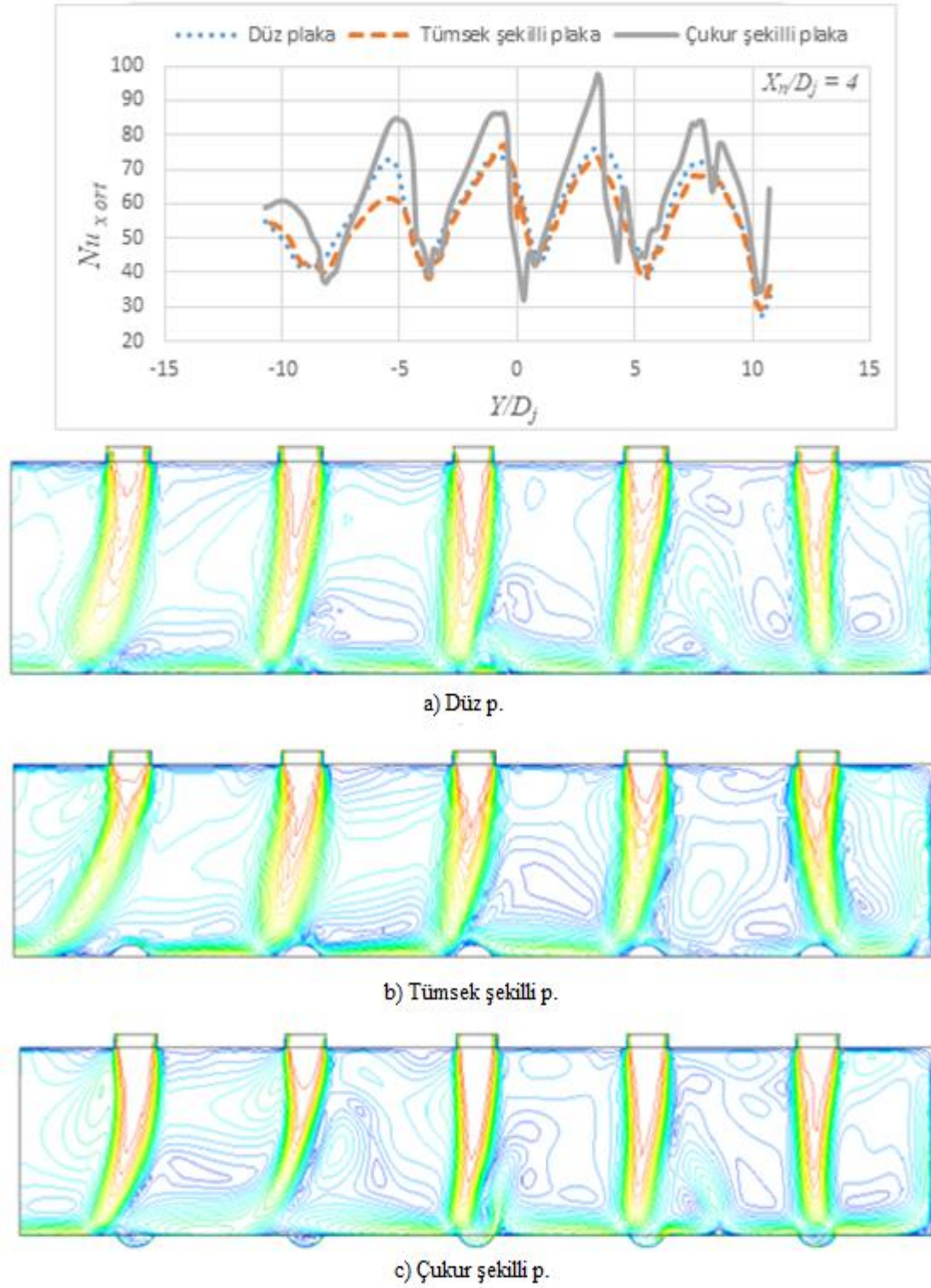


Şekil 4.28. Hız diyagramları, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

Şekil 4.30'da $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$ ve 4; $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$ ve 4 parametreleri için üç plakanın sıra ortalamalı Nusselt sonuçları ve hız sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekilden anlaşıldığına göre çukur şekilli plakada sıra ortalamalı Nusselt sayısı diğer plakalara göre daha yüksek değer almıştır. Düz ve tümsek şekilli plaka için sıra ortalamalı Nusselt sayısı benzer değerler göstermiştir.



Şekil 4.29. Hız diyagramları, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$



Şekil 4.30. Hız diyagramları, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

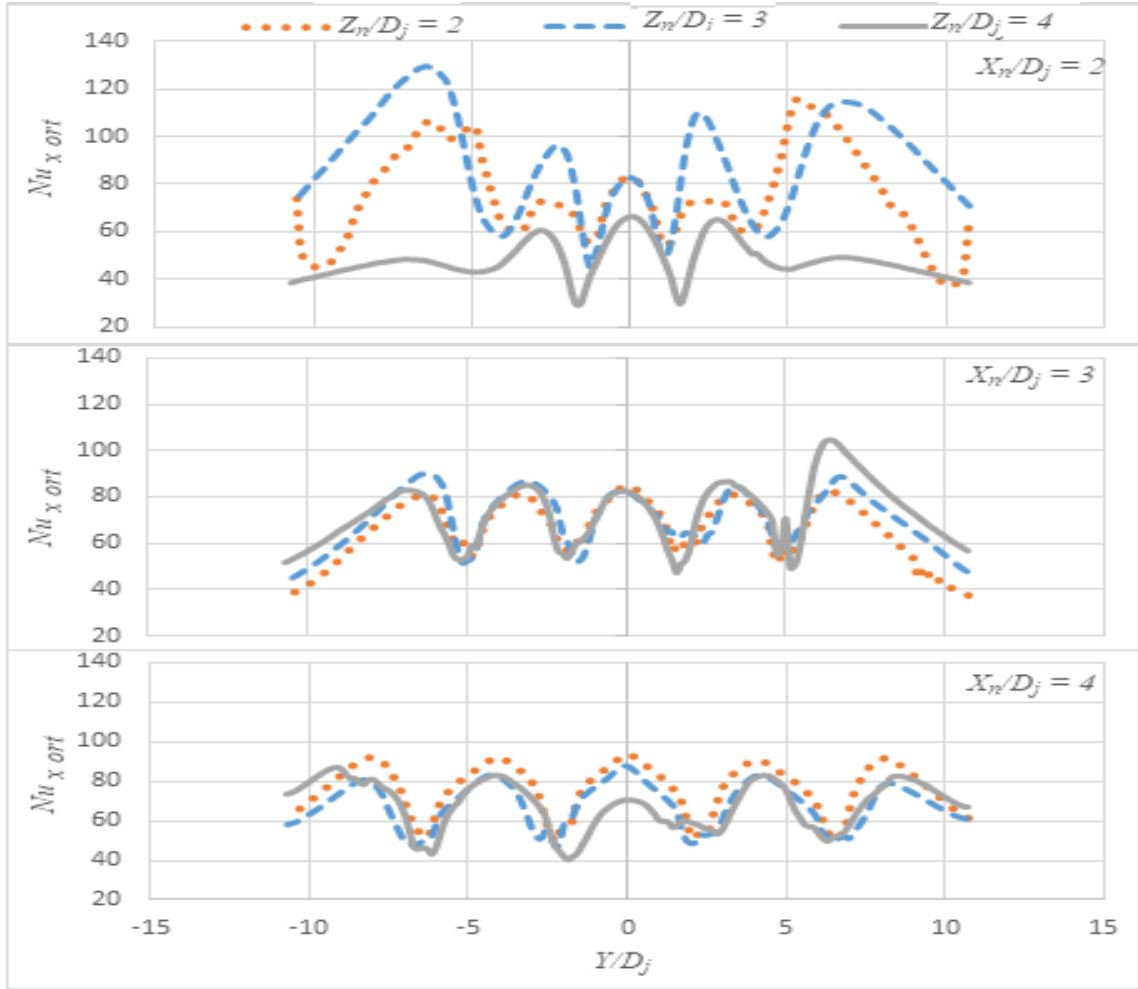
4.2. Minimum Çapraz Akış için Sayısal Sonuçlar

4.2.1. Çoklu Jetin Düz Plakaya Çarpması

Düz plakada minimum çapraz akışta farklı parametrelerin etkisinin değerlendirilmesi amaçlı olarak Şekil 4.31 ve 4.32 düzenlenmiştir. Şekil 4.31’de tüm X_n/D_j sabit tutularak farklı Z_n/D_j ’ler kıyaslanmıştır. Düşük jet mesafesinde Z_n/D_j parametre etkisi daha belirgin çıkmıştır. $X_n/D_j = 2$ ’de kıyaslanan Z_n/D_j parametrelerine bakılırsa en iyi sonucun $Z_n/D_j = 3$ ’e ait, ardından $Z_n/D_j = 2$ ve en düşük değer ise $Z_n/D_j = 4$ ’e ait çıkmıştır. Bu durum Tablo 4.5’te alan ortalama Nusselt sayıları için de görünmektedir. $X_n/D_j = 2$ ve $Z_n/D_j = 3$ ’te ortalama Nusselt, en yüksek; $X_n/D_j = 2$ $Z_n/D_j = 4$ ’te en düşük çıkmıştır.

Merkez bölgede simetrik olan üç adet jetin durma noktalarındaki Nusselt belirgin iken, diğer jetler için çapraz akış ve serbest çarpma etkisinden dolayı durma noktaları belirgin değildir. $X_n/D_j = 3$ ’te farklı Z_n/D_j sonuçları, birbirine yakın değerler almıştır. Dolayısıyla $X_n/D_j = 3$ için Z_n/D_j parametresinin etkisi ihmal edilecek kadar azdır. $X_n/D_j = 4$ sabit parametresinde farklı Z_n/D_j sonuçlarına göre, tüm Z_n/D_j parametrelerinde aynı karakteristikte eğriler oluşmuştur.

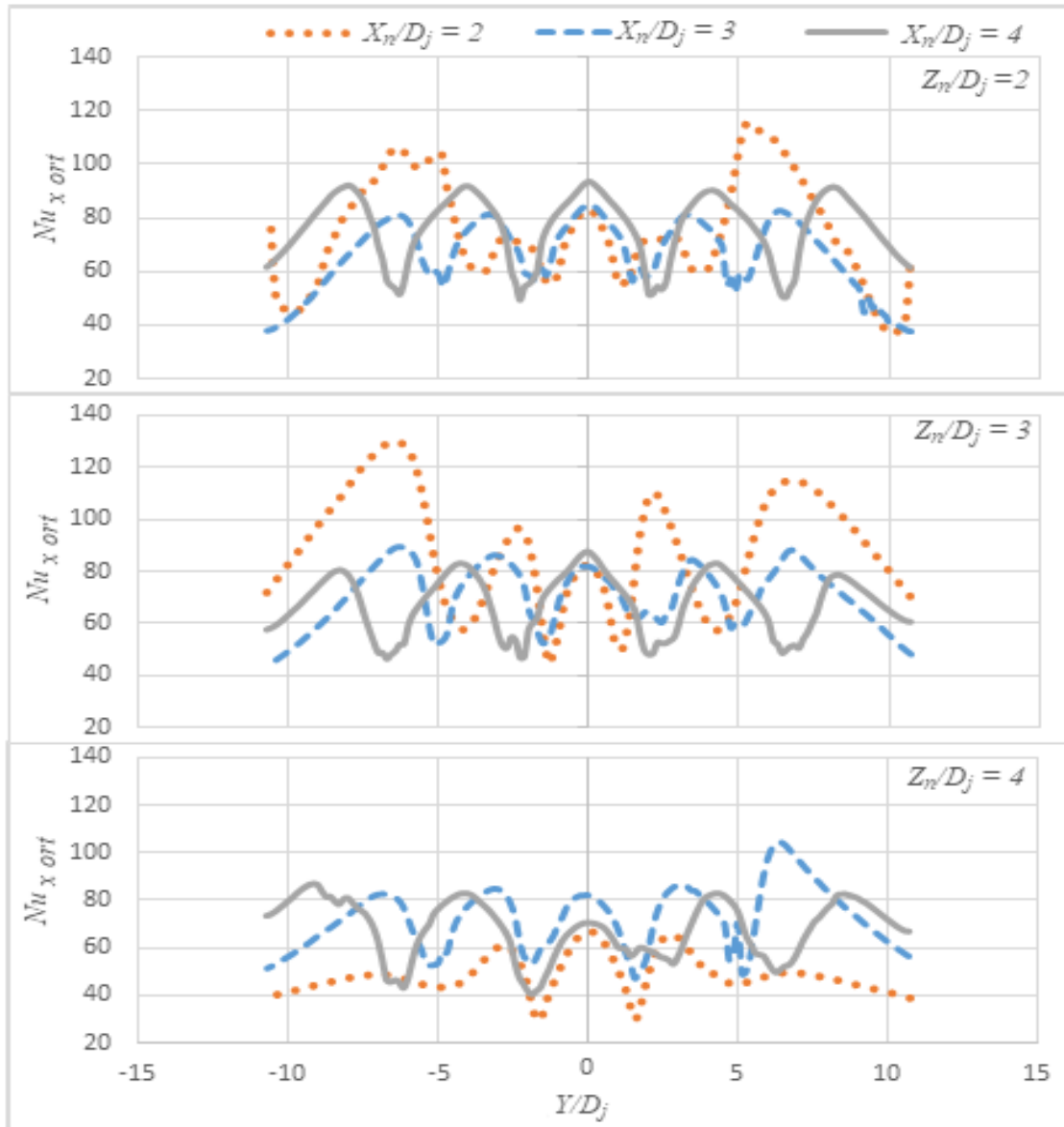
Şekil 4.32’de elde edilen sonuçlar sabit Z_n/D_j değerlerinde farklı X_n/D_j parametreleri için kıyaslanmıştır. Sabit $Z_n/D_j = 2$ ’de elde edilen sonuçlara göre $X_n/D_j = 3$ ve 4’te elde edilen sonuçlar birbirine yakın değerler alırken $X_n/D_j = 2$ ’de plaka kenar bölgesinde Nusselt sayısı artış göstermiştir. Benzer durum sabit $Z_n/D_j = 3$ için de gözlenmiştir. Sabit $Z_n/D_j = 4$ ’te yine $X_n/D_j = 3$ ve 4’te sonuçları uyumlu iken, $X_n/D_j = 2$ için elde edilen sonuçlar çok düşük çıkmıştır.



Şekil 4.31. Düz plakada minimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $Re = 20000$

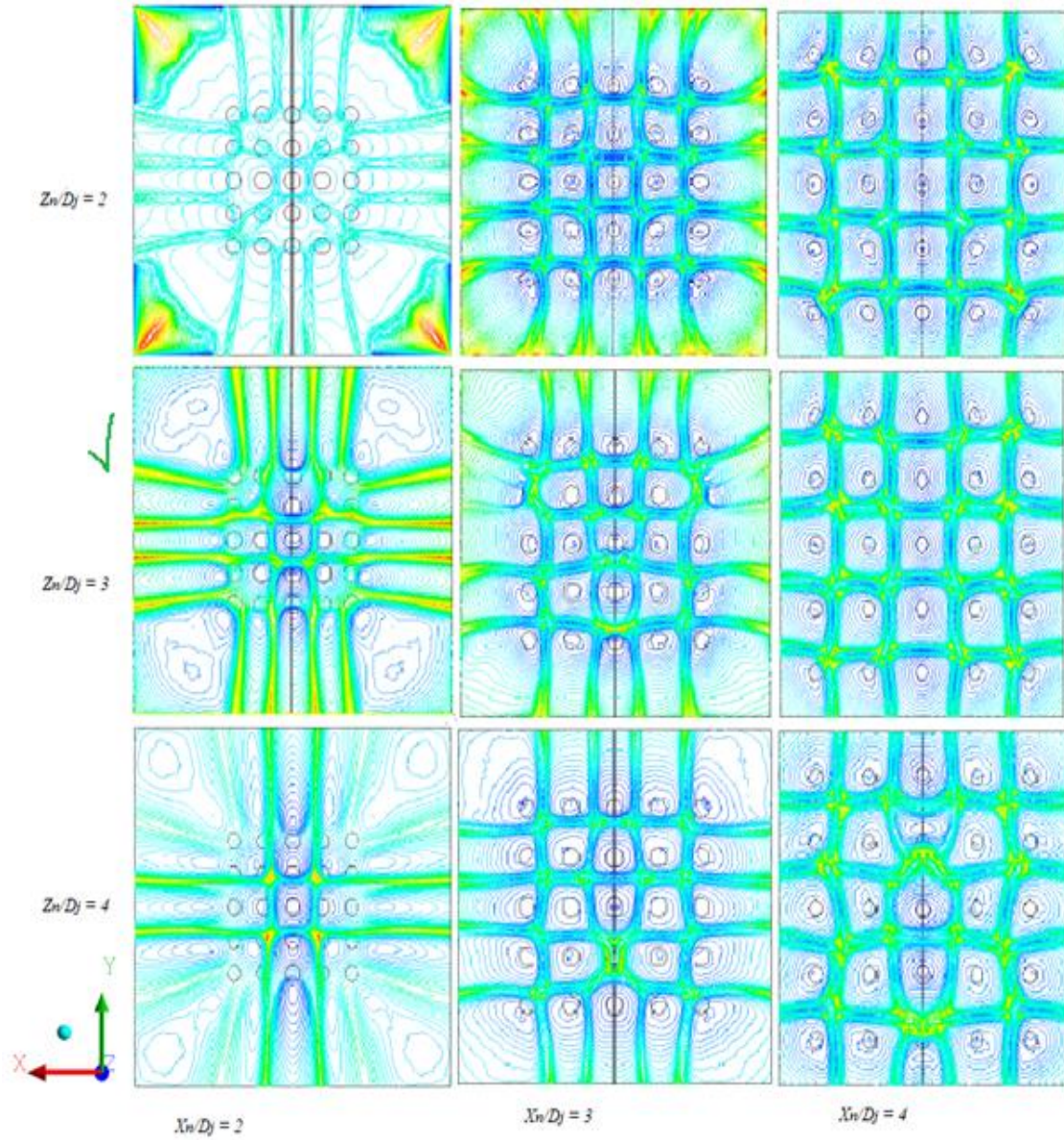
Tablo 4.5. Düz plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı

$Re = 20000$		
Z_n/D_j	X_n/D_j	Nu_{ort}
2	2	66.7
	3	64.1
	4	74.4
3	2	84.4
	3	73.3
	4	64.7
4	2	46.9
	3	70.9
	4	66



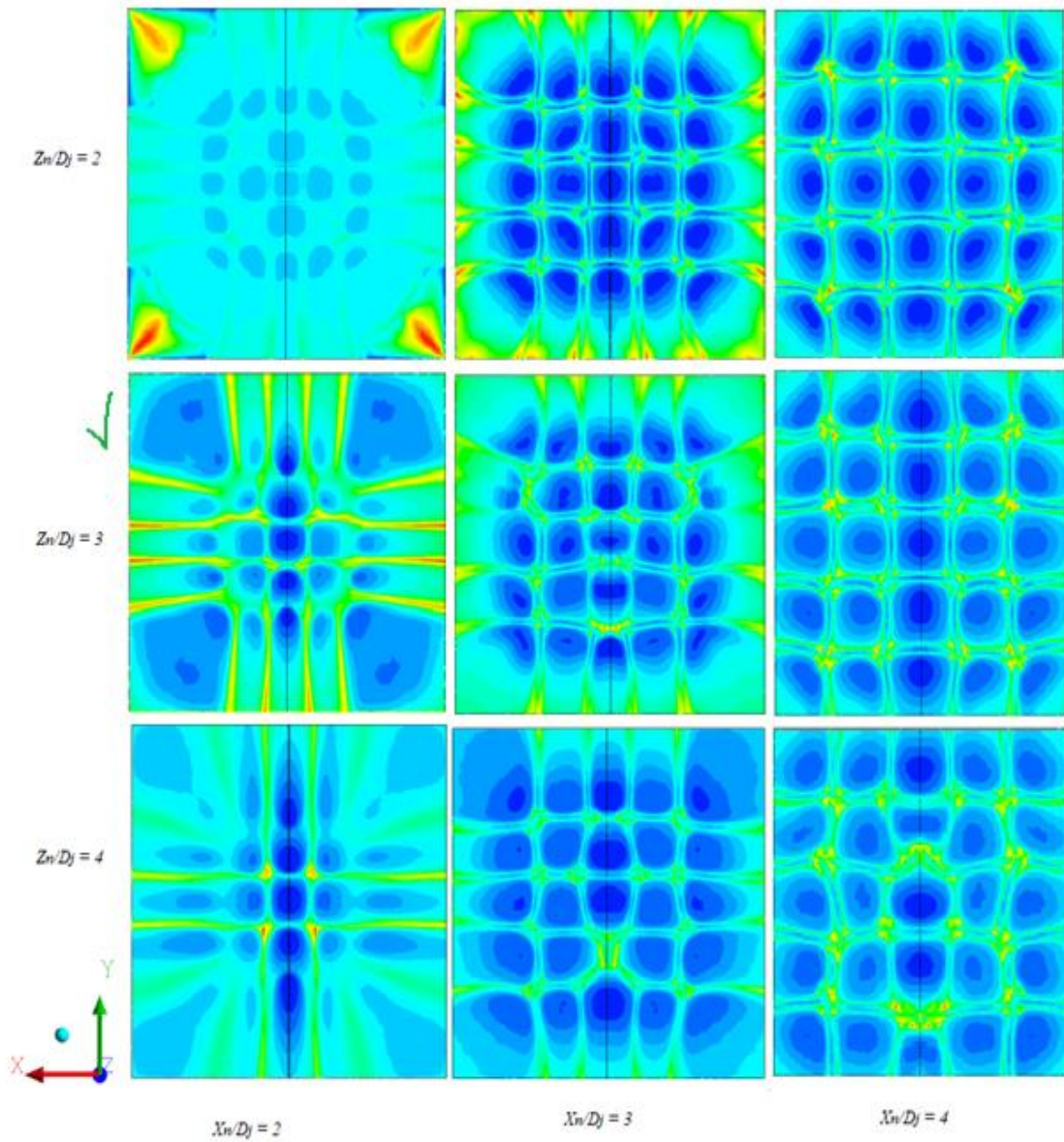
Şekil 4.32. Düz plakada minimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $Re = 20000$

Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te düz plakada minimum çapraz akış sonuçları hedef plaka yüzeyinde sıcaklık kontur diyagramları şeklinde görülmektedir. Sıra ortalamalı Nusselt grafikleri olan Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve ortalama Nusselt tablosu Tablo 4.5'te en iyi Nusselt sonucunun $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$ 'de elde edildiği belirtilmiştir. Bu durum kontur



Şekil 4.33. Düz plakada minimum çapraz akışta akım çizgileri, $Re = 20000$

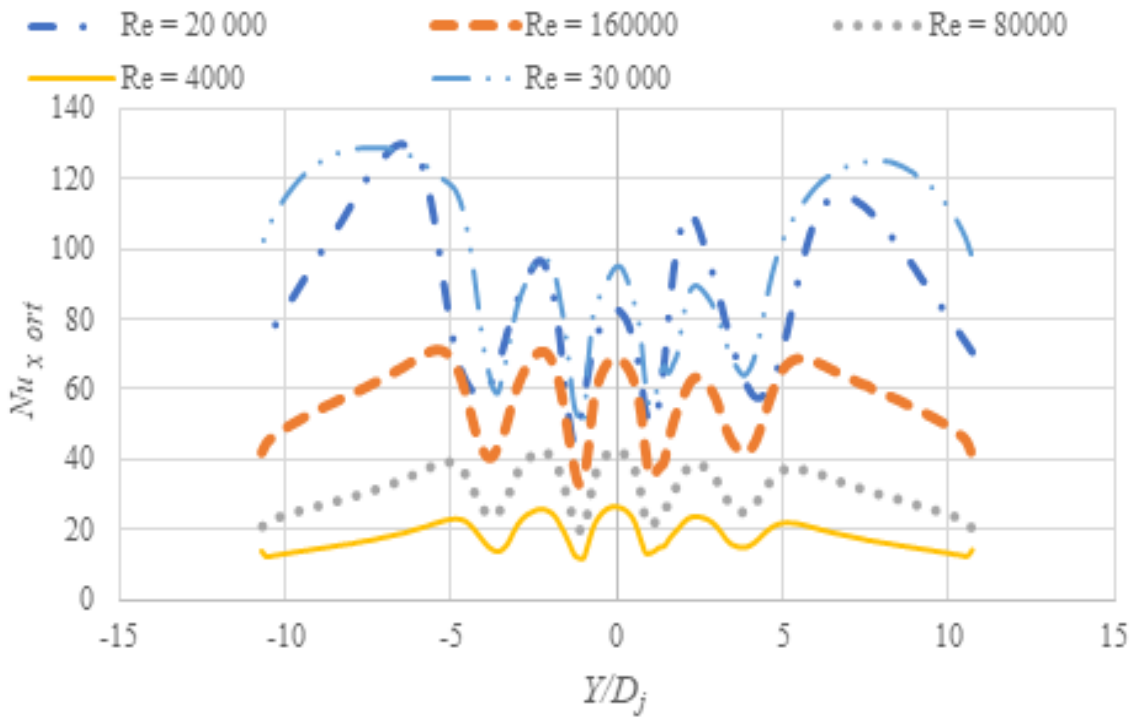
diyagramlarında da görülmektedir. Şekil 4.33'e göre $X_n/D_j = 3$ ve $X_n/D_j = 4$ 'te durma noktaları belirgin olup plaka geneline dağıldığından üniform görünümlüdür. Oysa $X_n/D_j = 2$ 'de merkez bölgede çarpma etkisinin oluşması gereken durma noktalarında üniform bir dağılım oluşmamıştır. Yerel ısı transferinin önem taşıdığı uygulamalarda bu tür yoğun jet düzenlemeleri daha iyi sonuç verirken, plaka genelinde ortalama bir ısı transferinin önemli olduğu uygulamalarda jetlerin üniform dağılımı daha kullanışlı olacaktır.



Şekil 4.34. Düz plakada minimum çapraz akışta sıcaklık konturleri, $Re = 20000$

Tablo 4.5'te tüm X_n/D_j ve Z_n/D_j parametrelerinde düz plakanın minimum çapraz akış sonuçları karşılaştırılmıştır. Ortalama Nusselt şeklinde verilen sonuçlara göre en yüksek Nusselt $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$ için elde edilmiştir. Genel olarak $Z_n/D_j = 2$ ve 3'te elde edilen tüm ortalama Nusselt sonuçları yüksek değer almış, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$ 'de ortalama Nusselt değeri önemli derecede düşmüştür. $Z_n/D_j = 3$ için elde edilen sonuçlara göre X_n/D_j parametresi arttıkça ortalama Nusselt değeri de düşmüştür.

Şekil 4.35'te düz plakada minimum çapraz akışta farklı Reynolds sayısı için elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Söz konusu sonuçlara göre genel olarak Reynolds sayısının artışı ile sıra ortalama Nusselt sayısının da arttığı görülmektedir. Düşük Reynolds sayılarında plaka merkez bölgesinde ortalama Nusselt sayısı daha yüksek çıkmıştır. Öte yandan yüksek Reynolds sayılarında ($Re = 20000$, $Re = 30000$ gibi) plakanın kenar bölgesinde ortalama Nusselt sayısında önemli derecede artış görülmüştür.

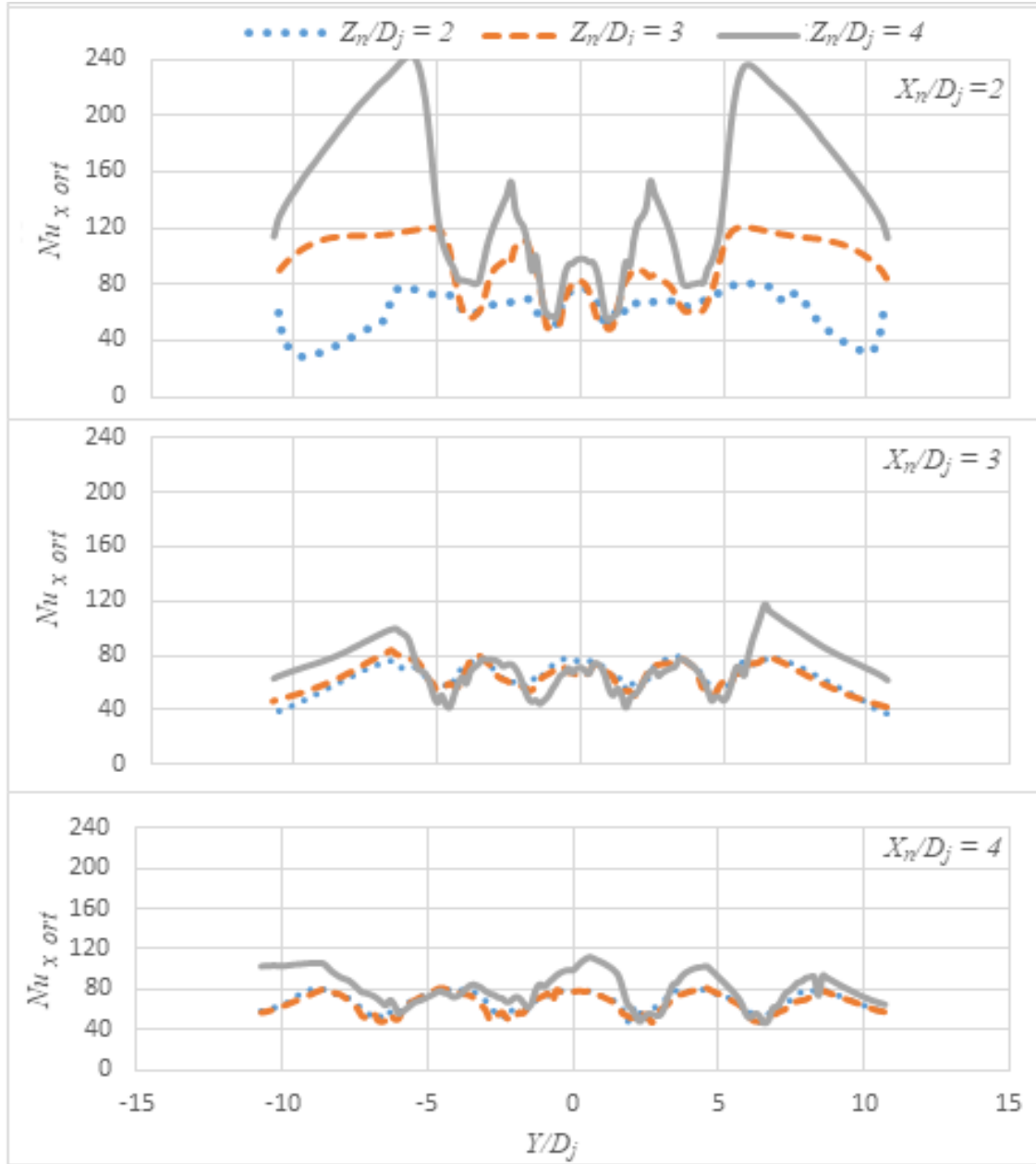


Şekil 4.35. Minimum çapraz akışta düz plakada Reynolds etkisi, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$

4.2.2. Çoklu Jetin Tümsek Şekilli Plakaya Çarpması

Tümsek şekilli plakada farklı parametreler için elde edilen minimum çapraz akış sonuçları Şekil 4.36'da sabit X_n/D_j , değişen Z_n/D_j parametreleri için karşılaştırılmıştır. Sabit $X_n/D_j = 2$ sonuçlarına bakılırsa $Z_n/D_j = 4$ için en yüksek değer elde edilmiş, bunu $Z_n/D_j = 3$ ve nihayet $Z_n/D_j = 2$ izlemiştir. En düşük Nusselt sayısı $Z_n/D_j = 2$ için sağlanmıştır. En yüksek sonuç $X_n/D_j = 3, 4$ ve $Z_n/D_j = 4$ 'te elde edilmiştir. $X_n/D_j = 2$ de tüm Z_n/D_j parametreleri için durma noktası etkisi sadece plaka orta bölgesinde görülmektedir. Orta bölgede Nusselt sayısı minimum değerini alırken plaka kenarlarında Nusselt sayısı yükselmiştir. $X_n/D_j = 3$

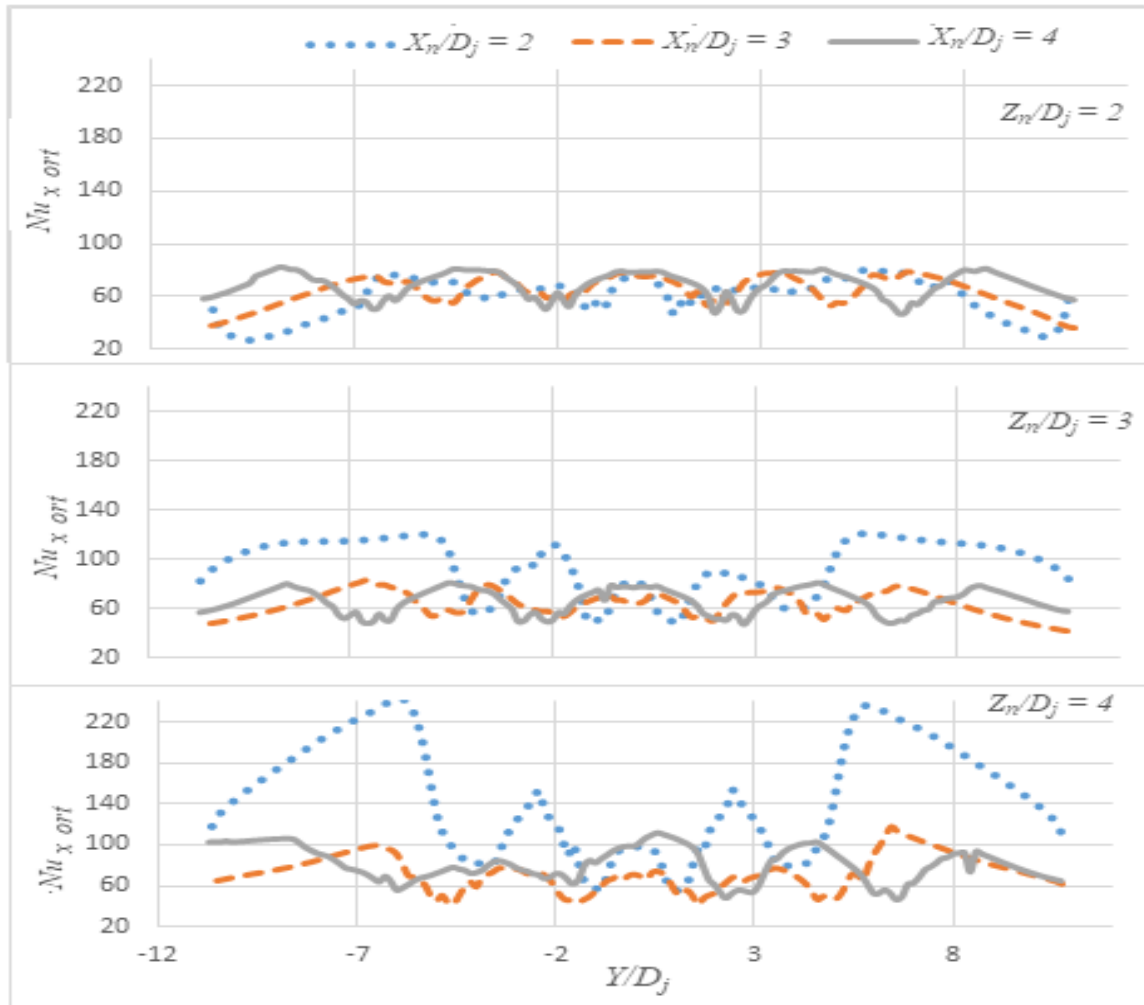
ve 4'te plaka kenar bölgesinde Nusselt bir miktar artış gösterse de plaka geneline üniform olarak dağılmıştır.



Şekil 4.36. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$, $Re = 20000$

Şekil 4.37'de sabit Z_n/D_j değerleri için farklı X_n/D_j parametre sonuçları karşılaştırılmıştır. Sabit $Z_n/D_j = 2$ 'de X_n/D_j etkisi ihmal edilecek kadar düşüktür. $Z_n/D_j = 3$ ve 4'te en yüksek Nusselt değerinin $X_n/D_j = 2$ 'ye ait olduğu görülmektedir.

Tablo 4.6’da tümsek şekilli plakada minimum çapraz akış için ortalama Nusselt sonuçları görülmektedir. $X_n/D_j = 2$, $Z_n/D_j = 3$ ve 4’te maksimum Nusselt değeri sağlanmıştır. Görüldüğü gibi maksimum Nusselt sayısı yüksek plaka mesafelerinde ($Z_n/D_j = 3$ ve 4), düşük jet mesafesinde ($X_n/D_j = 2$ ’de); ya da düşük plaka yüksek jet mesafesinde ($Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$ ’te), sağlanmaktadır. Yüksek jet mesafesinde olumsuz çapraz jet akışı azaldığı için bu durum Nusselt sayısını olumlu etkilemiştir.



Şekil 4.37. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$, $Re = 20000$

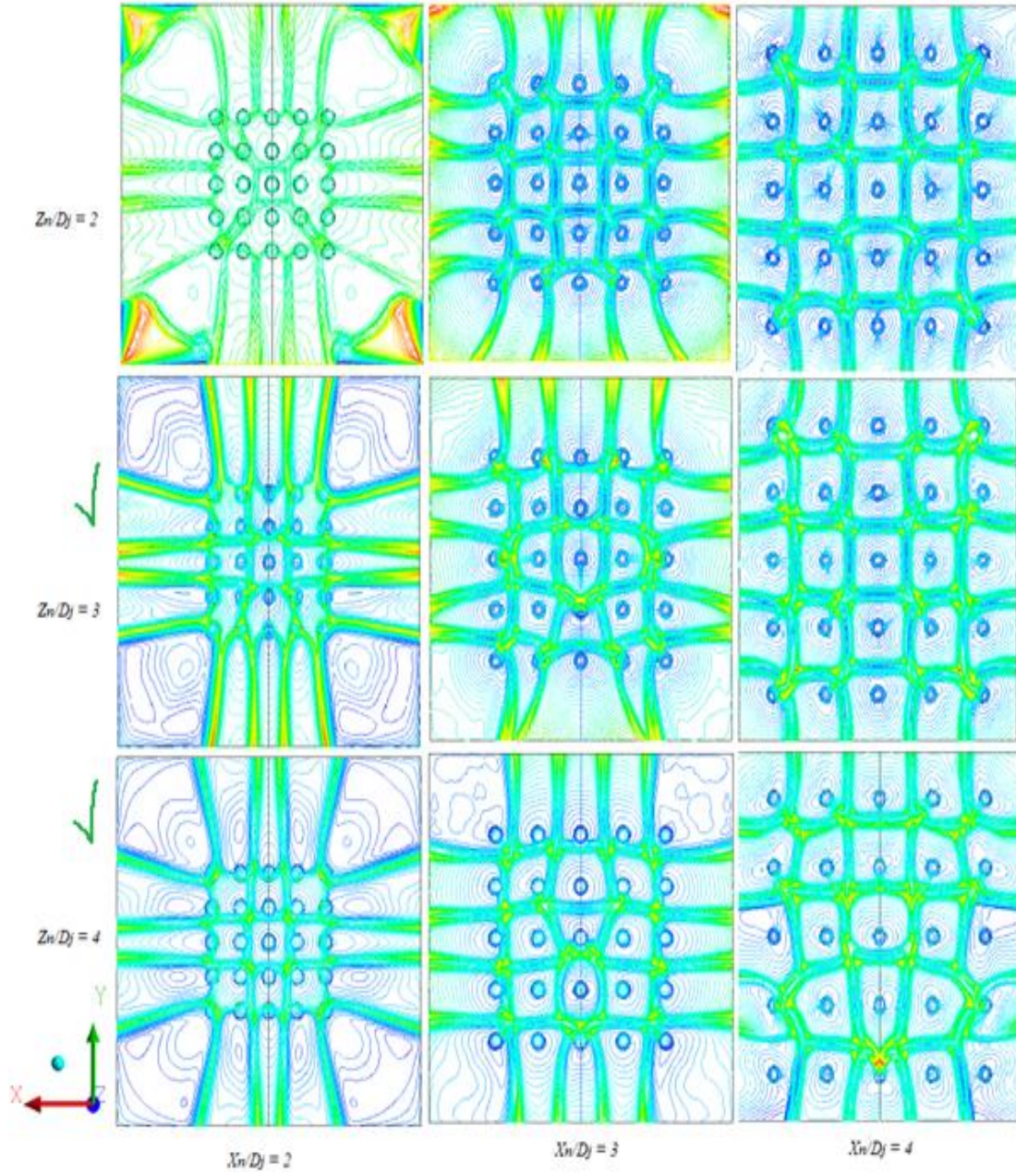
Tablo 4.6’dan görüleceği üzere tüm Z_n/D_j parametrelerinde $X_n/D_j = 4$ için genellikle yüksek Nusselt sayıları elde edilmiştir. Öte yandan tümsek şekilli plakada yüksek Z_n/D_j değerlerinde düşük jet mesafesinde akış etkileşimi ısı transferini olumlu etkilemiştir. Oysa maksimum çapraz akış durumunda düz ve pürüzlü plakalarda jetler arası düşük mesafede olumsuz çapraz akış ve jet etkileşimleri söz konusu iken, minimum çapraz akışta bu durum

daha farklı olmuştur. Nitekim minimum çapraz akışta $Z_n/D_j = 3$ ve 4 , $X_n/D_j = 2$ 'de Nusselt sayısı en yüksek değerini almıştır.

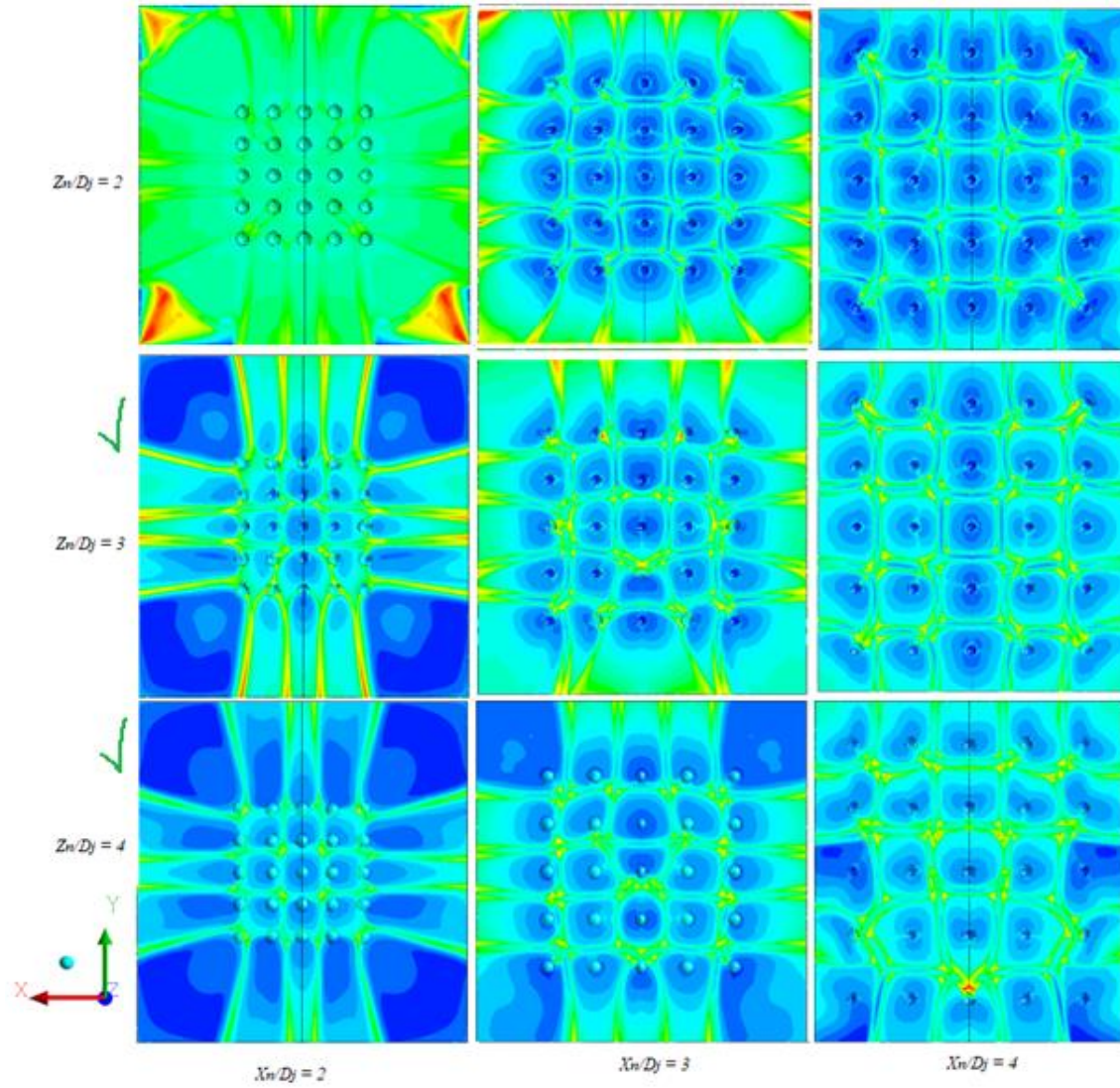
Tablo 4.6. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı

$t/D_d = 0.25, D_d/D_j = 1, Re = 20000$		
Z_n/D_j	X_n/D_j	Nu_{ort}
2	2	59.0
	3	52.9
	4	68.7
3	2	91.3
	3	63.5
	4	65.4
4	2	133.3
	3	70.9
	4	79.4

Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'da tümsek şekilli plakada minimum çapraz akış sonuçları sıcaklık kontur diyagramı şeklinde görülmektedir. İlgili ortalama Nusselt tablosu Tablo 4.6 ve sıra ortalama Nusselt grafiklerinde de görüldüğü gibi en iyi ortalama Nusselt sonuçları $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$ ve $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$ 'de elde edilmiştir. Yani genel olarak minimum çapraz akış düşük jet mesafesinde en iyi ısı transferi sağlanmıştır.



Şekil 4.38. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta akım çizgileri, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$, $Re = 20000$

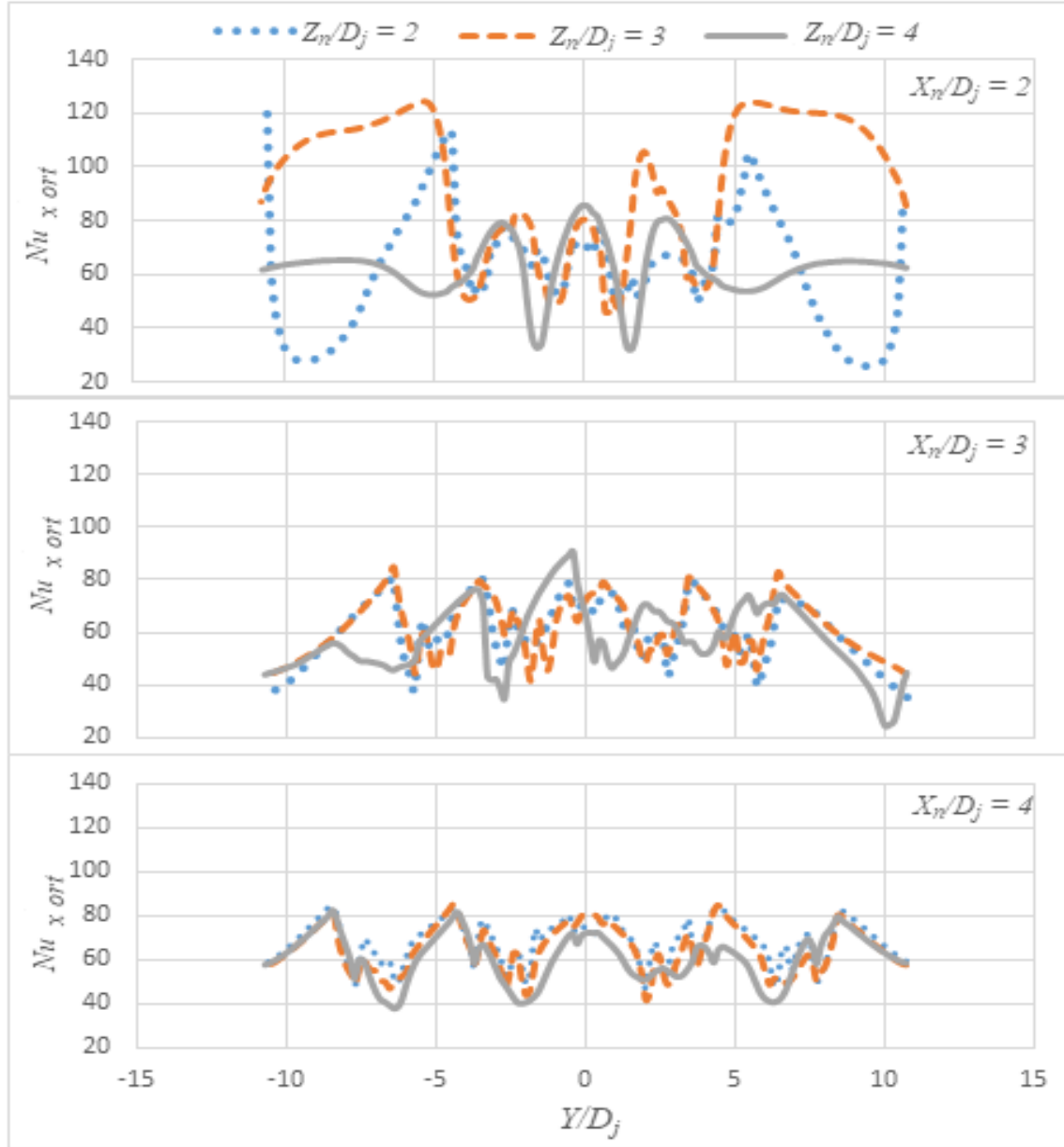


Şekil 4.39. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta sıcaklık konturleri, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$, $Re = 20000$

4.2.3. Çoklu Jetin Çukur Şekilli Plakaya Çarpması

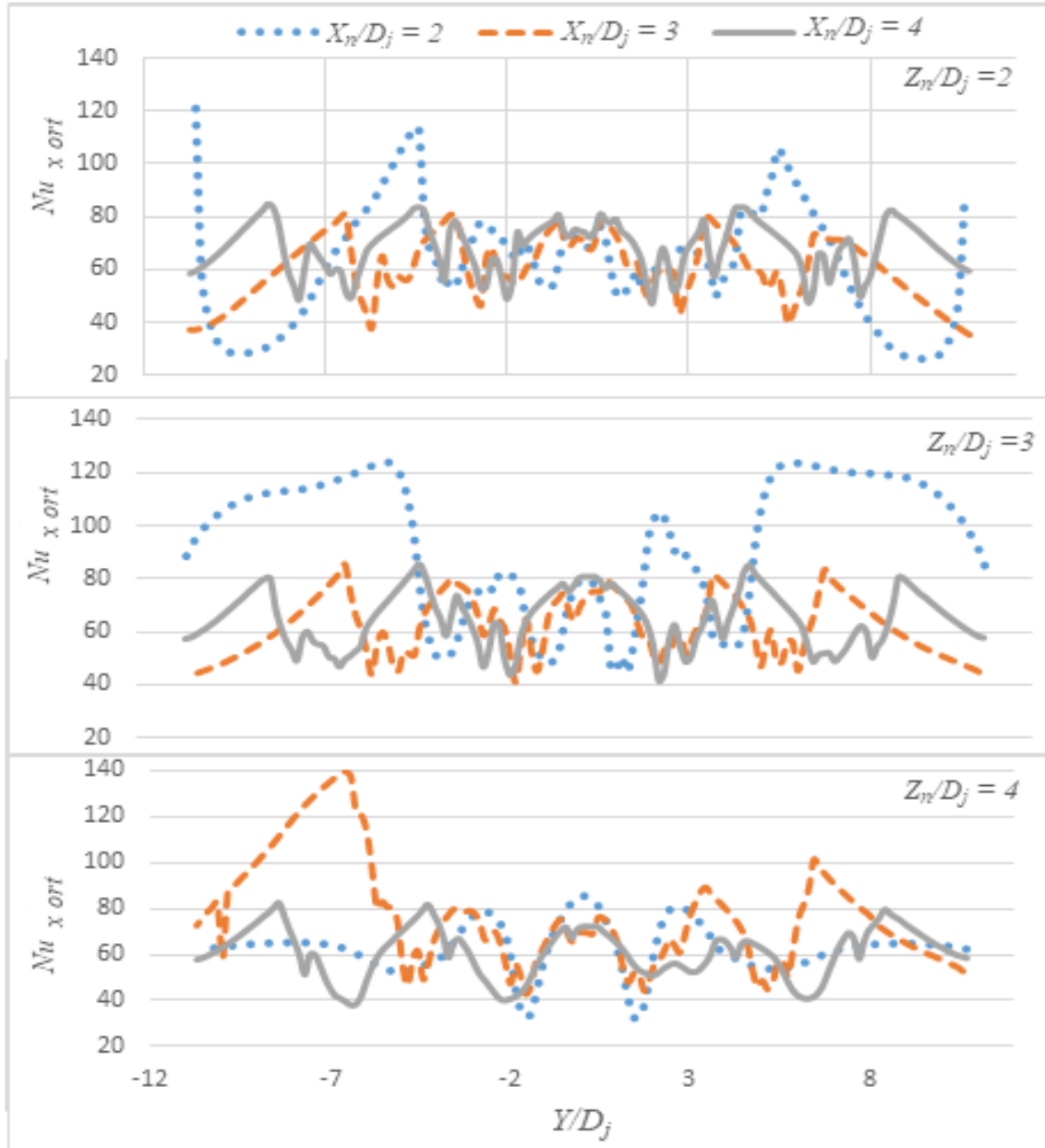
Şekil 4.40'ta çukur şekilli plakada minimum çapraz akış sıra ortalamalı Nusselt sonuçları sabit X_n/D_j 'de farklı Z_n/D_j parametreleri için karşılaştırılmıştır. Sabit $X_n/D_j = 3$ ve 4'te tüm Z_n/D_j sonuçları benzer değerler alırken düşük jet mesafesinde ($X_n/D_j = 2$) $Z_n/D_j = 2$ ve 3'te en yüksek sıra ortalamalı Nusselt sayısı tespit edilmiştir. Bu parametrelerde ayrıca öne çıkan başka bir özellik ise plaka kenar bölgesinde Nusselt sayısı önemli oranda yükselmiştir. Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'de görüldüğü gibi $X_n/D_j = 2$, $Z_n/D_j = 2$ ve 3'te özellikle merkez bölgede tüm plaka mesafesi için sonuçlar yakın değer alırken, merkezden uzaklaştıkça plakalar arası mesafe etkisi öne çıkmıştır.

Şekil 4.41’de çukur şekilli plakada minimum çapraz akış sonuçları sabit Z_n/D_j değerleri için farklı X_n/D_j parametre sonuçları karşılaştırılmıştır. Tüm Z_n/D_j değerlerinde en iyi sonuçlar $X_n/D_j = 2$ ve 3 için elde edilmiştir. $Z_n/D_j = 2$ ve 3 için jet mesafesi $X_n/D_j = 2$ iken; $Z_n/D_j = 4$ ’te ise $X_n/D_j = 3$ iken en iyi sıra ortalamalı Nusselt sayısı elde edilmiştir.



Şekil 4.40. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta Z_n/D_j etkisi, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$, $Re = 20000$

Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta alan ortalamalı Nusselt değerleri Tablo 4.7’de görülmektedir. Tablo 4.7 ve Şekil 4.41’den de görüldüğü gibi en yüksek Nusselt sayısı $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$ ’de elde edilmiştir.

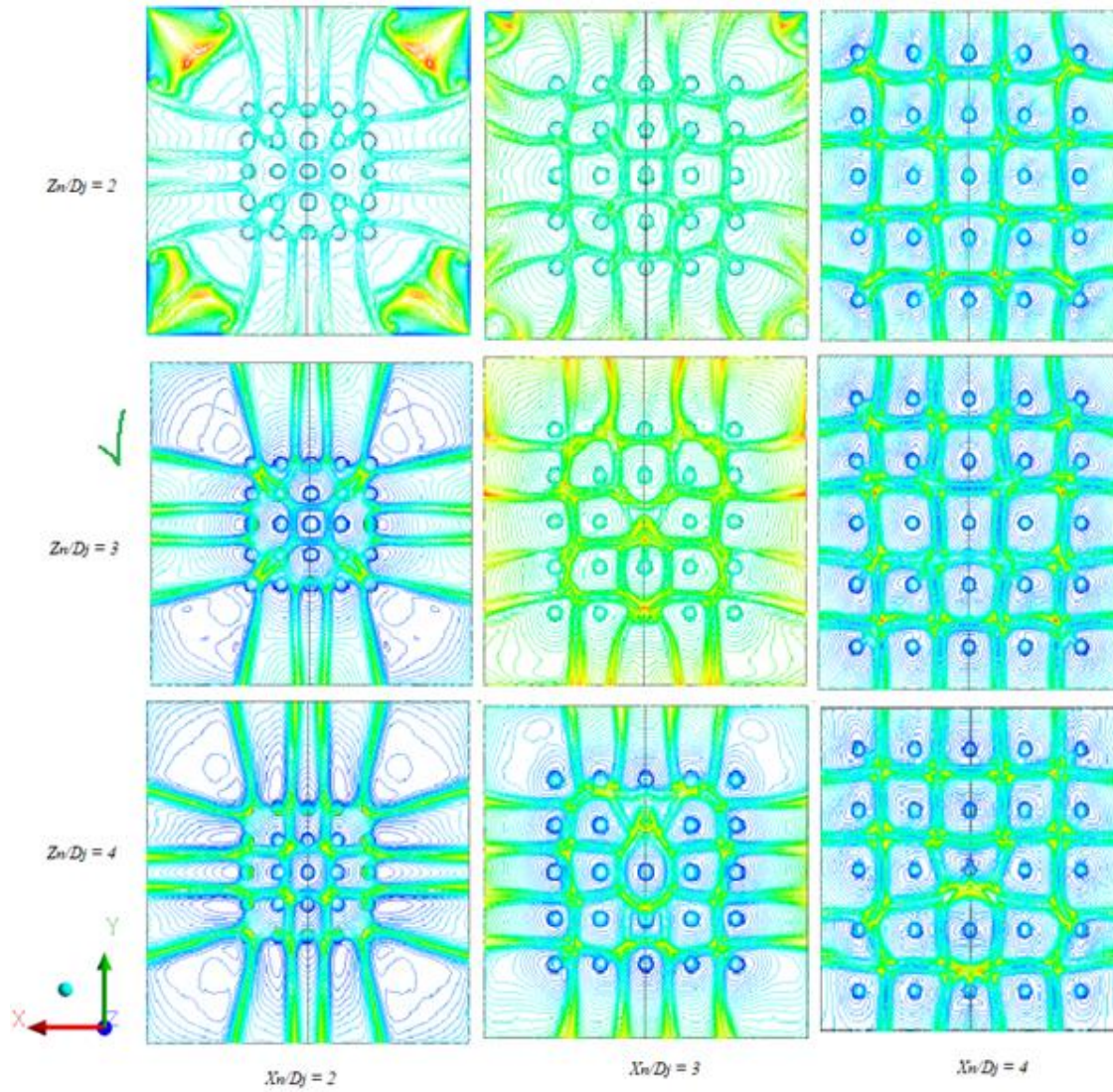


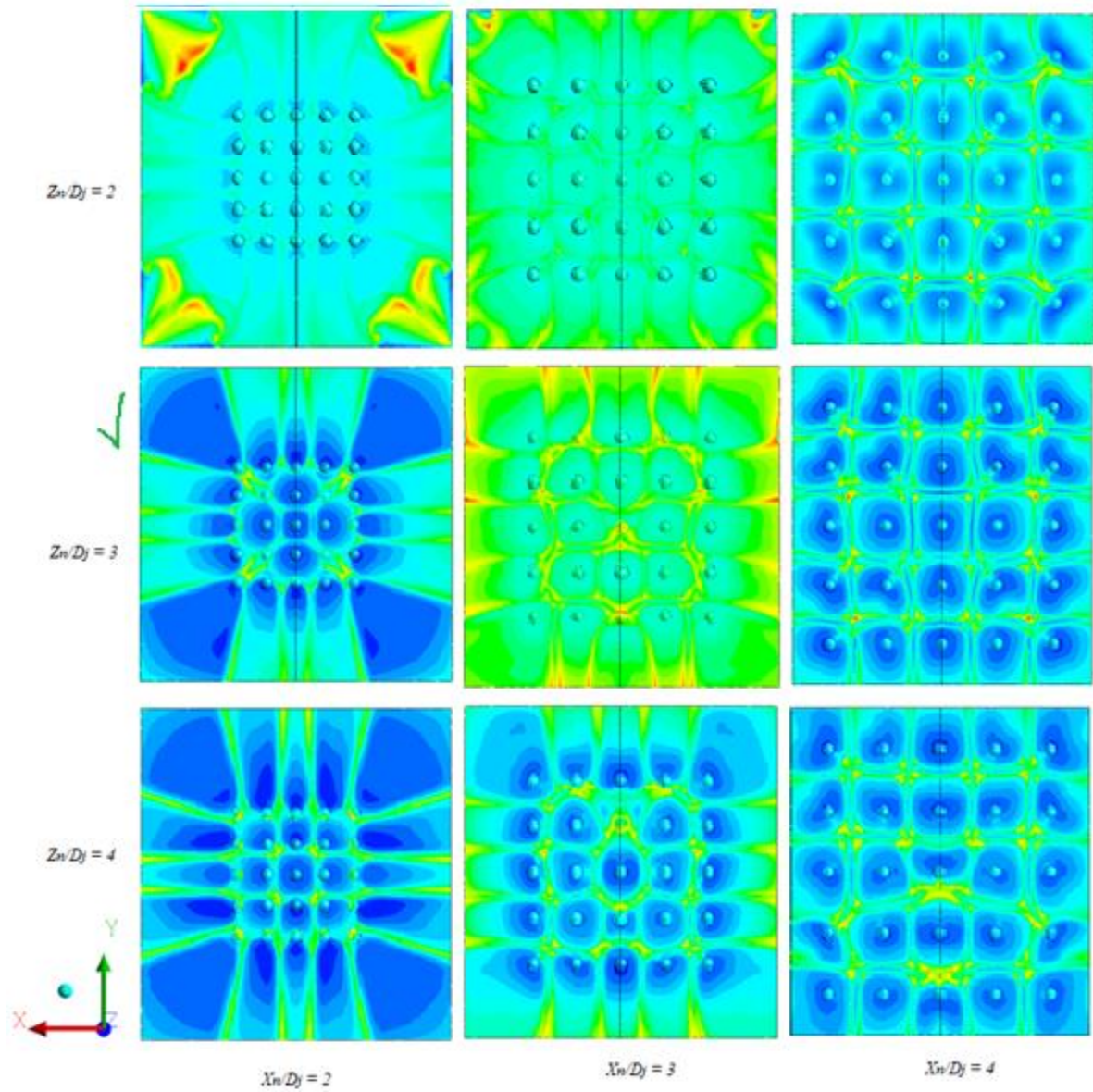
Şekil 4.41. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta X_n/D_j etkisi, $t/Dd = 0.25$, $D_d/D_j = 1$, $Re = 20000$

Minimum çapraz akışta çukur şekilli plaka yüzeyinde elde edilen sıcaklık kontur diyagramları Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te gösterilmiştir. Tablo 4.7 ve ilgili sıra ortalamalı Nusselt şekillerine göre en iyi Nusselt sayısı $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$ için elde edilmiştir.

Tablo 4.7. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı

$t/D_d = 0.25, D_d/D_j = 1, Re = 20000$		
Z_n/D_j	X_n/D_j	Nu_{ort}
2	2	54.6
	3	62.3
	4	68.7
3	2	80.3
	3	62.9
	4	64.7
4	2	61.7
	3	74
	4	59

Şekil 4.42. Çukur şekilli plaka minimum çapraz akışta akım çizgileri, $Re = 20000, t/D_d = 0.25, D_d/D_j = 1$



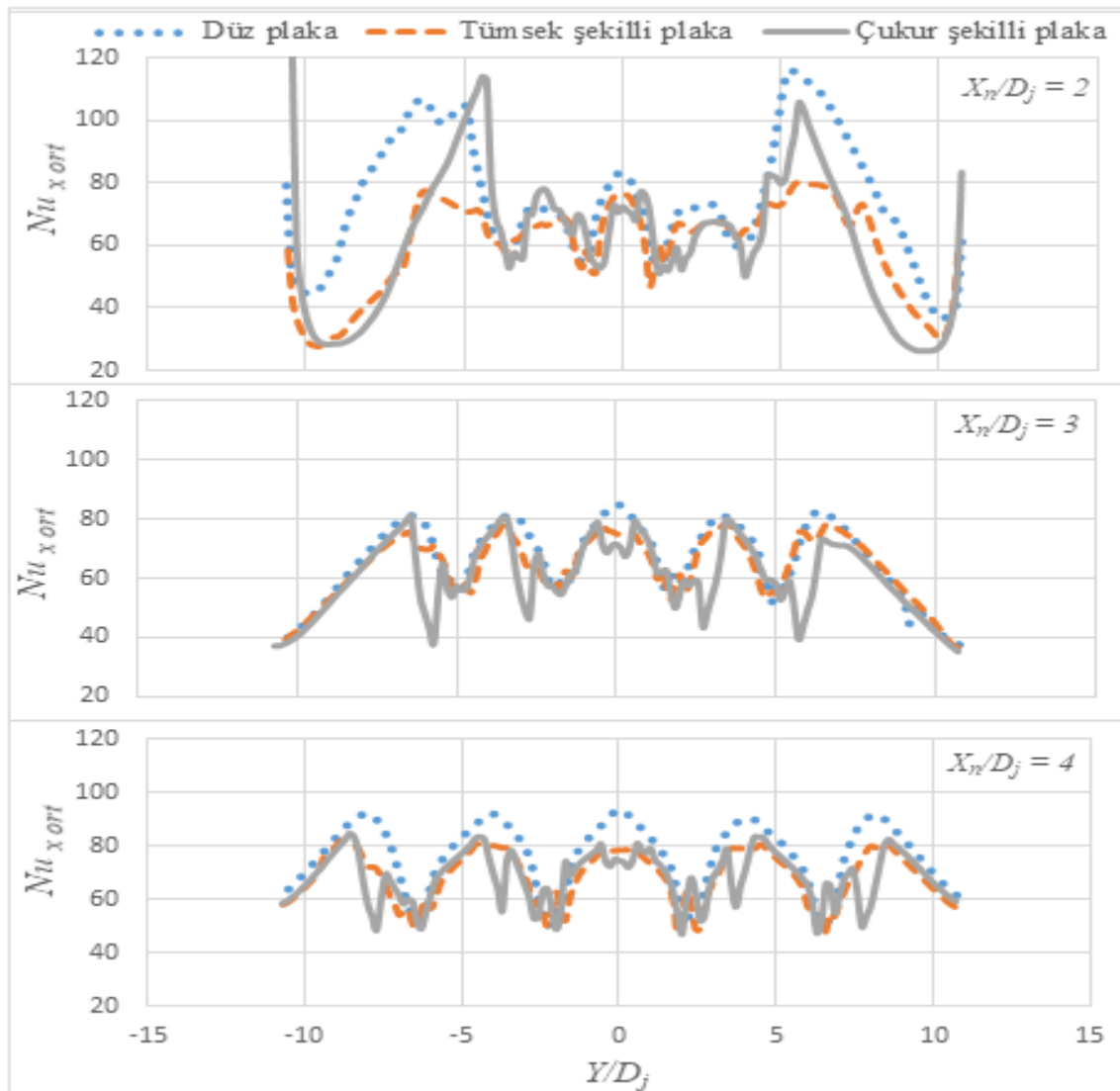
Şekil 4.43.Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta sıcaklık konturleri, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

4.2.4. Minimum Çapraz Akışta Plaka Türlerinin Karşılaştırılması

Minimum çapraz akış için elde edilen sıra ortalamalı Nusselt sonuçları farklı plakalar için Şekil 4.44 - Şekil 4.46'da karşılaştırılmıştır. Şekil 4.44'te $Z_n/D_j = 2$, Şekil 4.45'te $Z_n/D_j = 3$ ve Şekil 4.46'da $Z_n/D_j = 4$ için karşılaştırma yapılmıştır.

Şekil 4.44'e göre $Z_n/D_j = 2$ ve $X_n/D_j = 2$ 'de en yüksek sonuçlar düz plakaya ait, ardından çukur şekilli plaka sonuçları yüksek değer almış, en düşük değerler tümsek şekilli plakaya

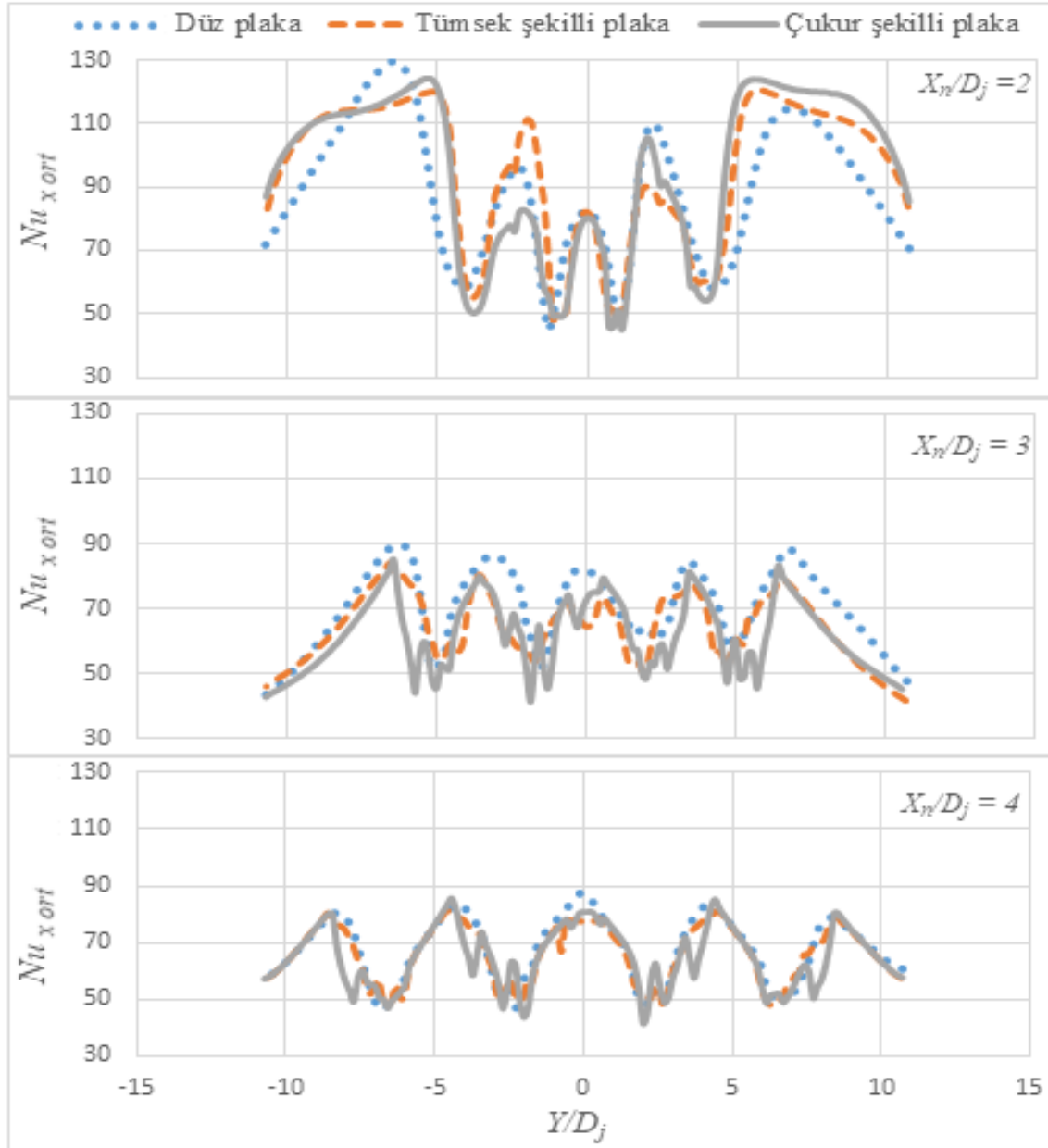
ait olmuştur. $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$ 'te düz ve tümsek şekilli plaka sonuçları benzer olmakla birlikte düz plaka sonuçları bir miktar daha yüksektir. Aynı durum şekilde $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$ sonuçlarında da karşımıza çıkmaktadır. Yine düz ve tümsek şekilli plaka sonuçları benzer karakterde olmasına karşın düz plaka sonuçları daha yüksektir. $X_n/D_j = 3$ ve 4 parametrelerinde çukur şekilli plaka sonuçlarına bakılırsa durma noktası etkisi bozulmuştur. Düz ve tümsek şekilli plakada ki gibi durma noktalarının etkisini görmek mümkün değildir.



Şekil 4.44. Minimum çapraz akışta farklı plakaların sıra ortalamlı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

Şekil 4.45'e göre $Z_n/D_j = 3$ için sonuçlara bakılırsa yine $X_n/D_j = 2$ 'de elde edilen sonuçlar $X_n/D_j = 3$ 'e göre çok yüksek çıkmıştır. Bu durum her üç plaka türü için de benzer olmuştur. Nitekim ortalama Nusselt tablosunda da ilgili parametrelerde Nusselt sayısının önemli derece artış gösterdiği anlaşılmaktadır. $X_n/D_j = 3$ ve 4 parametrelerinde düz ve tümsek şekilli plaka sonuçları benzer karakteristikte olup, düz plaka sonuçları daha yüksek, çukur plaka sonuçları en düşük değerini almıştır. Çukur şekilli plakada düşük Nusselt sayısının en önemli nedeni ise durma noktalarının etkisinin bozulması olduğu görülmektedir. Nitekim çukur şekilli plakada durma noktalarında önemli Nusselt düşüşleri gerçekleşmiştir. Çukur şekillerinin çapı ile jet çapı oranlarının değişimi ile bu durumun ortadan kalkması, daha iyi ısı transferinin sağlanıp sağlanamayacağı kontrol edilebilir. $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$ 'te düz plaka sonucu açık bir şekilde diğer plaka türlerine göre daha yüksek değerler göstermiştir. Bu durumu Tablo 4.8'den de görmek mümkündür. $X_n/D_j = 4$ 'te her üç plaka sonucunun önemli ölçüde çakıştığı görülmektedir.

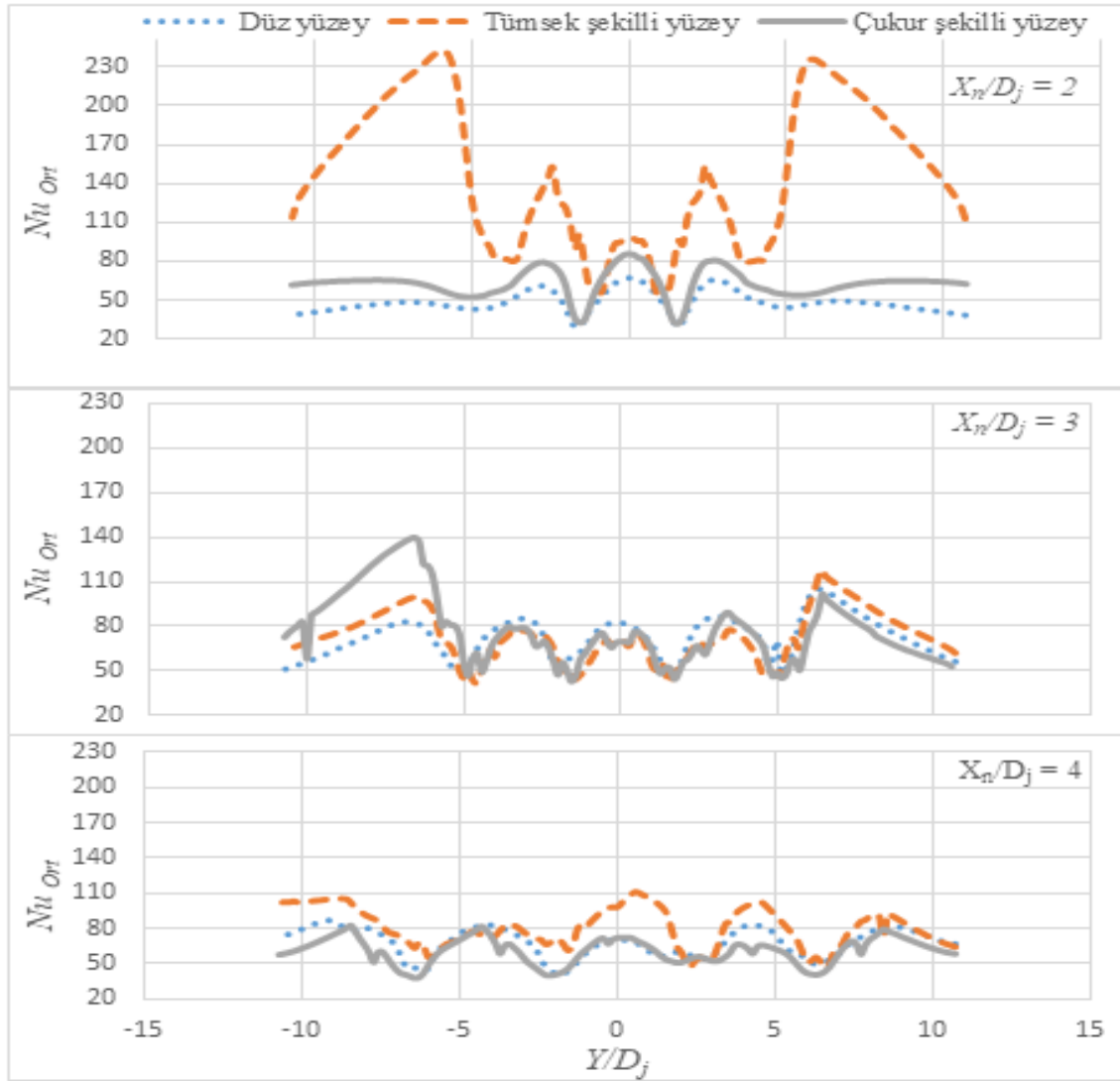
Tablo 4.8'de $X_n/D_j = 2$ ve $Z_n/D_j = 2$ 'de düz, çukur şekilli ve tümsek şekilli plakada ortalama Nusselt sonuçları sırasıyla 66.7, 54.6, 59.0 şeklinde çıkmıştır. Şekil 4.42' den hatırlanacağı üzere sabit $Z_n/D_j = 2$ için $X_n/D_j = 3$ sonuçlarına göre en iyi değerler yine düz plakaya ait çıkmıştır. İlgili parametreler için Tablo 4.8'de düz, çukur şekilli, tümsek şekilli plaka sonuçları sırasıyla 64.1, 62.3, 52.9 şeklindedir. $Z_n/D_j = 2$ için $X_n/D_j = 4$ 'te de Nusselt sayısının düz plakada en iyi değeri aldığı görülmektedir. Dolayısıyla düşük plaka mesafesinde jet mesafesi ne olursa olsun en iyi Nusselt sonuçları düz plakaya ait çıkmıştır.



Şekil 4.45. Minimum çapraz akışta farklı plakaların sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

Sabit $Z_n/D_j = 3$ için $X_n/D_j = 2$ 'de sıra ortalamalı Nusselt sonuçlarına göre çukur ve tümsek şekilli plaka sonuçları düz plaka sonuçları ile benzerlik göstermekle birlikte Tablo 4.8 de dikkate alınırsa en iyi sonuç tümsek şekilli plakaya ait çıkmıştır. Dolayısıyla düşük plaka mesafesindeki ($Z_n/D_j = 2$) tüm jet mesafelerinde düz plaka iyi performans göstermiş; artan plaka mesafesinde ($Z_n/D_j = 3$) ve düşük jet mesafesinde ($X_n/D_j = 2$) çukur ve tümsek şekilli plaka sonuçları da yüksek değer almıştır. Öte yandan hem şekil 4.45'ten hem de Tablo

4.8'den $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$ 'te en iyi değer düz plakaya ait olmuş; $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$ 'te her üç plaka sonuçları yakın değer almıştır.



Şekil 4.46. Minimum çapraz akışta farklı plakaların sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

Tablodaki değerlere göre sabit $X_n/D_j = 3$ durumunda $Z_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde arttıkça Nusselt sayısı her üç plakada da genel olarak artış göstermiştir. Örneğin düz plaka için $X_n/D_j = 3$ 'te $Z_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde artışı ile ortalama Nusselt sayısı sırasıyla 64.1, 73.3, 70.9 şeklinde, çukur şekilli plakada 62.3, 62.9, 74.1 şeklinde, tümsek şekilli plakada ise 52.9, 63.5, 70.9 şeklinde artış göstermiştir. $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$ 'de düz plaka minimum Nusselt değerini alırken, tümsek şekilli plaka ise maksimum değerini almıştır. Özellikle yakın plaka

mesafesinde($Z_n/D_j = 2, 3$ gibi) en iyi sonuçlar düz plakaya ait çıkmıştır. $Z_n/D_j = 4$ 'te tümsek ve çukur şekilli plaka sonuçları daha yüksek çıkmıştır.

Tablo 4.8. Minimum çapraz akışta farklı plaka türlerinde alan ortalama Nusselt sayısı

$t/D_d = 0.25, D_d/D_j = 1, Re = 20000$				
Z_n/D_j	X_n/D_j	Düz plaka	Çukur şekilli plaka	Tümsek şekilli plaka
2	2	66.7	54.6	59.0
	3	64.1	62.3	52.9
	4	74.4	68.7	68.7
3	2	84.4	80.3	91.3
	3	73.3	62.9	63.5
	4	64.7	64.7	65.4
4	2	46.9	61.7	133.3
	3	70.9	74.1	70.9
	4	66	59	79.4

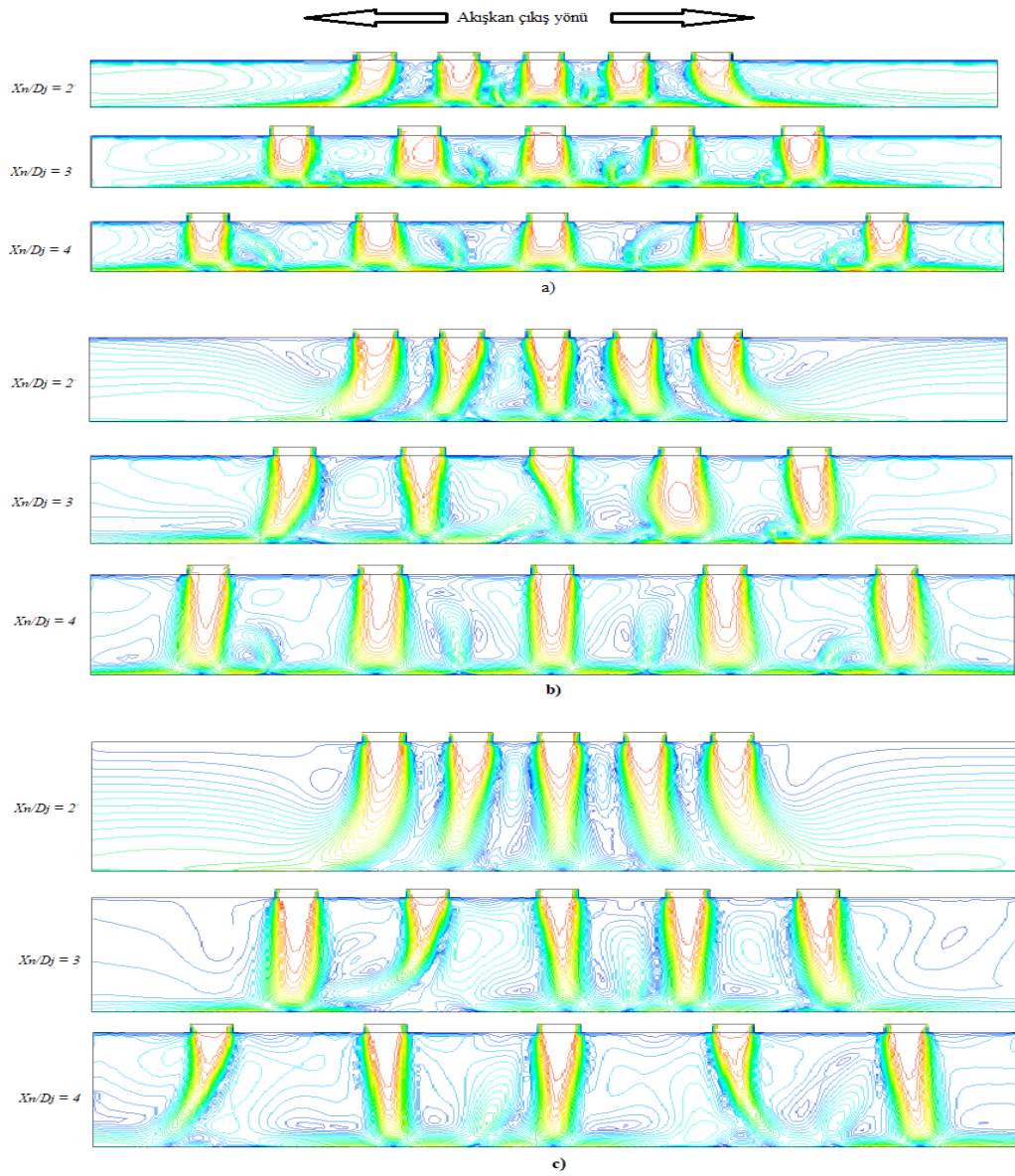
Şekil 4.46'da minimum çapraz akış sonuçları $Z_n/D_j = 4$ 'te farklı plakalar için karşılaştırılmıştır. $X_n/D_j = 2$ 'de tümsek şekilli plaka sonuçları düz ve çukur şekilli plaka sonuçlarına göre çok daha yüksek iken düz ve çukur şekilli plaka sonuçları yakın değer almıştır. Xing et al. (2010) yaptıkları benzer çalışmada minimum çapraz akış ve yoğun jet için düz ve çukur plakada sonuçların benzer çıktığını belirtmişlerdir. Tablo 4.8'de ilgili parametreler için tümsek şekilli plaka ortalama Nusselt sayısı 133.3 olup, diğer plaka sonuçlarının çok üzerindedir. Aynı şekilde $X_n/D_j = 3$ sonuçlarında çukur şekilli plaka sonuçları daha yüksek değer alırken, $X_n/D_j = 4$ olması durumunda tümsek şekilli plakada elde edilen sonuçlar daha yüksek çıkmıştır.

$Z_n/D_j = 4$ 'te genel itibari ile en iyi sonuçlar tümsek şekilli plaka sonuçlarına ait çıkmıştır. Xing et al. (2010) çarpan çoklu jet deneysel çalışmasında 9x9 sıralı çarpan çoklu jeti farklı pürüzlülükteki plakalara farklı çapraz akış ve $Z_n/D_j = 4$ için çarptırmıştır. Deneysel olarak incelenen çalışmada tüm plaka türlerinde minimum çapraz akış sonuçları en yüksek çıkarken, maksimum ve minimum her iki çapraz akış için de pürüzlü yüzeyde daha yüksek ısı transferi görülmüştür.

Şekil 4.47’de düz plakada minimum çapraz akışta simetri ekseninde hız diyagramları görülmektedir. Şekil 4.47a, b ve c ‘de hız diyagramları sırasıyla $Z_n/D_j = 2, 3, 4$ parametreleri için gösterilmiştir.

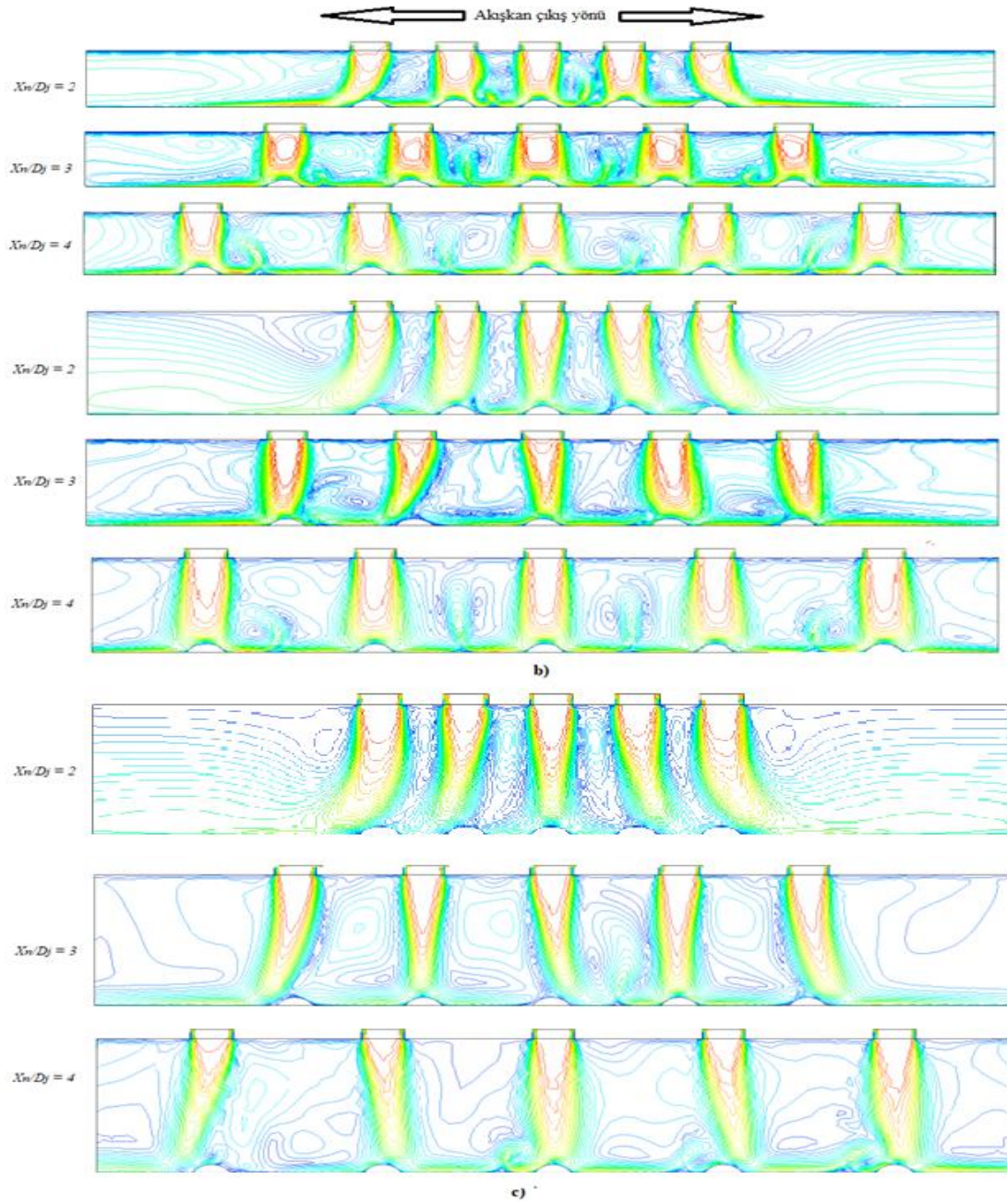
Daha önceki verilerden hatırlanacağı üzere minimum çapraz akış yakın plaka mesafesi ve nispeten yoğun jet durumunda düz plakada en iyi ısı transfer sonuçları elde edilmiştir. Nitekim en iyi ortalama Nusselt sonucu her üç plaka türünde de $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 2$ parametrelerinde sağlanmıştır. Düz plakada en düşük Nusselt sayısı yüksek plaka mesafesi ($Z_n/D_j = 4$) ve yoğun jet için ($X_n/D_j = 2$) elde edilmiştir. Şekil 4.47a’da yakın plaka mesafeleri olan $Z_n/D_j = 2$ ve 3’te, savrulmanın az olması ve jetler arası ikincil çarpma noktalarının da etkisi ile hemen hemen tüm akışkanın plakaya çarpması gerçekleştiğinden, akışkan-plaka teması önemli ölçüde sağlanmıştır. Bu bakımdan ortalama Nusselt sayısı yüksek çıkmıştır. Özellikle Şekil 4.47b’de hem yakın plaka mesafesinin avantajı hem de kanal akışı sayesinde daha fazla akışkanın plaka teması sayesinde en yüksek ısı transfer durumu elde edilmiştir. Şekil 4.47c’de $Z_n/D_j = 4, X_n/D_j = 2$ ’de hem plakalar arası mesafe artışı hem de yoğun jetten kaynaklanan jetler arası güçlü etkileşim çarpma öncesi önemli derece savrulmaya neden olmuştur. Bu durumda özellikle sonlardaki jetlerin hedef plakaya çarpması zayıf kalmıştır. Bu durum ortalama Nusselt sayısının düşüşüne sebep olmuştur.

Tümsek şekilli plaka minimum çapraz akışta $Z_n/D_j = 2, 3, 4$ için hız diyagramları Şekil 4.48a, b, c’de sırasıyla görülmektedir. Daha önce Tablo 4.8’de de belirtildiği gibi tümsek şekilli plaka minimum çapraz akışta genel olarak en iyi sonuçlar uzak plaka mesafesi olan $Z_n/D_j = 4$ ‘te sağlanmıştır. Şekil 4.48a’da $Z_n/D_j = 2$ sonuçlarından yoğun jet mesafesinde ($X_n/D_j = 2$), merkez bölgedeki jetlerin çarpması gereken noktaya çarptıkları, kenar jetlerin ise yüksek akış etkileşiminden dolayı akış yönüne meylettikleri için çarpmaları gereken bölgenin dışına çarptıkları görülmektedir. $Z_n/D_j = 2, X_n/D_j = 2$ parametrelerinde kanal akışı etkisi baskın olup durma noktası etkisi nispeten belirsizdir. Öte yandan $X_n/D_j = 3$ ve 4’te



Şekil 4.47. Düz plakada minimum çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri, $Re = 20000$

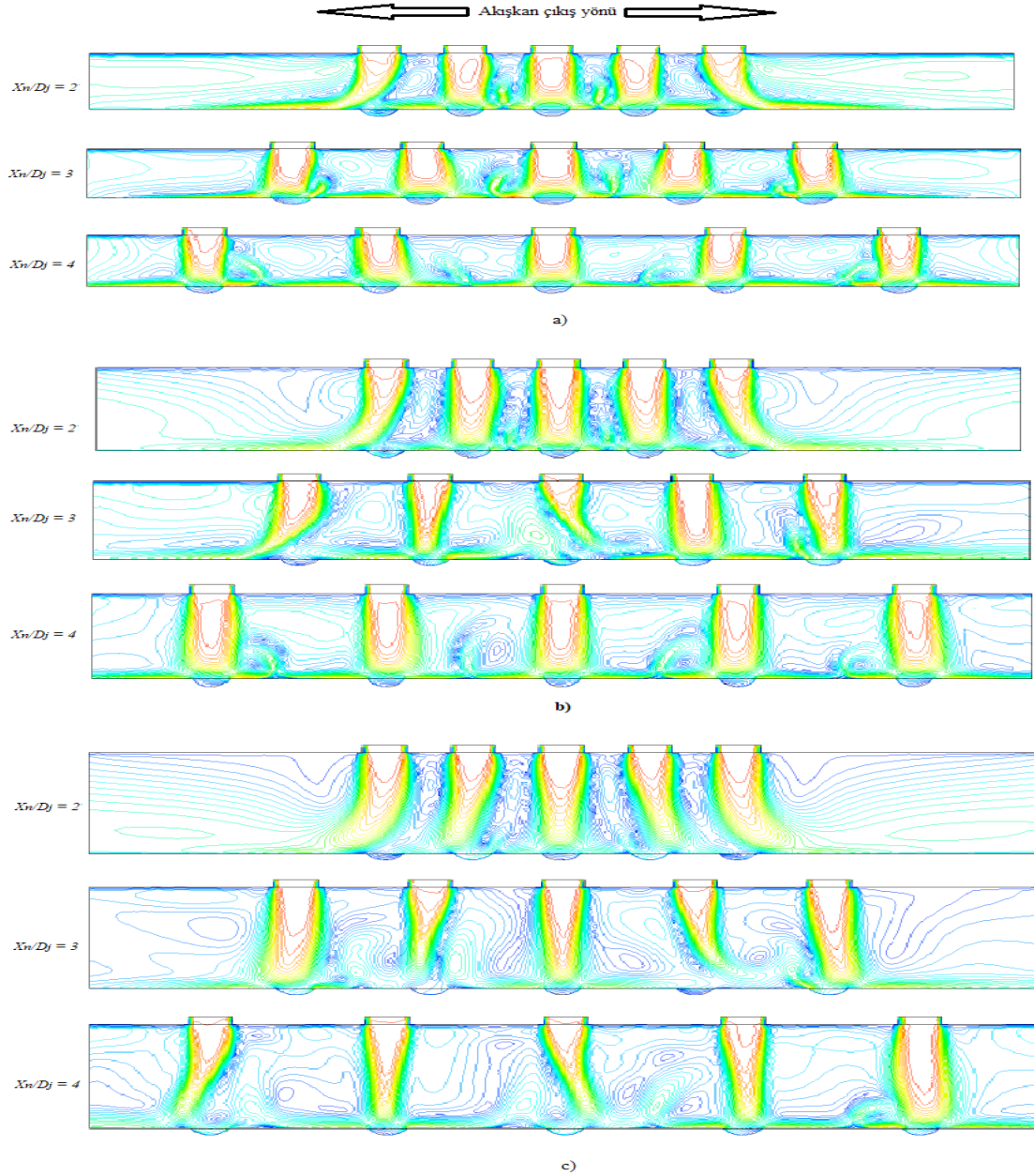
jetlerin arası biraz daha açılınca jetler asıl çarpması gereken bölgeye çarparak savrulma önlenmiştir. Sabit $Z_n/D_j = 2$ için jetler arası mesafe $X_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde arttıkça hem kanal akışı etkisi hem de jetler arası akış etkileşimi azaltılarak daha fazla akışkanın plaka ile teması sağlandığından dolayı ortalama Nusselt sayıları da artış göstermiştir.



Şekil 4.48. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

Ortalama Nusselt tablosuna göre $Z_n/D_j = 2, 3$ ve 4 'te $X_n/D_j = 4$ parametresinde Nusselt sayısı $X_n/D_j = 3$ 'e göre daha yüksek değer almıştır. Hız diyagramında bu durum değerlendirilirse $X_n/D_j = 3$ 'te jetler arası mesafe daha yakın olduğu için türbülans şiddeti daha yüksek olmasından dolayı ikincil çarpma noktaları düzenli değildir. Oysa $X_n/D_j = 4$ 'te hem jetler arası etkileşimden kaynaklanan türbülans durumu nispeten daha az, hem de

oluşan ikincil çarpma noktaları her iki jetin tam ortasında olup, plaka ile tam temas sağlanmıştır. Bu durum ise ısı transferini iyileştirmiştir.



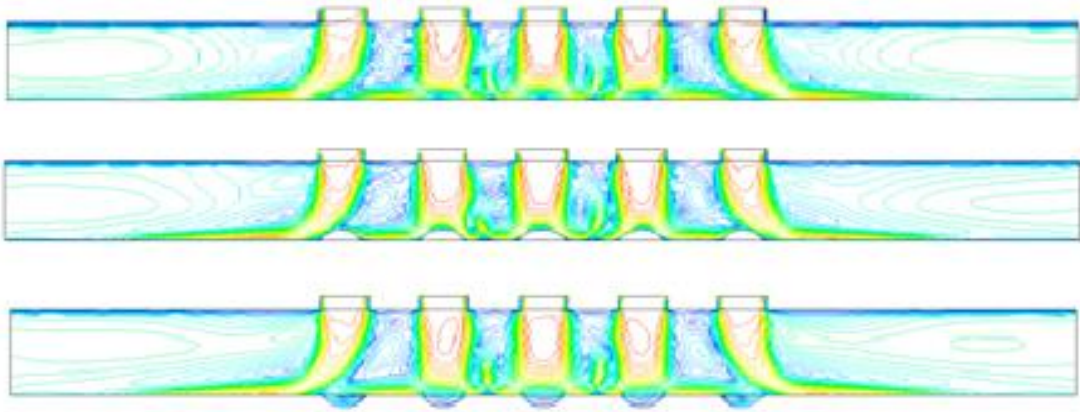
Şekil 4.49. Çukur şekilli plakada, minimum çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta hız diyagramı $Z_n/D_j = 2, 3, 4$ için sırasıyla Şekil 4.49 a, b, c’de gösterilmiştir. Daha önce çukur şekilli plakada minimum çapraz akış sonuçlarına göre $Z_n/D_j = 3$ için yoğun jet durumunda ($X_n/D_j = 2$) en yüksek ortalama Nusselt sayısı elde edildiği tespit edilmişti. Yoğun jet durumunda kanal akışı etkisinin

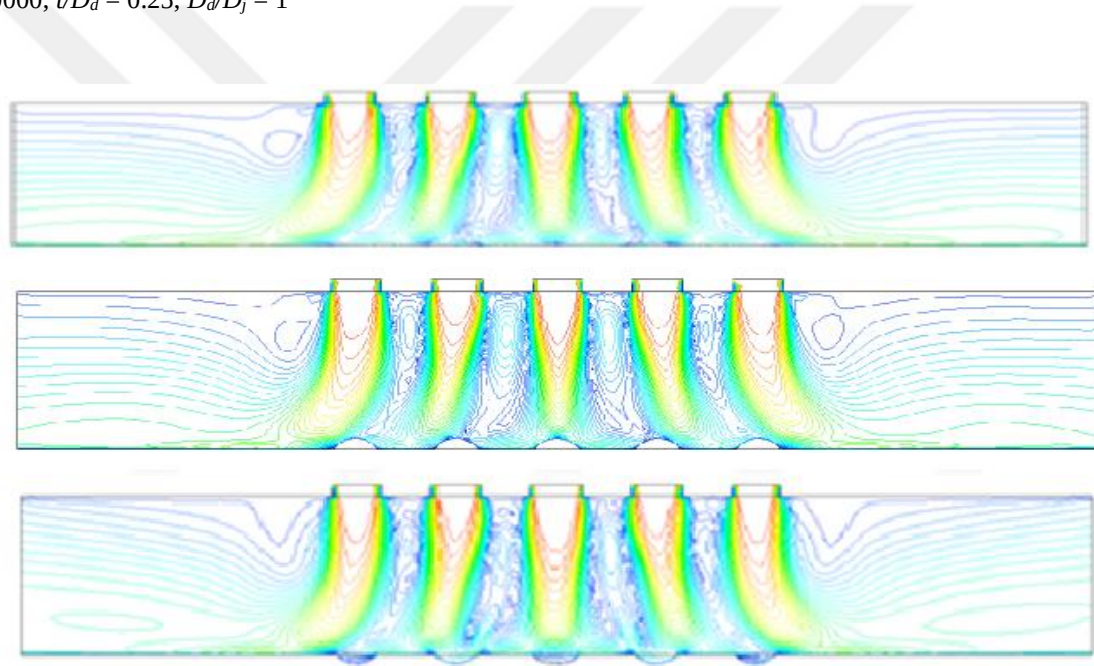
avantajıyla beraber plaka mesafesinin optimum değerde olması ve ikincil çarpma noktalarındaki çevrintilerin şiddetli olmaması durumu ısı transferini artırmıştır. Nitekim $Z_n/D_j = 2$ 'de de ikincil çarpma noktaların çevrintileri mevcuttur, ancak söz konusu çevrintiler daha şiddetli olduğundan plakaya temas eden akışkan miktarını sınırlandırmıştır.

Daha önce bahsedildiği gibi Şekil 4.40'ta verilen $X_n/D_j = 2$ 'de Z_n/D_j etkisine bakıldığında en iyi sonuçların $Z_n/D_j = 2$ ve 3 için elde edildiği gözlenmiştir. En düşük sonuçların ise $Z_n/D_j = 4$ 'e ait olduğu görülmektedir. Bu durumun plaka mesafesi arttıkça jetlerin çarpma öncesi dağılma şiddetlerinin farklı olmasından kaynaklanmıştır. Nitekim Şekil 4.49a, b ve c'de de görüldüğü gibi $Z_n/D_j = 2$ ve 3'te yakın plaka mesafesinde çarpma öncesi jet dağılması minimum düzeydedir ve akışkanın büyük çoğunluğu plaka ile tam temas halindedir. Oysa $Z_n/D_j = 4$ 'te ise plaka mesafesi nispeten artmış ve çarpma sonrası plaka ile olan akış teması azalmıştır. Bu durum ise Nusselt sayısında azalmaya sebep olmuştur.

Şekil 4.50 'de $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$ parametreleri için minimum çapraz akışta düz, tümsek ve çukur şekilli plakalar için hız diyagramları karşılaştırılmıştır. Daha önce $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$ parametrelerinde minimum çapraz akış için tüm plaka sonuçlarına bakıldığında düz plaka sonuçlarının yüksek; tümsek şekilli plaka sonuçlarının daha düşük olduğu tespit edilmişti. Hız diyagramından bu durumun olası sebebine bakılırsa düz plakada çarpma bölgelerinde hızı sıfırlanıp plaka ile temas eden akışkan bölgesi tümsek şekilli plakaya göre daha fazla olmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Öte yandan aynı jet mesafesinde($X_n/D_j = 2$) ancak plaka mesafeleri artırılınca ($Z_n/D_j = 4$) tümsek şekilli plaka sonuçlarının daha yüksek değerler aldığı görülmüştür (Tablo 4.8, Şekil 4.46). Bu bakımdan $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$ için minimum çapraz akım hız sonuçları farklı plakalar için Şekil 4.51'de karşılaştırılmıştır. Söz konusu şekilden de görüldüğü gibi düz ve çukur şekilli plakada çarpma bölgesinde akışın temasını olumsuz etkileyen çevrintiler oluşmuş iken tümsek şekilli plakada ise çevrinti durumu daha azdır. Bu durum sonuçlara ısı transferinin iyileşmesi olarak yansımıştır.



Şekil 4.50. Farklı plakaların minimum çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri, $Z_n/D_j = 2$, $X/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

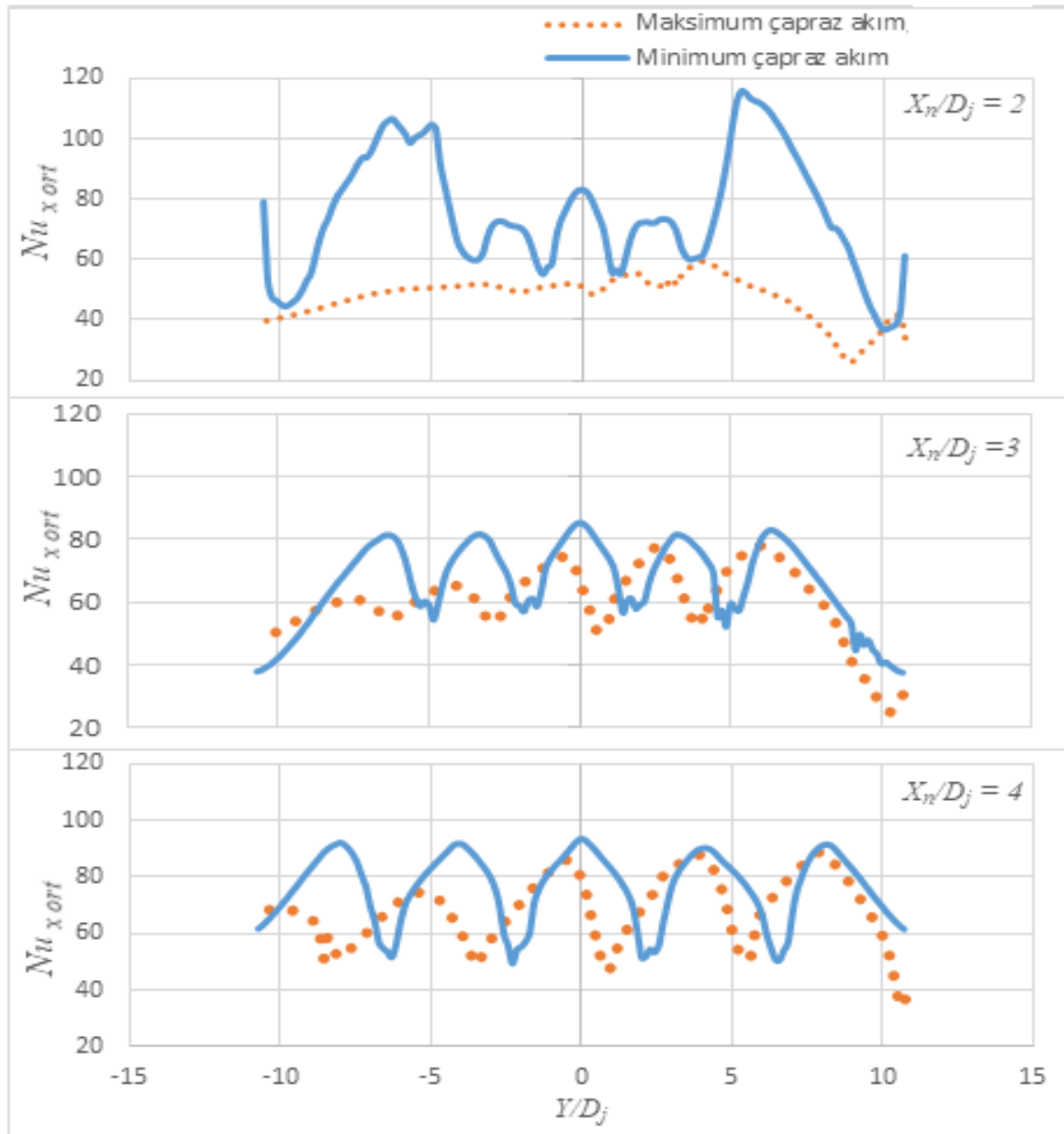


Şekil 4.51. Farklı plakaların minimum çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

4.3. Maksimum ve Minimum Çapraz Akış Etkilerinin Karşılaştırılması

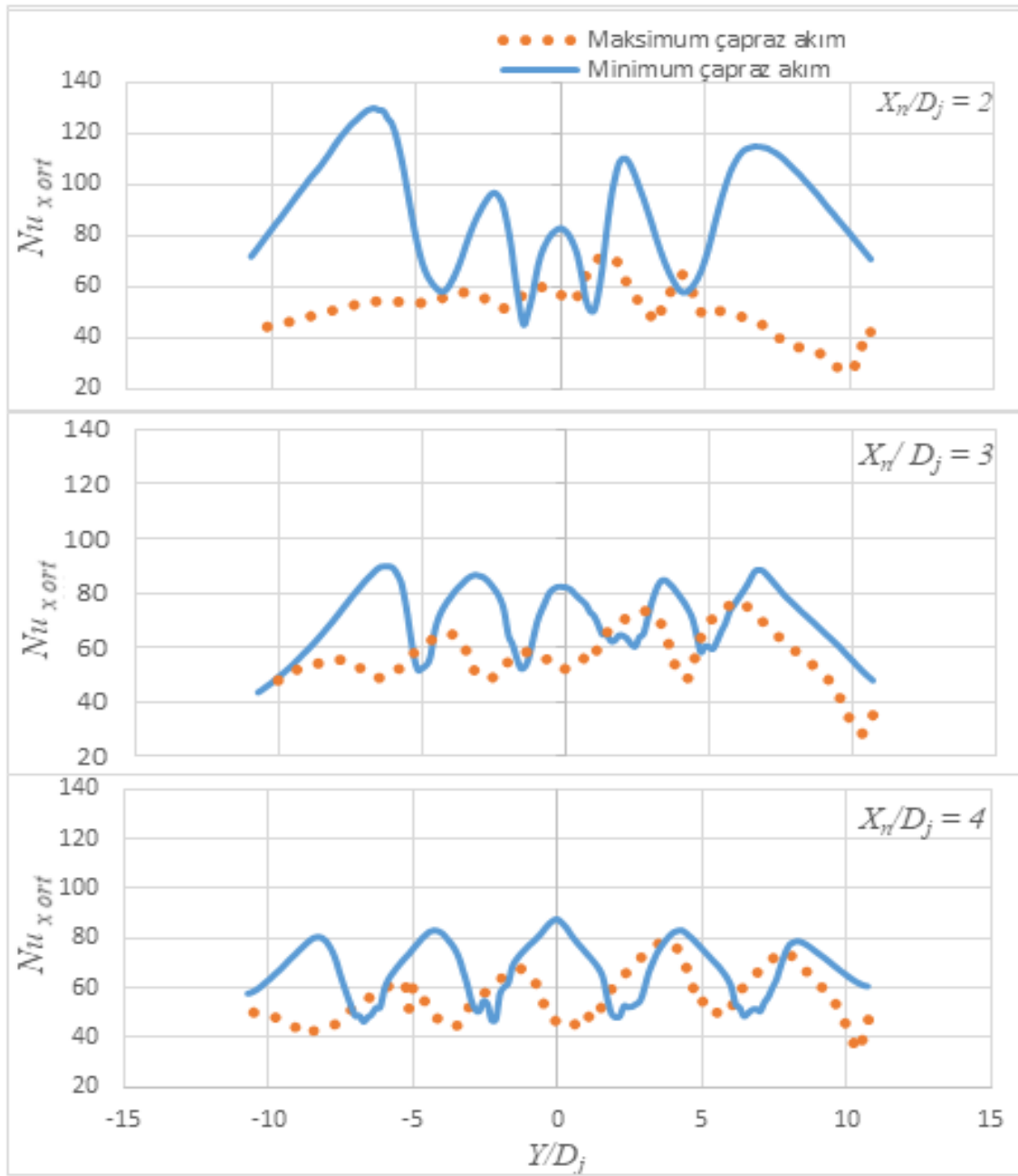
4.3.1. Düz Plakaya Çarpma Durumu

Düz plakada maksimum ve minimum çapraz akış için elde edilen sonuçlar Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'te gösterilmiştir.



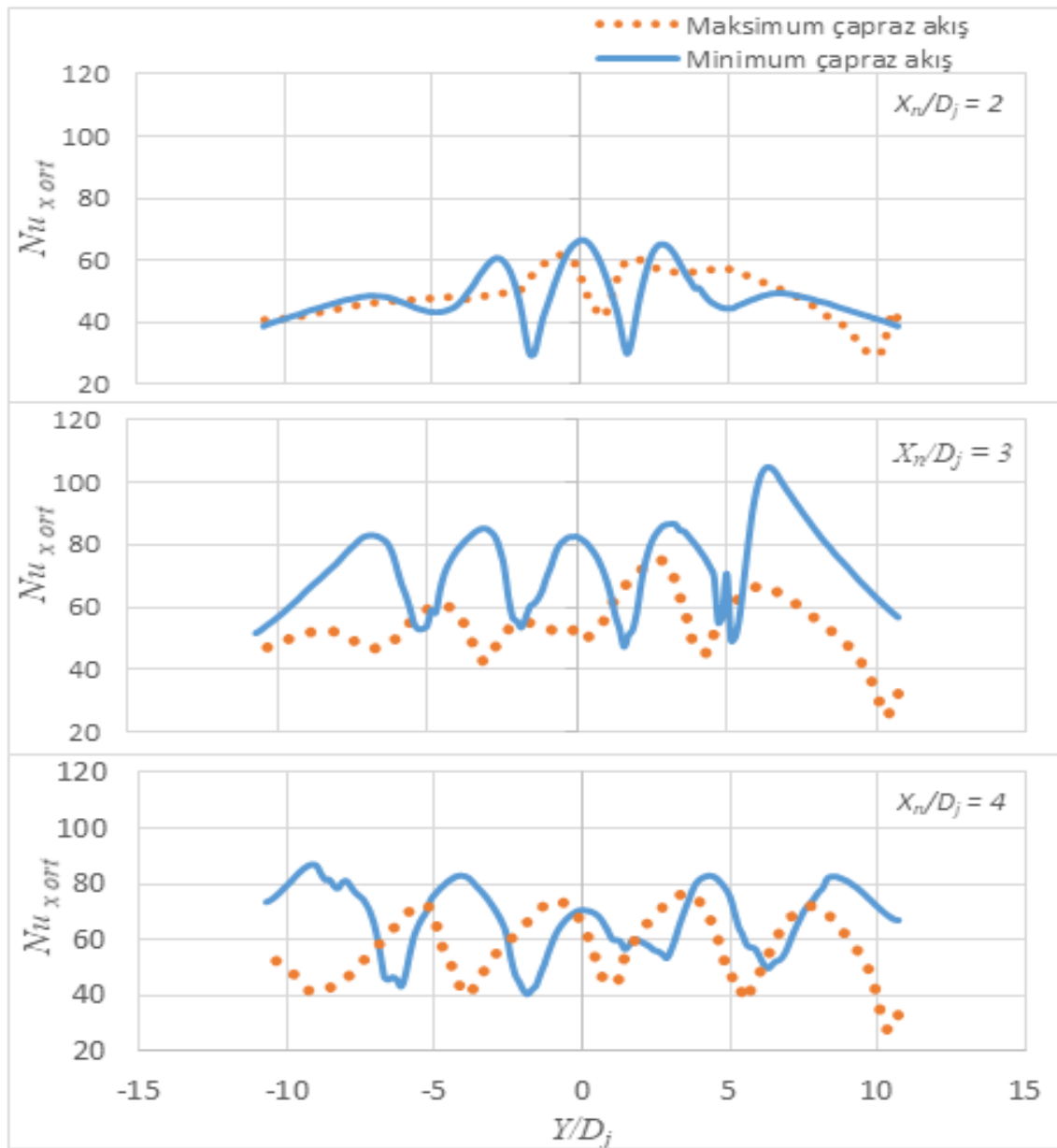
Şekil 4.52. Düz plakada çapraz akışın etkisi, $Z_n/D_j = 2$, $Re = 20000$

$Z_n/D_j = 2$ ve 3 'te sonuçlar benzer çıkmıştır. $X_n/D_j = 2$ iken minimum çapraz akışta belirgin şekilde yüksek değerler görülmüştür. $X_n/D_j = 3$ ve 4 'te de minimum çapraz akış sonuçları daha yüksek çıkmıştır, ancak $X_n/D_j = 2$ 'deki sonuçlar kadar belirgin değildir. $X_n/D_j = 2$, $Z_n/D_j = 2$ ve 3 'te minimum ve maksimum çapraz akış farkı daha belirgindir. Özellikle plakanın kenar bölgelerinde daha yüksek, merkez bölgesinde daha düşük Nusselt sayısı tespit edilmiştir.



Şekil 4.53. Düz plakada çapraz akışın etkisi, $Z_n/D_j = 3$, $Re = 20000$

Her iki çarpaz akış türü için de yüksek jet mesafeleri olan $X_n/D_j = 3$ ve 4' te çarpma bölgesinde Nusselt sayısı belirgin bir şekilde maksimum değerini almıştır. Minimum çarpaz akış için çarpma bölgesi Nusselt sayısı daha belirgin bir şekilde maksimum değerlerini almıştır. $Z_n/D_j = 4$ için maksimum ve minimum çarpaz akış sonuçları Şekil 4.54'teki gibi kıyaslanmıştır. $X_n/D_j = 2$ 'de her iki sonuç yakın değerler alırken, $X_n/D_j = 3$ ve 4 için her iki çarpaz akışta da durma noktaları belirgin olup, minimum çarpaz akış sonuçları belirgin şekilde daha yüksek değerler göstermiştir.



Şekil 4.54. Düz plakada çarpaz akışın etkisi, $Z_n/D_j = 4$, $Re = 20000$

Düz plaka için ele alınan tüm Z_n/D_j ve X_n/D_j parametrelerinde maksimum ve minimum çapraz akışları için plaka genelinde ortalama Nusselt sayıları Tablo 4.9’da görülmektedir. $Re = 20000$ için elde edilen sonuçlara göre herhangi bir parametre için minimum çapraz akış sonuçları önemli bir fark ile yüksek çıkmıştır. $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$ iken minimum çapraz akış sonucu %45 daha yüksek; $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$ iken minimum çapraz akış sonucu %73 daha yüksek nihayet $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$ için %35 daha yüksek çıkmıştır. Diğer parametreler için minimum çapraz akış fark etkisi ilgili Tablo 4.9’da görülmektedir. Genel anlamda düz plaka için minimum çapraz akış sonuçları maksimum çapraz akış sonuçlarına göre ısı transferini önemli şekilde artırmıştır.

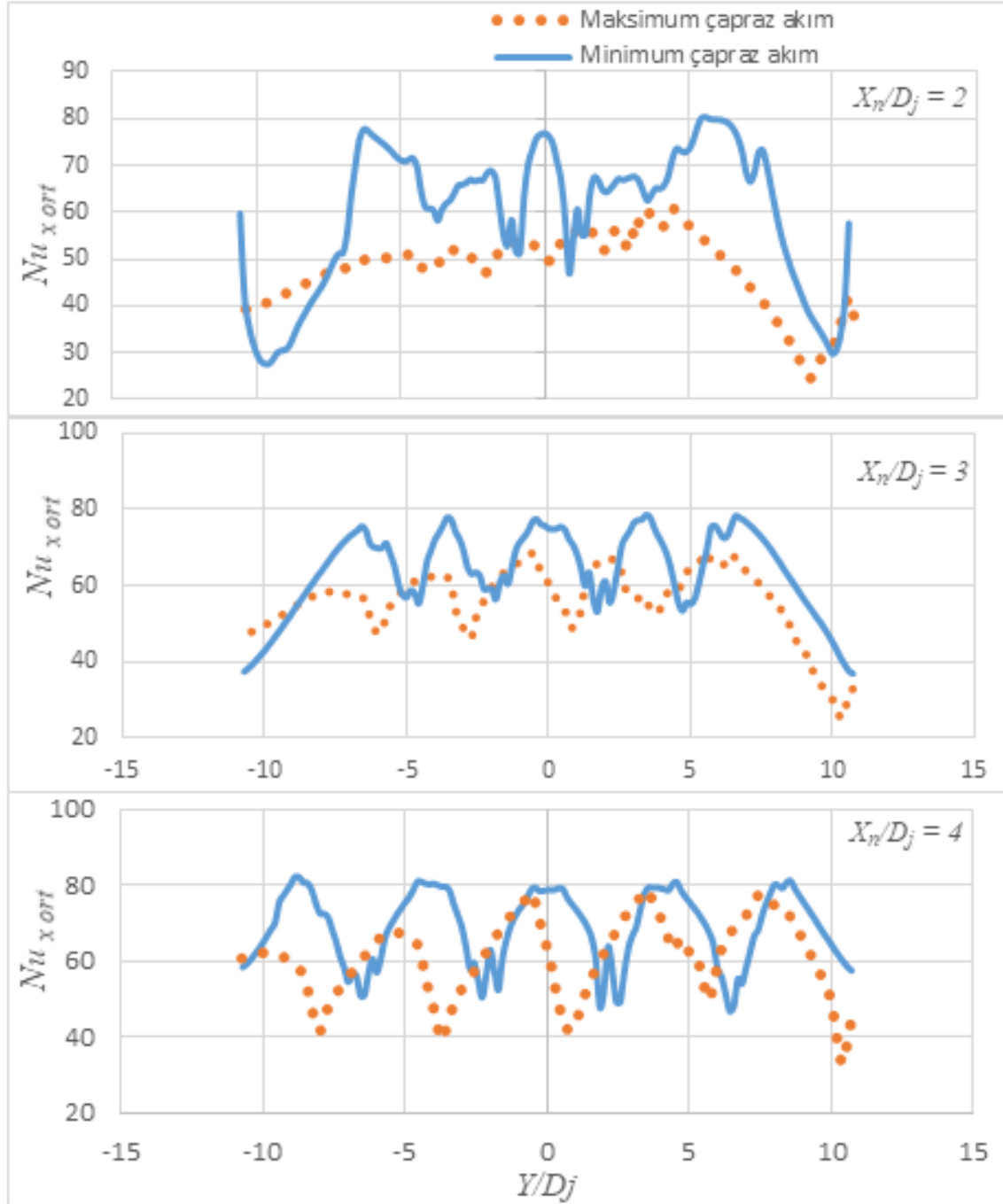
Tablo 4.9. Düz plakada farklı çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı

$t/D_a = 0.25$, $D_a/D_j = 1$, $Re = 20000$				
Z_n/D_j	X_n/D_j	Maksimum çapraz akış	Minimum çapraz akış	Ortalama Nusselt artışı(%)
2	2	46.0	66.7	45.0
	3	57.5	64.1	11.5
	4	67.3	74.4	10.5
3	2	48.8	84.4	73.0
	3	55.6	73.3	31.8
	4	54.6	64.7	18.5
4	2	47.6	46.9	1.5
	3	52.5	70.9	35.0
	4	55.6	66.0	18.7

4.3.2. Tümsek Şekilli Plakaya Çarpma Durumu

Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akış sonuçları farklı X_n/D_j ve Z_n/D_j parametreleri için Şekil 4.55 ve Şekil 4.56’da görülmektedir. Sabit $Z_n/D_j = 2$ için X_n/D_j parametreleri için karşılaştırılan sonuçlara göre en iyi ısı transferi $X_n/D_j = 2$ ’de minimum çapraz akış için elde edilmiştir. Nitekim ortalama Nusselt tablosuna göre $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$ ’de minimum çapraz akış sonuçları %26 oranında maksimum çapraz akışa göre daha yüksek çıkmıştır (Tablo 4.10). Bu parametrelerde minimum çapraz akış sonuçlarına göre plaka merkez bölgesinde minimum ısı transferi, kenar bölgesinde ise maksimum ısı transferi

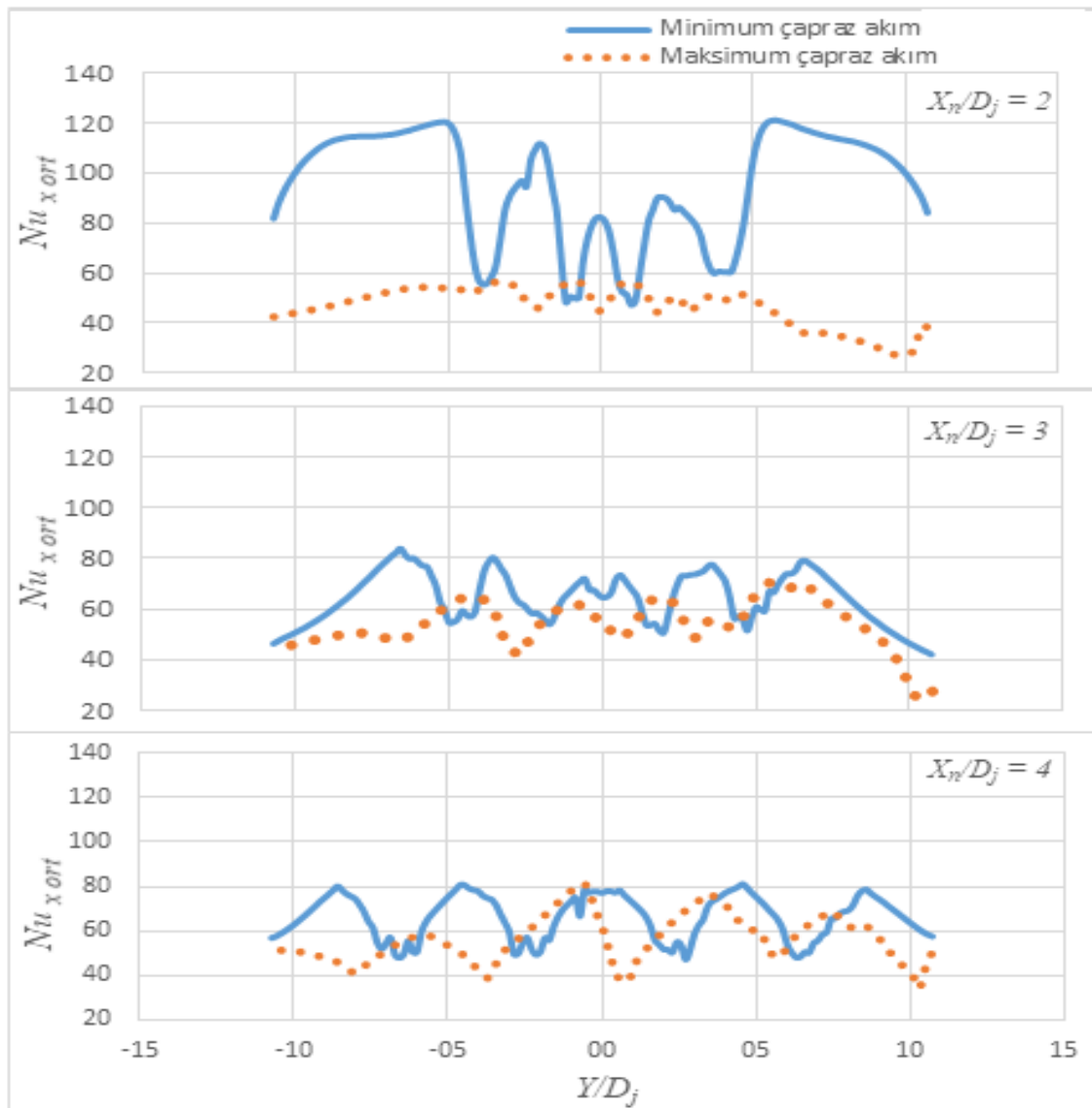
görülmüştür. $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$ ve 4 'te minimum çapraz akış sonuçları maksimum çapraz akış sonuçlarına göre %3 ve %14 daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.55. Tümssek şekilli plakada sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

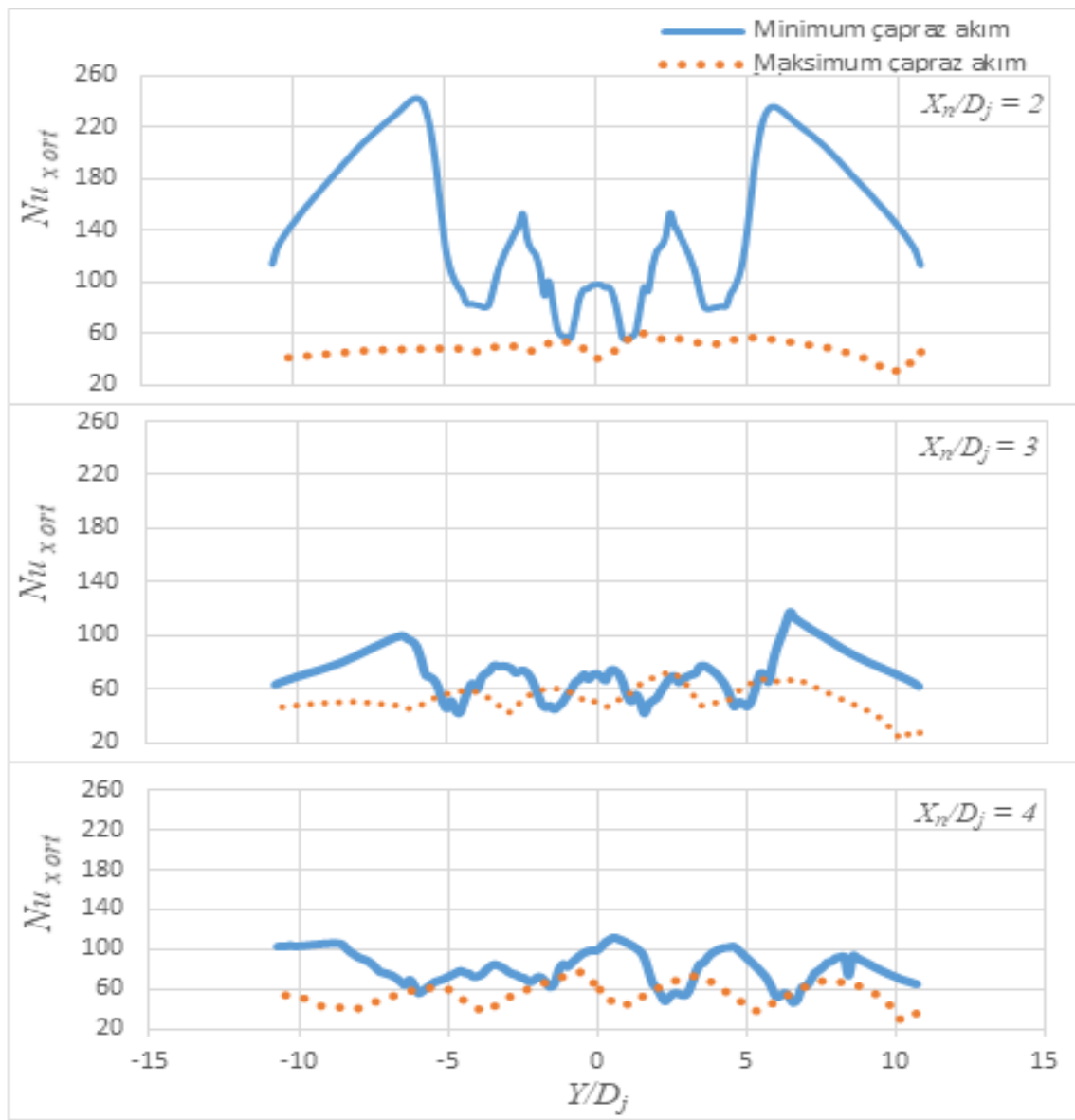
$Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$ 'de minimum çapraz akış ve maksimum çapraz akış farkı %101'e yükselmiştir. $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$ ve 4'te minimum çapraz akış sonuçları %22 ve %18 oranında maksimum çapraz akış sonuçlarına göre daha yüksek çıkmıştır.

Şekil 4.57'de $Z_n/D_j = 4$ sabit değeri için farklı X_n/D_j sonuçları maksimum ve minimum çapraz akış için karşılaştırılmıştır. Sonuçlar diğer Z_n/D_j değerleri ile benzer olup $X_n/D_j = 2$, 3, 4 şeklinde değişimi için minimum çapraz akış farkı sırasıyla % 182, %39, %50 şeklinde olmuştur(Tablo 4.10).



Şekil 4.56. Tümssek şekilli plakada sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 3$, $Re = 20000$ $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

Minimum çapraz akışta en yüksek artış $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$ için sağlanmıştır. Ortalama sonuçlara göre herhangi bir Z_n/D_j değerinde en iyi Nusselt düşük jet mesafesinde elde edilmiştir. Ayrıca düşük jet mesafesi sabit tutulup, plaka mesafeleri arttıkça maksimum ve minimum çapraz akım farkı da önemli derecede artmıştır. Nitekim sabit $X_n/D_j = 2$ 'de $Z_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde değıştikçe minimum ve maksimum çapraz akış farkı %26, %101 ve %182 şeklinde artmıştır. Artan jet mesafesinde ise bu fark azalmıştır. Nitekim $Z_n/D_j = X_n/D_j = 2$ 'de fark %20 iken, $X_n/D_j = 3$ ve 4 için %3 ve %14 şeklinde azalma olmuştur.



Şekil 4.57. Tümsek şekilli plakada sıra ortalama Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

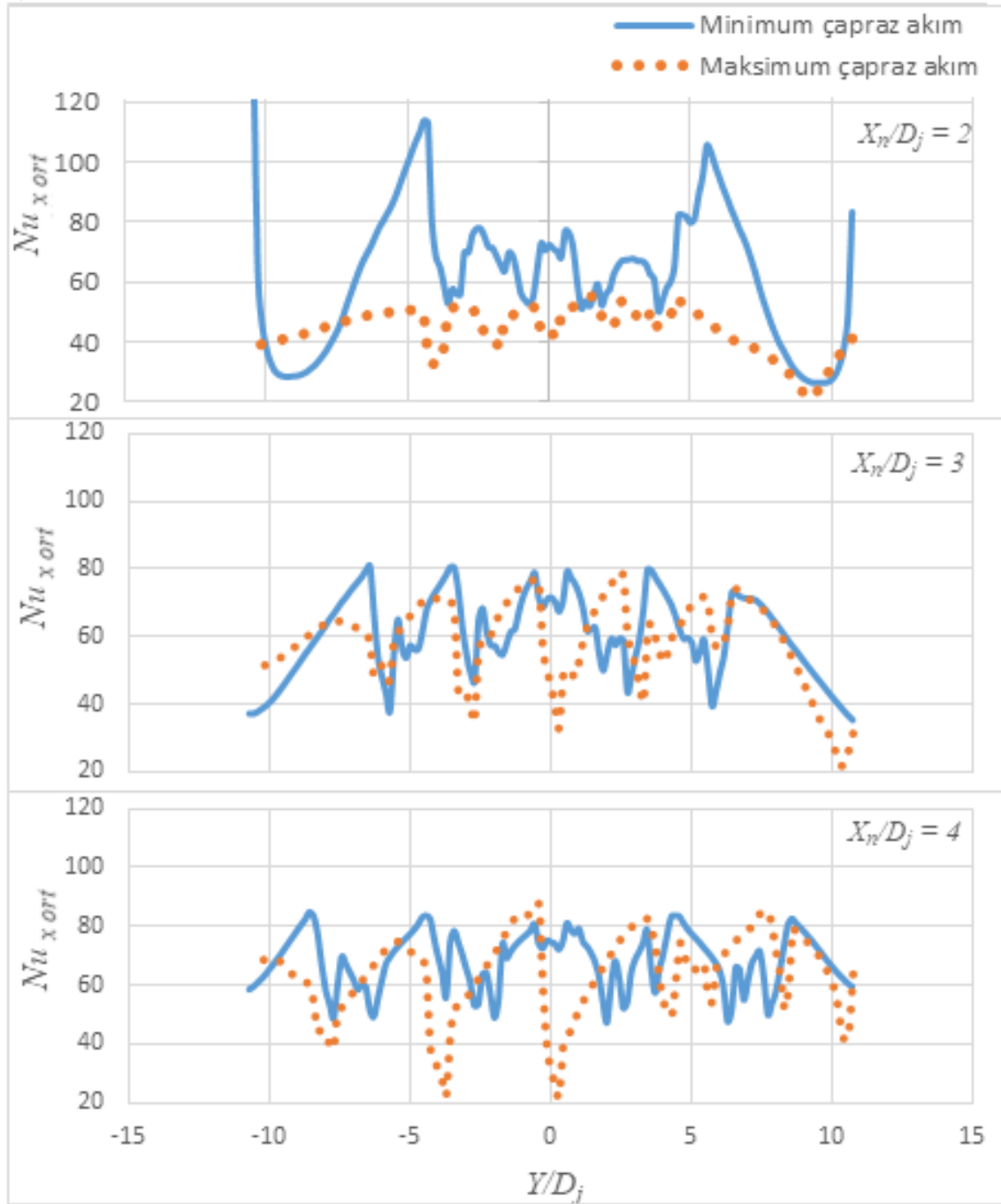
Tablo 4.10. Tümsek Şekilli plakada, farklı çapraz akışta alan ortalamalı Nusselt sayısı

Z_n/D_j	X_n/D_j	Re = 20000, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$		
		Maksimum �apraz akış	Minimum �apraz akış	Ortalama Nusselt artışı (%)
2	2	47.0	59.0	26
	3	54.6	52.9	3
	4	60.1	68.7	14
3	2	45.4	91.3	101
	3	52.1	63.5	22
	4	55.6	65.4	18
4	2	47.3	133.3	182
	3	50.9	70.9	39
	4	52.9	79.4	50

4.3.3. Çukur Şekilli Plakada Farklı  apraz Akışın Etkisi

Şekil 4.58 ve 4.59’da  ukur Şekilli plaka için maksimum ve minimum çapraz akış sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.58’de sabit $Z_n/D_j = 2$ ve 3 değerlerinde farklı X_n/D_j parametrelerinin sonuçları; Şekil 4.59’da ise sabit $Z_n/D_j = 4$ için farklı X_n/D_j sonuçları kıyaslanmıştır.

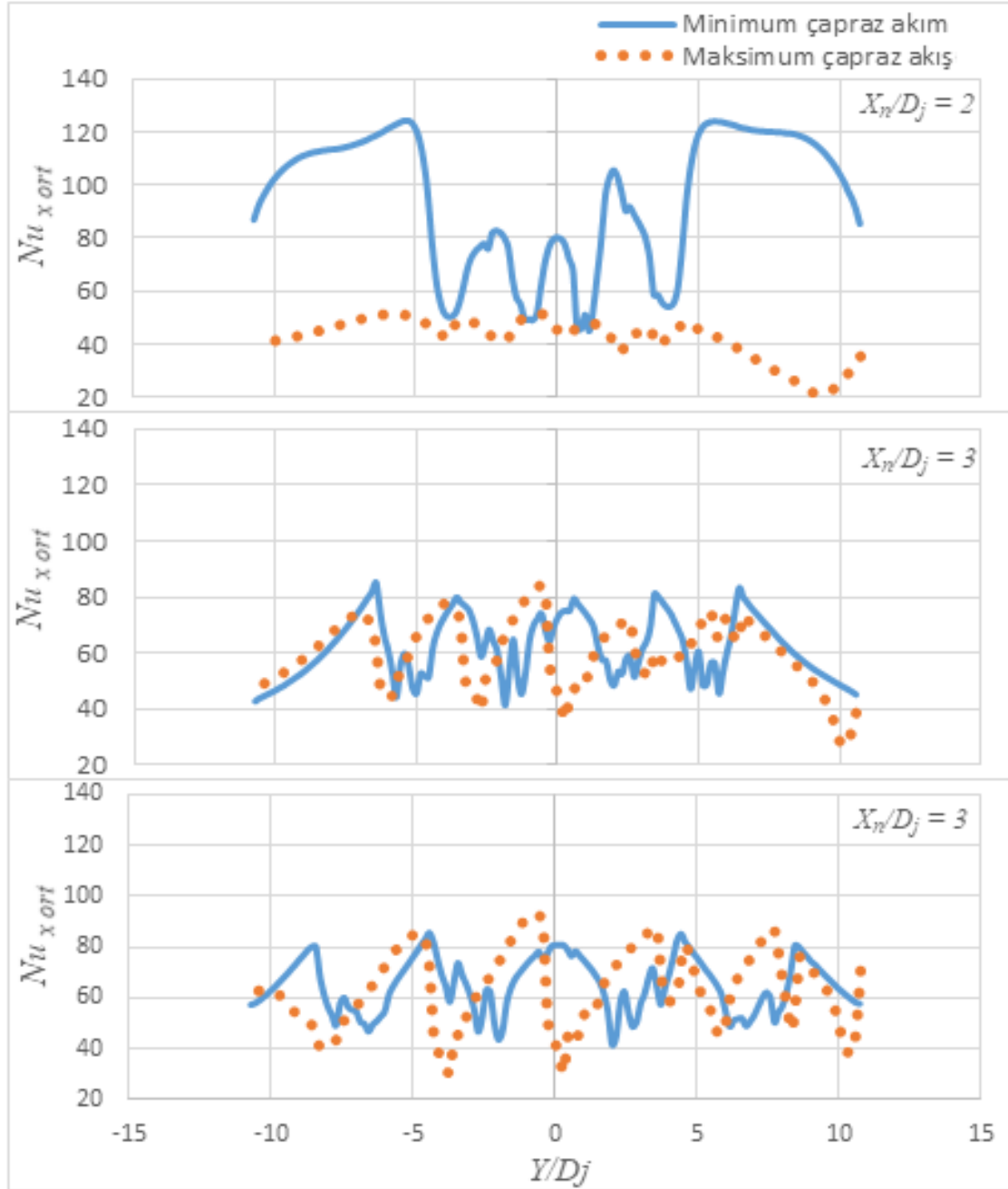
Çukur Şekilli plakada da tümsek Şekilli plakaya benzer olarak en yüksek maksimum ve minimum çapraz akış farkı $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$ ’ de görülmüştür. $X_n/D_j = 3$ ve 4 için maksimum ve minimum çapraz akış sonuçları yakın çıkmış, ancak yine de tüm parametreler için de minimum çapraz akış sonuçları maksimum çapraz akışa göre daha yüksek çıkmıştır. $X_n/D_j = 2$ ’de maksimum ve minimum çapraz akış farkı oldukça yüksek iken, $X_n/D_j = 3$ ve 4 için bu fark düşmüştür.



Şekil 4.58. Çukur şekilli plakada sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

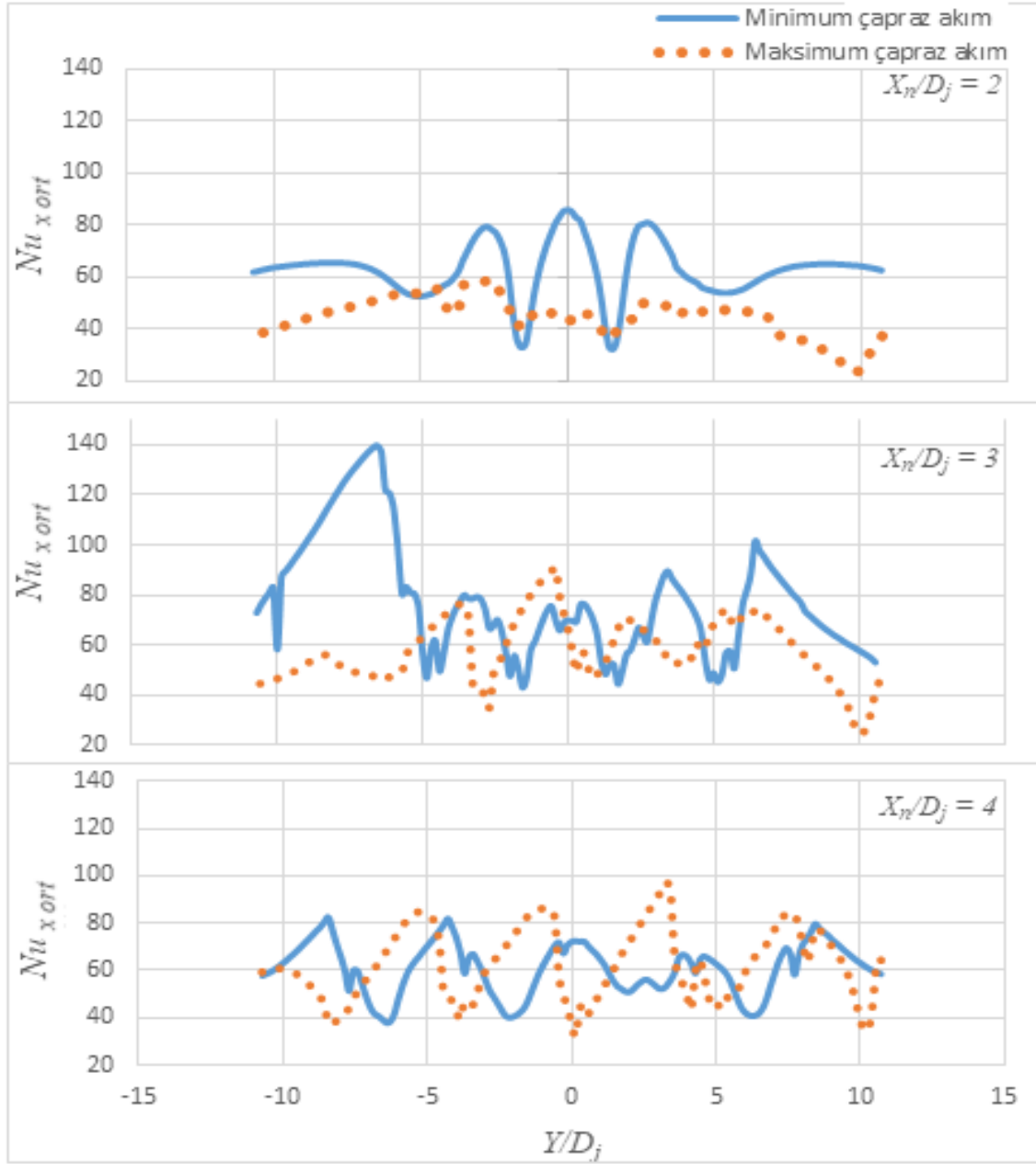
İlgili şekillerden $X_n/D_j = 2$ için minimum çapraz akış sonuçlarına göre merkez bölgede Nusselt sayısı düşük, plaka kenarlarında oldukça yükselmiştir. Ayrıca merkez bölgede 3 adet simetrik jet için durma noktasında Nusselt sayısı belirgin iken, kenarlara doğru çapraz akış ve jet etkileşimlerinden dolayı ısı transferi aniden artmıştır. Oysa plaka genelinde

$X_n/D_j = 3$ ve 4 değerlerinde hem maksimum hem de minimum çapraz akışta üniform bir akış meydana gelmiştir. İlgili şekillerden de anlaşıldığı gibi $X_n/D_j = 3$ ve 4 için tümsek



Şekil 4.59. Çukur şekilli plakada çapraz akışın etkisi, $Z_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

şekilli ve düz plakada belirgin olan durma noktası etkisi çukur şekilli plakada bozulmuştur. Durma noktası etkisi yerine plaka genelinde Nusselt sayısında dağınık bir şekilde artış ve azalış meydana gelmiştir.



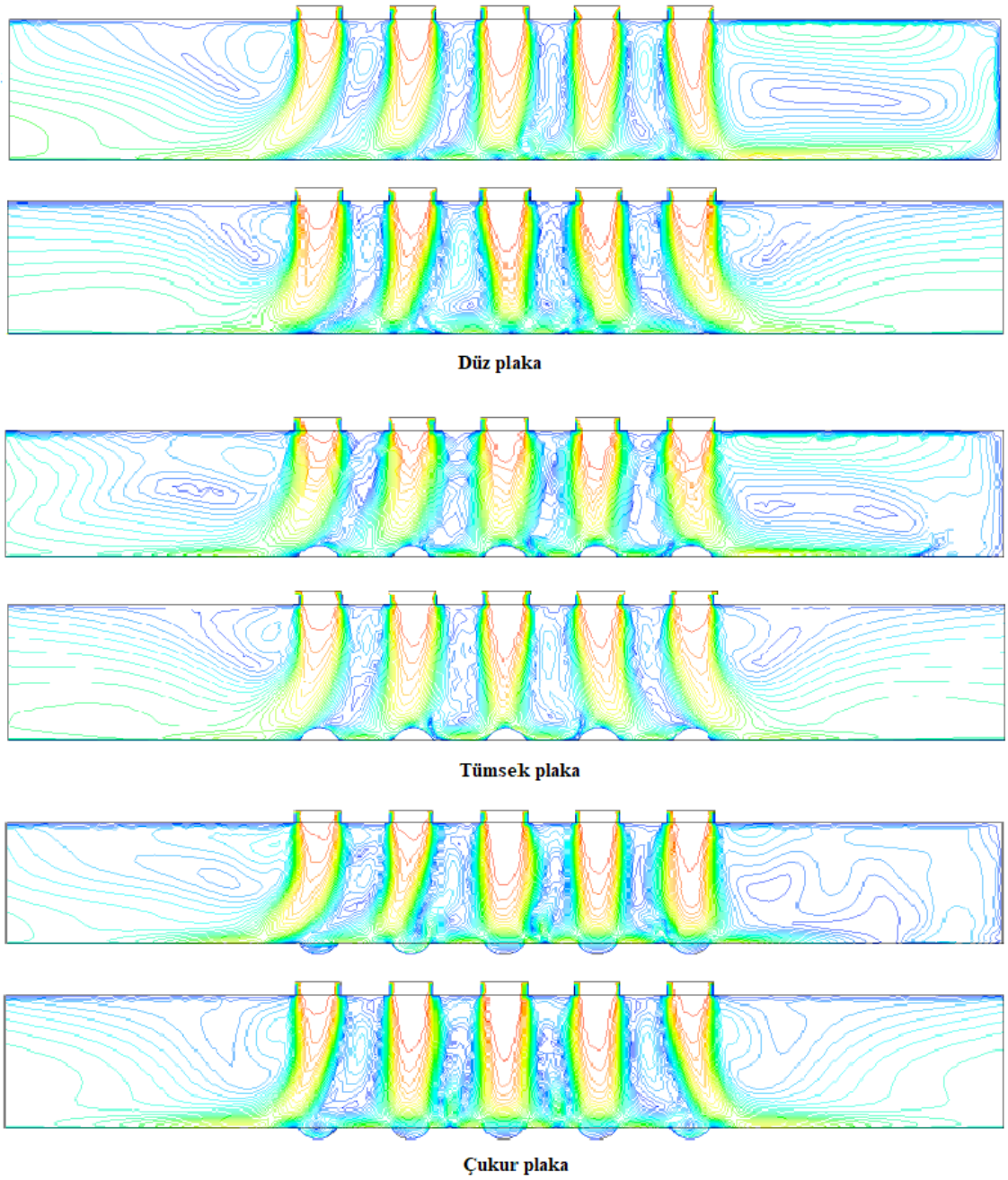
Şekil 4.60. Çukur şekilli plakada çapraz akışın etkisi, $Z_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

Şekil 4.60'ta $Z_n/D_j = 4$ için farklı jetler arası mesafe etkisine bakılırsa, yakın jet mesafesinde minimum ve maksimum çapraz akış farkı daha belirgindir. Çukur şekilli plaka maksimum ve minimum çapraz akış için alan ortalama Nusselt tablosuna göre de tüm $X_n/D_j = 2$ değerlerinde minimum çapraz akış farkı daha fazladır. Nitekim sabit $X_n/D_j = 2$ 'de $Z_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde değişimi ile minimum çapraz akış farkı sırasıyla %24, %93, %41 şeklindedir.

Tablo 4.11. Çukur şekilli plakada farklı çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı

Z_n/D_j	X_n/D_j	$Re = 20000, t/D_d = 0.25, D_d/D_j = 1$		
		Maksimum çapraz akış	Minimum çapraz akış	Ortalama Nusselt artışı(%)
2	2	43.9	54.6	24
	3	58.5	62.3	6
	4	66.0	68.7	4
3	2	41.7	80.3	93
	3	59.5	62.9	6
	4	64.1	64.7	1
4	2	43.9	61.7	41
	3	56.0	74.1	32
	4	61.7	59.0	4

Minimum çapraz akış için elde edilen sonuçlar genel olarak ele alınan tüm plaka çeşitleri için de maksimum çapraz akışa göre en yüksek Nusselt değerini sağlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre her üç plakada da özellikle $Z_n/D_j=3$, $X_n/D_j=2$ parametresinde en yüksek sonuçlar elde edilmiştir. İlgili parametreler için minimum ve maksimum çapraz akış hız kontur diyagramı Şekil 4.61’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi her üç plaka türünde de maksimum çapraz akışta tek yöne zorlanan akışkan diğer çarpan jetlerin de aynı yönde akmasına ve dolayısıyla jet yapılarının deformasyona uğramasına sebep olmuştur. Benzer literatür çalışmasında çarpan jette üst korunum duvarının olması durumunda hedef plakaya çarpan akışkanın tekrar geri sirkülasyon yapacağından dolayı düşük Nusselt sayısına sebep olacağı belirtilmiştir (Fitzgerald and Garimella 1998). Minimum çapraz akış hız diyagramında da görüldüğü gibi akışkan her yönden serbestçe çıkış yolu bulabildiği için diğer komşu jetleri daha az deformasyona uğratmıştır. Bu durum ise ısı transferini iyileştiren temel özellik olmuştur.



Şekil 4.61. Farklı çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri $Z_n/D_j=3$, $X_n/D_j=2$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$,

4.4. Farklı Pürüzlülük Oranının (D_d/D_j) Etkisi

4.4.1. Tümsek Şekilli Plakada Farklı Pürüzlülük Oranının Etkisi

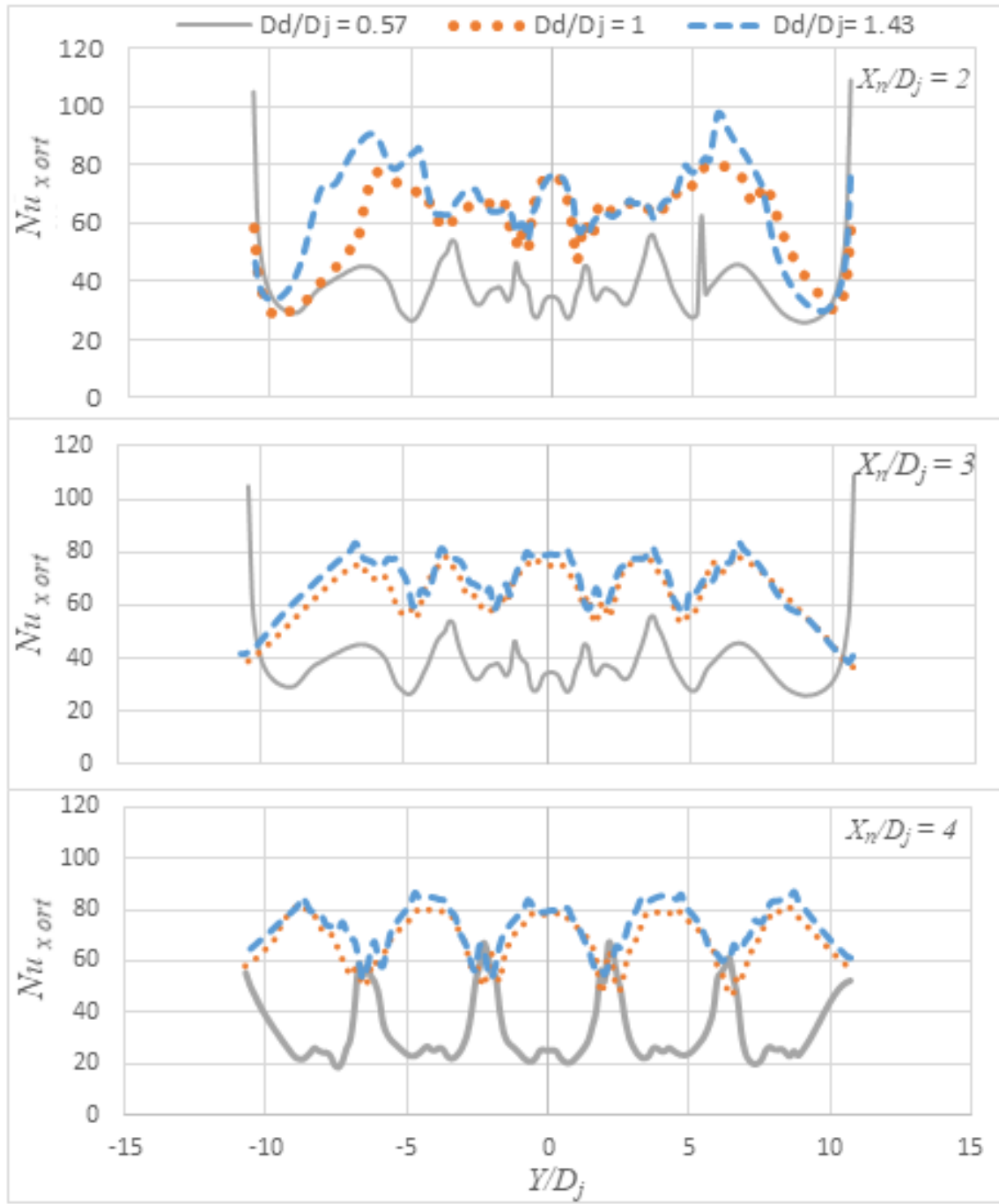
Bu bölümde pürüzlülük çapının jet çapına oranı (D_d/D_j) etkisi minimum çapraz akım için karşılaştırılmıştır. Pürüzlülük oranı olarak da isimlendirdiğimiz D_d/D_j etkisinin tespit

edilmesi için bu oran 0.57, 1, 1.43 şeklinde üç farklı değer için değiştirilmiştir. Bu değerler için hedef plaka üzerinde Y eksenini boyunca sıra ortalamalı Nusselt sayısı için sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar farklı Z_n/D_j parametreleri için ayrı ayrı Şekil 4.62, Şekil 4.63 ve Şekil 4.64 şeklinde grafiklere yansıtılmıştır.

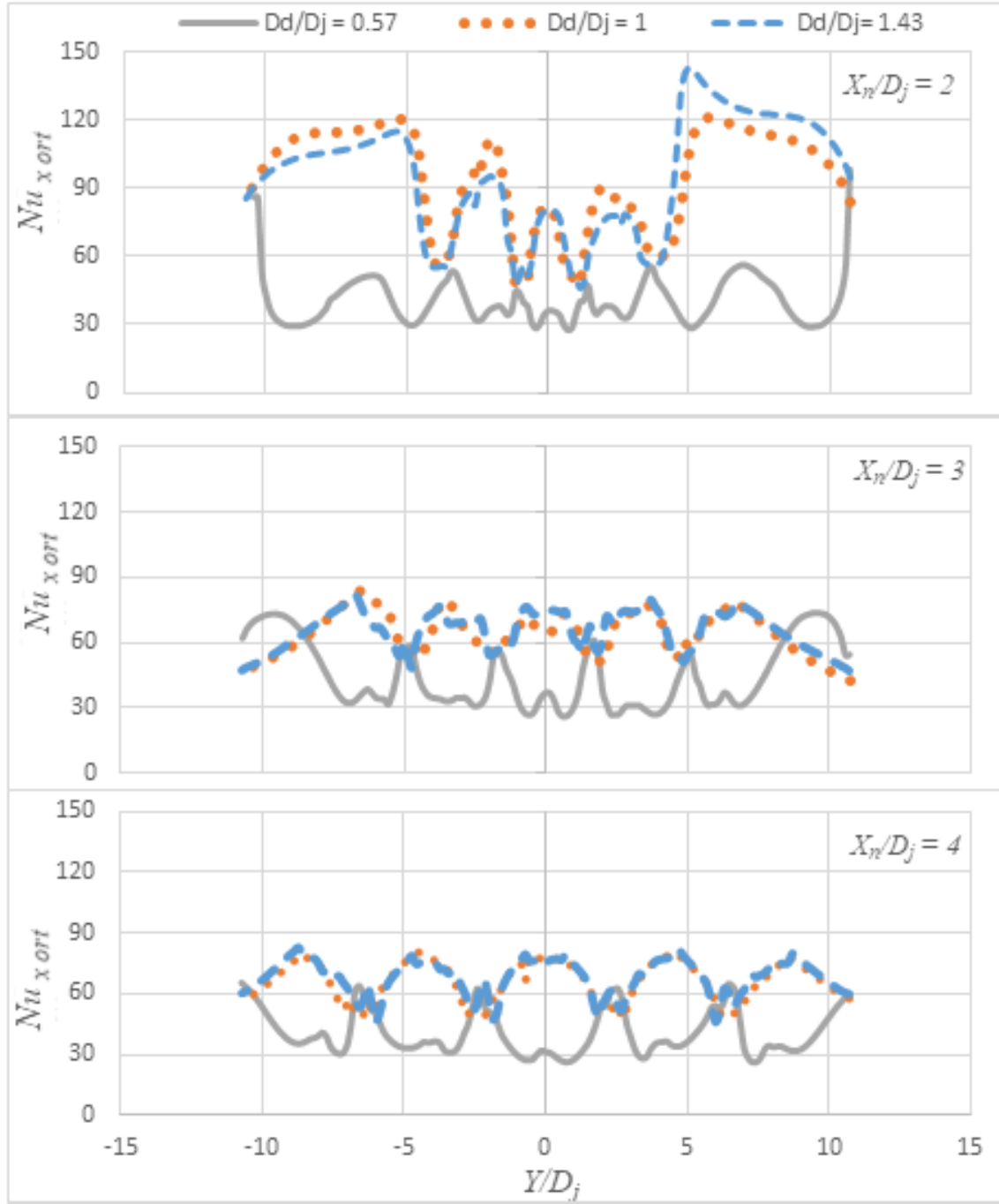
$Z_n/D_j = 2$ için elde edilen sonuçlar farklı X_n/D_j parametresi için ayrı ayrı Şekil 4.62’de gösterilmiştir. Söz konusu şekle göre genel olarak tüm X_n/D_j değerlerinde $D_d/D_j = 1$ ve $D_d/D_j = 1.43$ sonuçları birbirine yakın çıkmakla birlikte $D_d/D_j = 1.43$ sonuçları bir miktar yüksek çıkmıştır. $D_d/D_j = 0.57$ için sonuçlar plaka genelinde bariz farkla daha düşük olduğu görülmüştür. Özellikle çarpma bölgelerinde önemli düşüşler olmuştur. Çarpma bölgelerinde $D_d/D_j = 1$ ve $D_d/D_j = 1.43$ için maksimum noktaları oluşurken, $D_d/D_j = 0.57$ ’de minimum noktaları oluşmuştur. Oluşan maksimum ve minimum noktaları $X_n/D_j = 4$ için daha belirgin olarak görülmektedir.

$Z_n/D_j = 3$ için elde edilen farklı D_d/D_j sonuçları Şekil 4.63’te karşılaştırılmıştır. En yüksek Nusselt sayısı $X_n/D_j = 2$ için $D_d/D_j = 1$ ve 1.43 değerlerinde, en düşük değer ise $D_d/D_j = 0.57$ için tespit edilmiştir. $D_d/D_j = 0.57$ sonuçlarında $X_n/D_j = 3$ ve 4 parametreleri için çarpma bölgesi Nusselt sayısı minimum noktaları daha belirgindir. $D_d/D_j = 1$ ve 1.43 için $Z_n/D_j = 3$ ’te elde edilen tüm sonuçlara göre plaka genelinde ortalama Nusselt sayısının 50’nin üzerinde olduğu, $X_n/D_j = 2$ için özellikle plaka kenar bölgelerinde sonuçların 100’ün üzerine çıktığı görülmektedir. $X_n/D_j = 3$ ve 4’te $D_d/D_j = 1$ ve 1.43 sonuçları benzer olup, durma noktalarında maksimum Nusselt sayısı oluşmuştur. Aynı bölgede $D_d/D_j = 0.57$ için minimum durma noktaları oluşmuştur.

$Z_n/D_j = 4$ için elde edilen farklı D_d/D_j sonuçları Şekil 4.64’te karşılaştırılmıştır. En yüksek Nusselt sayısı $D_d/D_j = 0.57$ ve 1 değerlerinde $X_n/D_j = 2$ parametresi için, en düşük değer ise $D_d/D_j = 1.43$ için tespit edilmiştir. $D_d/D_j = 1$ ve 1.43 için $Z_n/D_j = 4$ ’te elde edilen tüm sonuçlara göre plaka genelinde ortalama Nusselt sayısının 60’ın üzerinde olduğu, $X_n/D_j = 2$ için özellikle plaka kenar bölgelerinde $D_d/D_j = 0.57$ ve 1 için sonuçların 100’ün üzerine çıktığı görülmektedir.



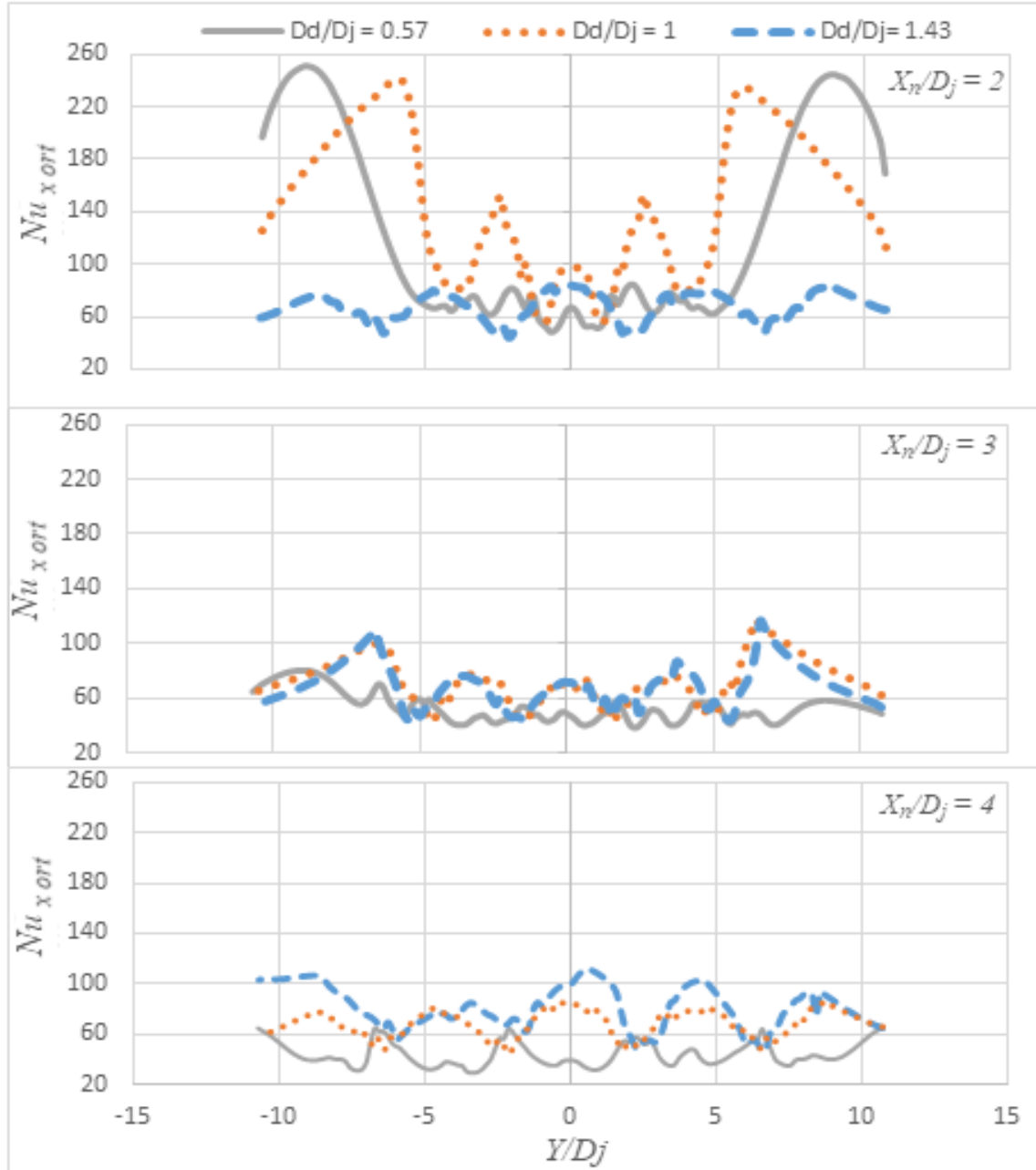
Şekil 4.62. Tümsek şekilli plakada sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$



Şekil 4.63. Tümsek şekilli plakada sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$

Tümsek şekilli plakada farklı D_d/D_j etkisi bakımından alan ortalamalı Nusselt sayısı Tablo 4.12’ de karşılaştırılmıştır. $D_d/D_j = 1.43$ ’te $Z_n/D_j = 2$ ve 3 değerinin tüm X_n/D_j parametresinde en iyi Nusselt sayısı elde edilirken, $Z_n/D_j = 4$ ’te ise $D_d/D_j = 1$ sonuçları daha yüksek çıkmıştır. Öte yandan $D_d/D_j = 0.57$ için bulunan sonuçlar ise çoğu parametrede en

düşük değerini almıştır. Söz konusu tabloya göre $D_d/D_j = 0.57$ parametresi için Nusselt sayısı $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$ parametrelerinde en iyi değerini almıştır.



Şekil 4.64. Tümsek şekilli plakada sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$

Şekil 4.65'te $Z_n/D_j = 2$ için farklı D_d/D_j sonuçları sıra ortalamalı Nusselt sayısı için karşılaştırılmıştır. $D_d/D_j = 1$ ve $D_d/D_j = 1.43$ sonuçları $X_n/D_j = 2$ için birbirine yakın iken, aynı parametrede $D_d/D_j = 0.57$ sonuçları çok daha düşük çıkmıştır. $X_n/D_j = 2$ ve 3 için sonuçlara bakıldığında yine $D_d/D_j = 1$ ve $D_d/D_j = 1.43$ değerleri birbirine yakın görünse de

$D_d/D_j = 1.43$ için çarpma bölgelerinde Nusselt sayısının önemli oranda düştüğü görülmektedir. Bu durum ise $D_d/D_j = 1.43$ için ortalama sonuçları düşürmüştür. Dolayısıyla ilgili grafikten en iyi sonucun $D_d/D_j = 1$ için elde edildiği söylenebilir çünkü durma noktalarındaki düşüşler nispeten daha azdır. $Z_n/D_j = 2$ 'de tüm X_n/D_j için elde edilen sonuçlara göre en iyi Nusselt sayısı $D_d/D_j = 1$ 'de elde edilmiştir.

Tablo 4.12. Tümsek şekilli plakada alan ortalama Nusselt sayısı

$Re = 20000, t/D_d = 0.25$				
Z_n/D_j	X_n/D_j	D_d/D_j		
		0.57	1	1.43
2	2	38.0	59.6	65.19
	3	33.9	63.9	67.4
	4	33.0	69.0	74.0
3	2	40.5	95.3	94.8
	3	45.0	64.1	65.6
	4	40.7	66.2	68.5
4	2	128.0	147.0	67.7
	3	53.7	73.0	69.0
	4	44.0	81.5	68.1

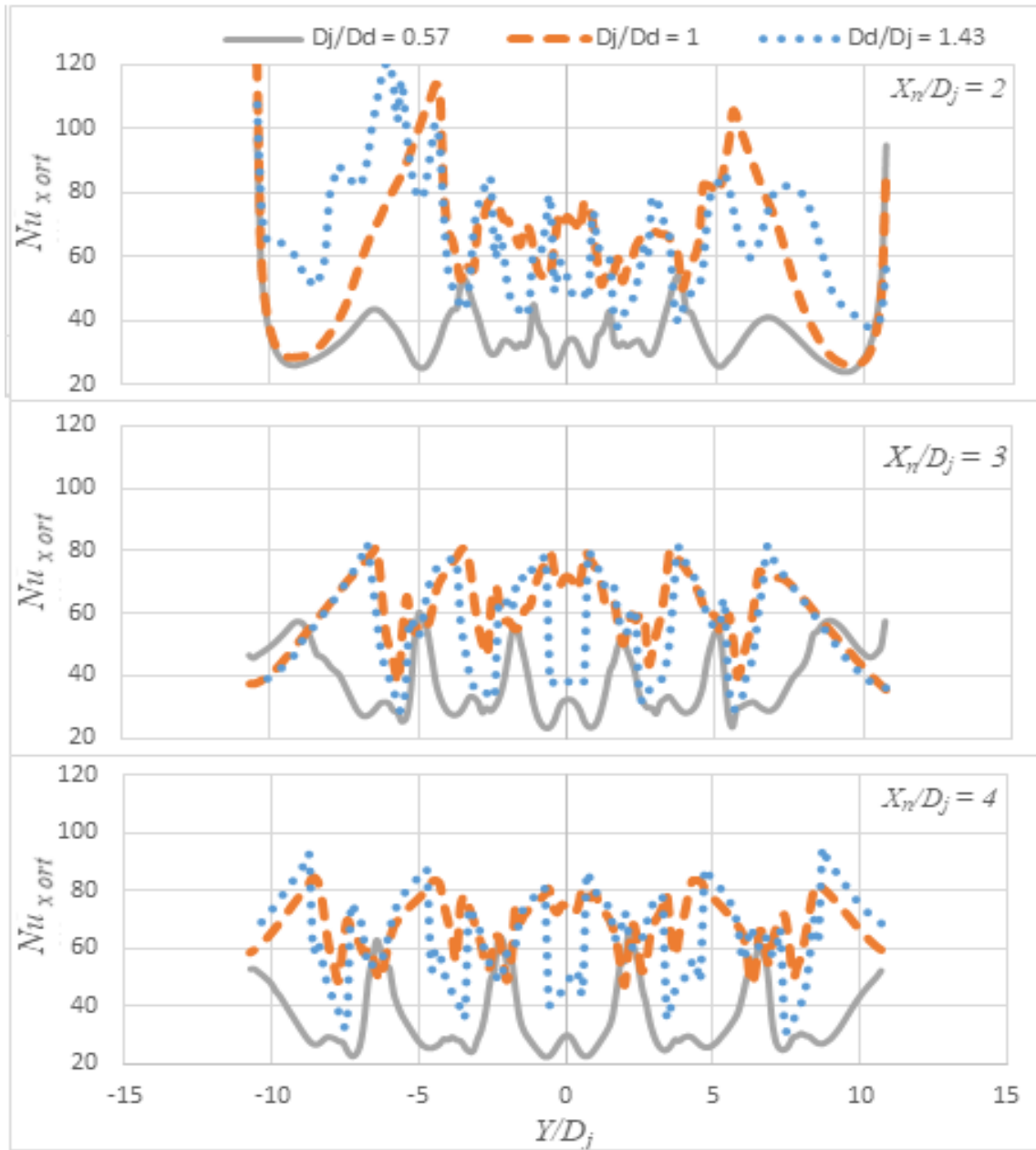
4.4.2. Çukur Şekilli Plakada Farklı Prüzülük Oranının Etkisi

Şekil 4.65'te $Z_n/D_j = 2$ için karşılaştırılan sonuçlara göre tüm X_n/D_j parametrelerinde de $D_d/D_j = 1$ ve 1.43 için elde edilen sonuçlar $D_d/D_j = 0.57$ sonuçlarından daha yüksektir. Ancak $D_d/D_j = 1$ ve 1.43 için alan ortalama Nusselt sayıları yakın olsa da $D_d/D_j = 1.43$ sonuçlarına göre durma noktalarında önemli derecede ısı transfer düşüşleri meydana gelmektedir. Bu bakımdan söz konusu parametrelerde $D_d/D_j = 1$ seçilmesi durumu daha avantajlı olacaktır.

Şekil 4.66'da $Z_n/D_j = 3$ için karşılaştırılan sonuçlarda tüm X_n/D_j değerlerinde yine $D_d/D_j = 1$ ve 1.43 için en iyi sonuçlar sağlanmıştır. Genel olarak $D_d/D_j = 0.57$ için en düşük sonuçlar elde edilmiştir. $Z_n/D_j = 4$ için sonuçlar diğer Z_n/D_j parametre sonuçları ile benzer çıkmıştır. Nitekim genel olarak $D_d/D_j = 1$ ve 1.43 için birbirine paralel değerler alırken, $D_d/D_j = 0.57$

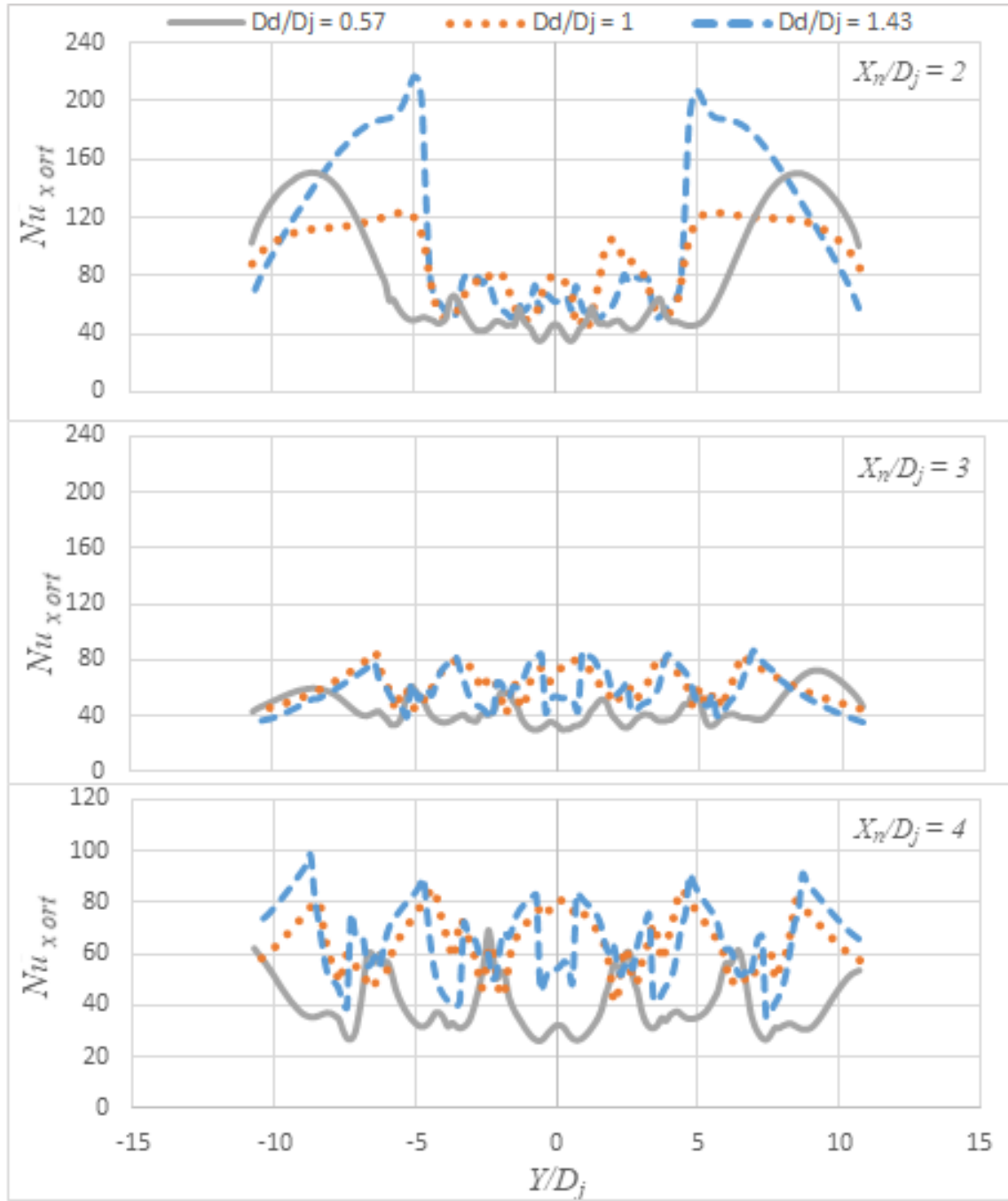
için yine düşük değerlerde seyretmiştir; ancak $X_n/D_j = 2$ için plaka çevresine doğru Nusselt sayısı yerel olarak artmıştır.

Şekil 4.67’de $Z_n/D_j = 4$ için karşılaştırılan sonuçlara göre daha önce elde edilen sonuçlara benzer olarak $D_d/D_j = 1$ ve 1.43 için değerler birbirine yakın; $D_d/D_j = 0.57$ sonuçları ise $X_n/D_j = 3$ ve 4’te daha düşük, $X_n/D_j = 2$ ’de daha yüksek değer almıştır.



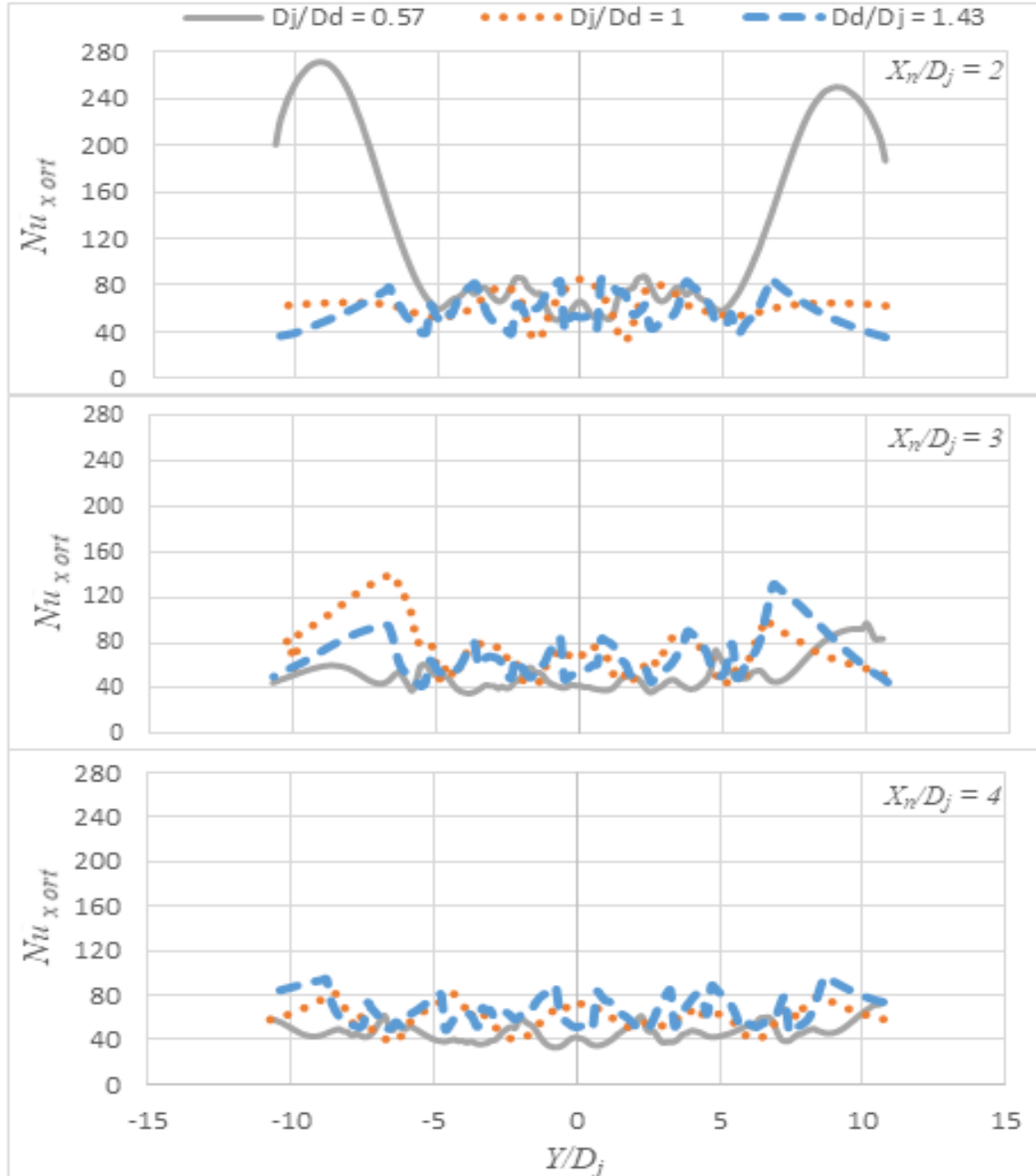
Şekil 4.65. Çukur şekilli plakada sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$

$D_d/D_j = 0.57$ 'de Minimum çapraz akış sonuçları tümsek ve çukur şekilli ve düz plaka için Tablo 4.14'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. İlgili tablodan hemen hemen tüm parametrelerde en iyi sonucun düz plakaya ait olduğu görülmektedir. Ancak $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$ 'de en iyi performansı çukur ve tümsek şekilli plaka sağlamaktadır



Şekil 4.66. Çukur şekilli plakada sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$

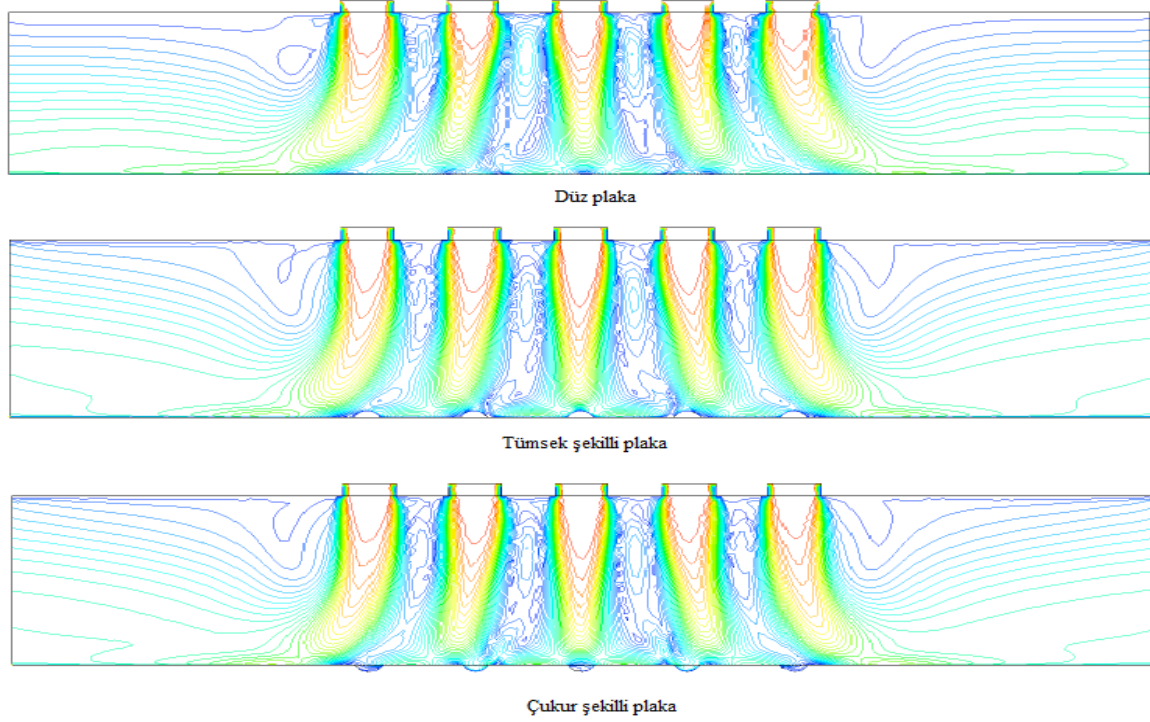
Bu duruma ilişkin Şekil 4.68’de verilen hız kontur diyagramında çukur ve tümsek şekilli plakada düz plakaya göre hızın sıfırlanma bölgelerinin daha fazla sayıda olması göze çarpmaktadır. Söz konusu ısı transfer artışının bundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.67. Çukur şekilli plakada sıra ortalamalı Nusselt sayısı, $Z_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$

$D_d/D_j = 1.43$ 'te minimum çapraz akışta tümsek ve çukur şekilli plakalar için analiz yapılmıştır. Tablo 4.15'te $D_d/D_j = 1.43$ için düz plaka sonuçları da kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. İlgili tabloya göre çoğu parametrede düz plaka sonuçları daha

yüksek çıkmıştır. Sadece $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$ 'de düz plaka minimum değerini alırken, tümsek şekilli plaka maksimum değer almıştır. $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$ için her üç plaka türünde de iyi sonuçlar elde edilmiş, ancak en iyi sonuç çukur şekilli plakaya ait olmuştur.



Şekil 4.68. Minimum çapraz akışta hız dağılımı ve akım çizgileri, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 0.57$, $t/D_d = 0.25$

Tablo 4.13. Çukur plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı

$Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$				
Z_n/D_j	X_n/D_j	D_d/D_j		
		0.57	1	1.43
2	2	35.3	62.0	66.0
	3	38.8	60.0	55.0
	4	35.6	68.6	65.0
3	2	84.5	95.2	114.0
	3	46.0	62.0	58.0
	4	40.3	65.2	66.2
4	2	132.0	63.0	58.0
	3	53.0	78.0	71.0
	4	47.0	60.9	67.7

Tablo 4.14. Farklı plaka türlerinde alan ortalamalı Nusselt sayısı

Z_n/D_j	X_n/D_j	Minimum çapraz akış $D_d/D_j = 0.57$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$		
		Düz plaka	Tümsek şekilli plaka	Çukur Şekilli plaka
2	2	75.1	38.0	35.3
	3	66.2	33.9	38.8
	4	76.6	33.0	35.6
3	2	89.0	40.5	84.5
	3	70.6	45.0	46.0
	4	67.8	40.7	40.3
4	2	48.1	128.0	132.0
	3	72.8	53.7	53.0
	4	68.2	44.0	47.0

Tablo 4.15 Farklı plaka türlerinde alan ortalamalı Nusselt sayısı

Z_n/D_j	X_n/D_j	Minimum çapraz akış, $D_d/D_j = 1.43$, $Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$		
		Düz plaka	Tümsek şekilli plaka	Çukur Şekilli plaka
2	2	75.1	65.2	66.0
	3	66.2	67.4	55.0
	4	76.6	74.0	65.0
3	2	89.0	94.8	114.0
	3	70.6	65.6	58.0
	4	67.8	68.5	66.2
4	2	48.1	67.7	58.0
	3	72.8	69.0	71.0
	4	68.2	68.1	67.7

4.5. İstatistiksel Regresyon Analizi

Yapılan çalışmanın sonuçları regresyon metodu ile incelenerek, jetler arası mesafenin (X_n/D_j , Y_n/D_j), orifis plaka-hedef plaka arası mesafenin (Z_n/D_j), Reynolds sayısının (Re) ve pürüzlülük oranının (D_d/D_j) ortalama Nusselt sayısını nasıl etkilediği tespit edilmeye çalışılmıştır. Ortalama Nusselt sayısı için öngörülen regresyon denklemleri hem plaka türleri için hem de minimum ve maksimum çapraz akışları için ayrı ayrı elde edilmiştir. Maksimum çapraz akış çalışmaları kapsamında D_d/D_j oranı sadece tek bir değer için ele alındığından denklem 4.1'e dahil edilmemiştir. Yapılan literatür çalışmalarından ve jet akışlarıyla ilgili teorik bilgilerden yola çıkılarak en iyi sonucun üstel fonksiyonlu denklemlerle elde edildiği görülmüştür (Çelik 2006, Meola 2009). Buna göre bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki matematiksel model denklemleri (Regresyon analiz denklemleri) aşağıdaki gibi olur.

Değiştirilen parametreler yalnızca X_n/D_j ve Y_n/D_j ise ;

$$Nu_{ort} = a_1 (X_n/D_j)^{b_1} (Z_n/D_j)^{c_1} \quad (4.1)$$

Bu parametrelere ek olarak farklı Reynolds sayıları da kullanılmış ise denkleme Reynolds sayısı da ilave edilir.

$$Nu_{ort} = a_2 Re^{b_2} (X_n/D_j)^{c_2} (Z_n/D_j)^{d_2} \quad (4.2)$$

Denklem 4.1 ve 4.2'deki parametreler hem minimum hem de maksimum çapraz akış için değiştirilmiş olup bulunan korelasyon katsayısı ve kovaryanslar (sabit sayılar) denklem 4.1 için Tablo 4.16'da, denklem 4.2 için Tablo 4.17'de verilmiştir.

Tablo 4.16. Denklem 4.1 için regresyon analiz sonuçları

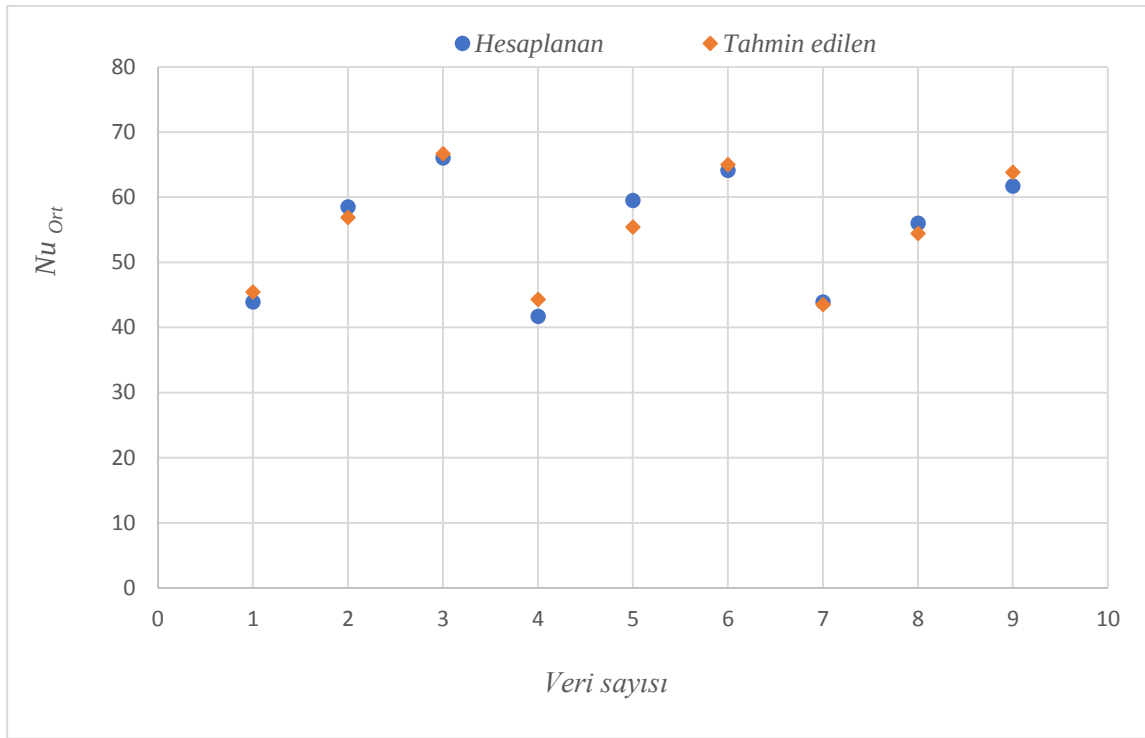
	Maksimum çapraz akış Çukur şekilli plaka	Minimum çapraz akış Tümsek şekilli plaka
a₁	32.37	62.55
b₁	0.55	-0.6
c₁	-0.06	0.7
R	0.99	0.95

Prüzlülük oranı etkisine bakılmak amaçlı olarak minimum çapraz akış kullanılmıştır. Sadece minimum çapraz akış için X_n/D_j , Y_n/D_j ve D_d/D_j parametreleri değiştirilerek bulunan sonuçlar denklem 4.3 regresyon denklemi kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar Tablo 4.18’de sunulmuştur.

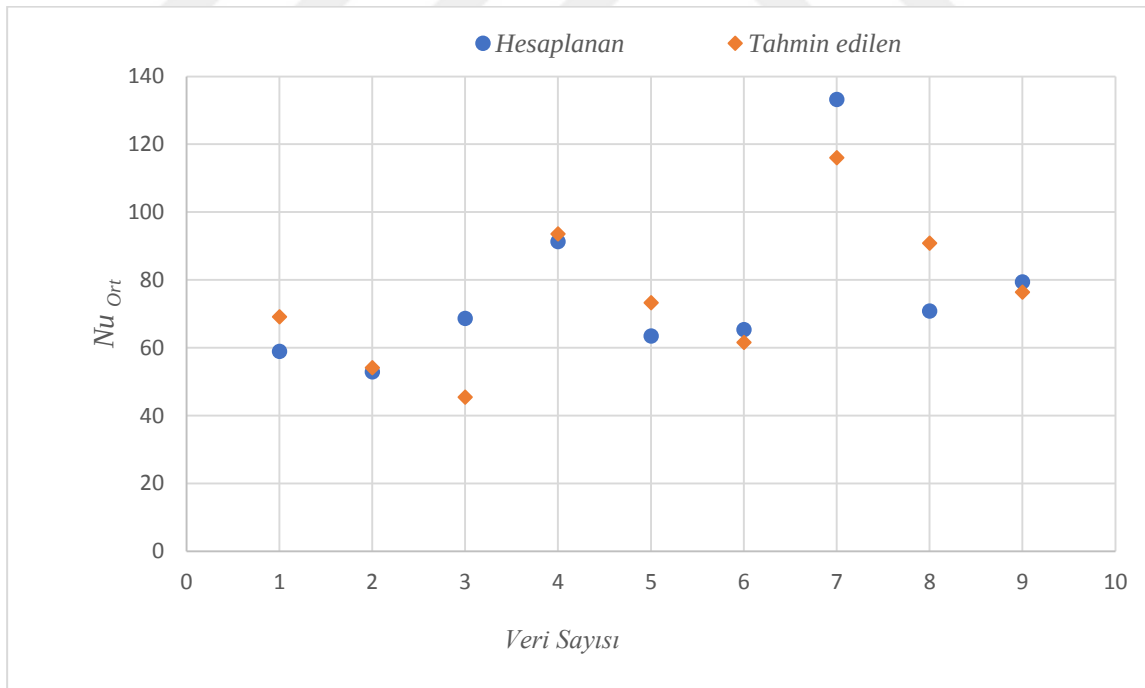
$$Nu_{ort} = a_3 (X_n/D_j)^{b_3} (Z_n/D_j)^{c_3} (D_d/D_j)^{d_3} \quad (4.3)$$

Öngörülen bağıntıyla elde edilen değerlerin, tezde bulunan sonuçlarla olan yaklaşık uyumu regresyonun geçerliliğinin ispatı olacağından, korelasyon katsayısı önem taşır. Korelasyon katsayısı iki değişken arasındaki ilişkinin şiddetini verir. Dolayısıyla korelasyon katsayısının 1’e yakınlık derecesine göre bağımlı değişken ve bağımsız değişken arasında uyumluluk oranı artacaktır. Tablo 4.16’ya göre korelasyon katsayısı ve sabitlere bakıldığı zaman genel olarak maksimum çapraz akışta korelasyon katsayısı R’nin 1’e yakın olmasından dolayı ortalama Nusselt sayısının jetler arası boyutsuz mesafe (X_n/D_j) ve plakalar arası boyutsuz mesafe (Z_n/D_j) ile aralarında güçlü bir ilişkinin var olduğu sonucuna ulaşılabilir. Sabit sayılara bakılırsa ilgili sabit sayı pozitif olduğundan ortalama Nusselt sayısı jetler arası mesafe ile doğru orantılı; plakalar arası mesafe ile ilgili sabit sayı negatif olduğundan ortalama Nusselt sayısı plakalar arası mesafe ile ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır. Jetler arası mesafe ısı transferini önemli derecede etkilemekte iken ($b_1 > 0.5$), plakalar arası mesafe etkisi oldukça düşüktür ($c_1 < 0.5$). Benzer şekilde minimum çapraz akış sonuçlarına göre ortalama Nusselt sayısı jetler arası mesafe ile ters orantılı, plakalar arası mesafe ile doğru orantılı çıkmıştır.

Maksimum çapraz akış çukur şekilli plaka ortalama Nusselt ve tahmini sonuçların karşılaştırılması Şekil 4.69’da, minimum çapraz akış tümsek şekilli plaka için Şekil 4.70’te gösterilmiştir.



Şekil 4.69. Maksimum çapraz akış çukur şekilli plaka (Denklem 4.1)



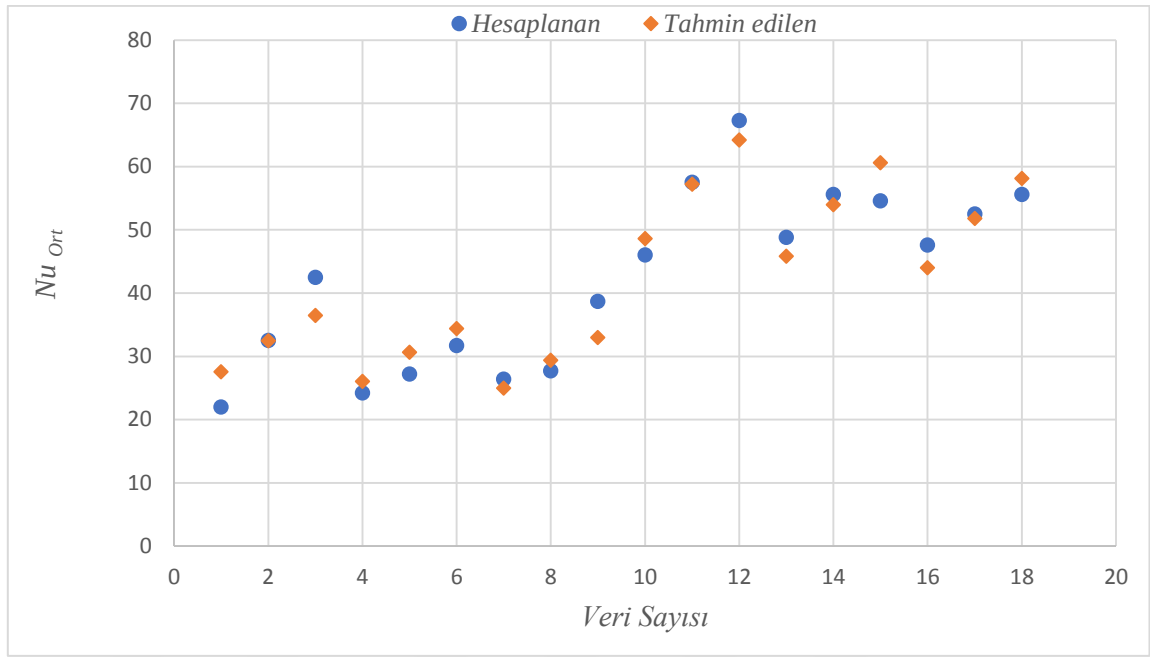
Şekil 4.70. Minimum çapraz akış tümsek şekilli plaka (Denklem 4.1)

Tablo 4.17. Denklem 4.2 için regresyon analiz sonuçları

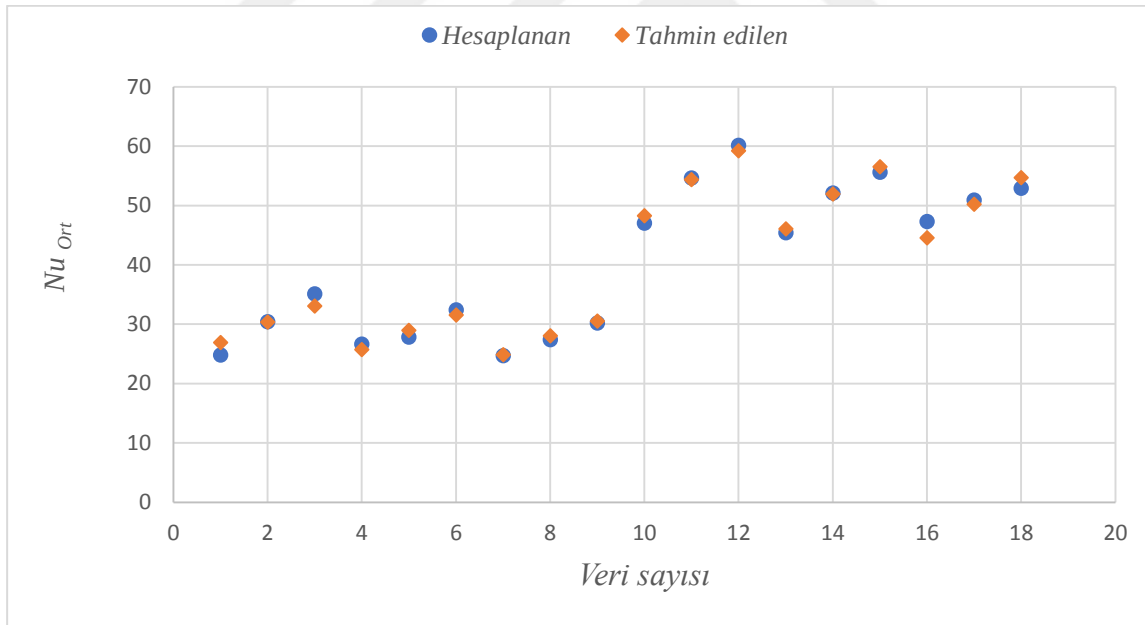
Maksimum çapraz akış			Minimum çapraz akış
	Düz plaka	Tümsek şekilli plaka	Düz plaka
a₂	0.05	0.05	0.01
b₂	0.66	0.68	0.86
c₂	0.40	0.29	0.04
d₂	-0.14	-0.11	-0.11
R	0.98	0.99	0.95

4.2 denkleminin analizi sonucunda bulunan korelasyon katsayıları ve sabit sayılar Tablo 4.17’de verilmiştir. Söz konusu durumlar maksimum çapraz akışta düz ve tümsek şekilli plaka için; minimum çapraz akışta düz plaka için değerlendirilmiştir. Ele alınan her üç durum için de korelasyon katsayısı 1’e yakın çıkmış dolayısıyla 4.2 numaralı denklemde bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasında güçlü bir ilişki olduğu anlaşılmaktadır. Burada maksimum çapraz akışta analizi yapılan düz ve tümsek şekilli plakada Reynolds sayısı 8565 ve 20000 alınarak iki kez değiştirilirken; minimum çapraz akış düz plaka için ise beş farklı Reynolds sayısı kullanılmıştır. Bu bakımdan Reynolds için kullanılan sabit sayı (b_2) ilk iki durumda 0.66, 0.68 değerinde iken beş farklı Reynolds değişiminde 0.86 şeklinde artış göstermiştir. Dolayısıyla Reynolds sayısının değişimi arttıkça ilgili katsayı da artış göstermiştir. Tablo 4.17’ye göre maksimum çapraz akış durumunda jetler arası mesafe etkisine bakılırsa her iki durum için sabit sayı (c_2) 0.4 ve 0.29 şeklinde pozitif çıkmıştır. Dolayısıyla maksimum çapraz akış durumunda ortalama Nusselt sayısının jetler arası mesafe ile doğru orantılı olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Yani jetler uzaklaştıkça ısı transferi artmakta, jetler yakınlıklaştıkça ısı transferi de azalmaktadır. Oysa plakalar arası mesafeyi temsil eden d_2 sabiti ise negatif (-0.14, -0.11 şeklinde) çıkmıştır. Yani maksimum çapraz akış durumunda ortalama Nusselt sayısı plakalar arası mesafe ile ters orantılı olarak değişmektedir. Daha önce maksimum ve minimum çapraz akış için elde edilen sonuçlara bakıldığında bu durum doğrulanmaktadır.

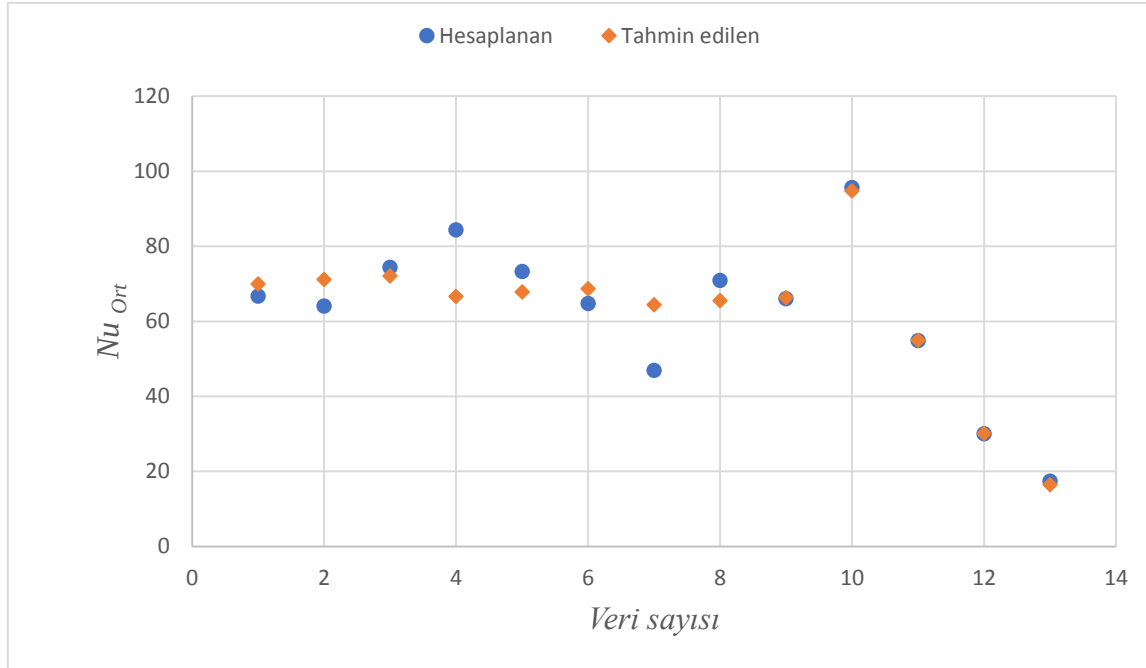
Denklem 4.2 için yapılan regresyon analiz sonuçlarına göre bulunan tahmini değerler, hesaplanan ortalama Nusselt değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar maksimum çapraz akış düz plaka, maksimum çapraz akış tümsek şekilli plaka ve minimum çapraz akış düz plaka için sırasıyla Şekil 4.71, Şekil 4.72 ve Şekil 4.73’te verilmiştir.



Şekil 4.71. Maksimum çapraz akış düz plaka sonuçları



Şekil 4.72. Maksimum çapraz akış tümsek şekilli plaka sonuçları



Şekil 4.73. Minimum çapraz akış düz plaka sonuçları

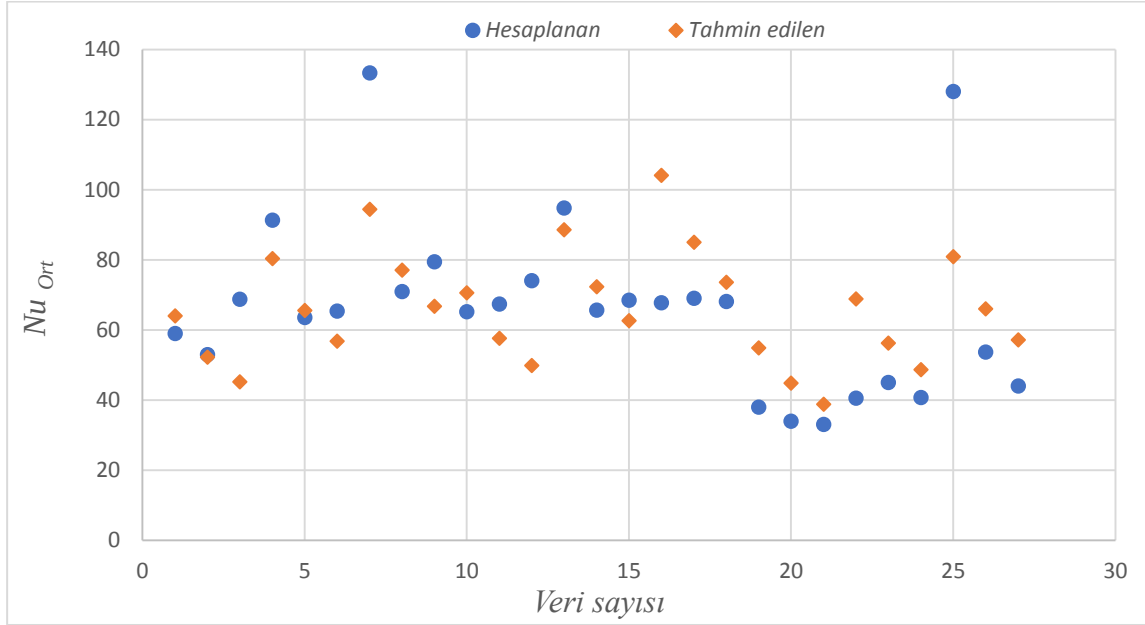
Çukur ve tümsek şekilli plakalar için minimum çapraz akışta prüzlülük oranının etkisi için üç farklı prüzlülük oranı kullanılmıştır. Bunlar için denklem 4.3 baz alınarak yapılan regresyon analiz sonuçlarına göre korelasyon katsayıları ve sabit sayılar Tablo 4.18’de görülmektedir. Bu durum için ortalama Nusselt sonuçlarının jetler arası boyutsuz mesafe ile ters, plakalar arası boyutsuz mesafe (Z_n/D_j) ve prüzlülük oranı (D_d/D_j) ile doğru orantılı olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 4.18. Denklem 4.3 için regresyon analiz sonuçları

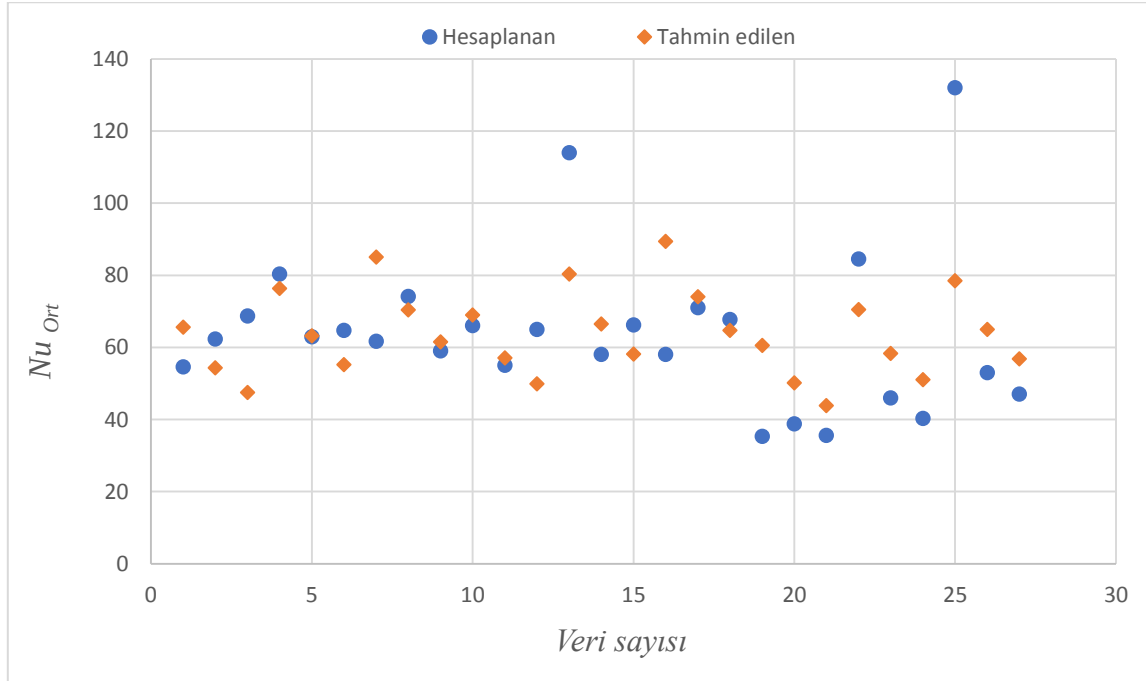
Minimum çapraz akış		
	Tümsek şekilli plaka	Çukur şekilli plaka
a_3	61.35	69.94
b_3	-0.50	-0.46
c_3	0.56	0.37
d_3	0.27	0.14
R	0.8	0.74

Yüzde fark değerlerinin önemini ortaya koymak bakımından her durum için ayrı ayrı hesaplanan ve tahmin edilen değerlerin kıyaslanması gösterilmiştir. Şekil 4.74 ve Şekil

4.75'te görülen grafiklere göre hesaplanan ve tahmin edilen değerler yüksek uyumlulukta yakın değerler almıştır. Bu durumda kullanılan üstel fonksiyonlu denklemlerin yerinde kullanıldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.74. Minimum çapraz akış tümsek şekilli plaka sonuçları



Şekil 4.75. Minimum çapraz akış çukur şekilli plaka sonuçları

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada üç farklı plaka türü için temel olarak iki farklı çapraz akış olan maksimum ve minimum çapraz akış modellerinde farklı jet ve hedef plaka-orifis plaka mesafelerinde sayısal analiz yapılmıştır. Bulunan sonuçlar en genel olarak aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir.

Maksimum çapraz akışta düz plaka modelleri için elde edilen sonuçlara göre ele alınan parametreler kapsamında jetler arası mesafe arttıkça, orifis- hedef plaka arası mesafe düştükçe ısı transferinde iyileşme olduğu gözlenmiştir. Düz plakada maksimum çapraz akışta en yüksek alan ortalamalı Nusselt sayısı minimum plaka mesafesinde ($Z_n/D_j = 2$) ve maksimum jet mesafesinde ($X_n/D_j = 4$) sağlanmıştır. Ele alınan her iki Reynolds sayısı ($Re = 8565$ ve $Re = 20000$) için de söz konusu durum benzer çıkmıştır. Genel olarak jetler arası mesafenin artması durumunda jarpan jet durma noktaları daha belirgin olmuştur. Bu durum ise plaka genelinde yerel Nusselt sayısının çarpma bölgelerinde daha yüksek, jetler arası bölgede ise daha düşük olmasına neden olmuştur. Düz plakada maksimum çapraz akış için elde edilen sonuçlarda iki farklı Reynolds sayısı kullanılarak Reynolds sayısının ısı transferine etkisine bakılmıştır. Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile orantılı olarak önemli derecede artış gösterdiği tespit edilmiştir. Herhangi bir Z_n/D_j değerinde $X_n/D_j = 2$ ve 3 için soğuma işlemi, başka bir deyişle en düşük sıcaklık değeri genel olarak plaka merkez bölgesinde, yüksek sıcaklık değeri ise plaka kenarlarında tespit edilmiştir. Düşük jet mesafelerinde yoğun jet etkisinden dolayı kanal akışı hakim olmuş ve merkez bölgede iyi bir ısı transferi elde edilirken kenarlarda ısı transferi zayıf kalmıştır. Kanal akışı etkisi en çok $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$ parametreleri için tespit edilirken, herhangi bir Z_n/D_j değerinde $X_n/D_j = 4$ olması durumunda jetler plaka geneline dağıldığı için plaka genelinde daha üniform ısı transferi sağlanmıştır. En üniform akış ise $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$ 'te gözlenmiştir.

Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akış sonuçlarına göre $Z_n/D_j = 2$ ve $Z_n/D_j = 3$ için ortalama Nusselt sayısı nispeten daha yüksek çıkarken $Z_n/D_j = 4$ 'te en düşük değerini almıştır. Bu durum düz plaka ile benzer özellik göstermiştir. Düz plaka sonuçların da en düşük Nusselt sayısı $Z_n/D_j = 4$ için elde edilirken, $Z_n/D_j = 2$ ve 3'te en yüksek ortalama değeri almıştır. Jetler arası artan mesafelerde, örneğin $X_n/D_j = 3$ ve 4 için $Z_n/D_j = 2$ ve 3 sonuçları daha yüksek çıkmıştır. Bu durum düz plaka ile benzerdir, çünkü düz plakada da en yüksek ortalama Nusselt değeri $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$ 'te elde edilmiştir. Dolayısıyla tümsek şekilli plaka maksimum çapraz akış sonuçlarına göre ısı transferi plakalar arası mesafe azaldıkça, jetler arası mesafe ise arttıkça artmıştır. Durma noktalarında maksimum ısı transfer tepe noktalarının oluşumu Z_n/D_j parametresinden bağımsız olup, X_n/D_j parametresine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Her iki Reynolds sayısı için de ($Re = 8565$ ve 20000 için) jetler arası boyutsuz mesafenin en düşük değerinde ($X_n/D_j = 2$) çarpma noktası etkisi az ya da gözlenmezken, en yüksek değerinde ($X_n/D_j = 4$) durma noktası Nusselt sayısı maksimum değerini almıştır. Dolayısıyla düz plakada olduğu gibi tümsek şekilli plakada da Reynolds sayısından bağımsız olarak en yüksek ortalama Nusselt sayısı $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$ olması durumunda elde edilmiştir. Ayrıca Reynolds sayısının etkisine bakmak amaçlı olarak karşılaştırılan sonuçlara göre düz plaka sonuçlarında olduğu gibi artan Reynolds sayısı ile (Reynolds sayısının 8565 'ten 20000 'e değiştirilmesi ile) Nusselt sayısının %90 dolaylarında artış gösterdiği gözlenmiştir.

Çukur şekilli plaka maksimum çapraz akış sonuçlarına göre $X_n/D_j = 2$ 'nin tüm Z_n/D_j değerlerinde de durma noktalarında Nusselt sayısının belirgin olmadığı, $X_n/D_j = 3$ ve $X_n/D_j = 4$ için ise durma noktası Nusselt sayısının maksimum değerlerini aldığı ve tepe noktaları oluşturduğu görülmüştür. Herhangi bir Z_n/D_j değerinde yüksek jet mesafelerinde ($X_n/D_j = 3, 4$) Nusselt sayısının daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Bu durum düz ve tümsek şekilli plaka sonuçlarında da benzer çıkmıştır.

Her üç plaka türünde de maksimum çapraz akışta jetler arası mesafe arttıkça ısı transferi istikrarlı bir şekilde artış göstermiştir. Elde edilen sonuçların Florschuetz et al. (1981), San and Lai (2001), Bailey and Bunker (2002) çalışmaları ile uyumlu olduğu anlaşılmıştır. Nitekim sözkonusu çalışmalarda çapraz akış etkisinin olması durumunda jetler arası mesafenin artışının ısı transferini olumlu etkileyeceği belirtilmiştir. Genel olarak maksimum çapraz akış sonuçlarına göre plakalar arası mesafe azaldıkça ısı transferi

artmaktadır. Mevcut çalışma ile benzer çalışma olan Huber and Viskanta (1994) çalışmasında jet ile plaka arası boyutsuz mesafeyi $Z_n/D_j = 1$ aldıklarında ortalama Nusselt sayısının daha yüksek çıktığını belirtmişlerdir. Bu artış durumunun jetler arasında oluşan ikincil çarpma noktalarından kaynaklandığını vurgulamışlardır.

Minimum çapraz akış modelleri oluşturularak minimum çapraz akışta her üç plaka için ayrı ayrı çözümler yapılmıştır. Bu doğrultuda minimum çapraz akış düz plaka sonuçlarına göre en yüksek ortalama Nusselt sonuçları düşük plaka mesafesi ($Z_n/D_j = 2$ ve 3), düşük jet mesafesi ($X_n/D_j = 2$) için elde edilmiştir. Chougule et al. 2011 sayısal ve deneysel çalışmasında 3x3 çoklu çarpan jetin düz bir duvara minimum çapraz akışta çarpma durumunda plakalar arası mesafenin 6'dan 10 artırılması ile ısı transferinin azaldığını ifade etmektedirler. Reynolds sayısının etkisinin görülebilmesi için Reynolds 4000, 8000, 16000, 20000, 30000 şeklinde 5 farklı şekilde deneme yapılmıştır. Reynolds 4000-20000 arasında Reynolds sayısının artışına bağlı olarak ortalama Nusselt sayısı belirgin bir fark ile artış göstermiştir. 20000-30000 arasında ise Reynolds artışına bağlı olarak Nusselt artışı daha az belirgin çıkmıştır. Minimum çapraz akış yoğun jet durumunda çukur plaka ve düz plaka sonuçları birbiri ile benzer olup, tümsek plakaya göre daha yüksek çıkmıştır.

Minimum çapraz akış tümsek şekilli plaka sonuçlarına göre düşük plaka mesafesinde ($Z_n/D_j = 2$) jet mesafeleri $X_n/D_j = 2, 3, 4$ şeklinde arttıkça ısı transferi de artmıştır. Yüksek plaka ($Z_n/D_j = 3, 4$) ve düşük jet mesafesinde ($X_n/D_j = 2$) en iyi ısı transfer sonucu elde edilmiştir. Minimum çapraz akış çukur şekilli plaka sonuçlarına bakılırsa tümsek şekilli plaka sonuçlarına benzer olarak $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 2$ 'de en iyi ortalama Nusselt sonucu elde edilmiştir. Her üç plaka türü için minimum çapraz akışta ortak bir sonuç olarak $Z_n/D_j = 3, X_n/D_j = 2$ parametreleri için en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Kullanılan iki farklı çapraz akış sonuçları her plaka için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Tüm plakalar için ayrı ayrı karşılaştırılan maksimum ve minimum çapraz akış sonuçlarına göre genel olarak minimum çapraz akışta ısı transferinin yüksek oranda artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte hem grafiklerden hem de ilgili tablolardan her üç plaka türü için tüm Z_n/D_j değeri ve $X_n/D_j = 3$ ve 4 'te maksimum ve minimum çapraz akış farkı az iken, $X_n/D_j = 2$ 'de fark maksimum değerini almıştır. Dolayısıyla çapraz akış etkisi jetler arası mesafenin artışı ile azalma göstermiştir. Jetler yoğunlaştıkça minimum çapraz akış etkisi

belirgin hale gelmiştir. Benzer bir çalışma olan Xing et al. (2010) deneysel çalışmasında, zamana bağlı değişim de göz önüne alınmış olup düz plaka ve pürüzlü plaka için sonuçlar kıyaslanmıştır. Söz konusu çalışmada da minimum çapraz akış ve yoğun jet durumunda en iyi ısı transferinin elde edildiği belirtilmiştir. Benzer başka bir literatür çalışması olan Obot et al. (1987) maksimum, medium ve minimum çapraz akış için yaptığı çoklu çarpan jet çalışmasında yakın jet ve uzak jet mesafelerinde bu üç tür çapraz akışın etkisinin ne olduğuna baktıklarında elde ettikleri sonuçlara göre; minimum çapraz akış için en iyi ısı transfer sonuçlarının elde edildiğini, ayrıca minimum çapraz akışta da en iyi sonuçların yakın jet mesafesine ait olduğunu tespit etmişlerdir. Bununla birlikte yerel ısı transferinin önem taşıdığı uygulamalarda bu tür yoğun jet düzenlemeleri daha iyi sonuç verirken, plaka genelinde ortalama bir ısı transferinin önemli olduğu uygulamalarda jetlerin üniform dağılımı daha kullanışlı olacaktır.

Bu çalışmada değerlendirilen bir diğer parametre ise pürüzlülük oranıdır (D_d/D_j). Üç farklı pürüzlülük oranı ($D_d/D_j = 0.57, 1, 1.43$) için tümsek ve çukur şekilli plaka sonuçları karşılaştırılmıştır. Tümsek şekilli plakada farklı D_d/D_j etkisi bakımından ortalama Nusselt sayısı Tablo 4.12 de karşılaştırılmıştır. $D_d/D_j = 1.43$ 'te $Z_n/D_j = 2$ ve 3 değerinin tüm X_n/D_j parametresinde en iyi Nusselt sayısı elde edilirken, $Z_n/D_j = 4$ 'te ise $D_d/D_j = 1$ sonuçları daha yüksek çıkmıştır. Öte yandan $D_d/D_j = 0.57$ için bulunan sonuçlar ise çoğu parametrede en düşük değerini almıştır. Söz konusu tabloya göre $D_d/D_j = 0.57$ parametresi için Nusselt sayısı $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$ parametrelerinde en iyi değerini almıştır. Çukur şekilli plaka sonuçlarına göre $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$ parametresinde her üç D_d/D_j oranında da yüksek Nusselt sayısı elde edilmiştir, ancak en yüksek değer $D_d/D_j = 1.43$ 'te sağlanmıştır. $D_d/D_j = 0.57$ parametresi için sonuçlar genel olarak düşük Nusselt değerini göstermiş ancak $X_n/D_j = 2$, $Z_n/D_j = 3$ ve 4 şeklinde iki adet parametre için yüksek değer almıştır.

Maksimum ve minimum çapraz akış için elde edilen tüm sonuçlar kullanılarak regresyon analizleri yapılmıştır. Yapılan regresyon analizinde daha önceki çalışmalar baz alınarak söz konusu ortalama Nusselt sayısı için en uygun denklemin üstel denklem olduğuna karar verilmiş ve üstel denklem kullanılmıştır. Elde edilen korelasyon katsayıları, mevcut çalışmada bulunan sayısal sonuçları doğrular nitelikte çıkmıştır. Bu bakımdan kullanılan üstel fonksiyonlu denklemlerin yerinde kullanıldığı anlaşılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak söz konusu alanda yapılacak çalışmalar için sunulabilecek öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Hem maksimum hem de minimum çapraz akışta daha geniş X_n/D_j ve Z_n/D_j parametreleri için araştırma yapılabilir. Böylece X_n/D_j ve Z_n/D_j parametreleri daha geniş aralıkta incelendiğinden yapılan yorumlar daha yerinde olacaktır.
2. Hem kendi çalışmamıza göre hem de literatür çalışmalarının çoğu, minimum çapraz akış sonuçlarının daha iyi olduğunu gösterdiğinden minimum çapraz akış üzerinden iyileştirmelerin yapılması daha yerinde olacaktır.
3. Genel olarak çapraz akış etkisinin azaltılması ısı transfer sonuçlarını artırdığı düşünüldüğünden çapraz akış etkisini azaltma yönünde çalışmalar yaparak mevcut çalışmalar ile kıyas yapılabilir.
4. Farklı soğutucu akışkanlar kullanılarak benzer çalışmalar yapılabilir. Böylece hangi uygulamalarda hangi soğutucu akışkanın daha iyi etki oluşturacağı tespit edilebilir.
5. Tümsek ve çukur şekilli plaka farklı prüzlülük etkisine bakıldığında $D_d/D_j = 1$ ve 1.43 sonuçlarının genel olarak paralel olduğu bunun yanında, $D_d/D_j = 0.57$ sonuçlarının ise daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Bu bakımdan yapılacak araştırmalarda, D_d/D_j oranının geniş aralıklarda değiştirilerek değerlendirilmesi, söz konusu durumun netleşmesine katkı sağlayacaktır.
6. Özellikle minimum çapraz akışta farklı prüzlülükteki çarpma plakalarında farklı jet geometrileri de denenerek sonuçlar düz plaka ile kıyaslanabilir.
7. Yüksek jet etkileşimlerinin olduğu düşük jet mesafesi için tahliye deliklerinin kullanılması çapraz akışı azaltacağı için ısı transferini artırmaya yardımcı olacaklardır. Bu bakımdan minimum çapraz akışta düşük jet mesafesinde tahliye deliklerinin etkisine bakılabilir.

KAYNAKLAR

Aldabbagh LBY, Sezai I (2002) Numerical simulation of three-dimensional laminar multiple impinging square jets. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 23: 509–518

Aldabbagh LBY, Sezai I (2004) Three-dimensional numerical simulation of an array of impinging laminar square jets with spent fluid removal. *International Journal of Thermal Sciences* 43: 241–247

Al-Sanea S (1992) A numerical study of the flow and heat transfer characteristics of an impinging laminar slot-jet including crossflow effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 35(10): 2501–2513

Azad GS, Huang Y, Han JC (2000) impingement heat transfer on dimpled surfaces using a transient liquid crystal technique. *Journal of Thermophysics and Heat transfer* 14: 186-193

Atsatan M (2012) Değişik geometrili açık jetlerin akış özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Marmara Üniversitesi İstanbul, s. 92

Bakker A (2002) *Applied Computational Fluid Dynamics*. Lecture 11 –Boundary Layers and Separation, s. 1- 47

Barata JMM (1996) Fountain flows produced by multiple impinging jets in a crossflow. *Aeronautics Astronautics (AAIA) Journal* 34(12): 2523–2530

Bardina JE, Huang PG, Coakley TJ (1997) Turbulence modeling, validation, testing and development. NASA Technical Memorandum 110446

Bayraktar S (2008) Çapraz akıştaki türbülanslı jet akışlarının deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 210

Behbahani AI, Goldstein RJ (1983) Local heat transfer to staggered arrays of impinging circular air jets. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 105(2): 354–360

Bilen K (1994) Isıtılan düzlem bir plakaya dik ve eğik hava jeti çarpmasında ısı transfer karakteristiklerinin deneysel olarak incelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, s. 119

Bilgin N (2009) Uyarılmış jet çarpma akışındaki ısı ve akışkan hareketinin deneysel araştırması. İzmir Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, s. 89

Bouchez JP, Goldstein RJ (1975) Impingement cooling from a circular jet in a cross flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18: 719-730

Bölek A (2017) Farklı düzlemler üzerine çarpan jetlerin akış ve ısı transfer analizleri. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 117

Browne EA, Michna GJ, Jensen MK, Peles Y (2010) Experimental investigation of single-phase microjet array heattransfer. Department of mechanical, aerospace, and nuclear engineering, rensselaer polytechnic institute, 132 / 041013: 1-9

Buchlin JM (2011) Convective heat transfer in impinging- gas- jet arrangements. *Journal of Applied Fluid Mechanics* 4(2): 137-149

Chang SW, Chiou SF, Chang SF (2007) Heat transfer of impinging jet array over concave-dimpled surface with applications to cooling of electronic chipsets. *Experimental Thermal and Fluid Science* 31: 625–640

Chang SW, Jena JY, Fei CS (2006) Heat transfer of impinging jet array over convex-dimpled surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40: 3045-3059

Can M (1988) Çarpan hava jetleri ile ısı transferinin artırılması. *Isı bilimi ve tekniği dergisi* 11(1): 25-32

Cornaro C, Fleischer A, Goldstein R (1999) Flow visualization of a round jet impinging on cylindrical surfaces. *Experimental Thermal Fluid Science* 20(2): 66–78

Chougule NK, Parishwad GV, Gore PR, Pagnis S, Sapali SN (2011) CFD Analysis of multi-jet air impingement on flat plate. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, U.K., ISBN: 978-988-19251-5-2

Çalışır T (2011) Çarpan akışkan jetleri kullanarak kanatçıklı yüzeyler üzerindeki ısı transferinin sayısal olarak incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Ankara, s. 188

Çalışır T, Çalışkan S, Kılıç M, Başkaya Ş (2017) Çarpan akışkan jetleri kullanarak kanatçıklı yüzeyler üzerindeki akış alanının sayısal olarak incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 32: 119-130

Çalışkan S (2012) Farklı jet ve çarpma plakası özelliklerinde çarpmalı akışkan jetlerinin ısı transferi ve akışının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Ankara*, s. 329

Çalışkan S, Baskaya S, Calisir T (2014) Experimental and numerical investigation of geometry effects on multiple impinging air jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 75: 685–703

Çelik N (2006) Optimum lüle şeklinin çarpan jet üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 267

Çengel Y (2003) Heat transfer a practical approach, Mc Graw-Hill, s. 930

Çengel Y, Cimbala JM (2007) Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları. ISBN: 978-975-6240-18-2, Çeviri Editörü: Tahsin Engin, Editör yardımcıları: Halil Rıdvan Öz, Hasan Küçük, Şevki Çeşmeci, Güven Kitabevi, İzmir, s. 937

Çetin Ö (2013) Sentetik Jet Uyarıcı Kullanarak Düz Levha Yüzeyinin Etkili Soğutulması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, s. 65

Çulun P, Çelik N, Kapan S (2017) Investigation of inlet turbulence intensity effect on multiple jet impinging applications. International Conference on Multidisciplinary, Science, Engineering and Technology (IMESET'17Bitlis) Bitlis, Turkey, s. 471-477

Ekkad SV, Kontrovitz D (2002) Jet impingement heat transfer on dimpled target surfaces. International Journal of Heat and Fluid Flow 23: 22–28

El Gharbi N, Absi N, Benzaoui A, Amara EH (2009) Effect of near-wall treatments on air flow simulation. Prooceding of 2009 international conference on computational methods for energy engineering and environment. IICCME. Sousse, Tunisia, s.185-189

Fitzgerald JA, Garimella SV (1998) A study of the flow field of a confined and submerged impinging jet. International Journal of Heat and Mass Transfer 41(89): 1025-1034

Florschuetz LW, Metzger DE, Takeuchi DI, Berry RA (1980) Multiple jet impingement heat transfer characteristics - experimental investigation of inline and staggered arrays with crossflow. NASA Contractor Report-3217, Tempe, USA, s. 64

Florschuetz LW, Metzger DE, Truman CR (1981) Jet array impingement with crossflow – correlation of streamwise resolved flow and heat transfer distributions. NASA Contractor Report 3373, Arizona State University Tempe, Arizona, s. 53

Gautner JW, Livingwood, JNB, Hryciuk P (1970) Survey of literature on flow characteristics of a single turbulent jet impinging on a flat plate, NASA TN D-5652 NTIS N70-18963

Geçim S, Pulat E, İşman MK, Etemoğlu AB (2008) Çarpan dikdörtgen bir hava jetinde türbülans modellerinin karşılaştırılması ve ilgili parametrelerin ısı transferine etkileri. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 13(2): 69

Geers LFG, Tummers MJ, Hanjalic K (2004) Experimental investigation of impinging jet arrays. Experiments in Fluids 36(6): 946-958

Giram DR, Patil AM (2013) Experimental & theoretical analysis of heat transfer augmentation from dimpled surface. *International Journal of Engineering Research and applications* 3:19-23

Goldstein RJ, Behbahani AI, Heppelmann KK (1986) Streamwise distribution of recovery factor and the local heat transfer to an impinging circular air jet. *International Journal of Heat Transfer* 29(8):1227 - 1235

Gölcü M, Yazıcı H, Akçay M, Köseoğlu MF, Sekmen Y (2012) Oto camların temperlenmesinin de çarpan hava jetleri ile soğutmanın deneysel incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 27(4): 775-783

Hansen IG, Webb BW (1993) Air jet impingement heat transfer from modified surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 36: 987-999

Han B, Goldstein RJ (2001) jet impingement heat transfer in gas turbine systems. *Annals of the New York Academy Science* 934(1):147-161.

Huber AM, Viskanta R (1994) Convective heat transfer to a confined impinging array of air jets with spend air exits, *ASME J. Heat Transfer* 116: 570-576

İpek G (2012) Çarpan çoklu slot jetlerde akış ve ısı transferi, karakteristiklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, s.102

İşman MK (2011) Tekli ve çoklu çarpan hava jetlerinde zorlanmış taşınım ile ısı ve kütle transferinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Uludağ Üniversitesi, Bursa, s. 195

Jones WP, Launder BE (1972) the prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 15: 301-314

Kaçar EN (2014) Jet çarpma ile soğutma sistemi özelliklerinin sayısal araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, s. 59

Kanokjaruvijit K, Martinez-Botas RF (2005) Jet impingement on a dimpled surface with different crossflow schemes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48: 161–170

Kanokjaruvijit K, Martinez-Botas RF (2010) Heat transfer correlations of perpendicular impinging jets on a hemispherical-dimpled surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53: 3045–3056

Kim SW, Benson TJ (1993) Fluid flow of a row of jets in crossflow a numerical study. *Aeronautics Astronautics (AIAA) Journal* 31(5): 806–811

Launder BE, Spalding DB (1974) The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3(2): 269-289

Lee DH, Kim SJ, Kim YH, Park HJ (2015) Heat transfer with fully developed slot jets impinging on confined concave and convex surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 88: 218–223

Meola C (2009) A new correlation of nusselt number for impinging jets. *Heat Transfer Engineering* 30(3): 221–228

Menter F (1994) Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *Aeronautics Astronautics (AAIA) Journals* 32(8): 1598–1605

Metzger DE, Florschuetz LW, Takeuchi DI, Behee RD, Berry RA (1979) Heat transfer characteristics for inline and staggered arrays of circular jets with crossflow of spent air. *Journal of Heat Transfer* 101(3): 526–531

Nakod PM, Prabhu SV, Vedula RP (2006) Heat transfer augmentation between impinging circular air jet and flat plate using finned surfaces and vortex generators. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32(5): 1168–1187

Negi DS, Pattamatta A (2015) Profile shape optimization in multi-jet impingement cooling of dimpled topologies for local heat transfer enhancement. *Heat and Mass Transfer* 51: 451–464

Obot NT, Trabold TA (1987) Impingement heat transfer within arrays of circular jets: Part 1 - effects of minimum, intermediate, and complete crossflow for small and large spacings. *Journal of Heat Transfer* 109: 872–879

Onstad AJ, Hoberg TB, Elkins CJ, Eaton JK (2009) Flow and Heat Transfer for Jet Impingement Arrays with Local Extraction, Sixth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena Seoul, Korea, June 22–24, ISSN Online: 2642-0554

Penumadu PS, Rao AG (2017) Numerical investigations of heat transfer and pressure drop characteristics in multiple jet impingement system. *Applied Thermal Engineering* 110: 1511–1524

Rhee DH, Yoon PH, Cho HH (2003) Local heat/mass transfer and flow characteristics of array impinging jets with effusion holes ejecting spent air. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46: 1049–1061

Robertson PR (2005) The design and validation of an impinging jet test facility. Ph.D. Department of Mechanical Engineering, Baylor University, s. 144

Saad NR, Mujumdar AS, Abdelmessah W, Douglas WJM (1980) Local heat transfer characteristics for staggered arrays of circular impinging jets with crossflow of spent air. *ASME Paper* 80HT-23

Slayzak SJ, Viskanta R, Incropera FP (1994) Effect of interaction between adjacent free surface planar jets on local heat transfer from the impingement surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 37(2): 269–282

Smith BE (2012) Simulation of heat/mass transfer of a three-layer impingement/effusion cooling system. Master Thesis, Mechanical Engineering Department of Mechanical, Materials and Aerospace Engineering College of Engineering and Computer Science, B.S. University of Central Florida, Orlando, Florida, s. 77

Telişik ÇB (2007) Lüle – hedef yüzey arası uzaklığın çarpan jet akış ve ısı transferi karakteristiklerine etkisinin sayısal olarak incelenmesi. Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Ankara, s. 96

Türker E (2006) Dönen bir disk yüzeyine çarpan jet akımının sayısal incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 96

Trinh XT, Fenot M, Dorignac E (2016) Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to unconfined impinging air jets. *Experimental Thermal And Fluid Science* 70: 1–16

Viskanta R (1993) Heat Transfer to impinging isothermal gas and flame jets. *Experimental Thermal and Fluid Science* 6: 111-134

Weigand B, Spring S (2009) Multiple jet impingement – a review. *International Symposium on Heat Transfer in Gas Turbine Systems*, Antalya, Turkey

Wolf DH, Incropera FP, Viskanta R (1993) Jet impingement boiling. *Advances in Heat Transfer* 23: 1-132

White FM (2016) Akışkanlar mekaniği, Çeviri editörleri: Prof. Dr. Kadir Kırkköprü, Prof. Dr. Erkan Ayder, 7. Baskı, Literatür yayıncılık, İstanbul, s. 910

Yakut R (2013) Altıgen kanatçıklı ısı alıcılarda çarpan jetle ısı ve akış karakteristiklerinin deneysel ve sayısal olarak belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, s. 174

Yong S, Zhou ZJ, Nan XG (2015) Convective heat transfer for multiple rows of impinging air jets with small jet-to-jet spacing in a semi-confined channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer* (86): 832–842

Yükselentürk Y (2011) Dairesel ve dairesel olmayan jet akım alanlarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak ve Uzay Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, s. 105

EKLER

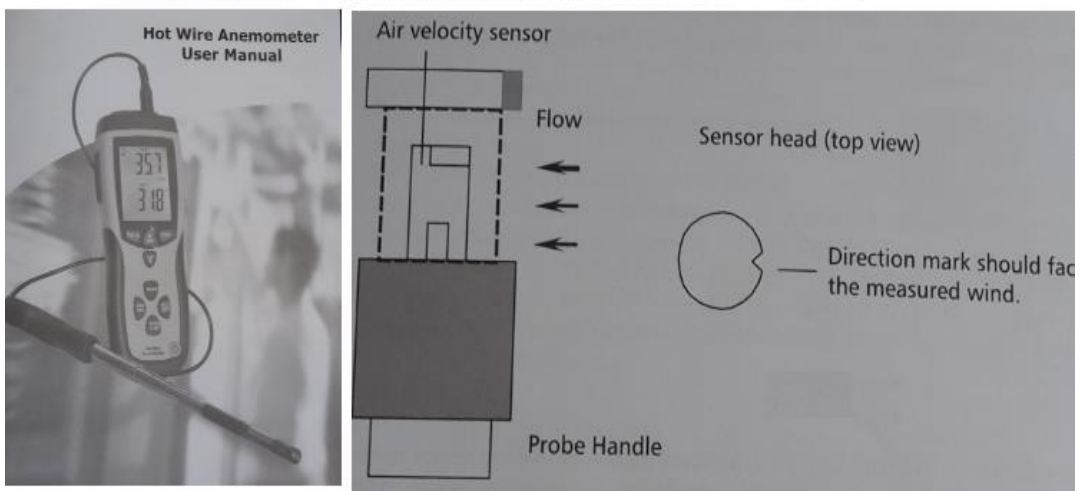
Ek A Deneysel Veriler

Tablo A1. Film sıcaklığı için sıcaklık ölçüm değerleri

Sıcaklık Nokta	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Her Nokta Ort. Sıc.(°C)
1	35	53	83	86	84.5
2	35	55	85	83	84.0
3	34	55	88	90	89.0
4	35	52	86	84	85.0
5	34	54	85	83	84.0
6	39	59	79	80	79.5
7	37	57	84	83	83.5
8	37	57	82	85	83.5
9	35	54	73	84	78.5
10	35	54	75	81	78.0
11	35	51	80	84	82.0
12	35	51	85	79	82.0
13	38	50	83	78	80.5
14	38	50	85	77	81.0
15	38	51	80	79	79.5
16	38	44	79	82	80.5
17	34	45	80	73	76.5
18	34	45	80	76	78.0
19	37	47	80	70	75.0
20	35	52	77	78	77.5
21	39	45	74	86	80.0
22	33	47	75	83	79.0
23	36	50	75	90	82.5
24	36	45	72	84	78.0
25	37	45	73	83	78.0
Ort. Sıc. (°C)			80	81.6	80.7

Tablo A3. (Devamı) Jet hızı ölçüm değerleri

Hız Ölçüm Noktaları	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Her nokta için Ort. Jet Hızı (m/s)
20	1.270	1.200	1.300	1.256
21	1.190	1.270	1.190	1.216
22	1.180	1.280	1.300	1.253
23	1.170	1.270	1.360	1.266
24	1.230	1.220	1.200	1.216
25	1.190	1.240	1.310	1.246
Ort. Jet Hızı				1.230



Şekil A1.Sıcak tel anemometre ve probu



Şekil A2. Hedef plakaya termokulpların yerleşimi



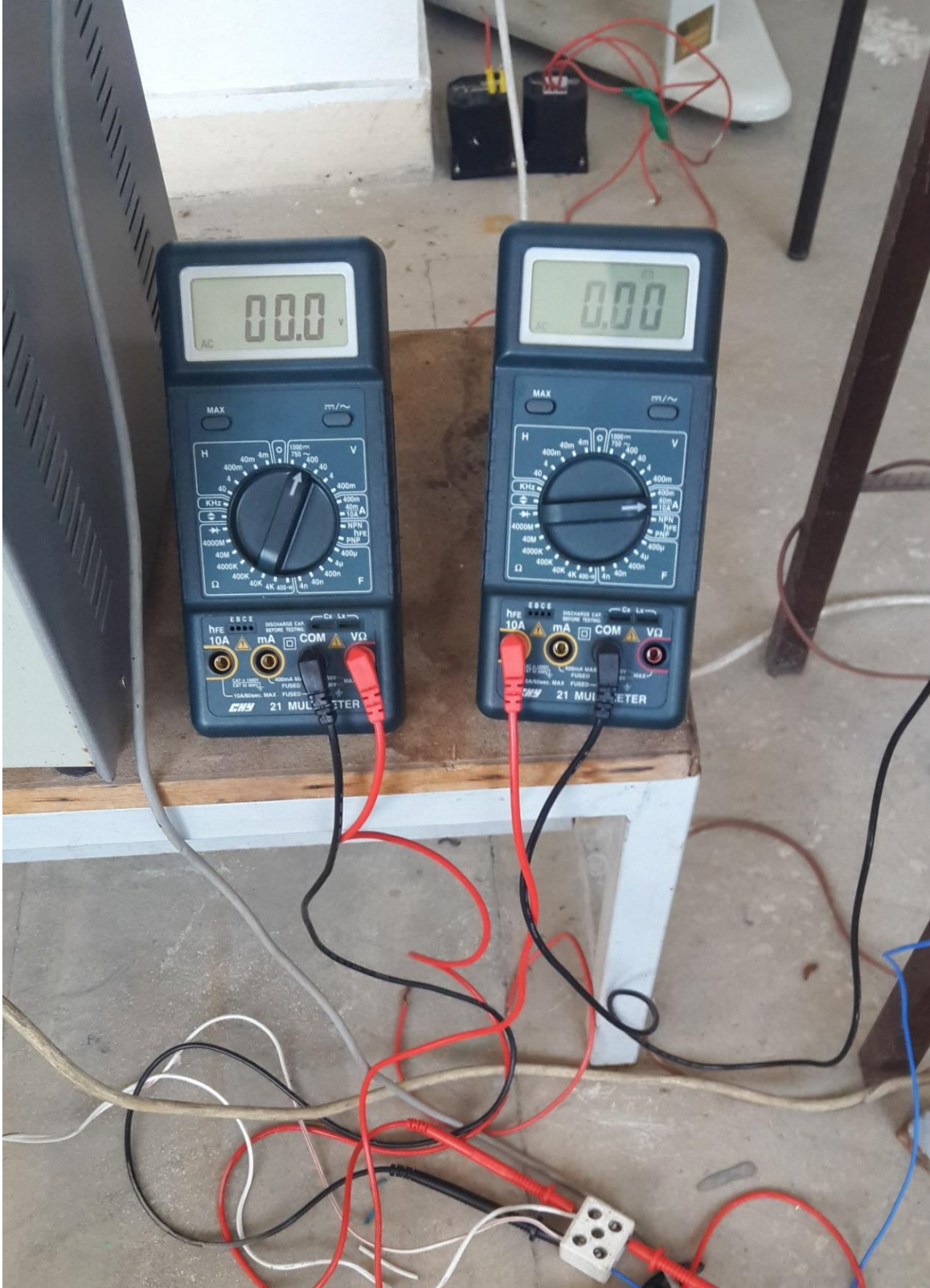
Şekil A3. Folyo tipi ısıtıcı ve termokulpların yerleştirilmesi



Şekil A4. İzolasyon detayı



Şekil A5. Sabit ısı akısı için kullanılan varyak



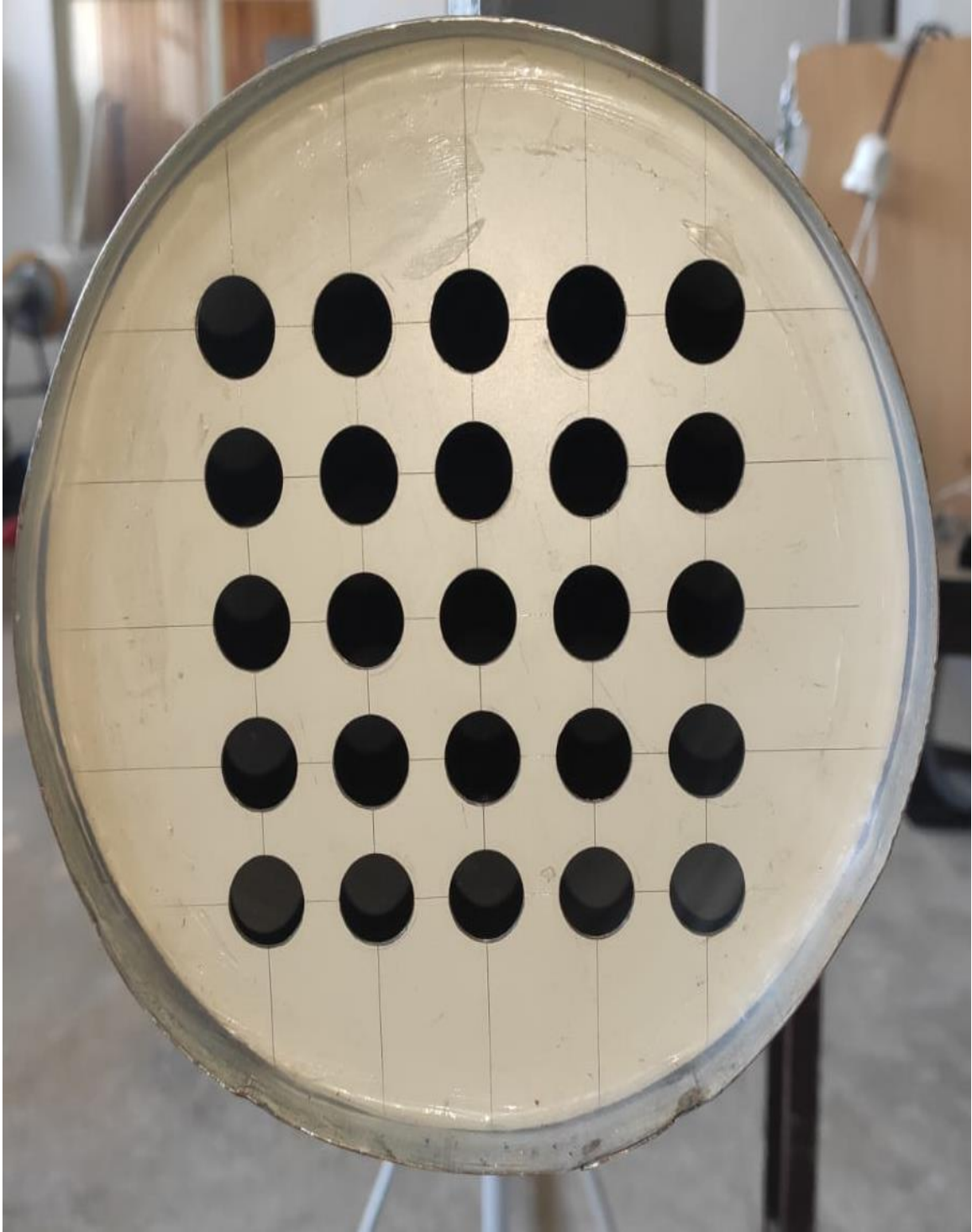
Şekil A6. Ampermetre ve voltmetre bağlantısı



Şekil A7. Deney seti komple elektrik bağlantısı



Şekil A8. Termokulpların kanal seçiciye bağlanması



Şekil A9. Orifis plaka yapısı



Şekil A10. Anemometrede akışkan hızı ve sıcaklığının ölçümü



Şekil A11. Kompresör çıkışı basınç ölçümü



Şekil A12. Rotametre ile debi ölçümü

Ek B Sayısal Doğrulama Verileri

Tablo B1. Maksimum çapraz akış modelleri

Modeller ($D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$)	Plaka Türü	Korunum durumu	Jet-Hedef plaka arası mesafe(Z_n/D_j)	jetler arası boyutsuz mesafe(X_n/D_j)	Reynolds sayısı
M1	Düz plaka	Tek çıkış	2	2	8565
M2	Düz plaka	Tek çıkış	2	3	8565
M3	Düz plaka	Tek çıkış	2	4	8565
M4	Düz plaka	Tek çıkış	3	2	8565
M5	Düz plaka	Tek çıkış	3	3	8565
M6	Düz plaka	Tek çıkış	3	4	8565
M7	Düz plaka	Tek çıkış	4	2	8565
M8	Düz plaka	Tek çıkış	4	3	8565
M9	Düz plaka	Tek çıkış	4	4	8565
M10	Düz plaka	Tek çıkış	2	2	20 000
M11	Düz plaka	Tek çıkış	2	3	20 000
M12	Düz plaka	Tek çıkış	2	4	20 000
M13	Düz plaka	Tek çıkış	3	2	20 000
M14	Düz plaka	Tek çıkış	3	3	20 000
M15	Düz plaka	Tek çıkış	3	4	20 000
M16	Düz plaka	Tek çıkış	4	2	20 000
M17	Düz plaka	Tek çıkış	4	3	20 000
M18	Düz plaka	Tek çıkış	4	4	20 000
M19	Tümsek şekilli p.	Tek çıkış	2	2	20 000
M20	Tümsek şekilli p.	Tek çıkış	2	3	20 000
M21	Tümsek şekilli p.	Tek çıkış	2	4	20 000
M22	Tümsek şekilli p.	Tek çıkış	3	2	20 000
M23	Tümsek şekilli p.	Tek çıkış	3	3	20 000
M24	Tümsek şekilli p.	Tek çıkış	3	4	20 000
M25	Tümsek şekilli p.	Tek çıkış	4	2	20 000
M26	Tümsek şekilli p.	Tek çıkış	4	3	20 000
M27	Tümsek şekilli p.	Tek çıkış	4	4	20 000
M28	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	2	2	8565
M29	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	2	3	8565
M30	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	2	4	8565
M31	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	3	2	8565
M32	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	3	3	8565
M33	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	3	4	8565
M34	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	4	2	8565
M35	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	4	3	8565

Tablo B1. (Devamı): Maksimum çapraz akış modelleri

Modeller ($D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$)	Plaka Türü	Korunum durumu	Jet-Hedef plaka arası mesafe(Z_n/D_j)	jetler arası boyutsuz mesafe(X_n/D_j)	Reynolds sayısı
M36	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	4	4	8565
M37	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	2	2	20 000
M38	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	2	3	20 000
M39	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	2	4	20 000
M40	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	3	2	20 000
M41	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	3	3	20 000
M42	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	3	4	20 000
M43	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	4	2	20 000
M44	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	4	3	20 000
M45	Çukur şekilli p.	Tek çıkış	4	4	20 000

Tablo B2. Minimum çapraz akış modelleri

Modeller($D_d/D_j = 1$ $t/D_d = 0.25$)	Plaka Türü	Korunum durumu	Jet-Hedef plaka arası mesafe(Z_n/D_j)	jetler arası boyutsuz mesafe(X_n/D_j)	Reynol ds sayısı
M46	Düz plaka	Dört çıkış	2	2	8565
M47	Düz plaka	Dört çıkış	2	3	8565
M48	Düz plaka	Dört çıkış	2	4	8565
M49	Düz plaka	Dört çıkış	3	2	8565
M50	Düz plaka	Dört çıkış	3	3	8565
M51	Düz plaka	Dört çıkış	3	4	8565
M52	Düz plaka	Dört çıkış	4	2	8565
M53	Düz plaka	Dört çıkış	4	3	8565
M54	Düz plaka	Dört çıkış	4	4	8565
M55	Düz plaka	Dört çıkış	2	2	20 000
M56	Düz plaka	Dört çıkış	2	3	20 000
M57	Düz plaka	Dört çıkış	2	4	20 000
M58	Düz plaka	Dört çıkış	3	2	20 000
M59	Düz plaka	Dört çıkış	3	3	20 000
M60	Düz plaka	Dört çıkış	3	4	20 000
M61	Düz plaka	Dört çıkış	4	2	20 000
M62	Düz plaka	Dört çıkış	4	3	20 000
M63	Düz plaka	Dört çıkış	4	4	20 000
M64	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	2	2	20 000
M65	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	2	3	20 000
M66	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	2	4	20 000

Tablo B2. (Devamı): Minimum çapraz akış modelleri

Modeller($D_d/D_j = 1$ t/ $D_d = 0.25$)	Plaka Türü	Korunum durumu	Jet-Hedef plaka arası mesafe(Z_n/D_j)	jetler arası boyutsuz mesafe(X_n/D_j)	Reynolds sayısı
M67	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	3	2	20 000
M68	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	3	3	20 000
M69	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	3	4	20 000
M70	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	4	2	20 000
M71	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	4	3	20 000
M72	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	4	4	20 000
M73	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	2	2	8565
M74	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	2	3	8565
M75	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	2	4	8565
M76	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	3	2	8565
M77	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	3	3	8565
M78	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	3	4	8565
M79	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	4	2	8565
M80	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	4	3	8565
M81	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	4	4	8565
M82	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	2	2	20 000
M83	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	2	3	20 000
M84	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	2	4	20 000
M85	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	3	2	20 000
M86	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	3	3	20 000
M87	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	3	4	20 000
M88	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	4	2	20 000
M89	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	4	3	20 000

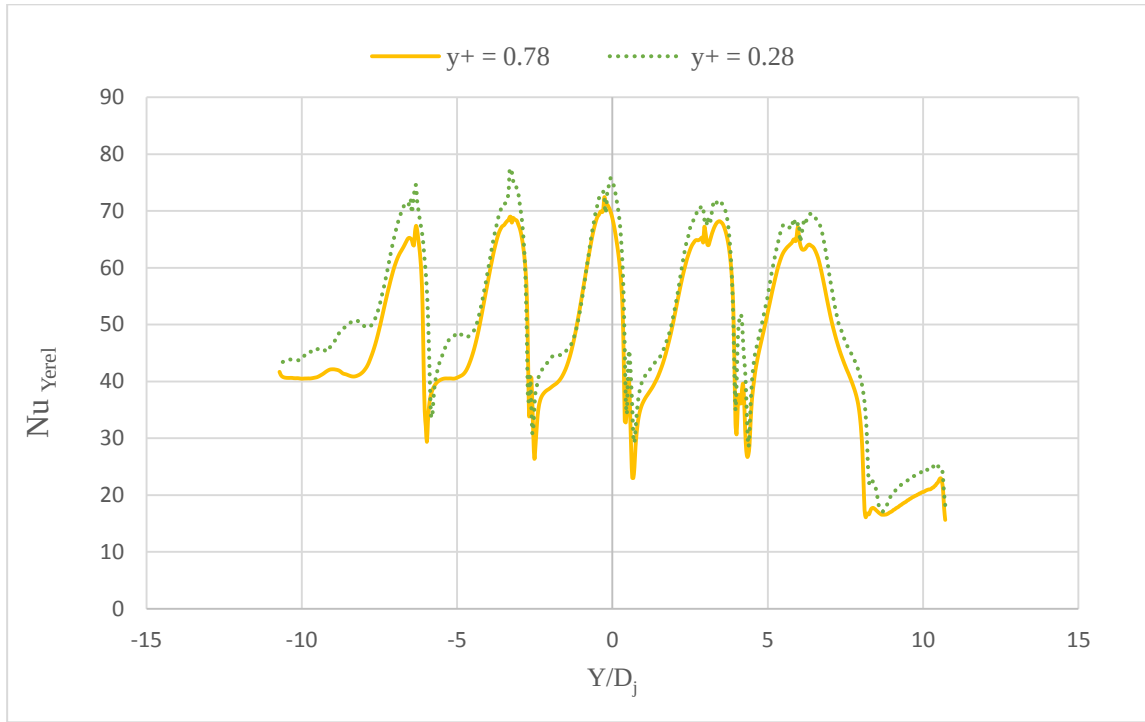
Tablo B3. Farklı D_d/D_j parametresi için modeller

Modeller (t/ $D_d = 0.25$)	Plaka	Korunum durumu	D_d/D_j	Jet-Hedef plaka mesafesi (Z_n/D_j)	jetler arası mesafe(X_n/D_j)	Reynolds sayısı
M90	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	1.43	2	2	20000
M91	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	1.43	2	3	20000
M92	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	1.43	2	4	20000
M93	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	1.43	3	2	20000
M94	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	1.43	3	3	20000
M95	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	1.43	3	4	20000
M96	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	1.43	4	2	20000

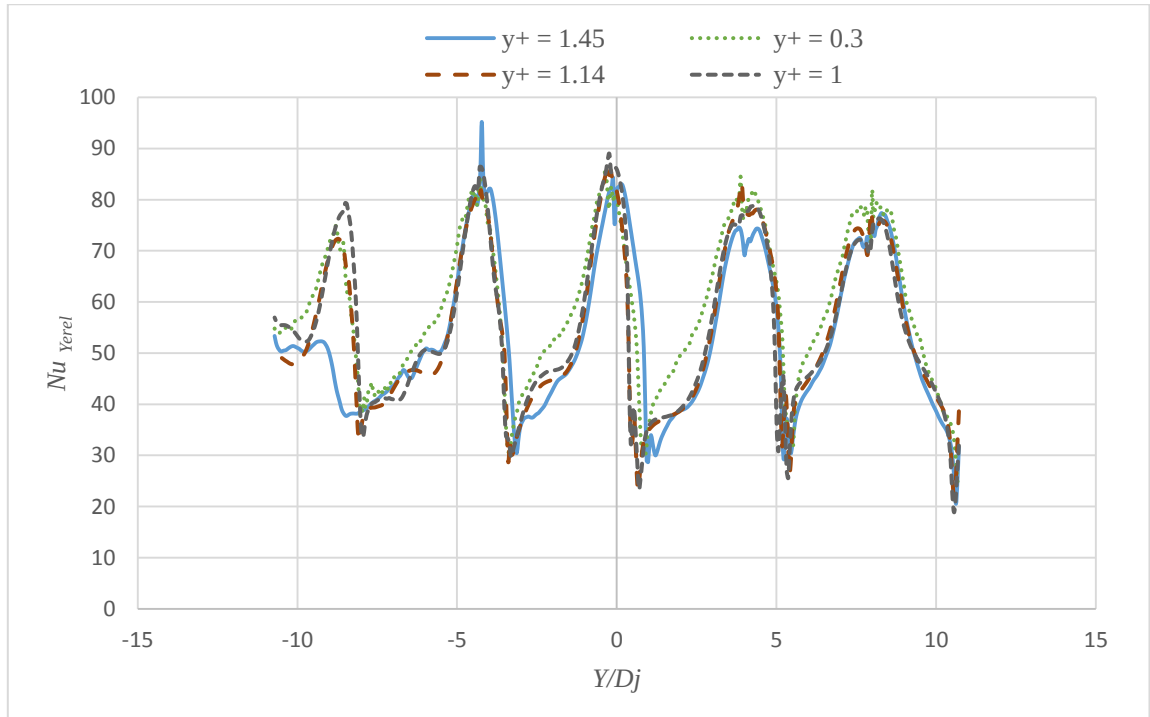
Tablo B3. (Devamı): Farklı D_d/D_j parametresi için modeller

Modeller ($t/D_d = 0.25$)	Plaka	Korunum durumu	D_d/D_j	Jet-Hedef plaka arası mesafe(Z_n/D_j)	jetler arası boyutsuz mesafe(X_n/D_j)	Reynolds sayısı
M97	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	1.43	4	3	20000
M98	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	1.43	4	4	20000
M99	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	1.43	2	2	20000
M100	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	1.43	2	3	20000
M101	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	1.43	2	4	20000
M102	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	1.43	3	2	20000
M103	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	1.43	3	3	20000
M104	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	1.43	3	4	20000
M105	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	1.43	4	2	20000
M106	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	1.43	4	3	20000
M107	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	1.43	4	4	20000
M108	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	0.57	2	2	20000
M109	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	0.57	2	3	20000
M110	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	0.57	2	4	20000
M111	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	0.57	3	2	20000
M112	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	0.57	3	3	20000
M113	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	0.57	3	4	20000
M114	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	0.57	4	2	20000
M115	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	0.57	4	3	20000
M116	Tümsek şekilli p.	Dört çıkış	0.57	4	4	20000
M117	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	0.57	2	2	20000
M118	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	0.57	2	3	20000
M119	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	0.57	2	4	20000
M120	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	0.57	3	2	20000
M121	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	0.57	3	3	20000
M122	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	0.57	3	4	20000
M123	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	0.57	4	2	20000
M124	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	0.57	4	3	20000
M125	Çukur şekilli p.	Dört çıkış	0.57	4	4	20000

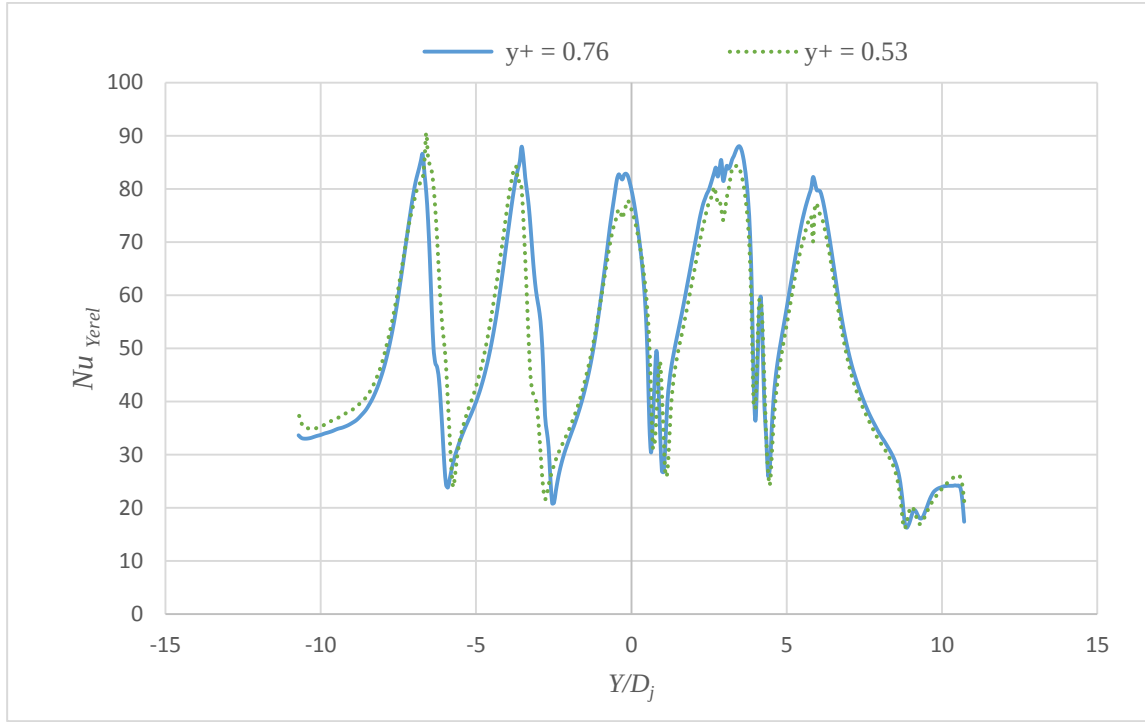
Ek B1. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Re = 8565$



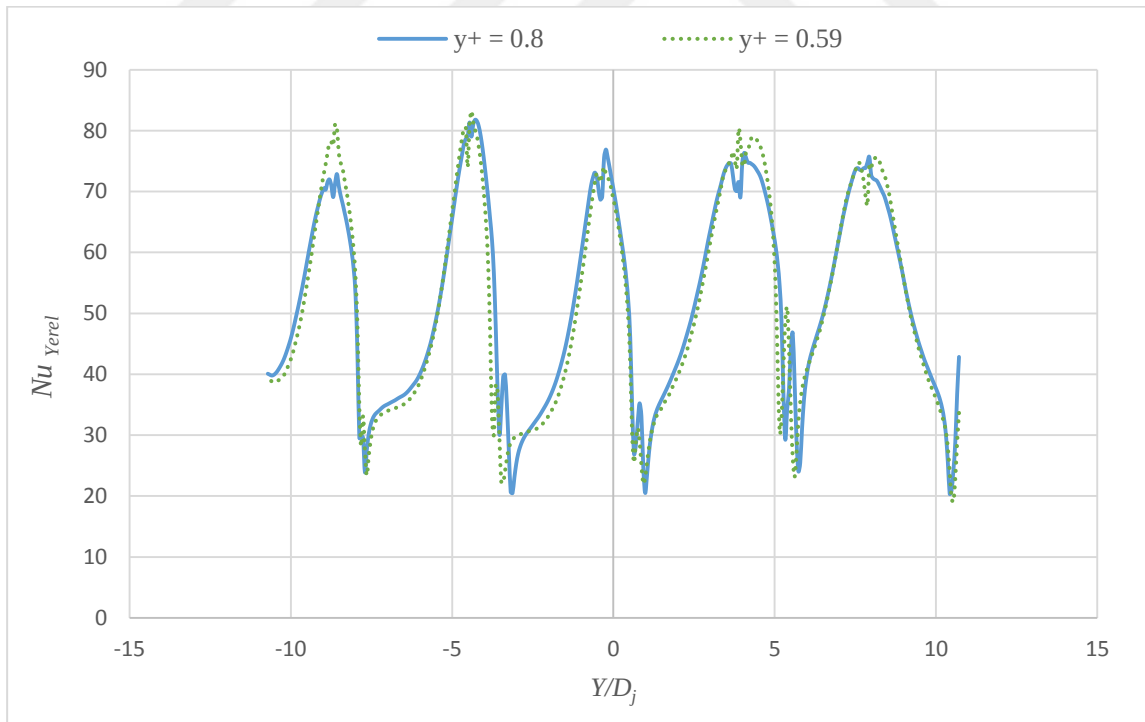
Şekil B1.1. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 8565$



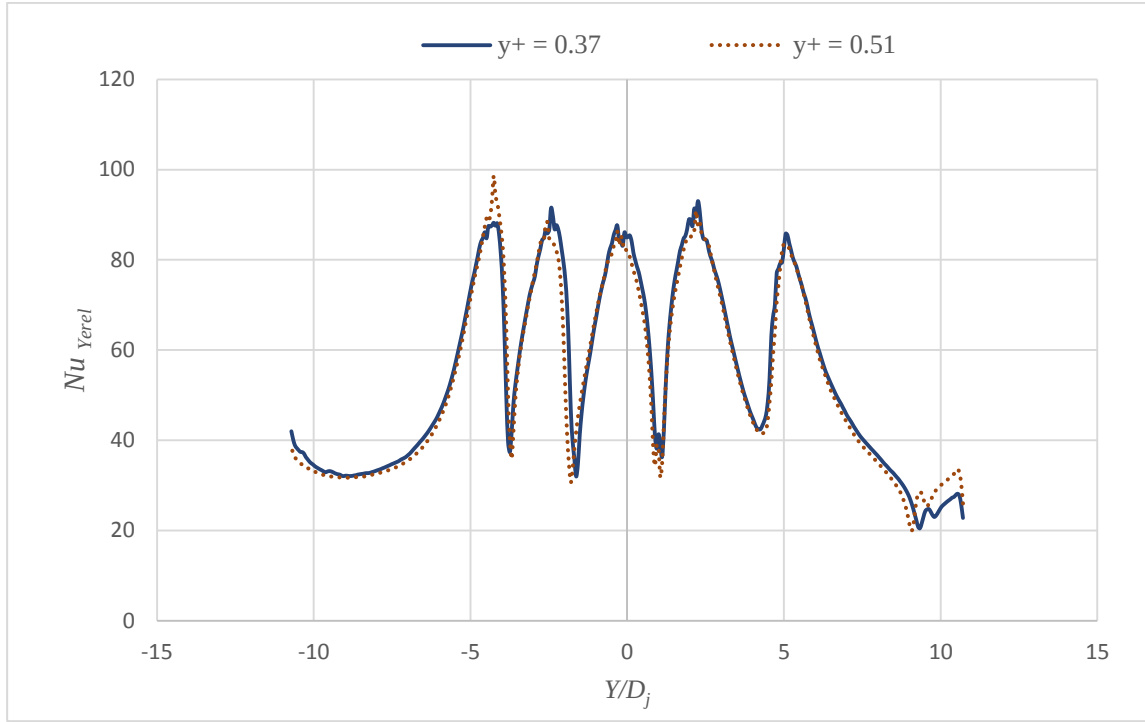
Şekil B1.2. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 8565$



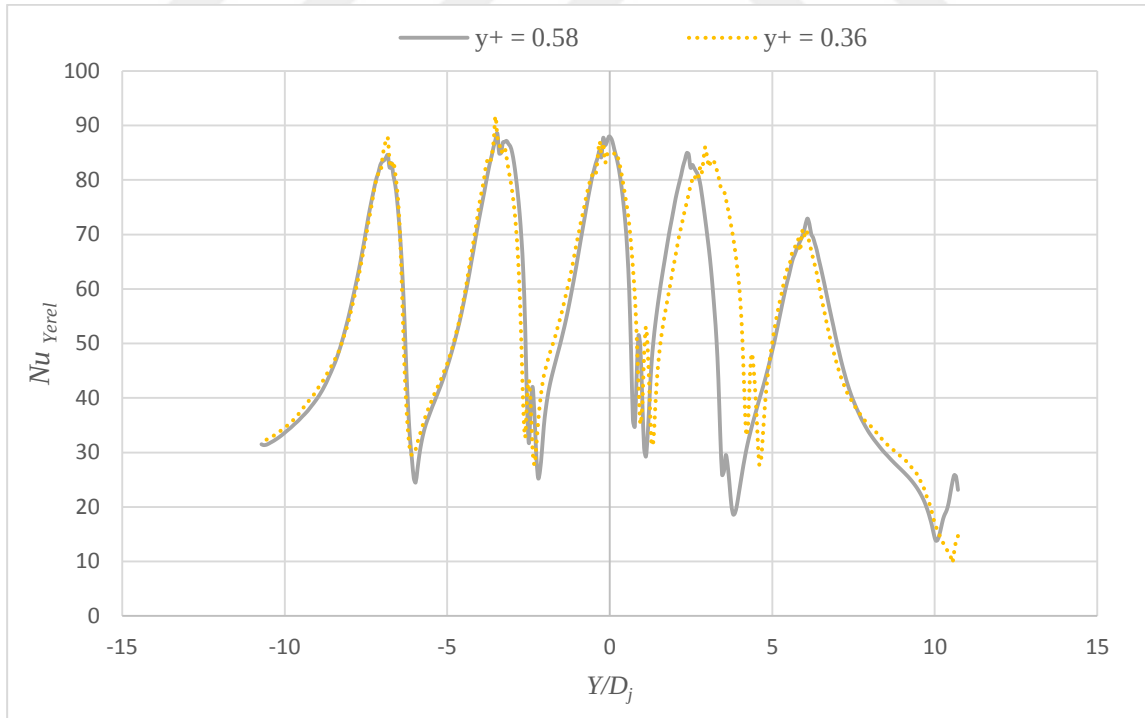
Şekil B1.3. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 8565$



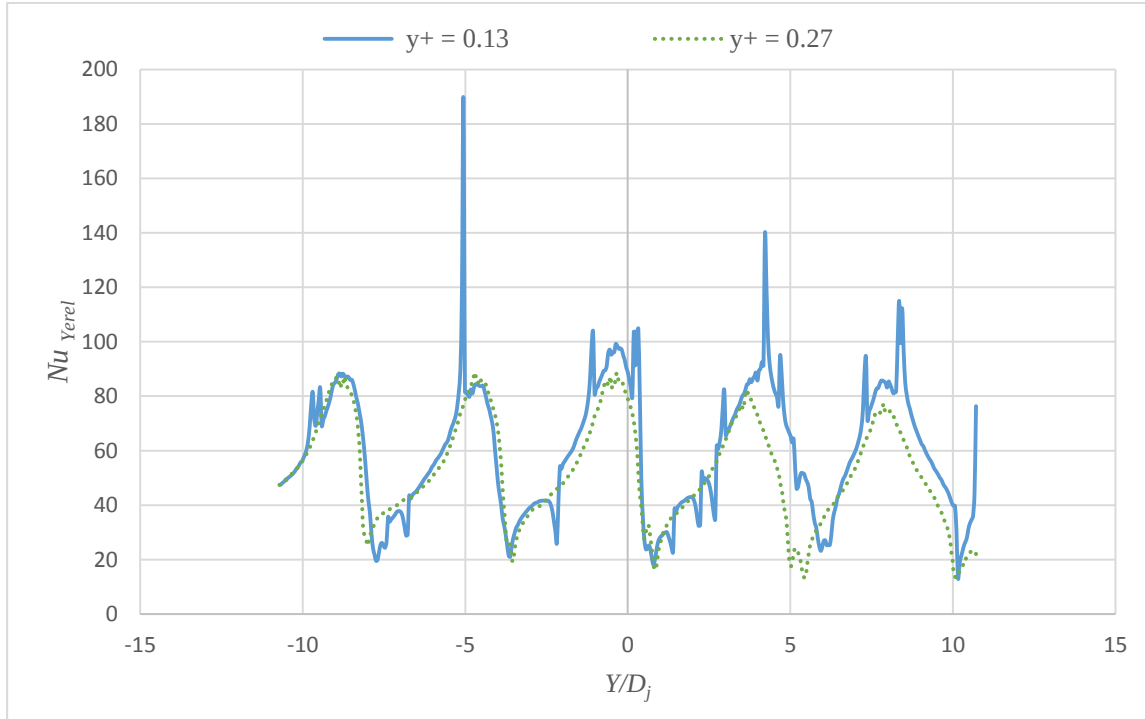
Şekil B1.4. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 8565$



Şekil B1.5. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 8565$

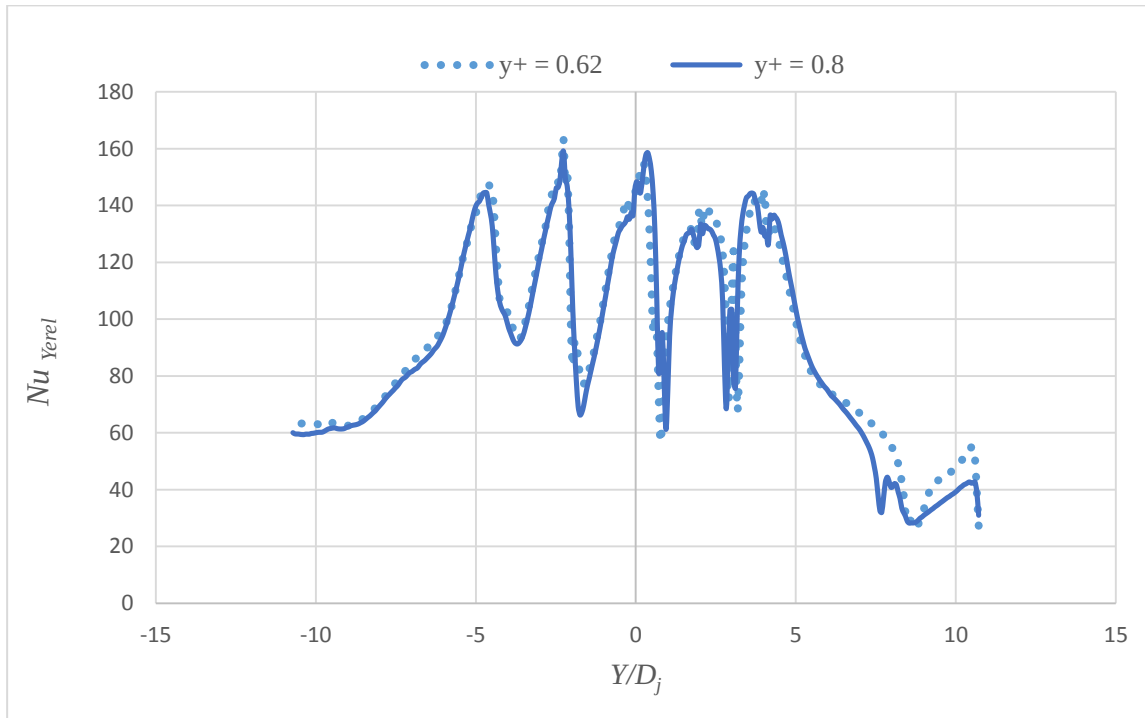


Şekil B1.6. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 8565$

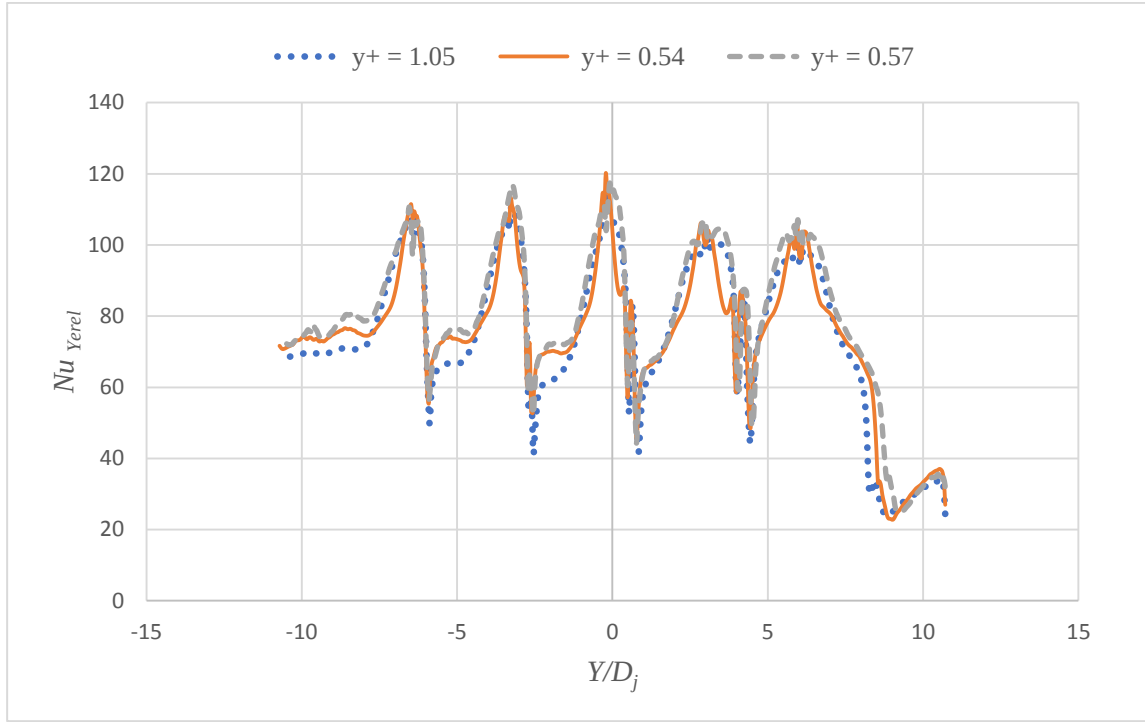


Şekil B1.7. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 8565$

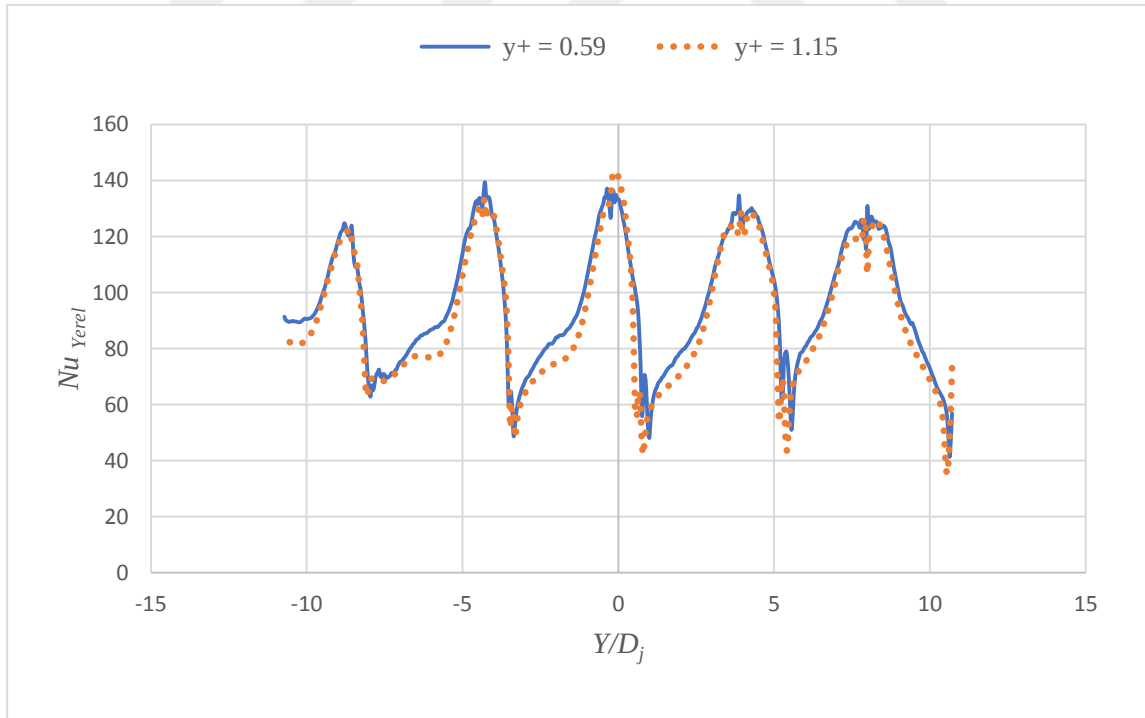
Ek B2. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Re = 20000$



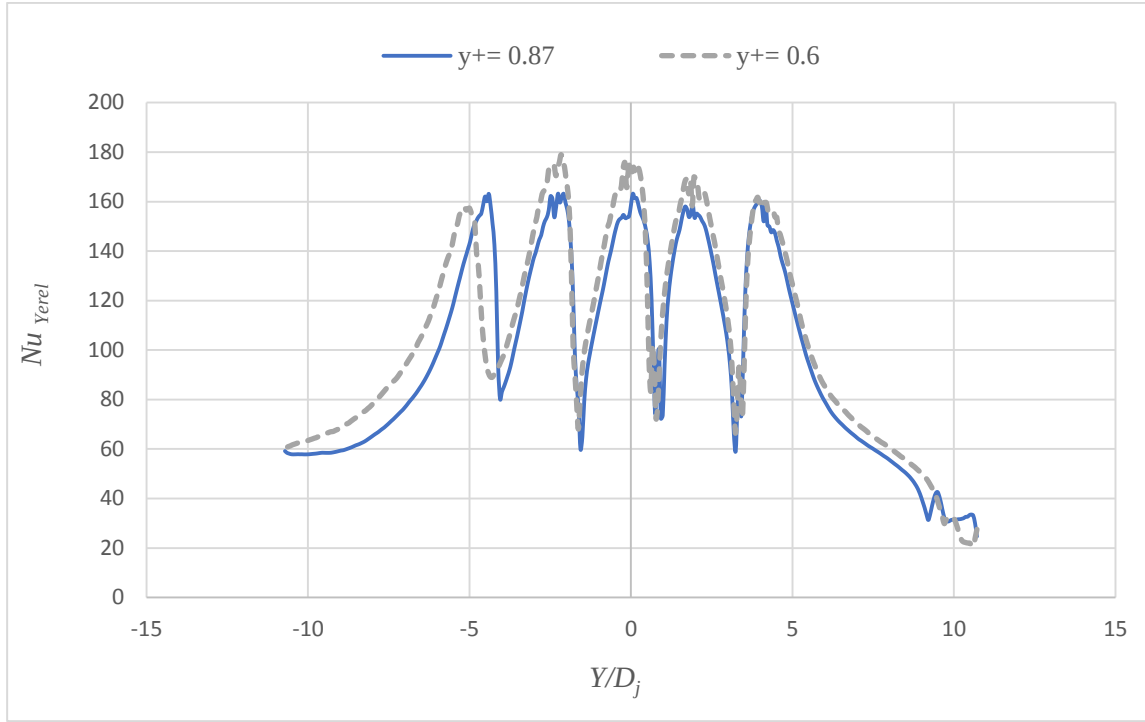
Şekil B2.1. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$



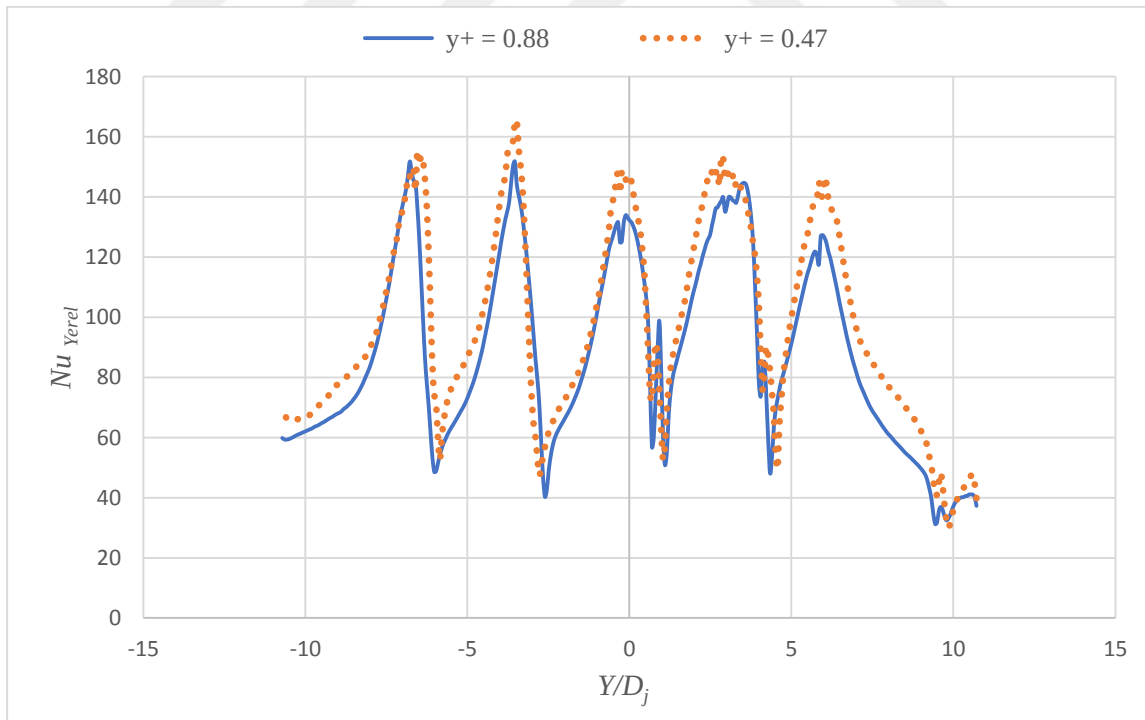
Şekil B2.2. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$



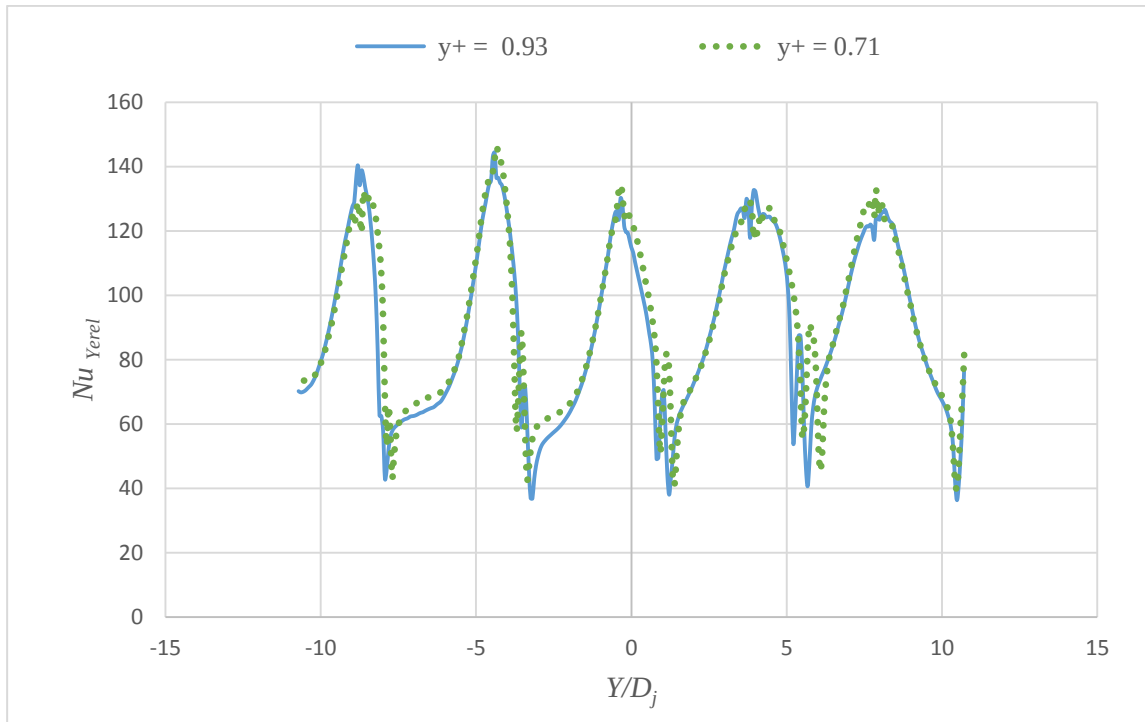
Şekil B2.3. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$



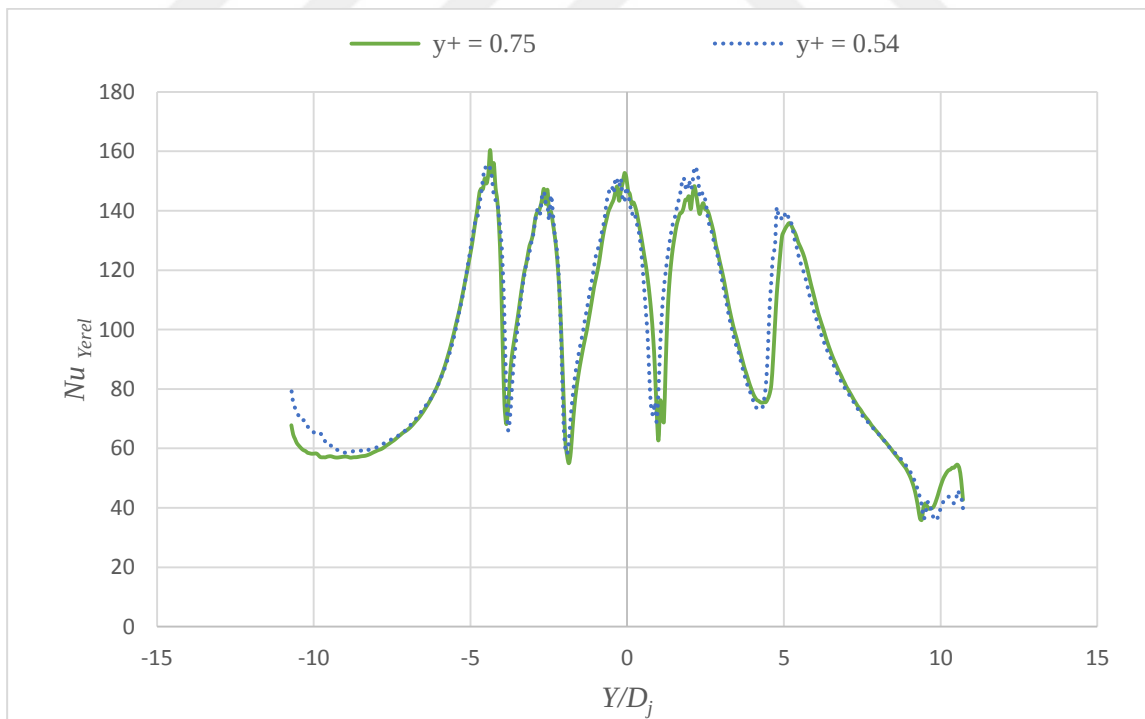
Şekil B2.4. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$



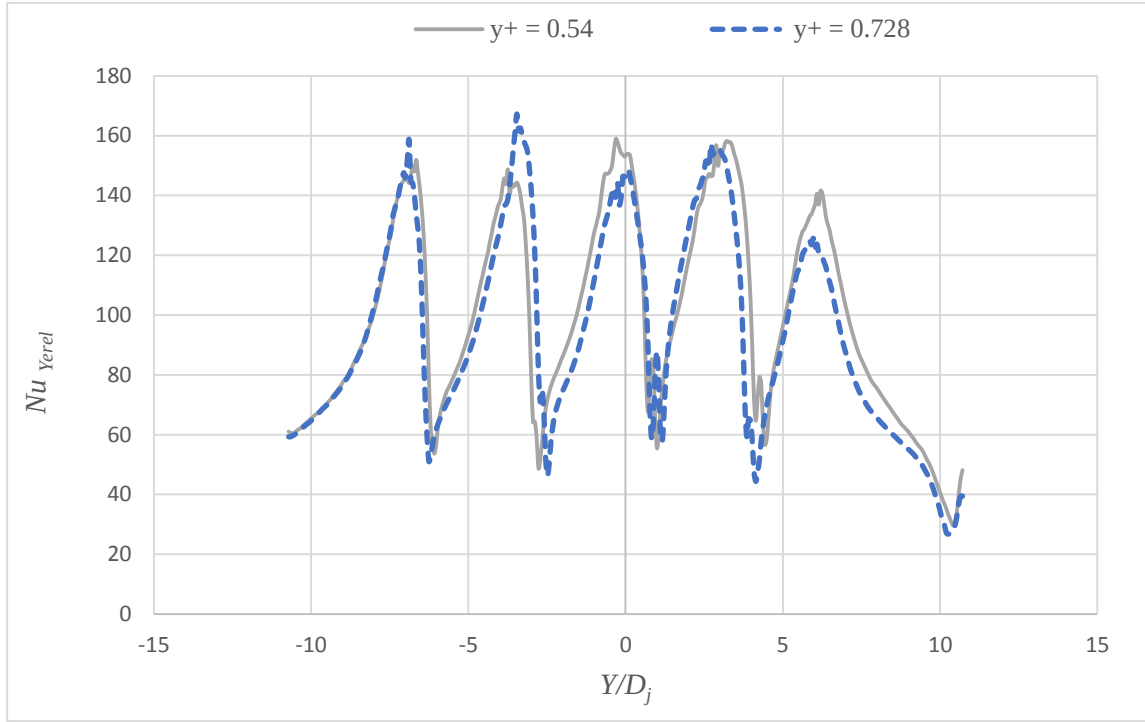
Şekil B2.5. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$



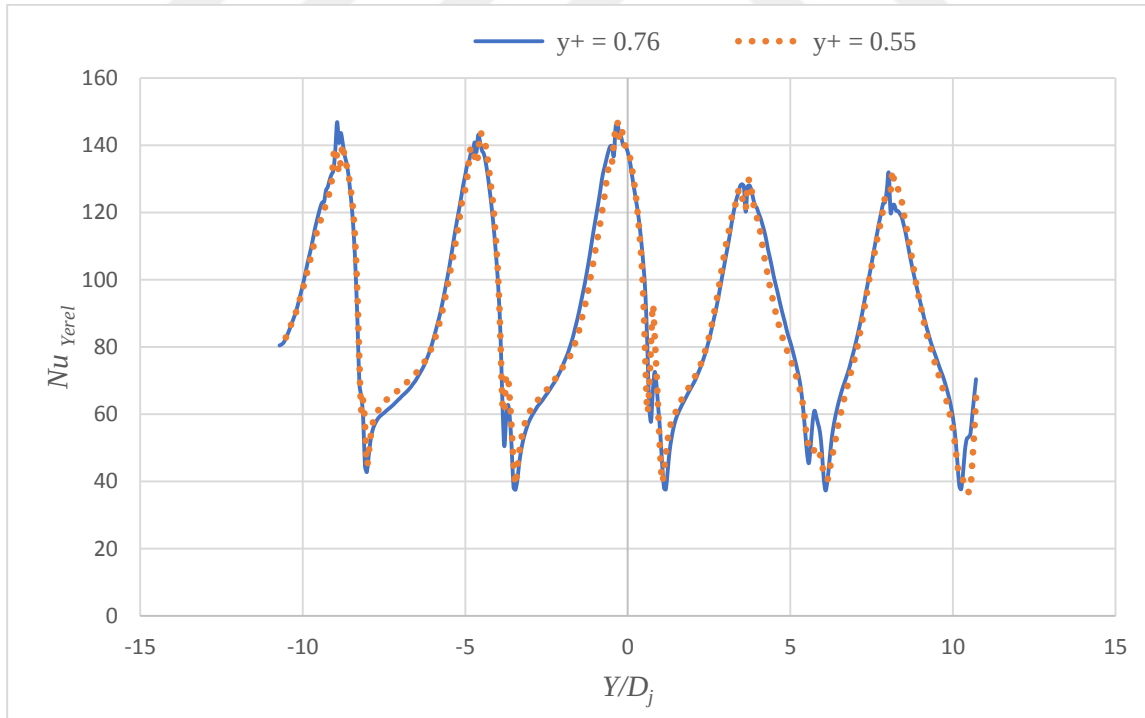
Şekil B2.6. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$



Şekil B2.7. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$



Şekil B2.8. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$

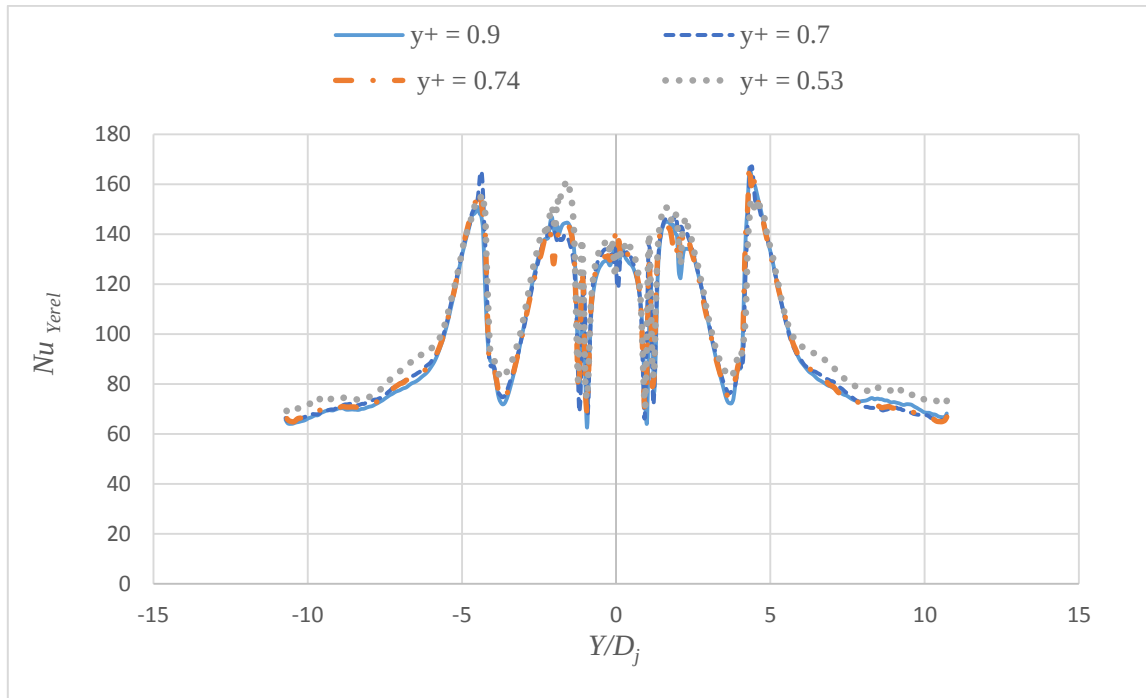


Şekil B2.9. Düz plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$

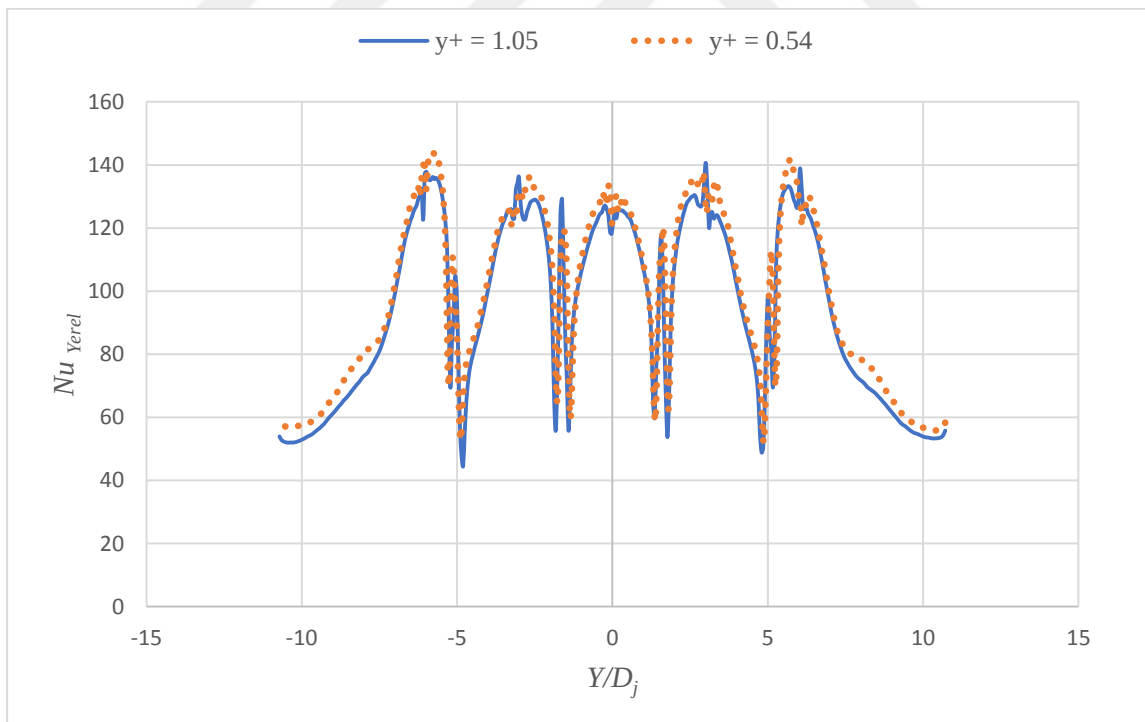
Tablo B2.1. Düz plaka maksimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı

Düz plaka, Maksimum çapraz akış, $Re = 20000$					
Farklı ağ yapısında alan ortalama Nusselt değerleri					Nu _{Ort} hata oranı (%)
$Z_n/D_j = 2$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.62	0.8	6,90
		Nu _{ort}	46,0	43,0	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.54	0.54	0,00
		Nu _{ort}	57,5	57,5	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.59	1.15	6,06
		Nu _{ort}	67,3	63,5	
$Z_n/D_j = 3$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.87	0.6	4,48
		Nu _{ort}	46,6	48,8	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.88	0.47	9,09
		Nu _{ort}	50,5	55,6	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.93	0.71	2,40
		Nu _{ort}	53,3	54,6	
$Z_n/D_j = 4$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.75	0.54	1,41
		Nu _{ort}	46,9	47,6	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.59	0.728	6,30
		Nu _{ort}	52,5	49,4	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.76	0.56	4,35
		Nu _{ort}	58,0	55,6	

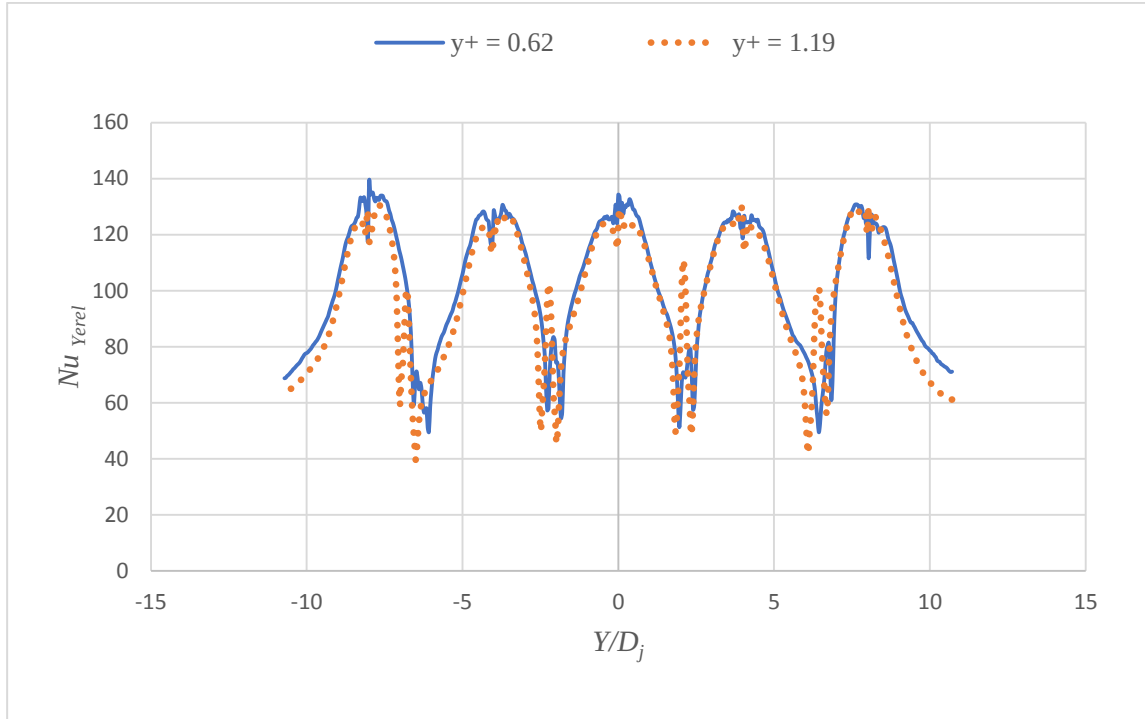
Ek B3. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Re = 20000$



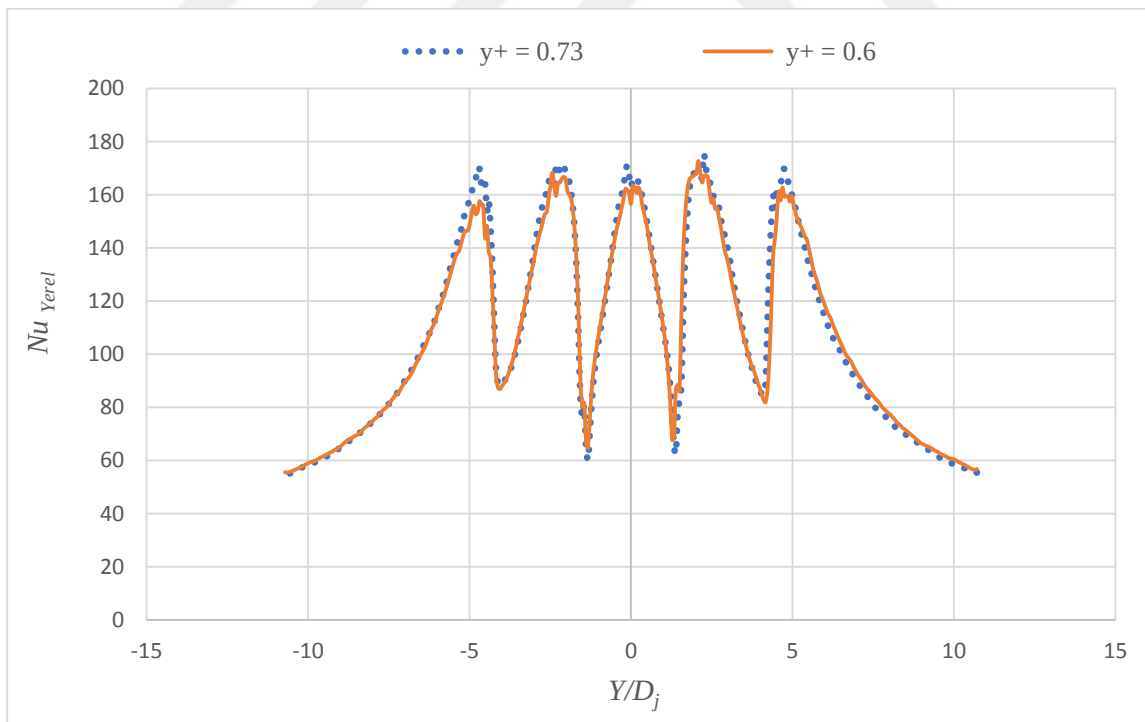
Şekil B3.1. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$



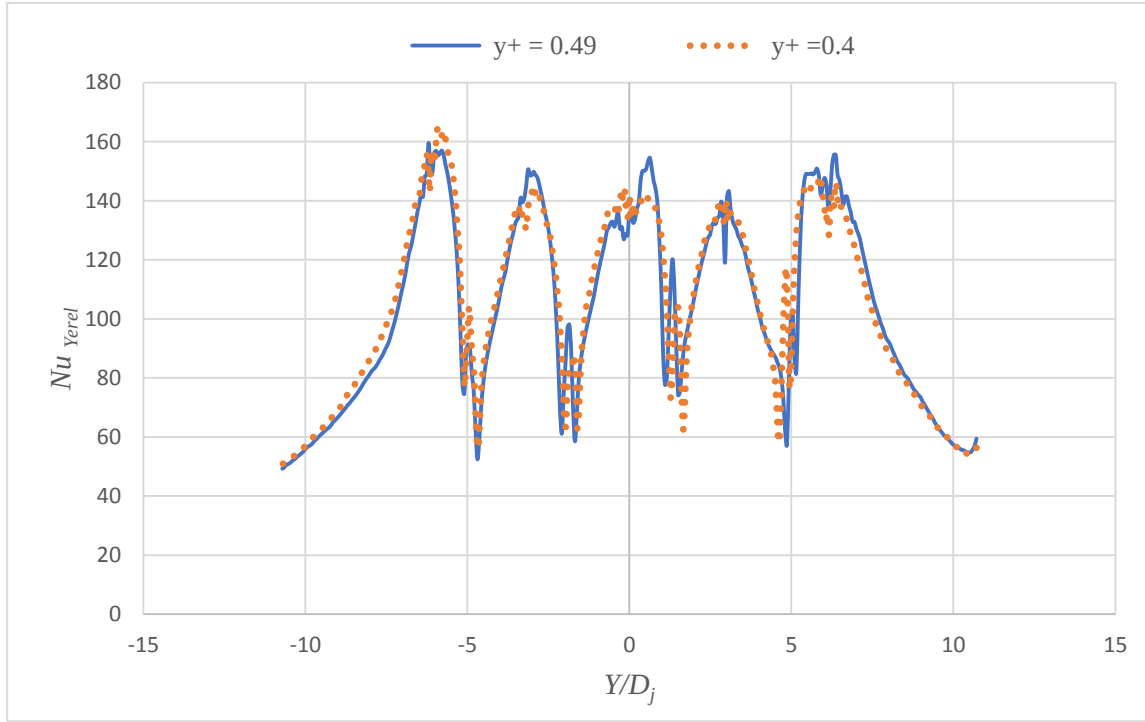
Şekil B3.2. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$



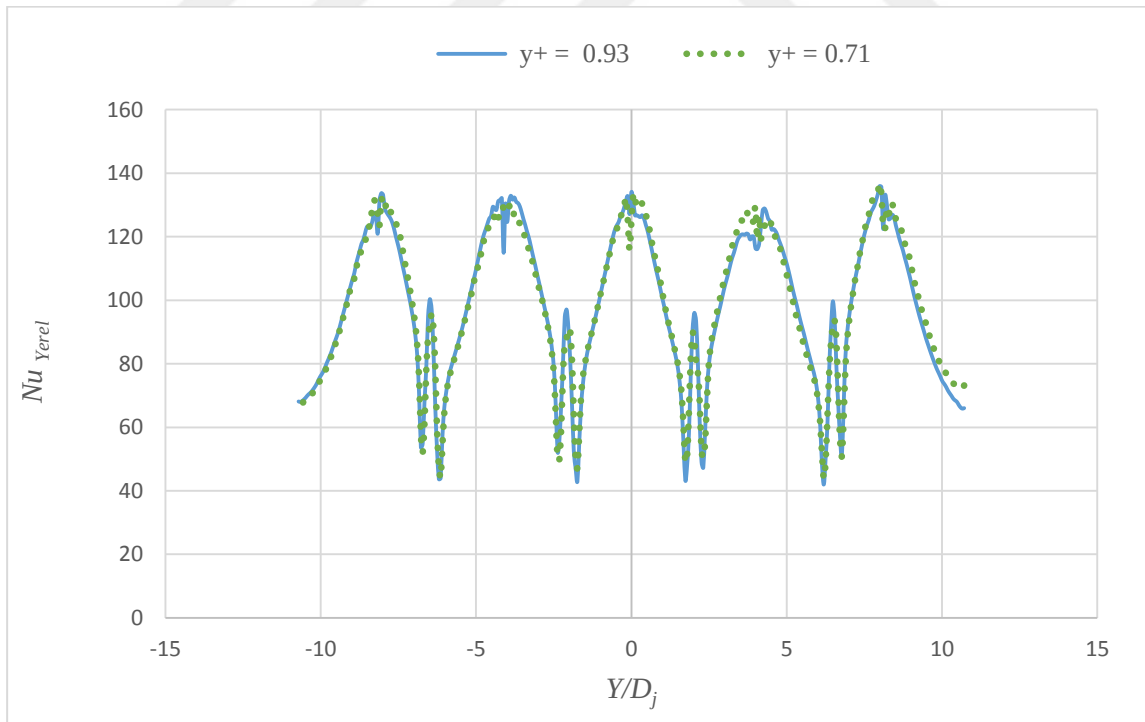
Şekil B3.3. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$



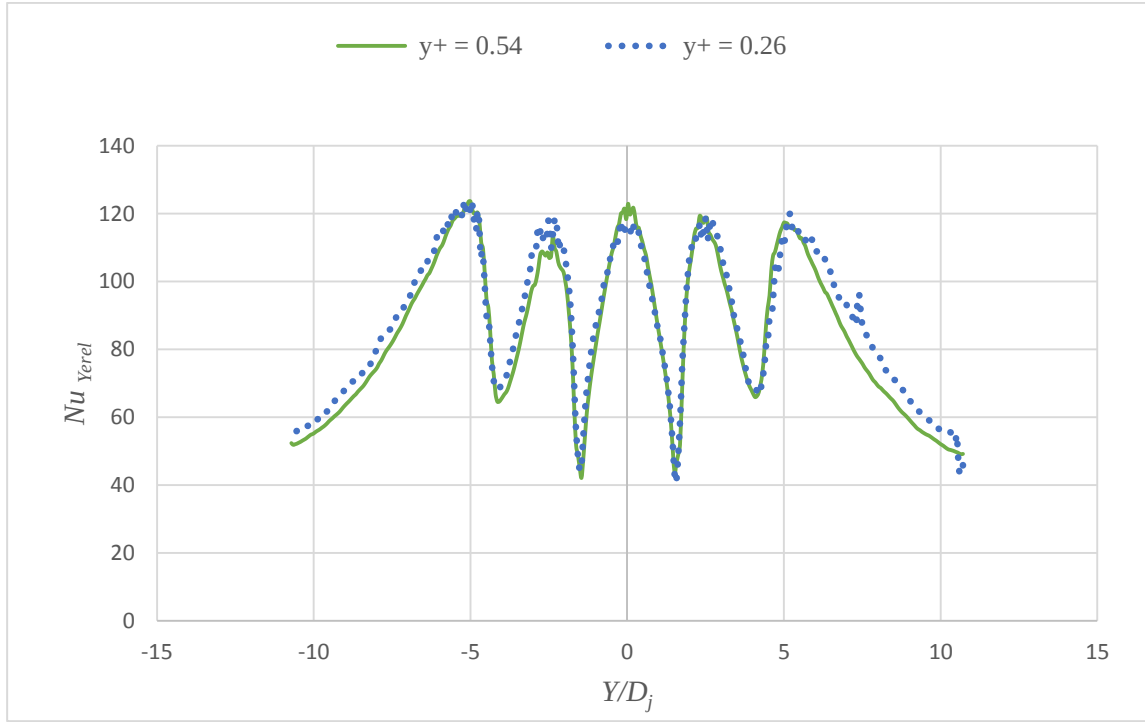
Şekil B3.4. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$



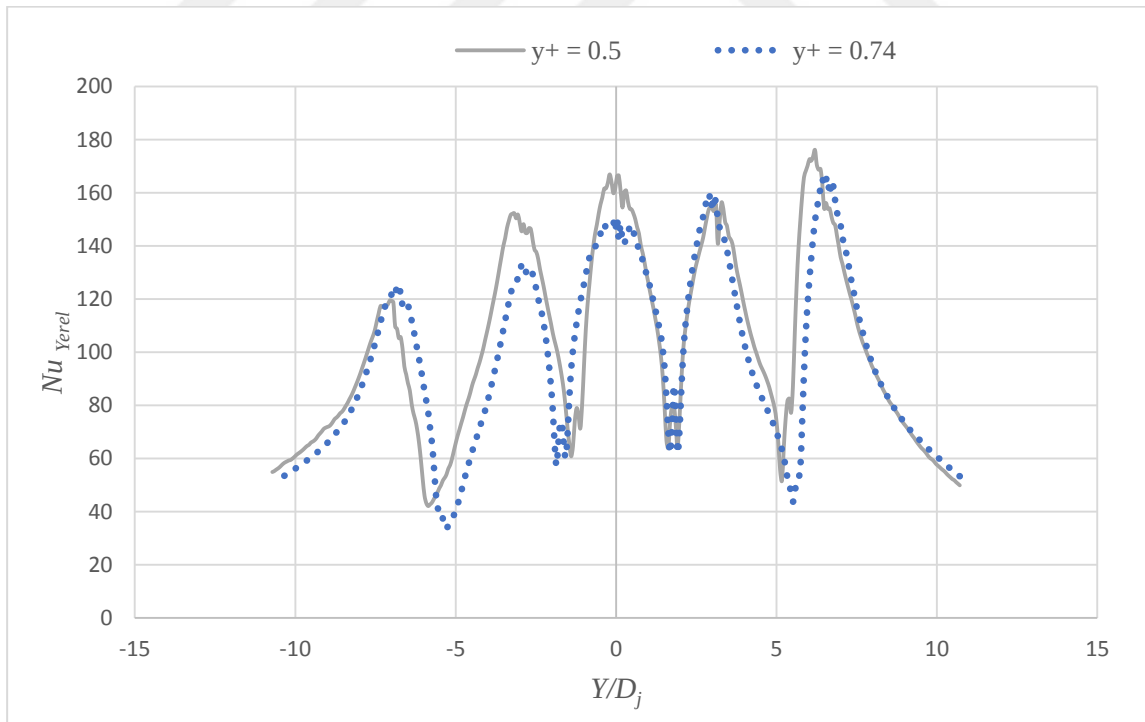
Şekil B3.5. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$



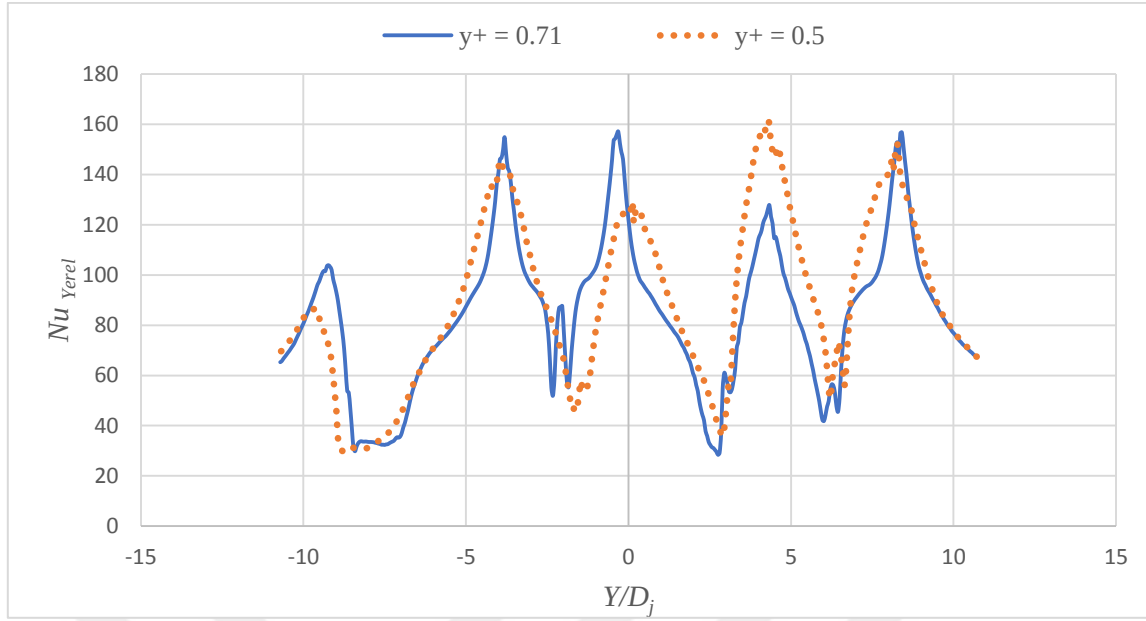
Şekil B3.6. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$



Şekil B3.7. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$



Şekil B3.8. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$

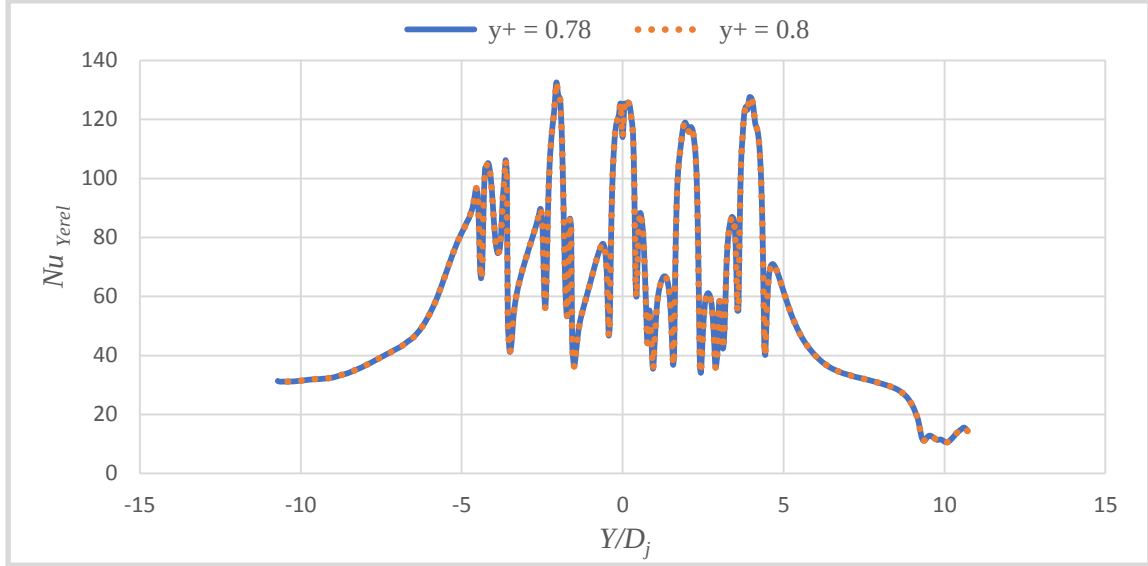


Şekil B3.9. Düz plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$

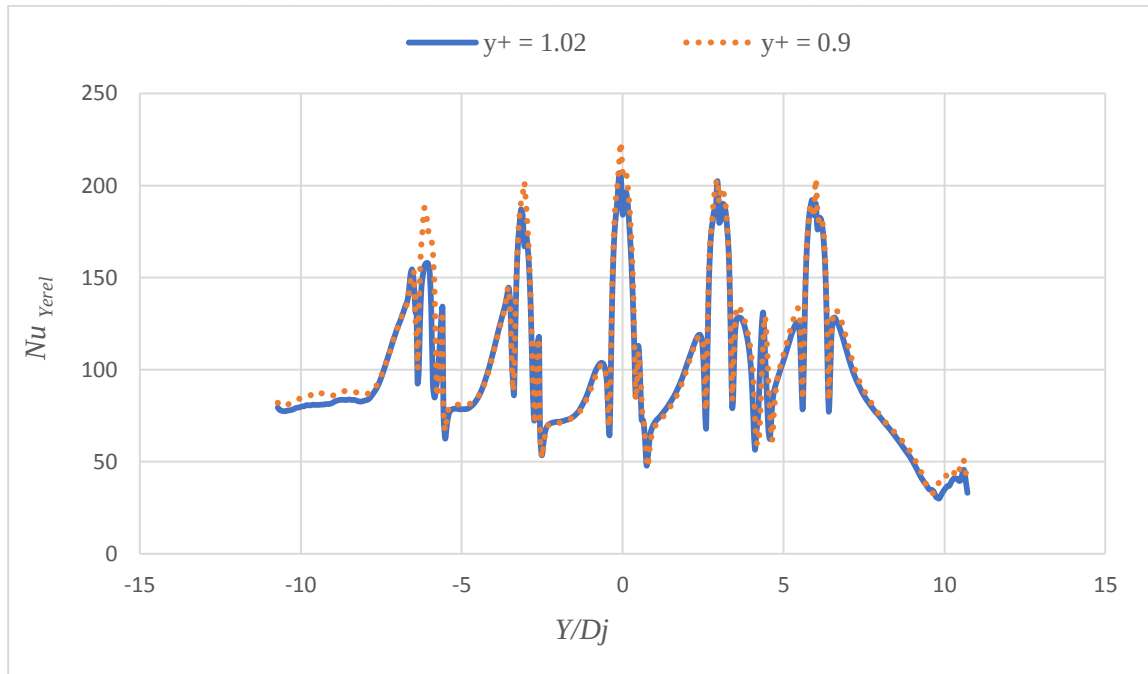
Tablo B3.1 Düz plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı

Düz Plaka, minimum çapraz akış, $Re = 20000$					
Farklı ağ yapısında alan ortalama Nusselt değerleri					Nu_{ort} hata oranı (%)
$Z_n/D_j = 2$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.7	0.53	8.00
		Nu_{ort}	66.7	61.7	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.54	1.05	0.00
		Nu_{ort}	64.1	64.1	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.62	1.19	12.72
		Nu_{ort}	74.4	66.0	
$Z_n/D_j = 3$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.6	0.73	0.00
		Nu_{ort}	84.4	84.4	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.8	0.4	6.71
		Nu_{ort}	73.3	68.7	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.93	0.77	1.94
		Nu_{ort}	64.7	66.0	
$Z_n/D_j = 4$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.75	0.54	1.41
		Nu_{ort}	46.9	47.6	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.5	0.74	0.53
		Nu_{ort}	70.9	70.5	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.71	0.5	0.00%
		Nu_{ort}	66.0	66.0	

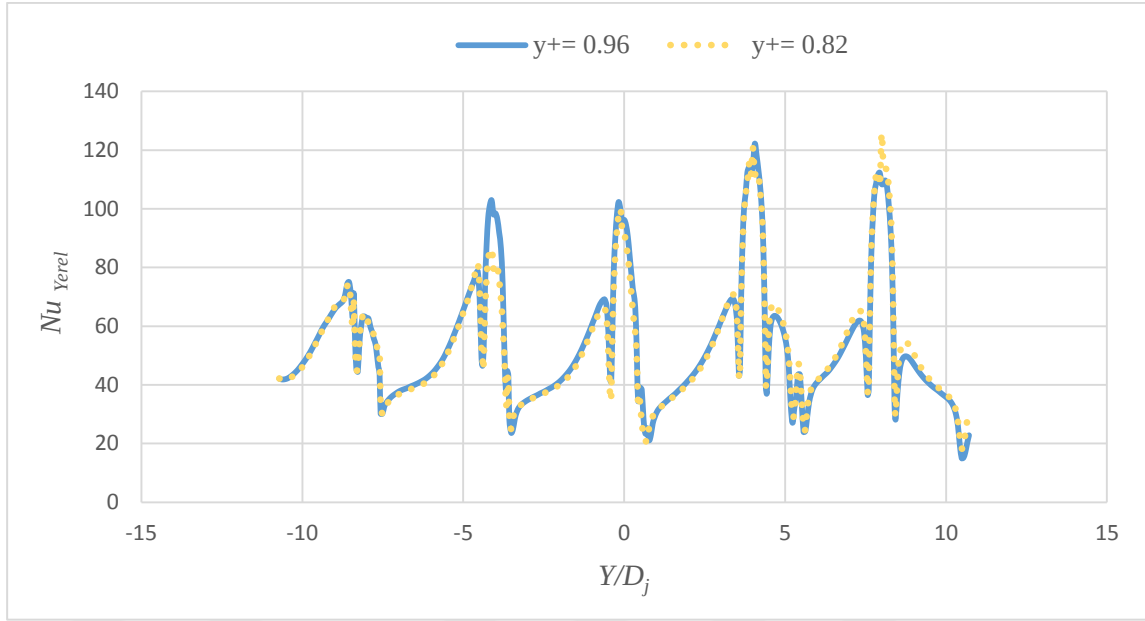
Ek B4. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$, $Re = 8565$



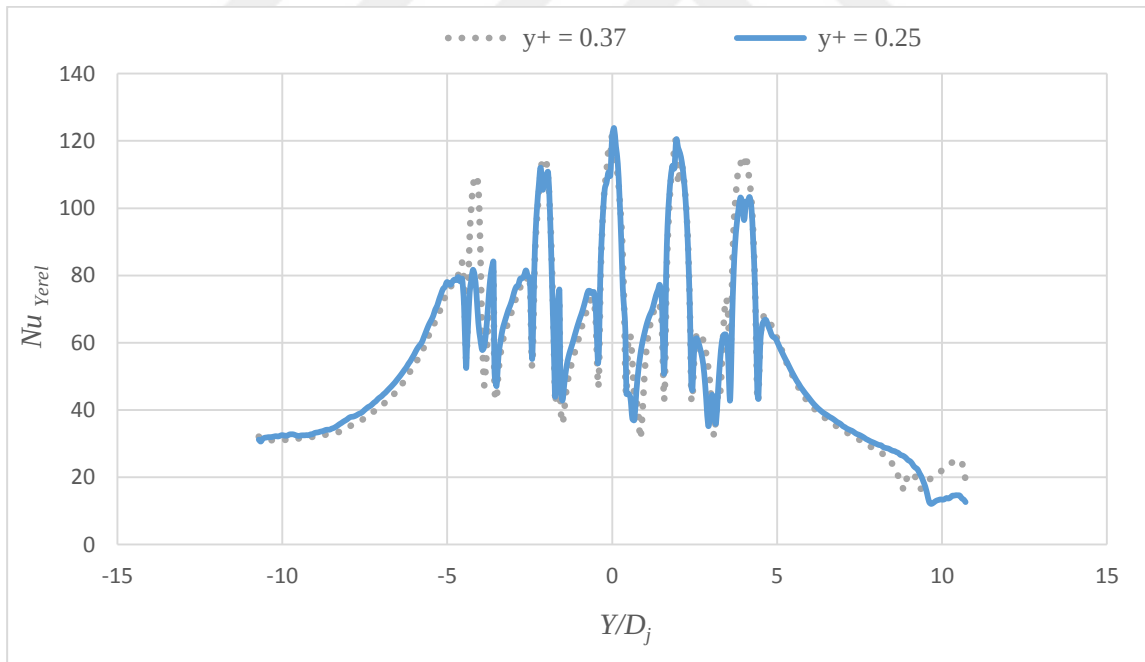
Şekil B4.1. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



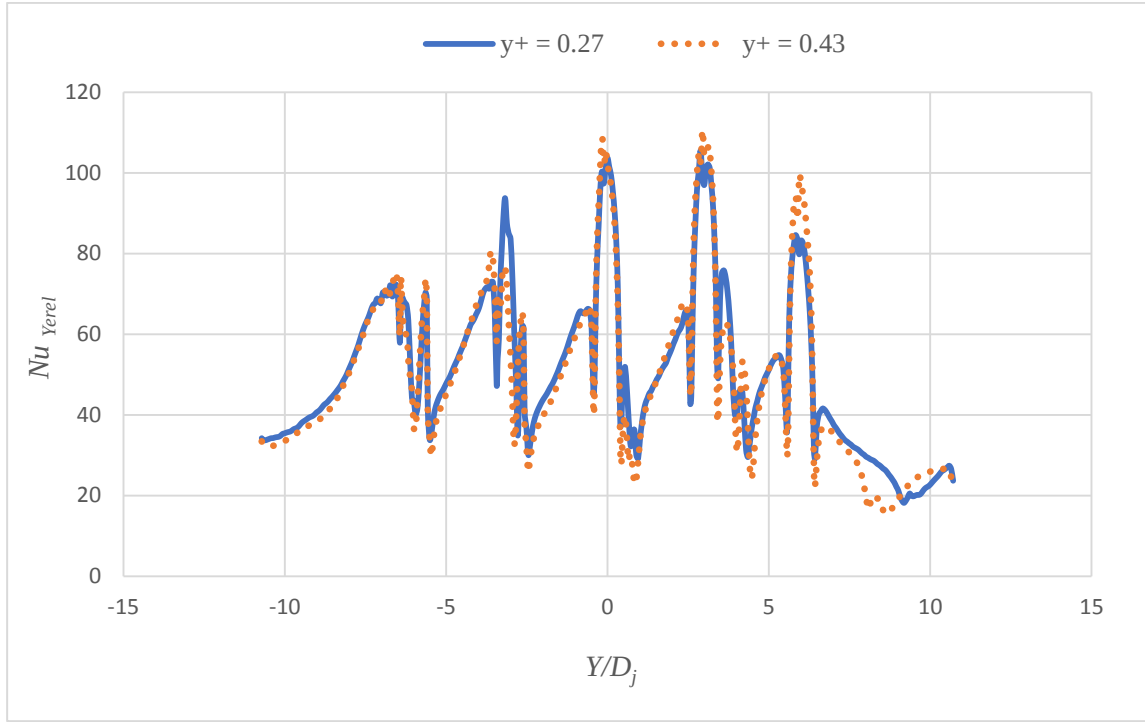
Şekil B4.2. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



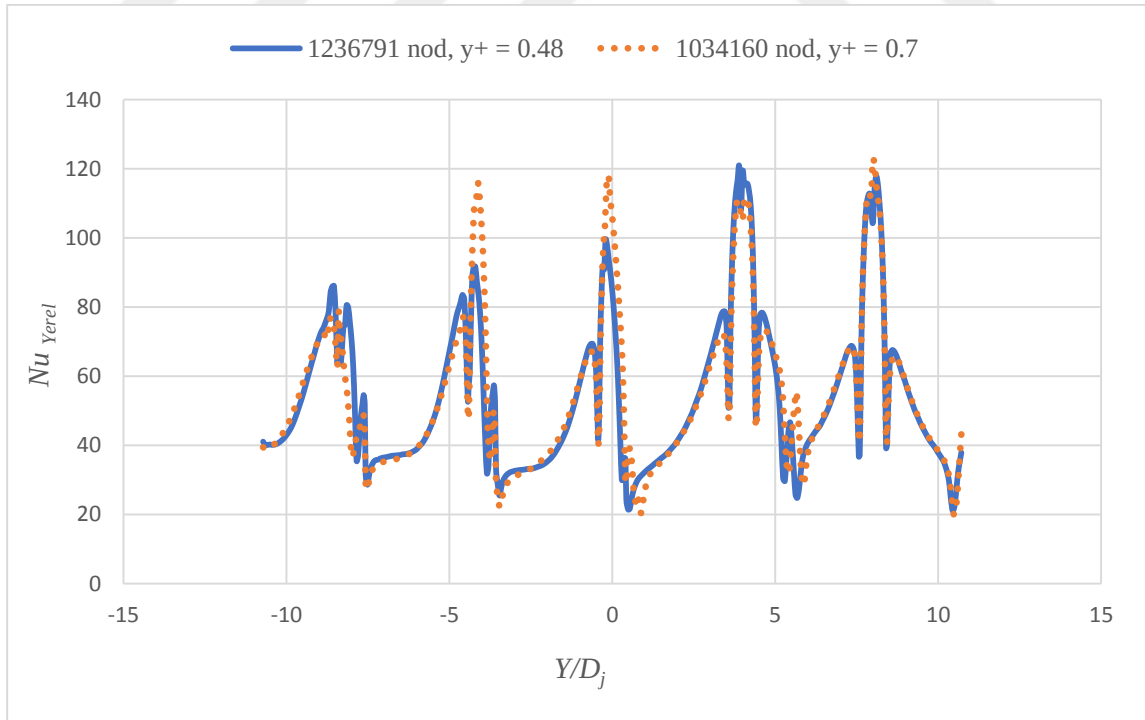
Şekil B4.3. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



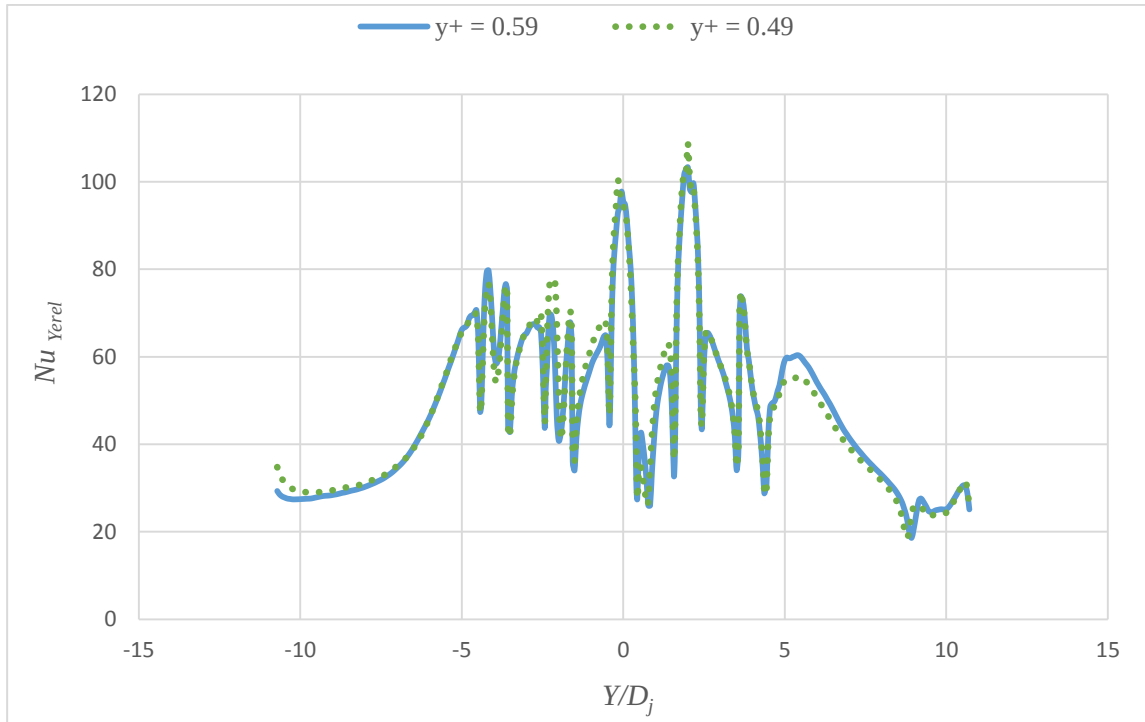
Şekil B4.4. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



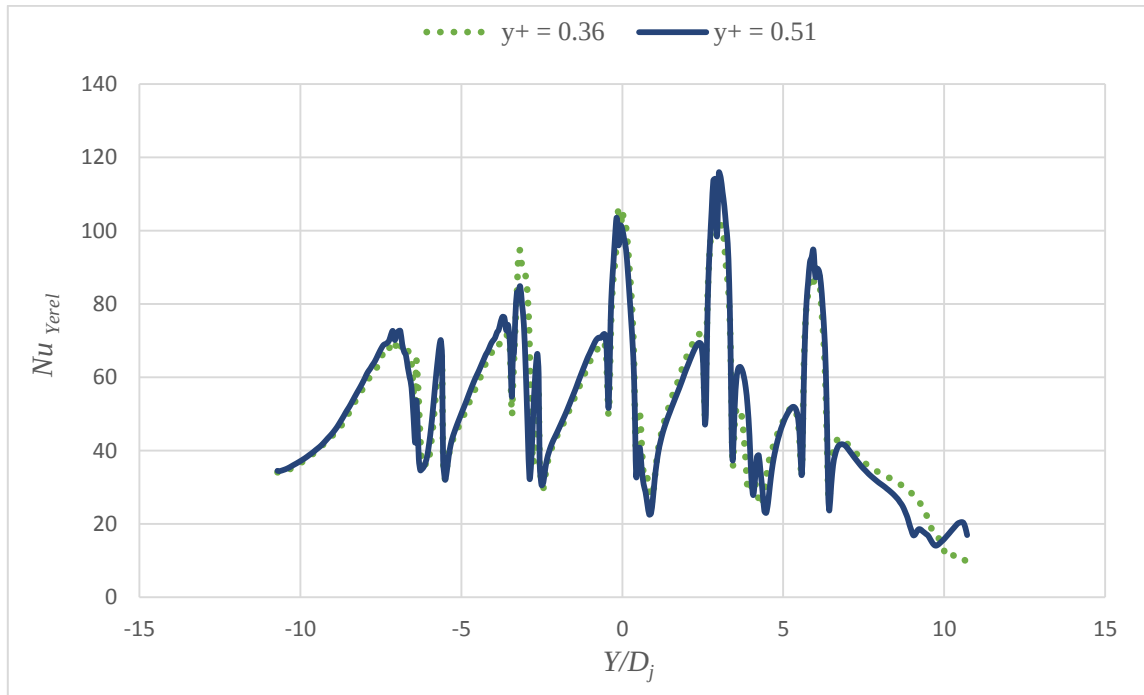
Şekil B4.5. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



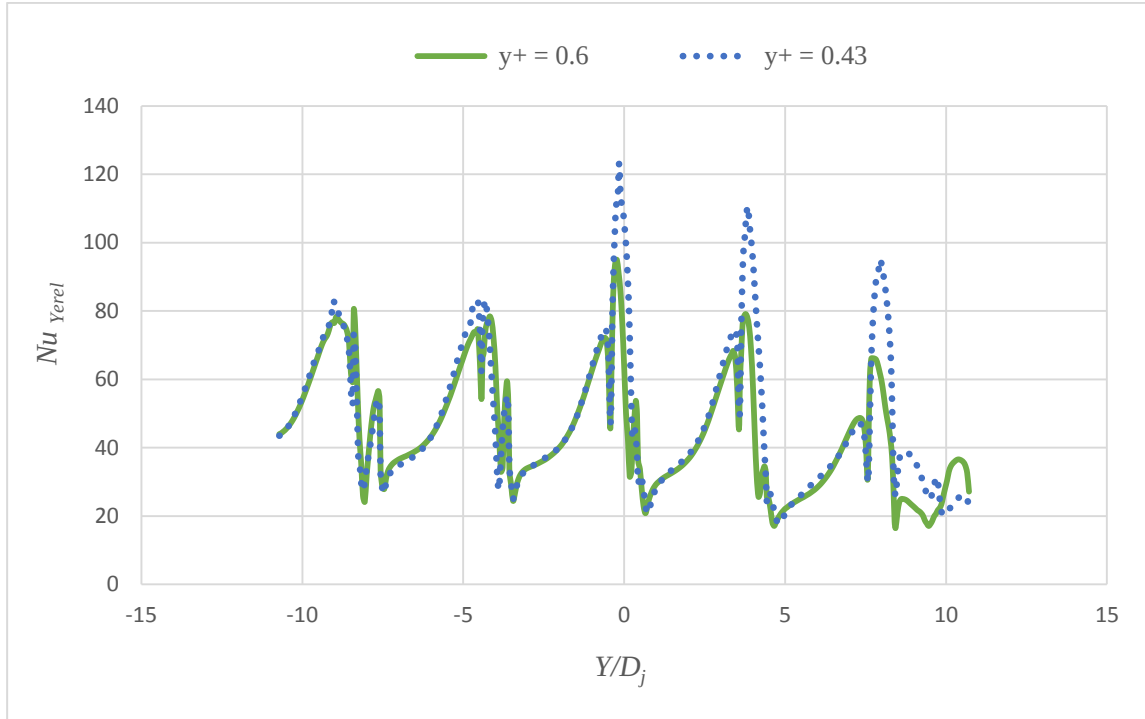
Şekil B4.6. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



Şekil B4.7. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



Şekil B4.8. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



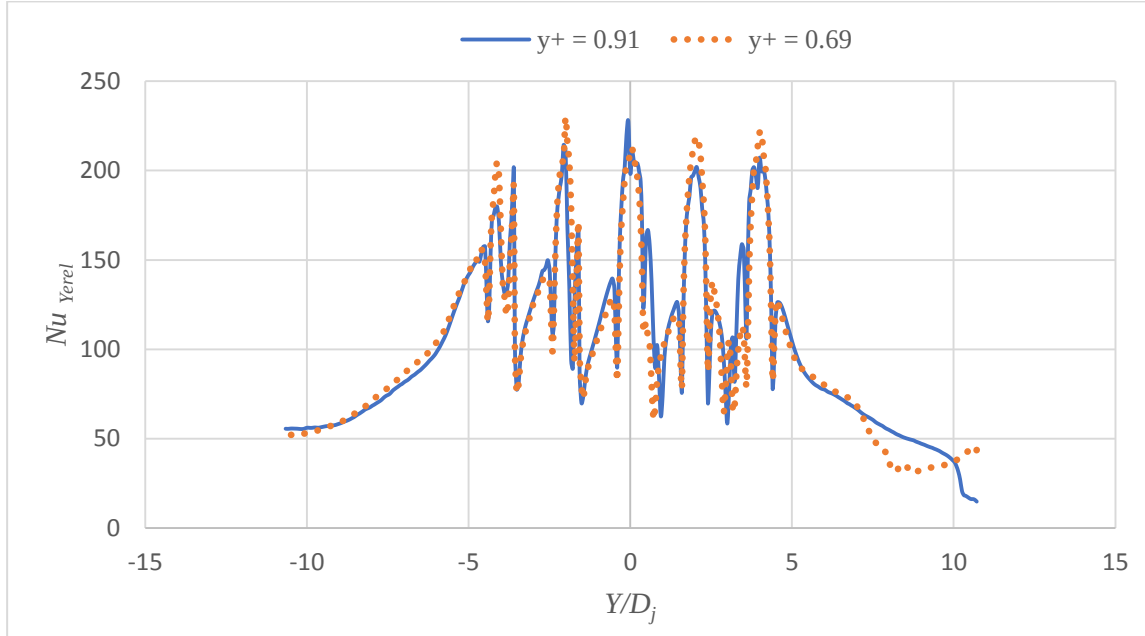
Şekil B4.9. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 8565$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

Tablo B4.1. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu

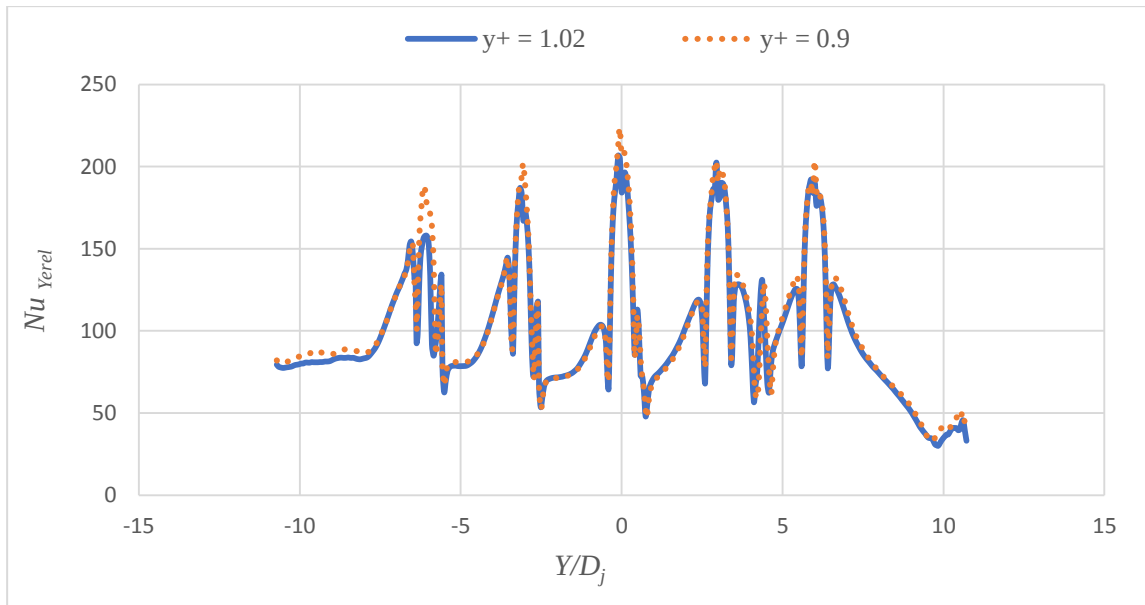
Tümsek Şekilli Plaka, maksimum çapraz akış, $Re = 8565$, $D_j/D_d = 1$, $t/D_d = 0.25$,					
Farklı ağ yapısında Nu_{ort} değerleri					Nu_{ort} hata oranı (%)
$Z_n/D_j = 2$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.8	0.78	
		Nu_{ort}	23,7	24,8	4,5
	$X_n/D_j = 3$	y^+	1	0.9	
		Nu_{ort}	30,3	30,4	0,5
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.96	0.82	
		Nu_{ort}	35,3	35,1	0,5
$Z_n/D_j = 3$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.37	0.25	
		Nu_{ort}	25,6	26,6	3,6
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.27	0.43	
		Nu_{ort}	30,2	27,8	7,9
$Z_n/D_j = 4$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.59	0.49	
		Nu_{ort}	25,2	24,7	1,9
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.73	0.4	
		Nu_{ort}	30,0	30,2	0,5

Ek B5. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu,

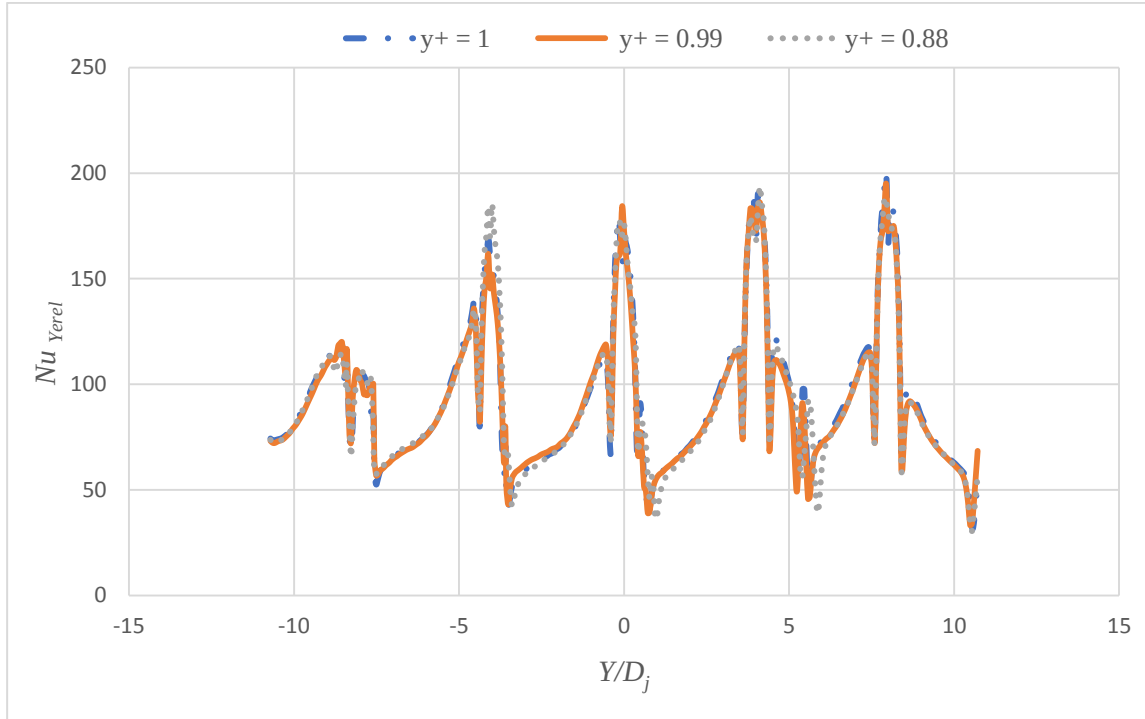
$D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$, $Re = 20000$



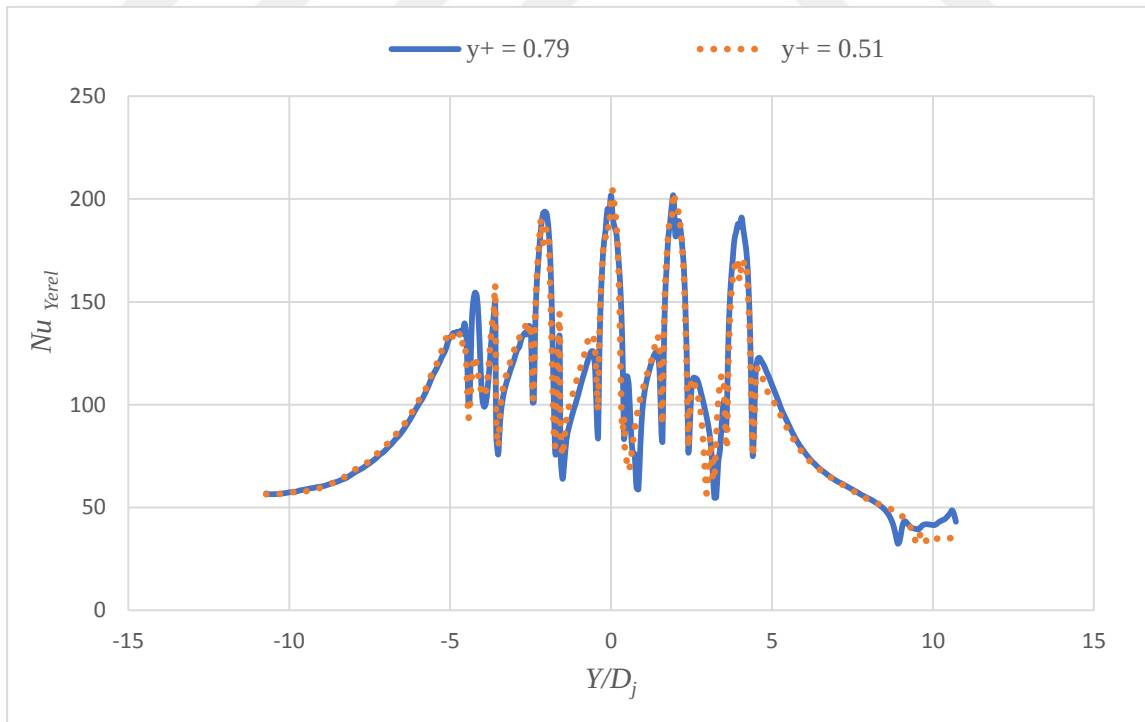
Şekil B5.1. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



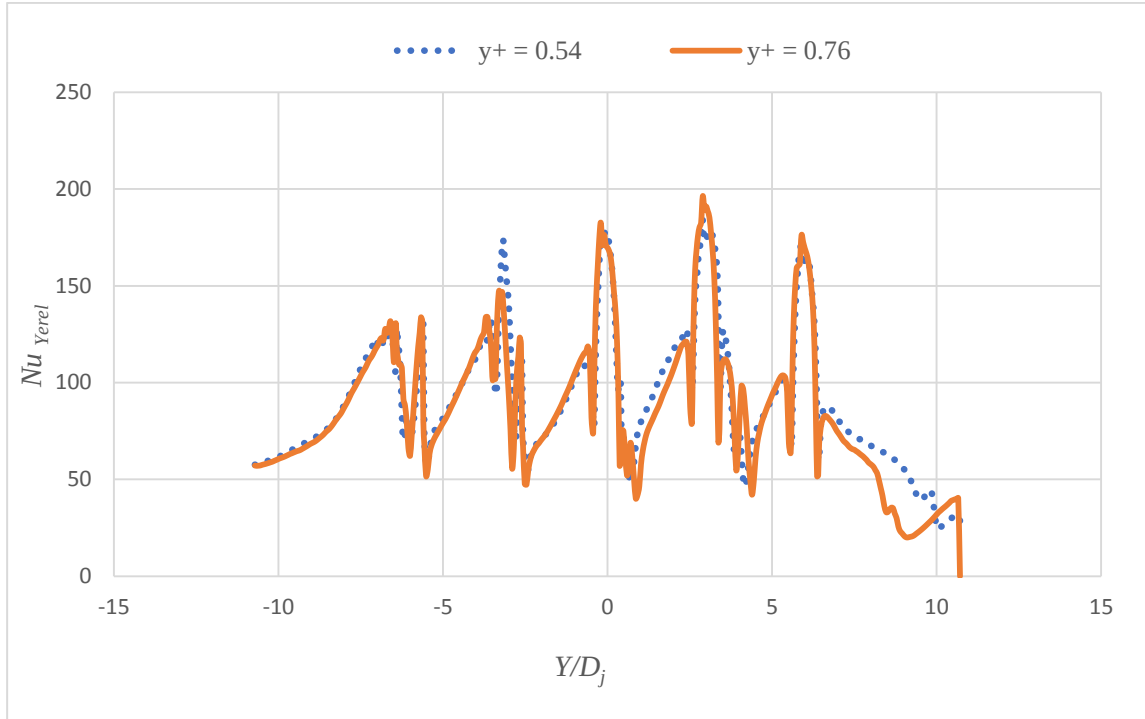
Şekil B5.2. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



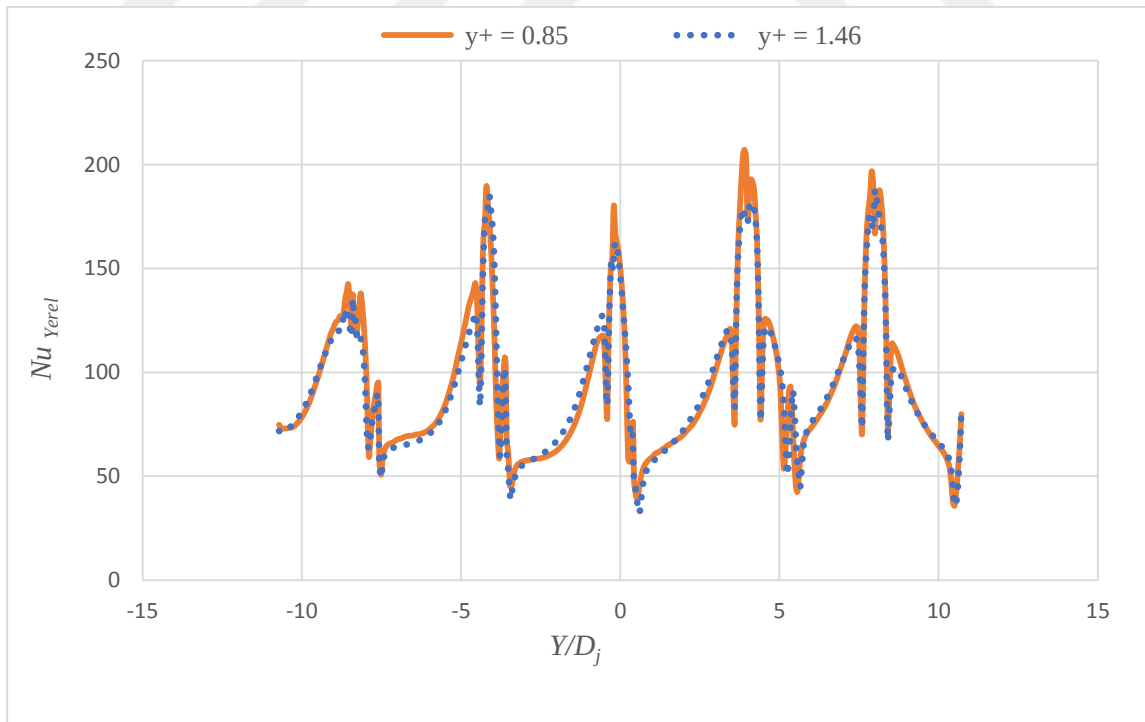
Şekil B5.3. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



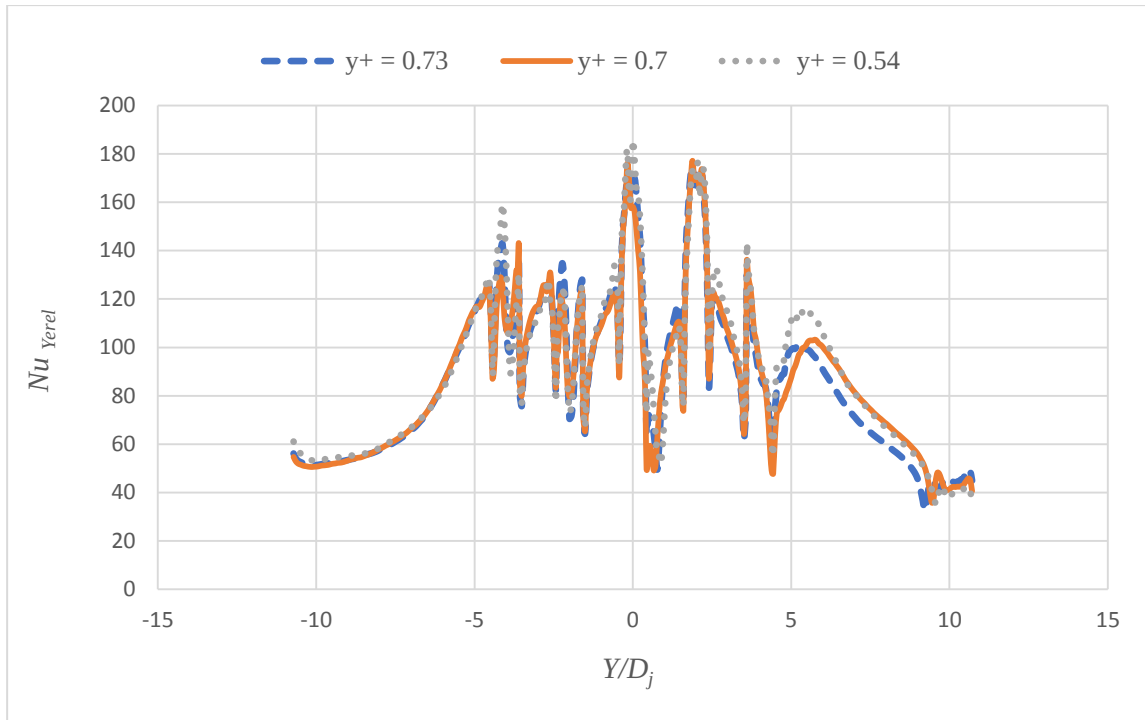
Şekil B5.4. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



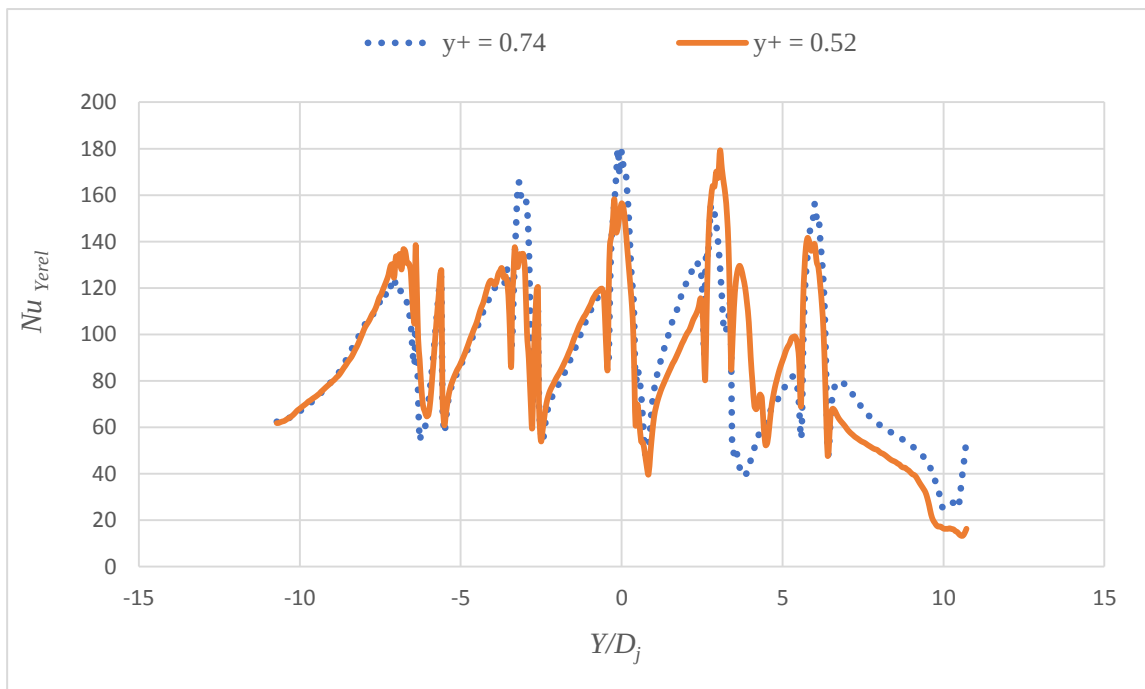
Şekil B5.5. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



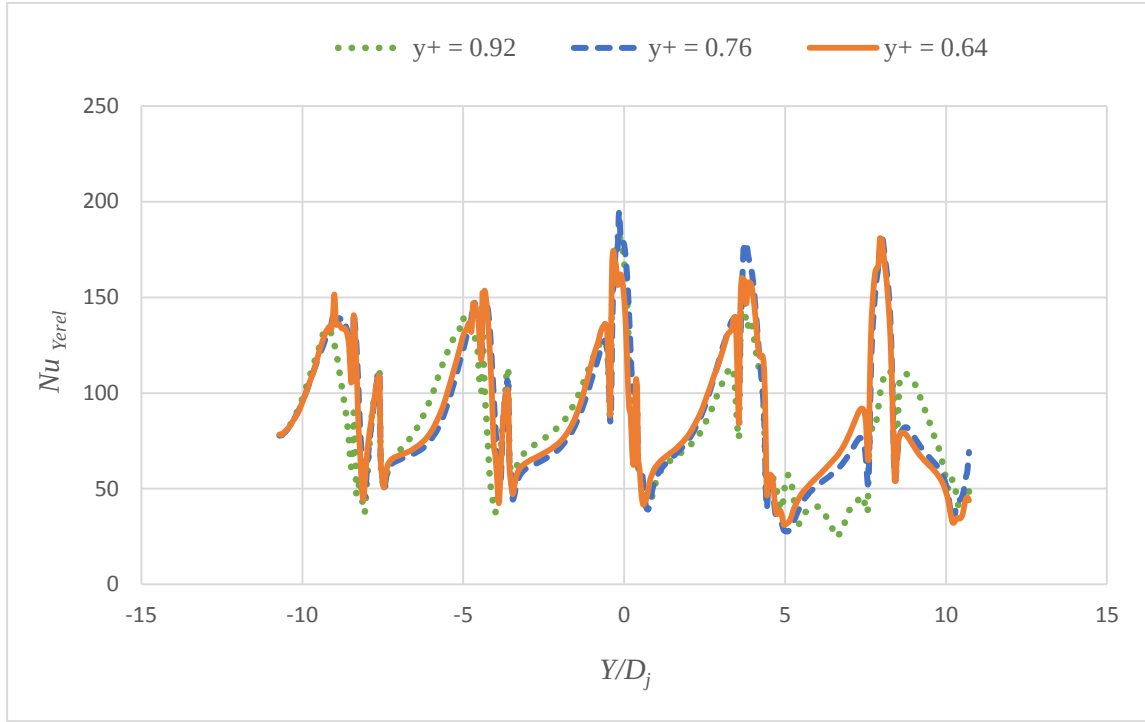
Şekil B5.6. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



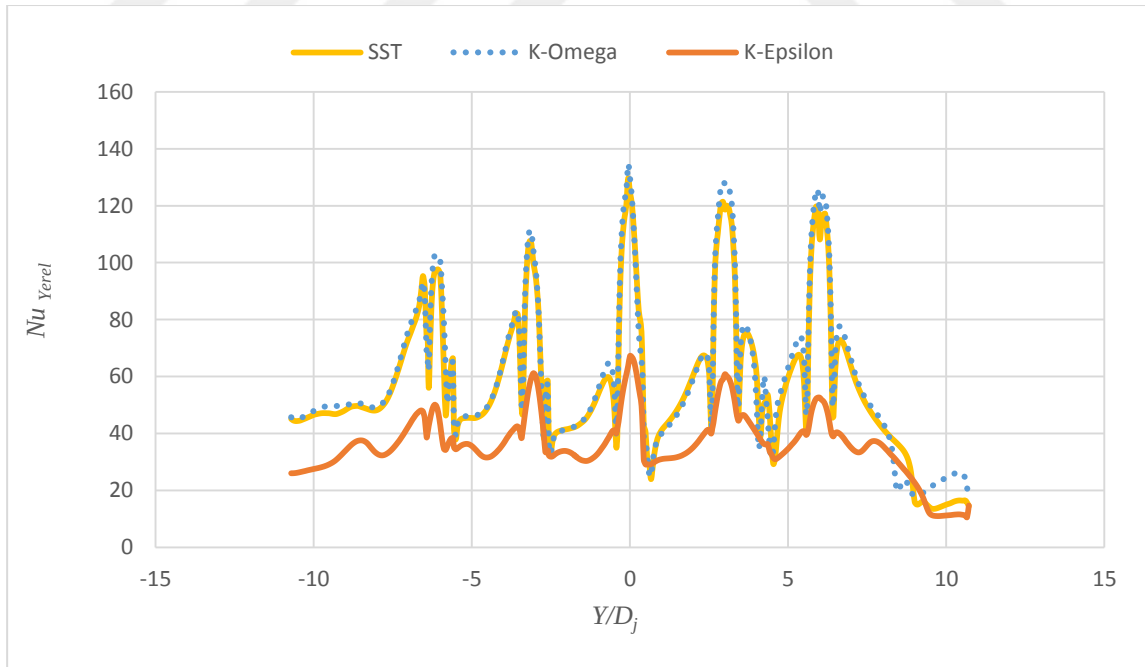
Şekil B5.7. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



Şekil B5.8. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



Şekil B5.9. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

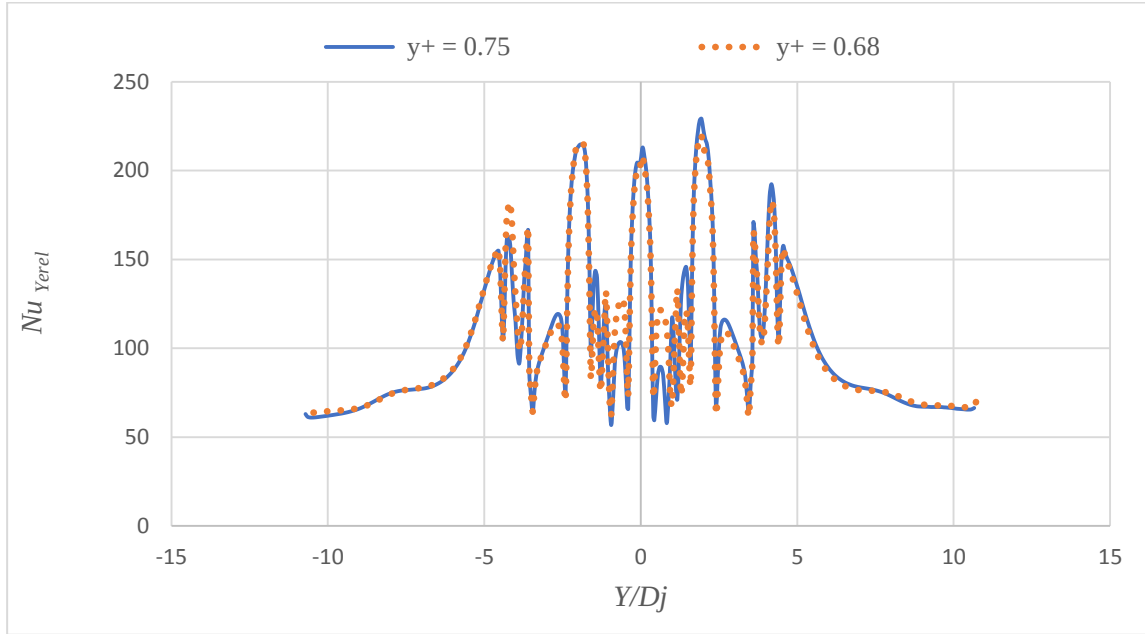


Şekil B5.10. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta türbülans model doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

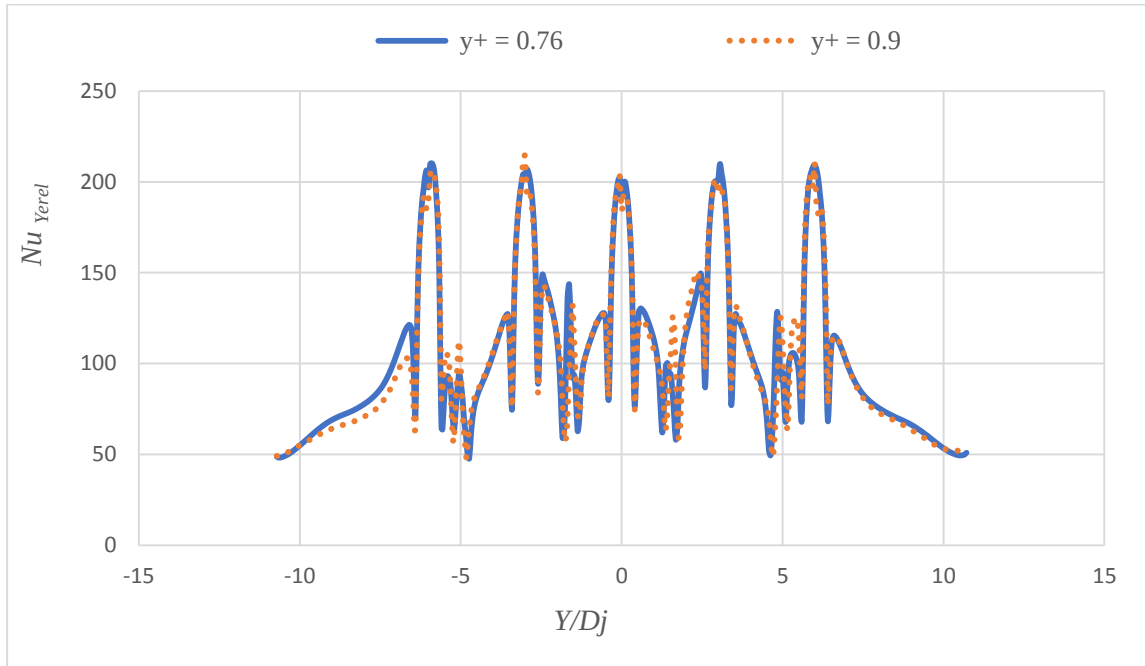
Tablo B5.1. Tümsek şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu

Tümsek Şekilli Plaka, maksimum çapraz akış, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$					
Farklı ağ yapısında Nu_{ort} değerleri					Nu_{Ort} hata oranı (%)
$Z_n/D_j = 2$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.91	0.69	4.9
		Nu_{ort}	44.7	46.9	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	1.02	0.9	1.6
		Nu_{ort}	53.8	54.6	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.99	0.99	0.0
		Nu_{ort}	60.1	60.1	
$Z_n/D_j = 3$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.79	0.51	6.1
		Nu_{ort}	48.3	45.4	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.54	0.76	1.6
		Nu_{ort}	52.9	52.1	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.85	1.46	0.8
		Nu_{ort}	55.1	55.6	
$Z_n/D_j = 4$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.7	0.7	0.0
		Nu_{ort}	47.3	47.3	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.76	0.76	0.0
		Nu_{ort}	52.9	52.9	

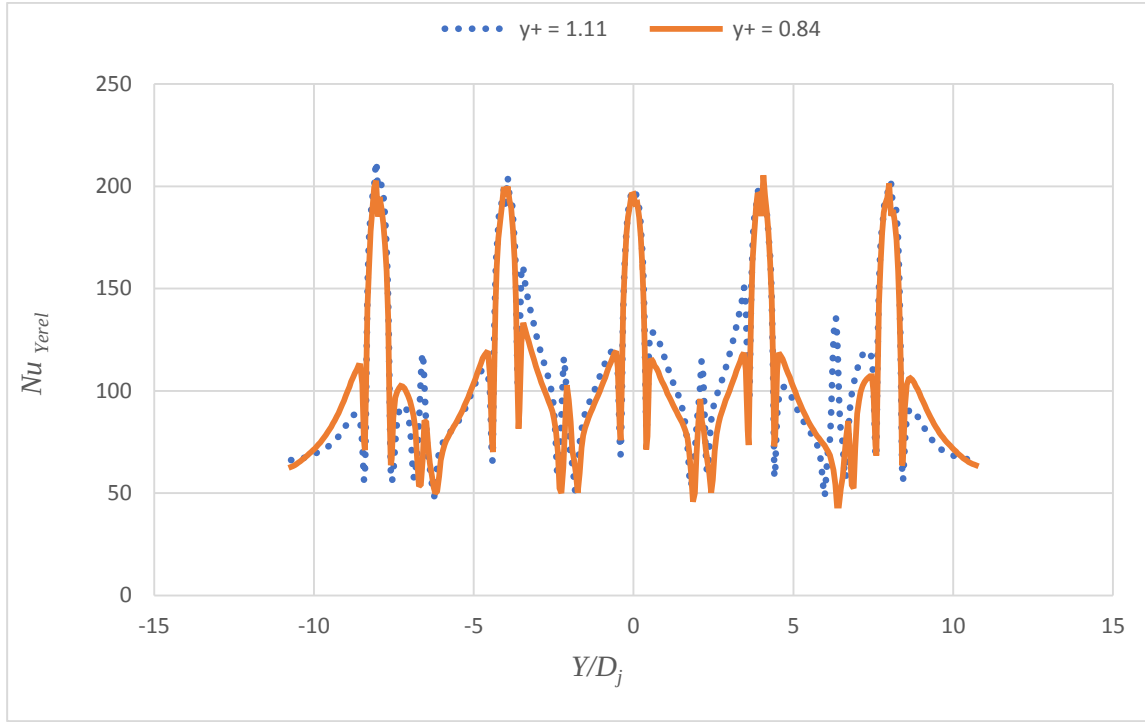
Ek B6. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akış ağ doğruluğu, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$, $Re = 20000$



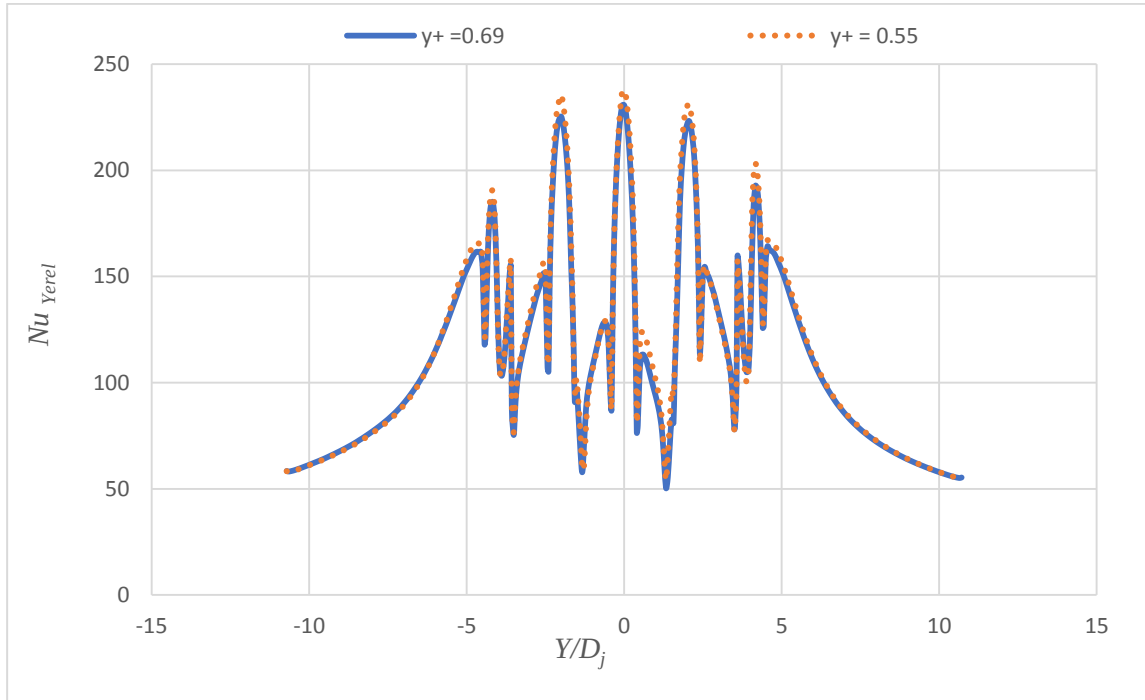
Şekil B6.1. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



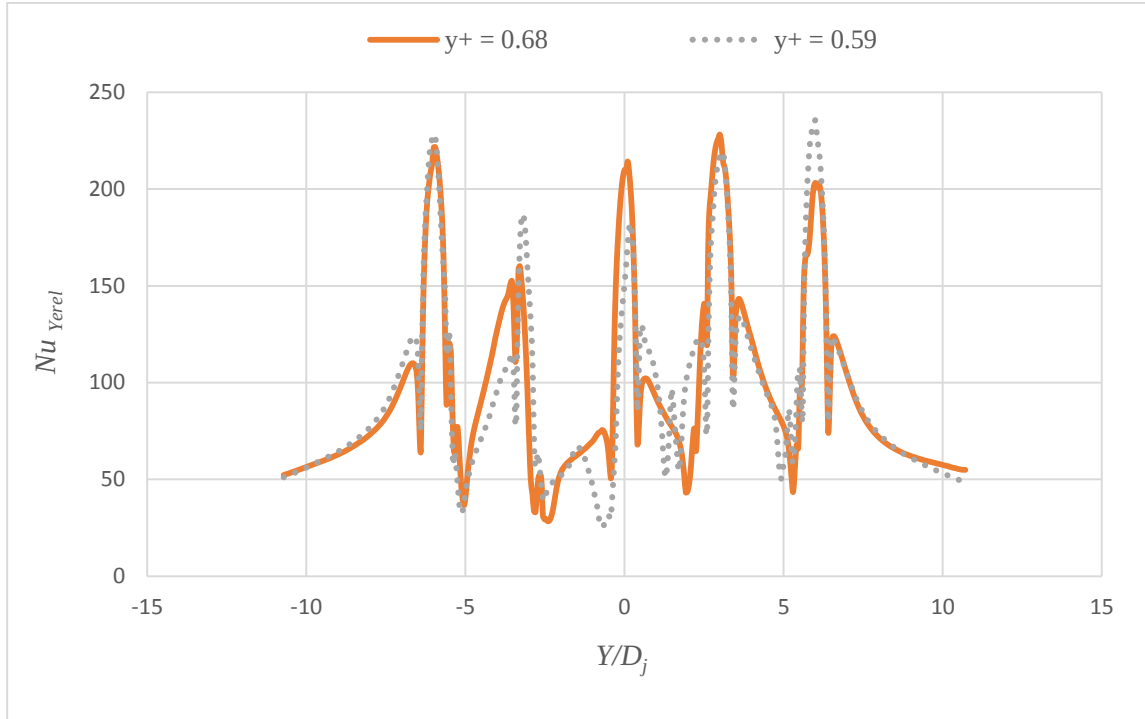
Şekil B6.2. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



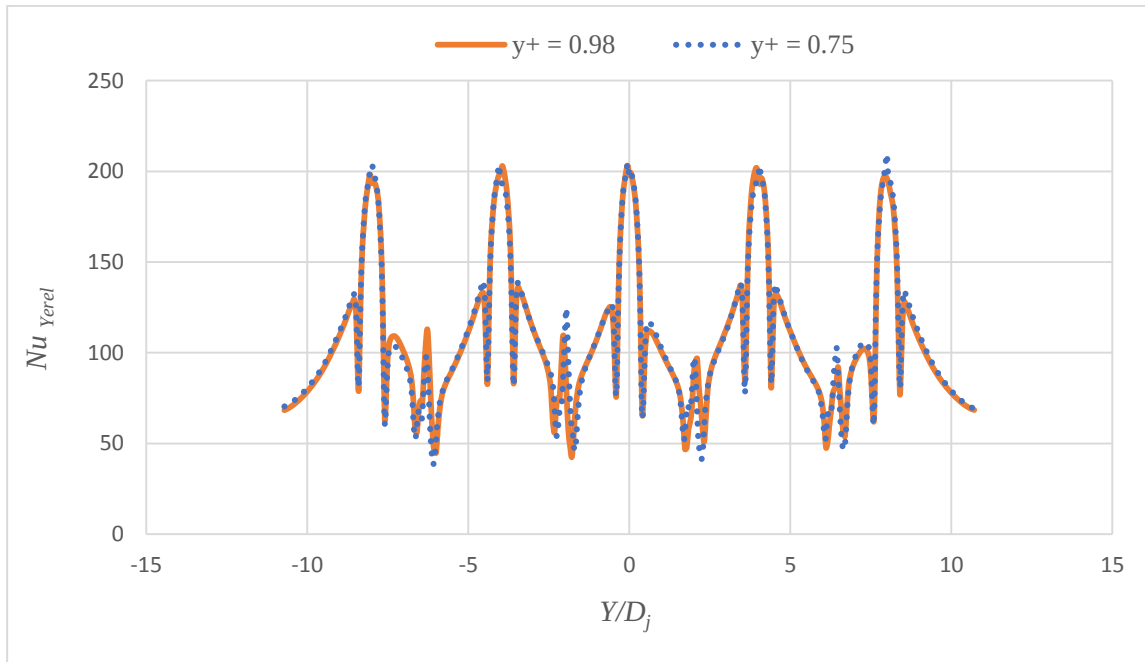
Şekil B6.3. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



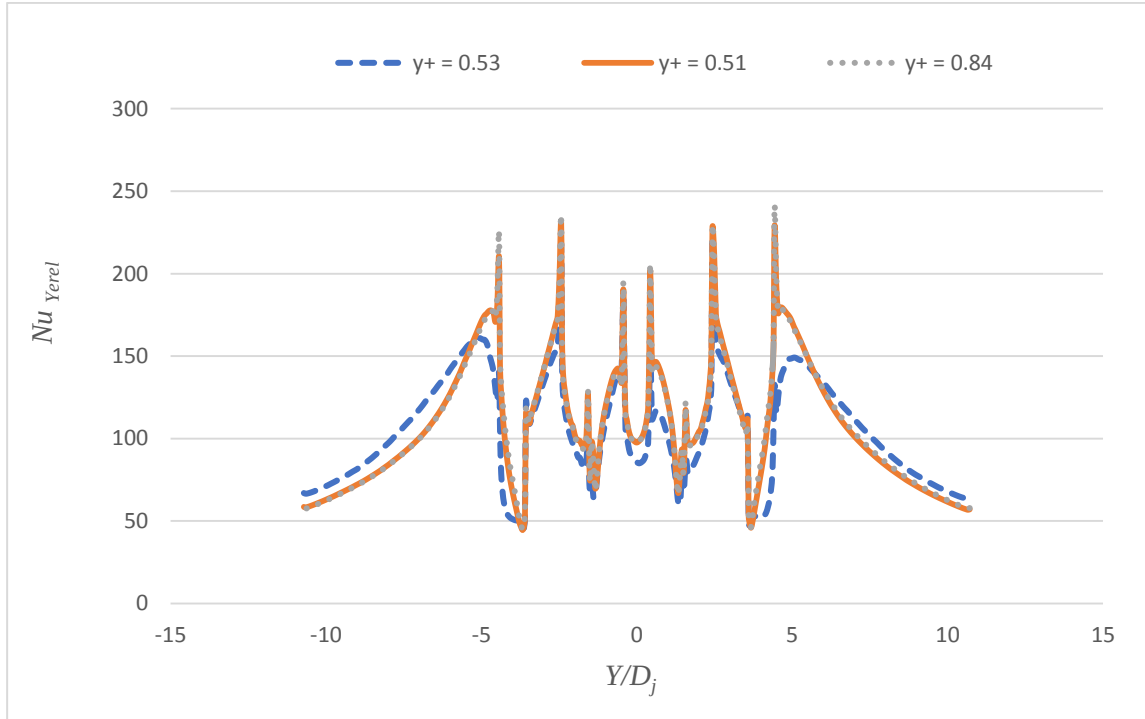
Şekil B6.4. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



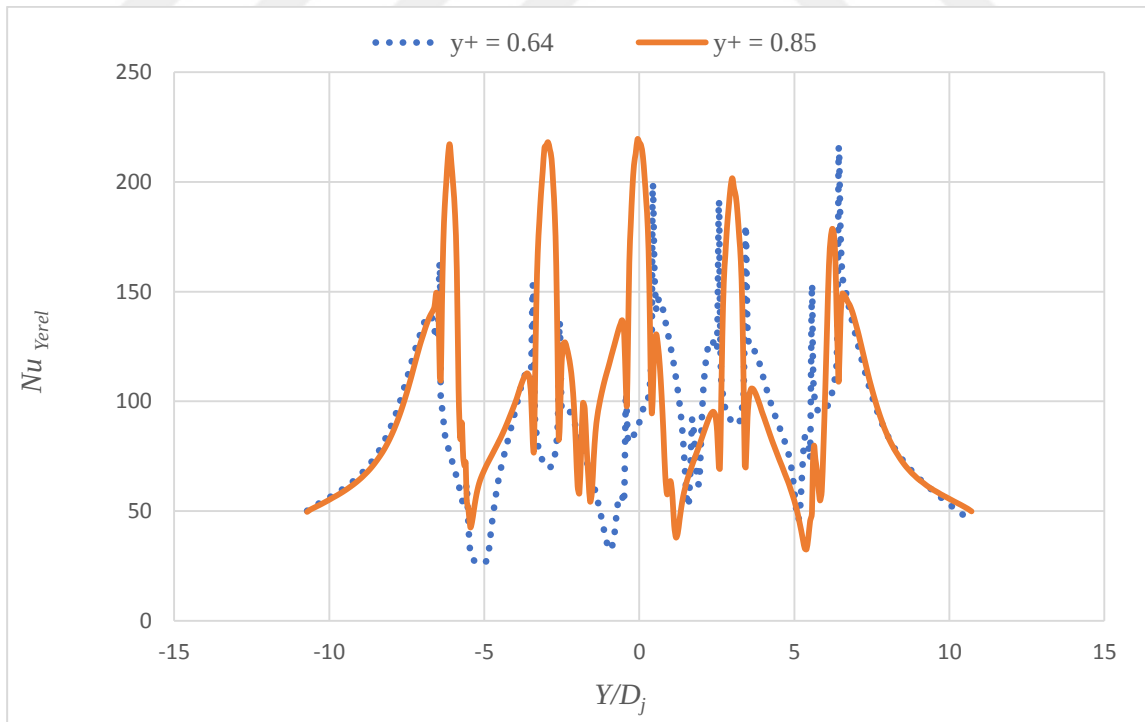
Şekil B6.5. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



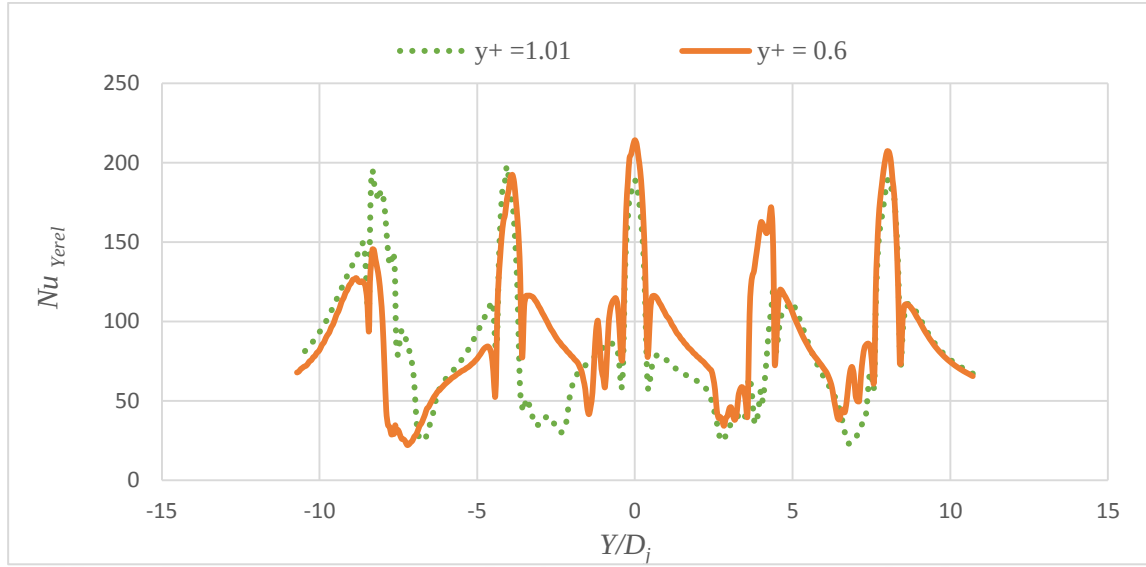
Şekil B6.6. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



Şekil B6.7. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



Şekil B6.8. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

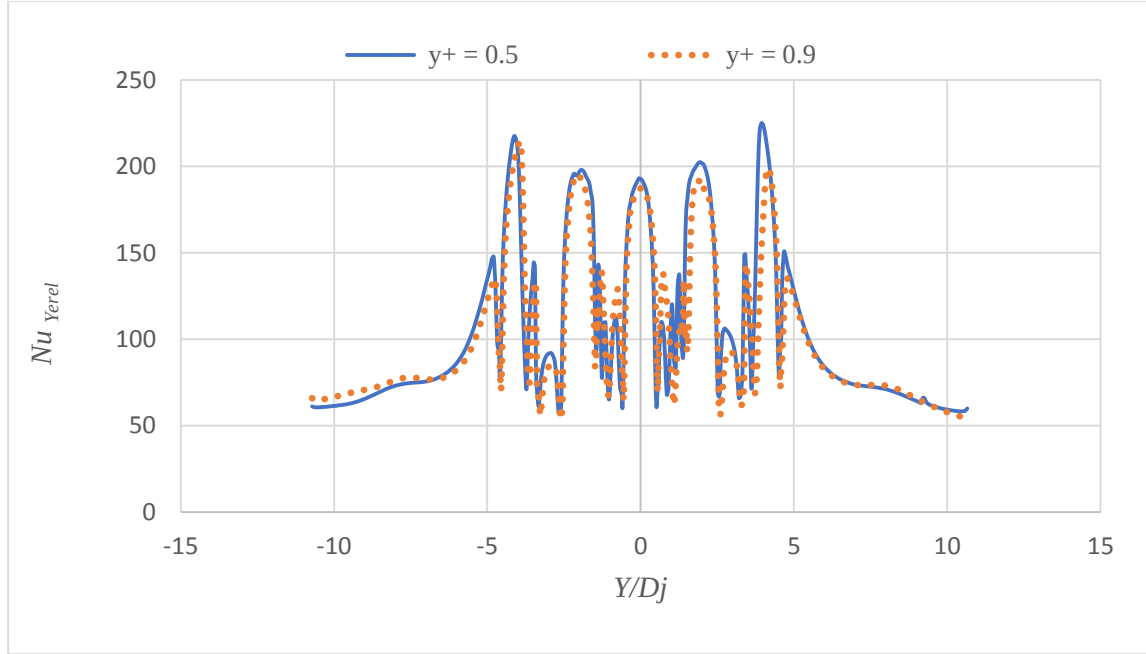


Şekil B6.9. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

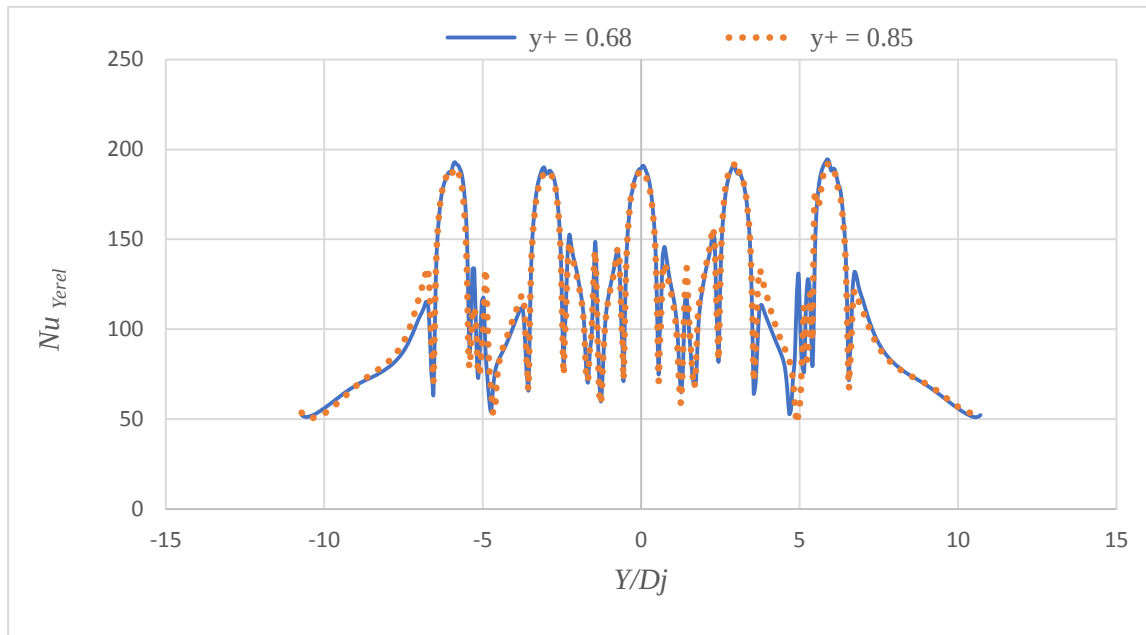
Tablo B6.1. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı

Tümsek şekilli plaka, minimum çapraz akış, $Re = 20\ 000$, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$					
Farklı ağ yapısında alan ortalama Nusselt değerleri					Nu _{Ort} hata oranı (%)
$Z_n/D_j = 2$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.75	0.68	5.83%
		Nu _{ort}	55.6	59.0	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.76	0.9	0.00%
		Nu _{ort}	62.9	62.9	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	1.11	0.84	7.78%
		Nu _{ort}	74.1	68.7	
$Z_n/D_j = 3$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.69	0.55	1.35%
		Nu _{ort}	90.1	91.3	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.83	0.68	1.94%
		Nu _{ort}	64.7	63.5	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.98	0.79	2.00%
		Nu _{ort}	66.7	65.4	
$Z_n/D_j = 4$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.51	0.84	6.00%
		Nu _{ort}	133.3	125.8	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.64	0.85	1.06%
		Nu _{ort}	70.9	70.2	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	1.01	0.6	4.55%
		Nu _{ort}	75.8	79.4	

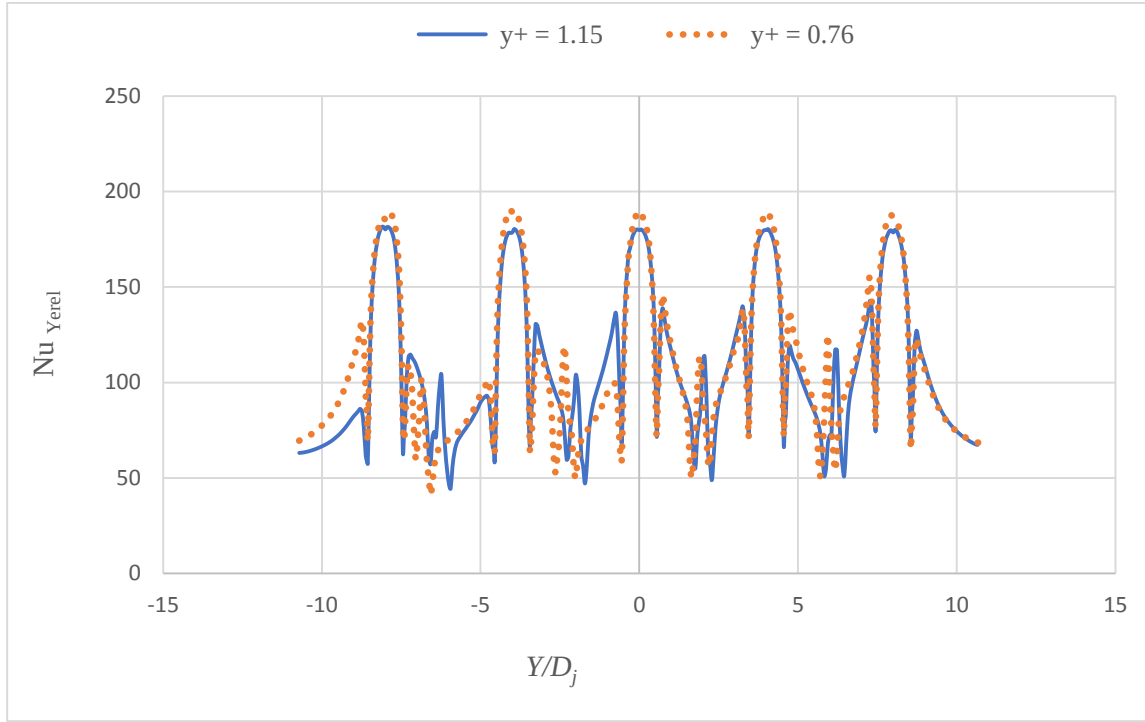
Ek B7. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğrulamaları,
 $D_d/D_j = 1.43$, $t/D_d = 0.25$, $Re = 20000$



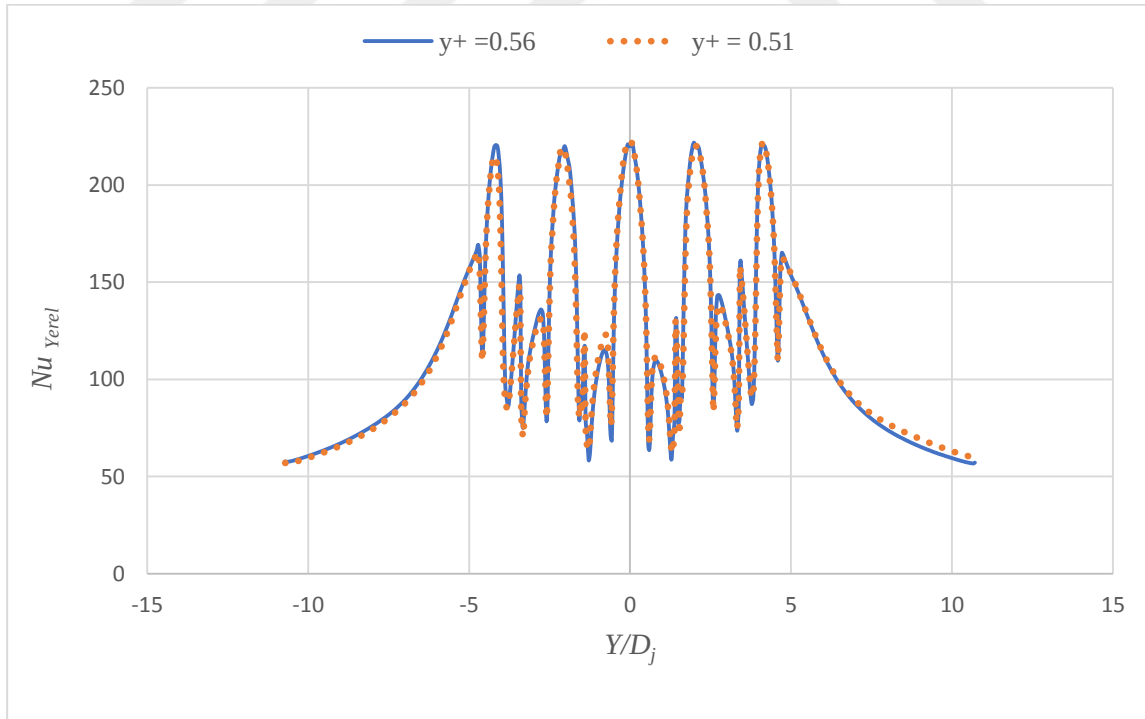
Şekil B7.1. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



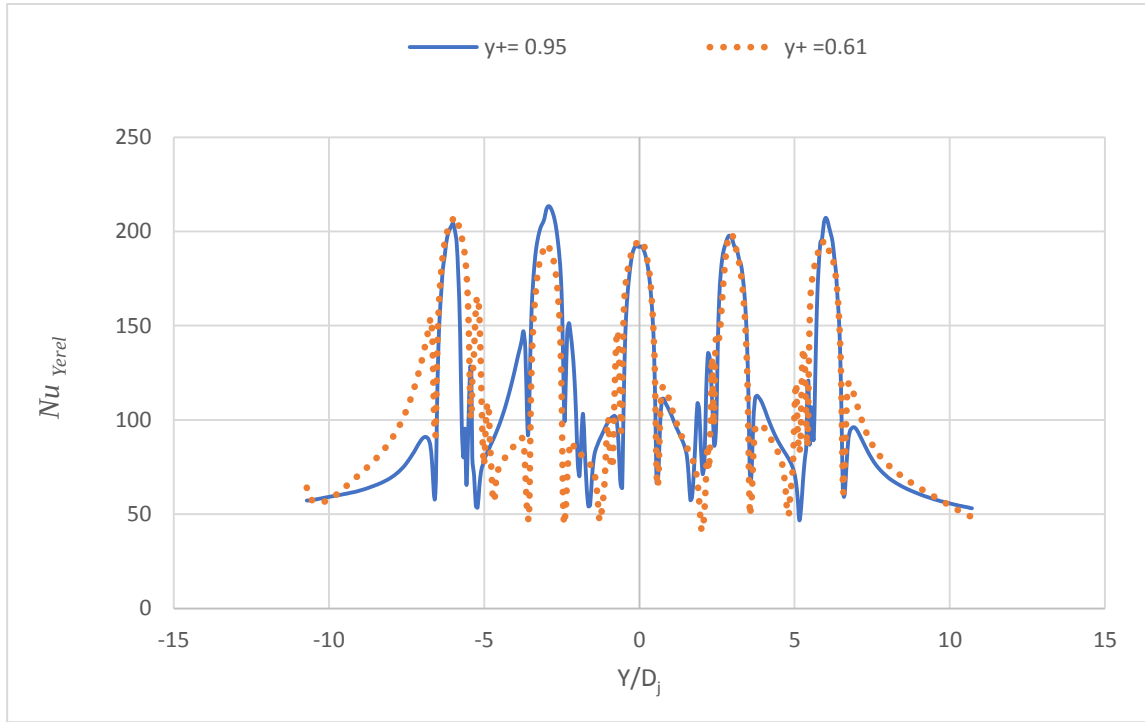
Şekil B7.2. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



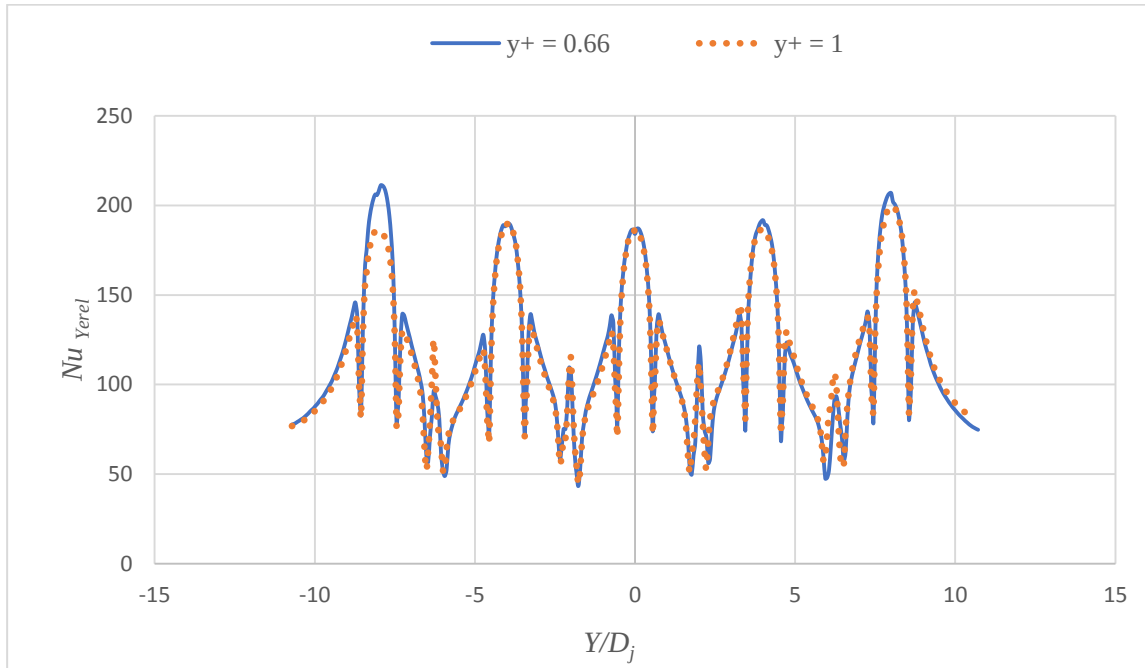
Şekil B7.3. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



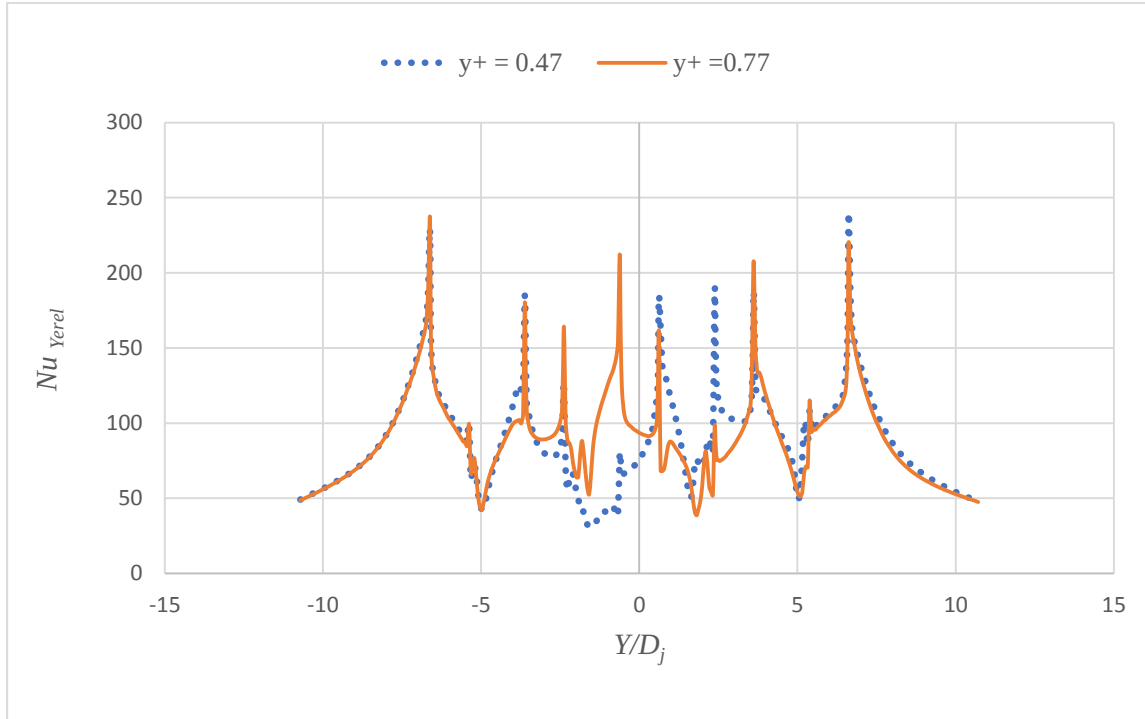
Şekil B7.4. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



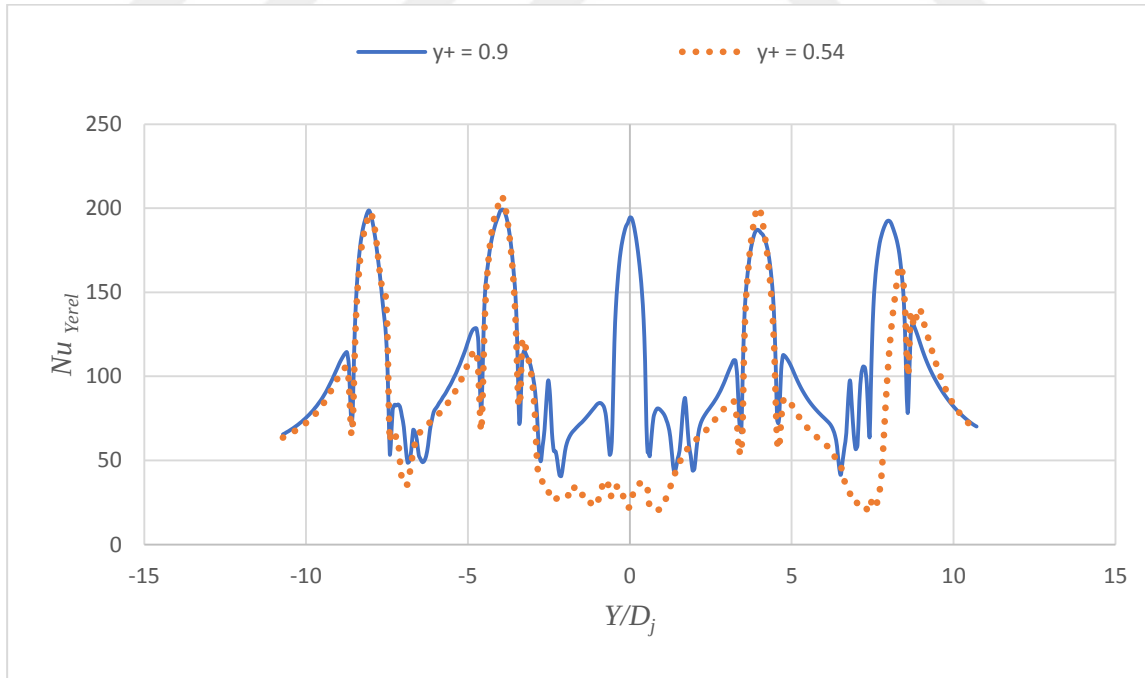
Şekil B7.5. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



Şekil B7.6. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$

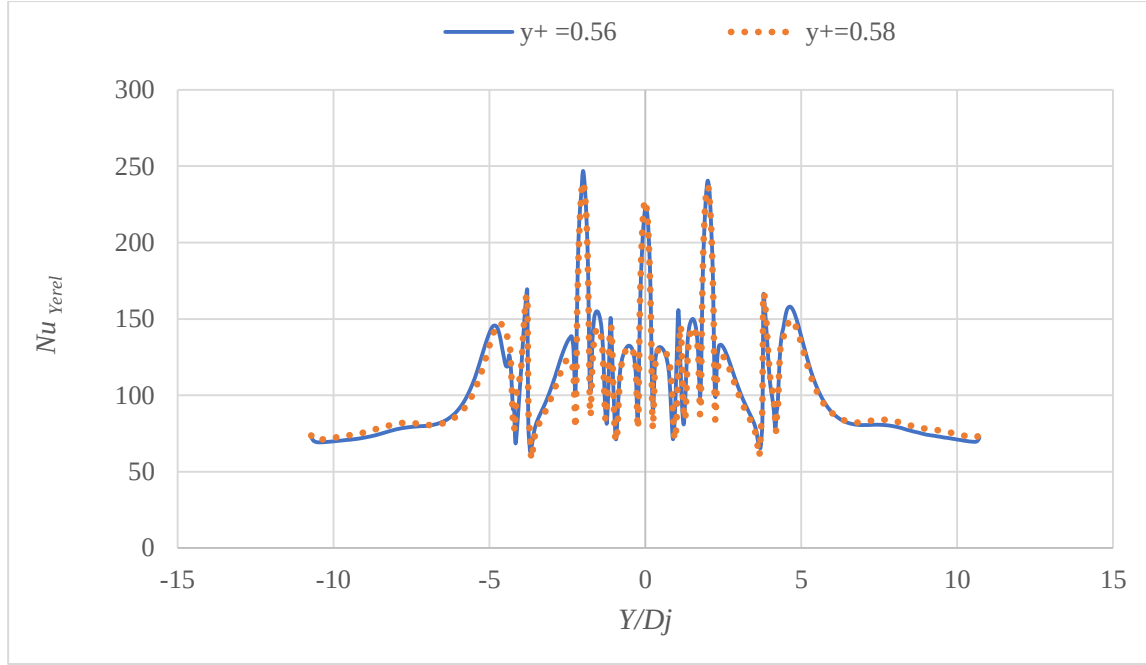


Şekil B7.7. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$

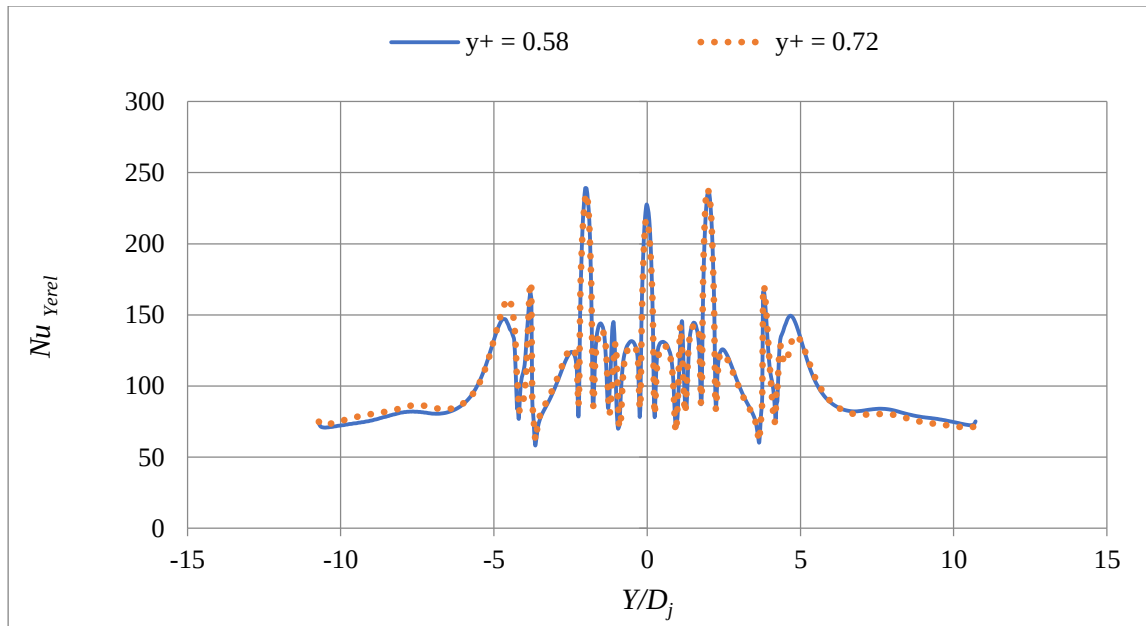


Şekil B7.8. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$

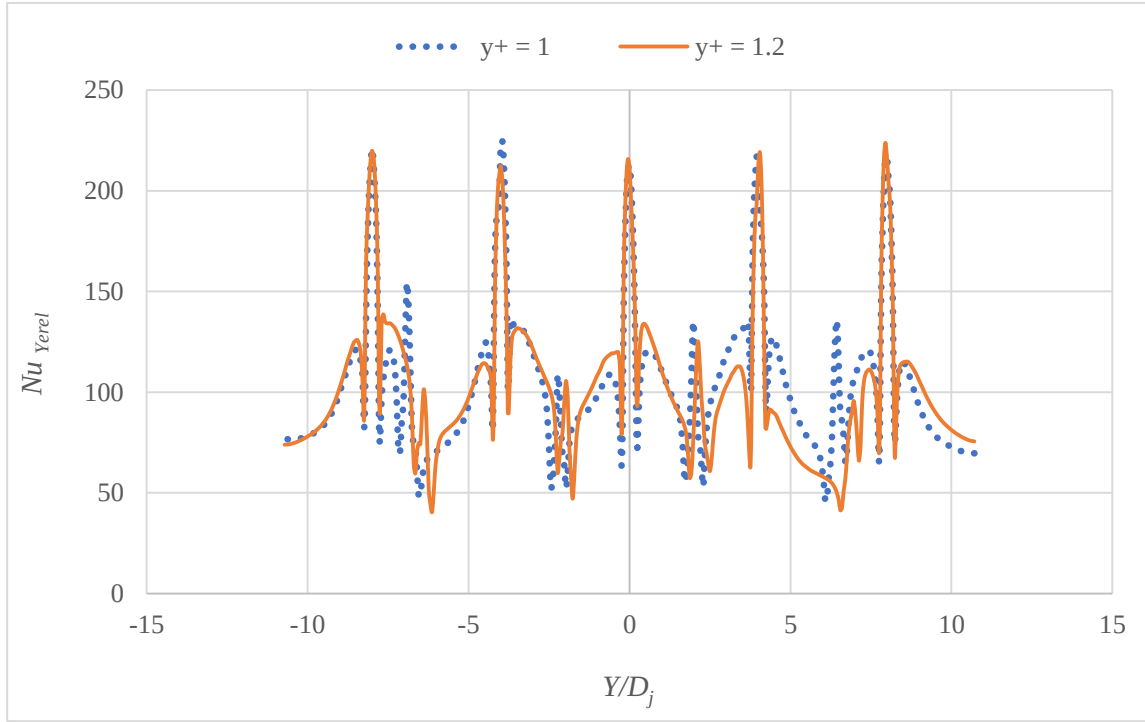
Ek B8. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğrulamaları,
 $D_d/D_j = 0.57$, $t/D_d = 0.25$, $Re = 20000$



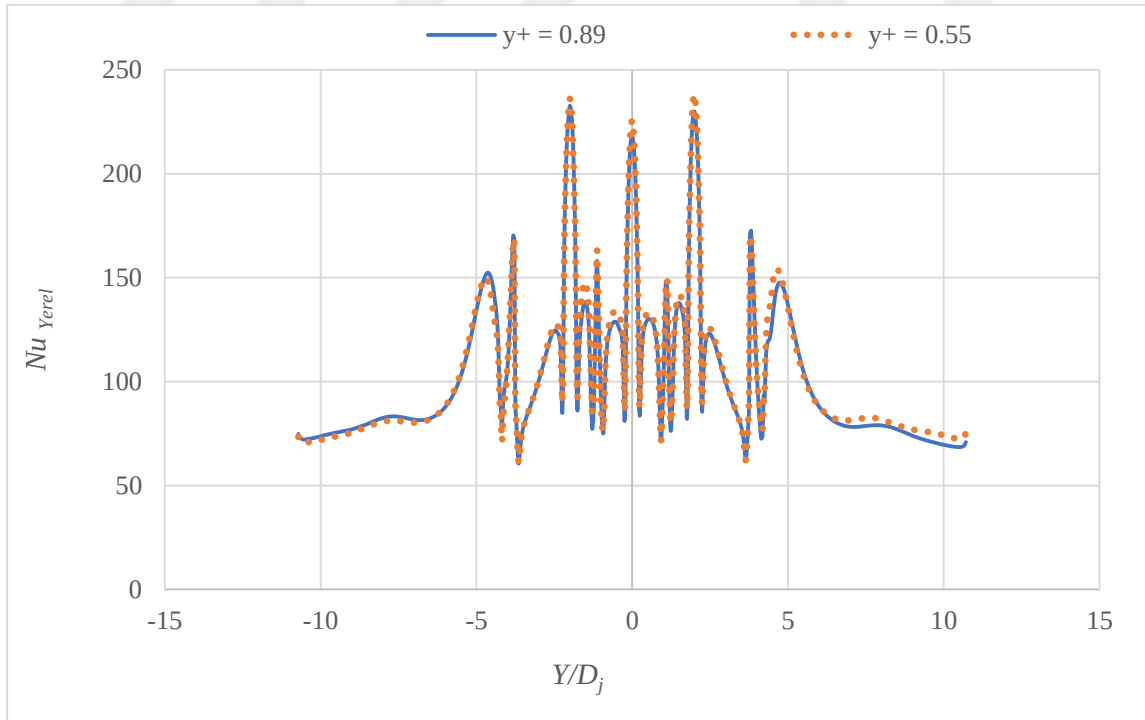
Şekil B8.1. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



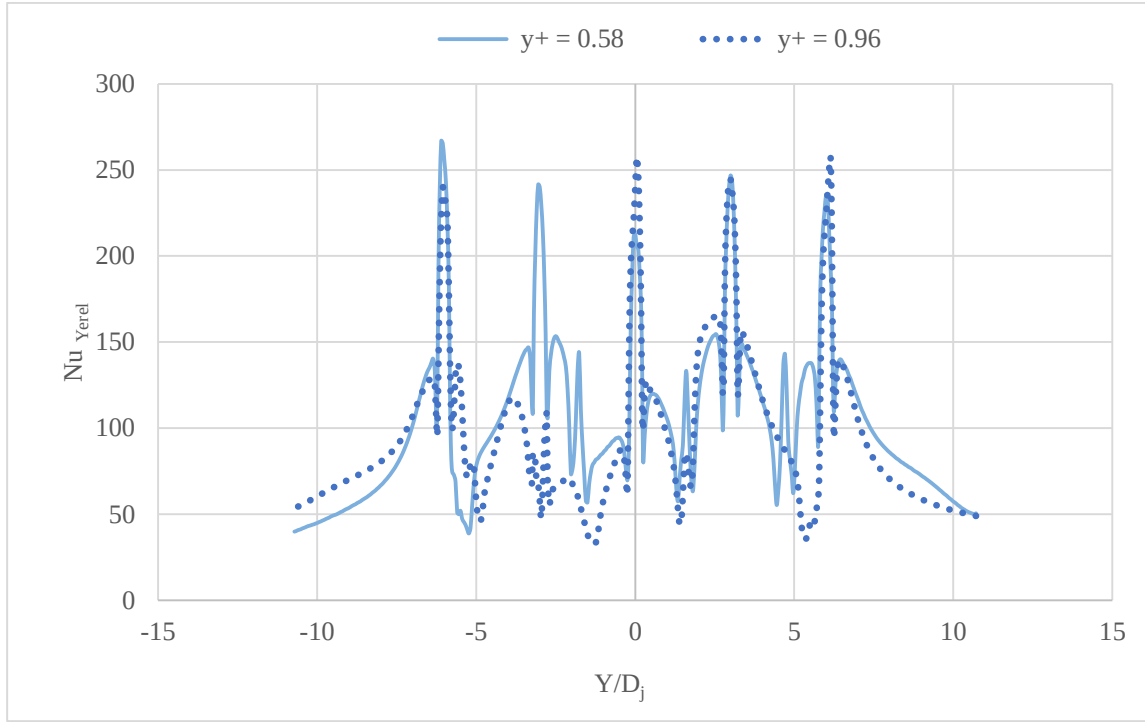
Şekil B8.2. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu,
 $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



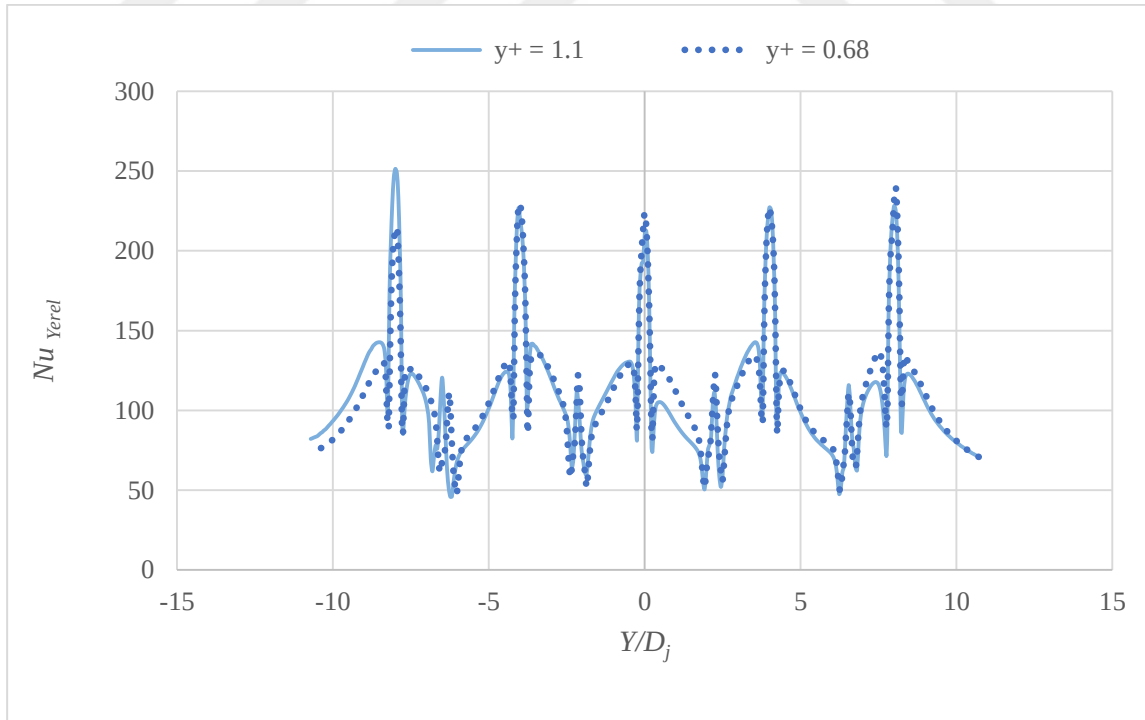
Şekil B8.3. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



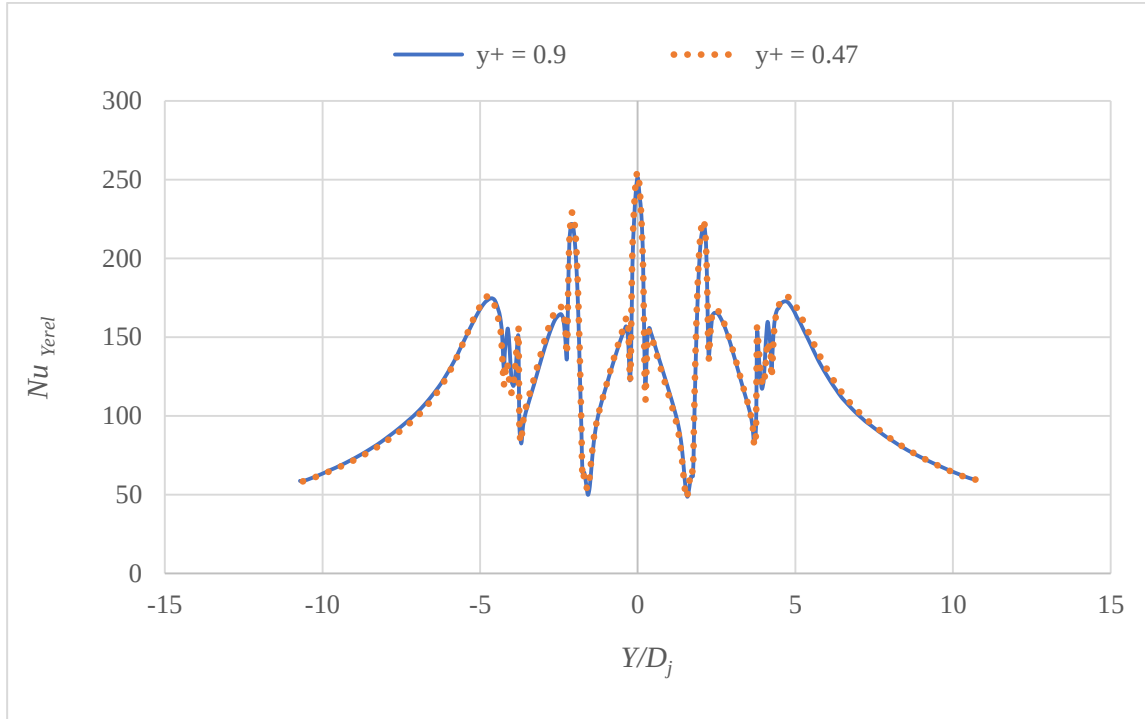
Şekil B8.4. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.5$



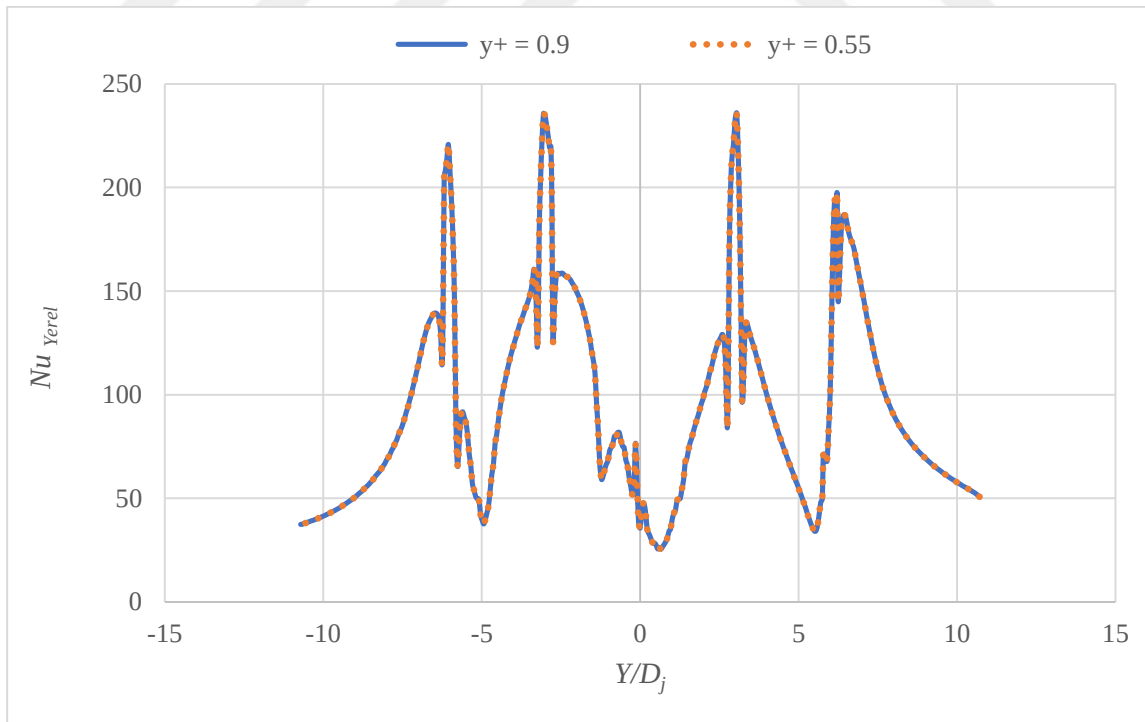
Şekil B8.5. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



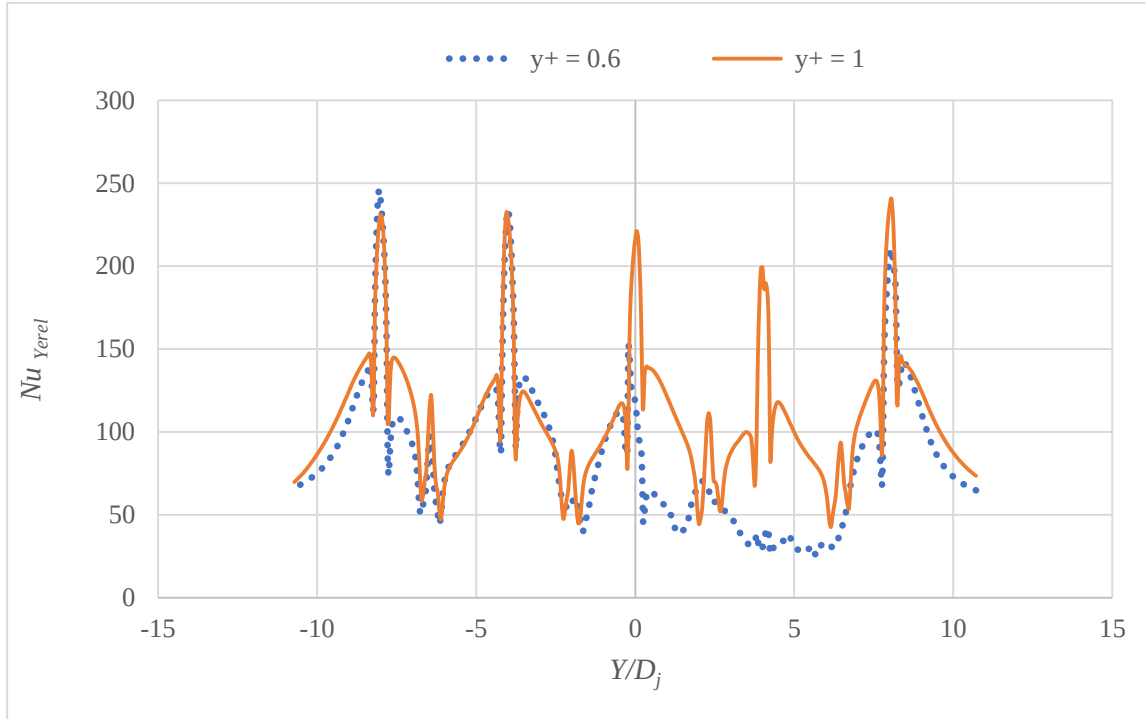
Şekil B8.6. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



Şekil B8.7. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



Şekil B8.8. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



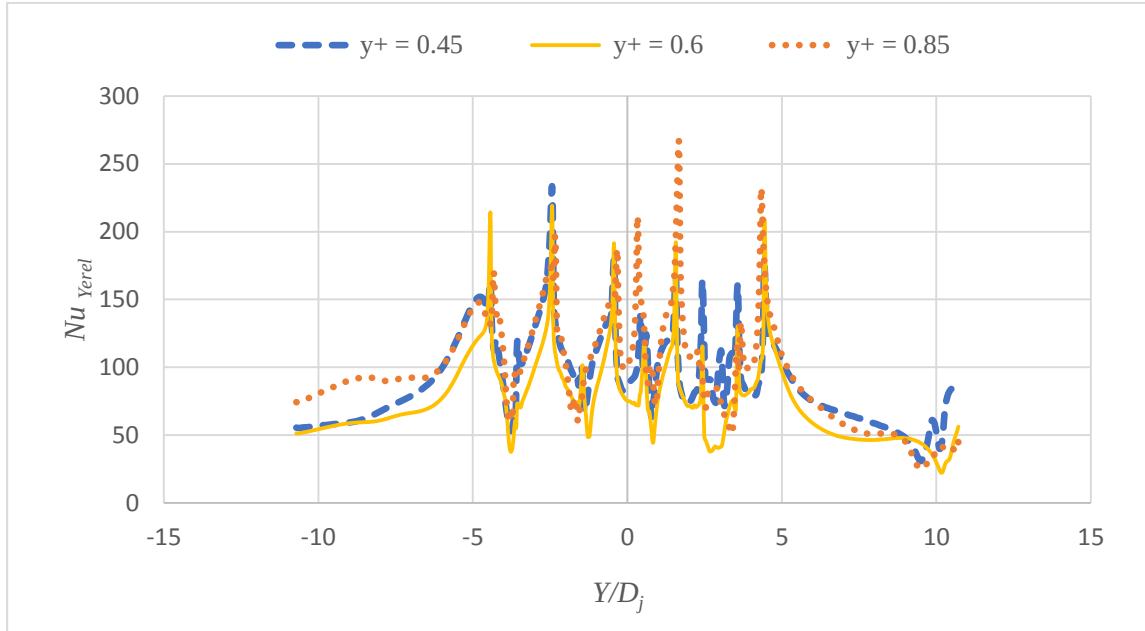
Şekil B8.9. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$

Tablo B8.1. Tümsek şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu

Tümsek şekilli plaka, minimum çapraz akış, $Re = 20000$, $D_d/D_j = 0.57$, $t/D_d = 0.25$					
Farklı ağ yapısında alan ortalama Nusselt değerleri					Nu _{ort} hata oranı (%)
$Z_n/D_j = 2$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.56	0.58	0,82
		Nu _{ort}	54,6	54,2	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.6	0.72	0,00
		Nu _{ort}	54,2	54,2	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	1	1.2	2,30%
		Nu _{ort}	76,6	78,4	
$Z_n/D_j = 3$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.89	0.55	2,50
		Nu _{ort}	55,6	57,0	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.58	0.96	6,06
		Nu _{ort}	67,3	71,7	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	1.1	0.68	2,30
		Nu _{ort}	76,6	78,4	
$Z_n/D_j = 4$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.9	0.47	5,77
		Nu _{ort}	128,2	136,1	

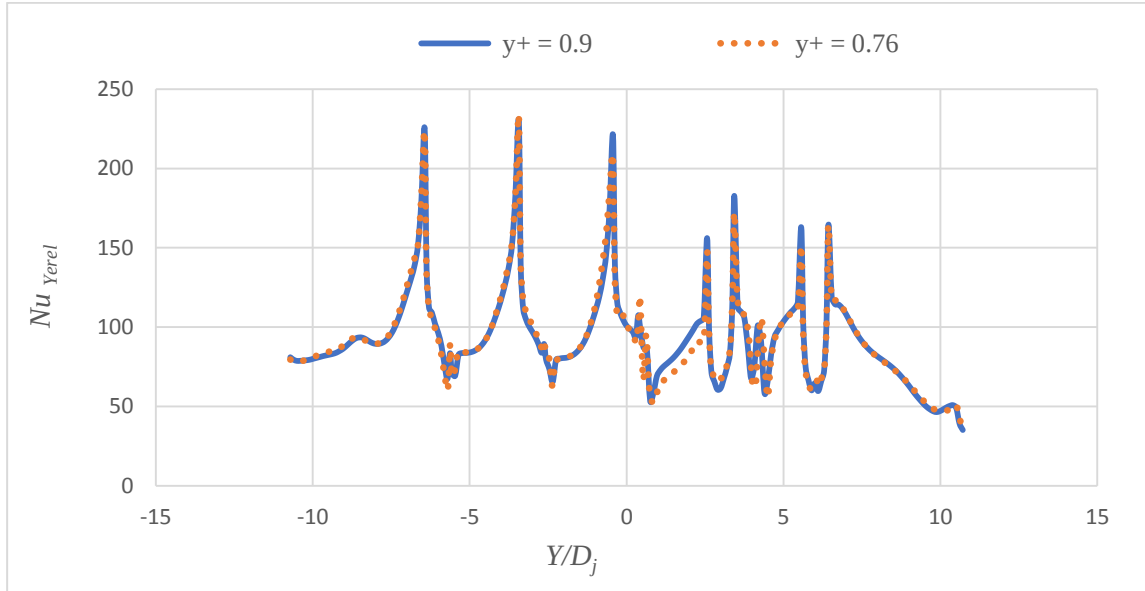
Ek B9. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu,

$Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



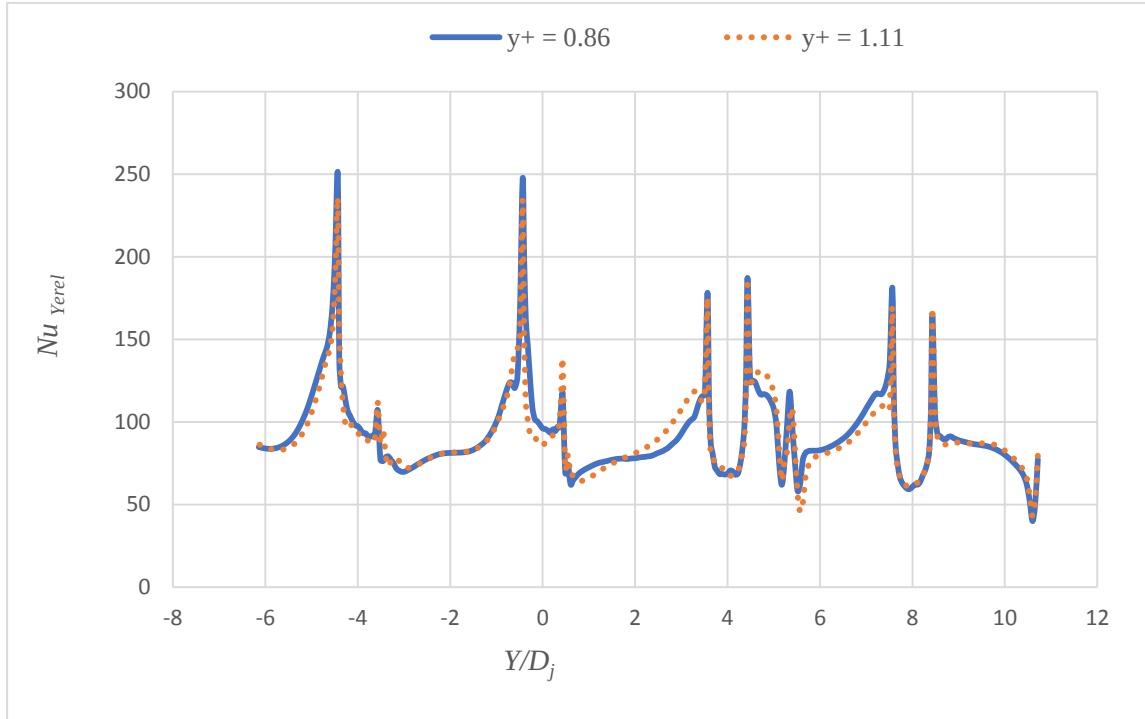
Şekil B9.1. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$,

$Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

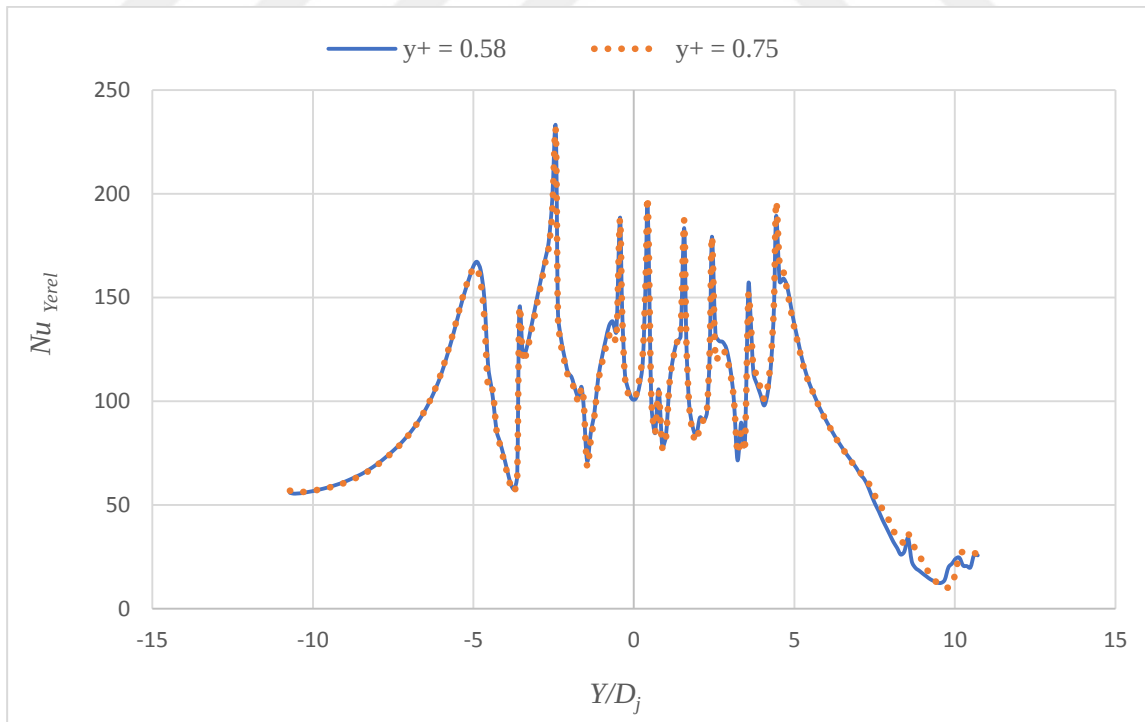


Şekil B9.2. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$,

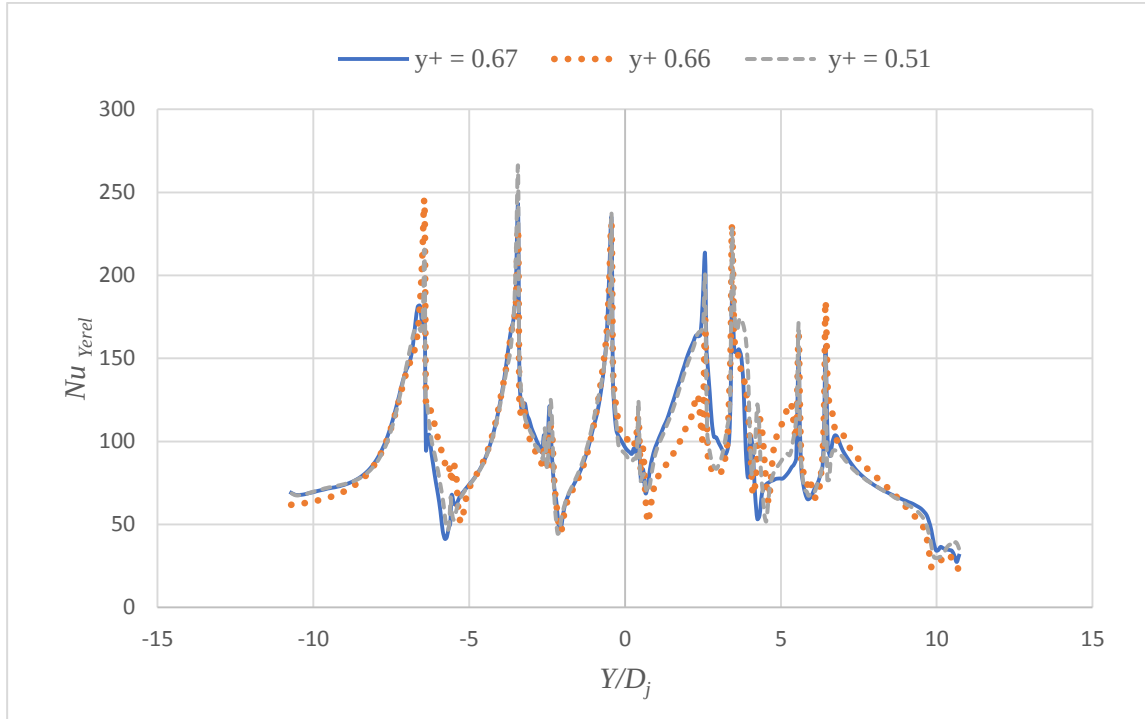
$Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



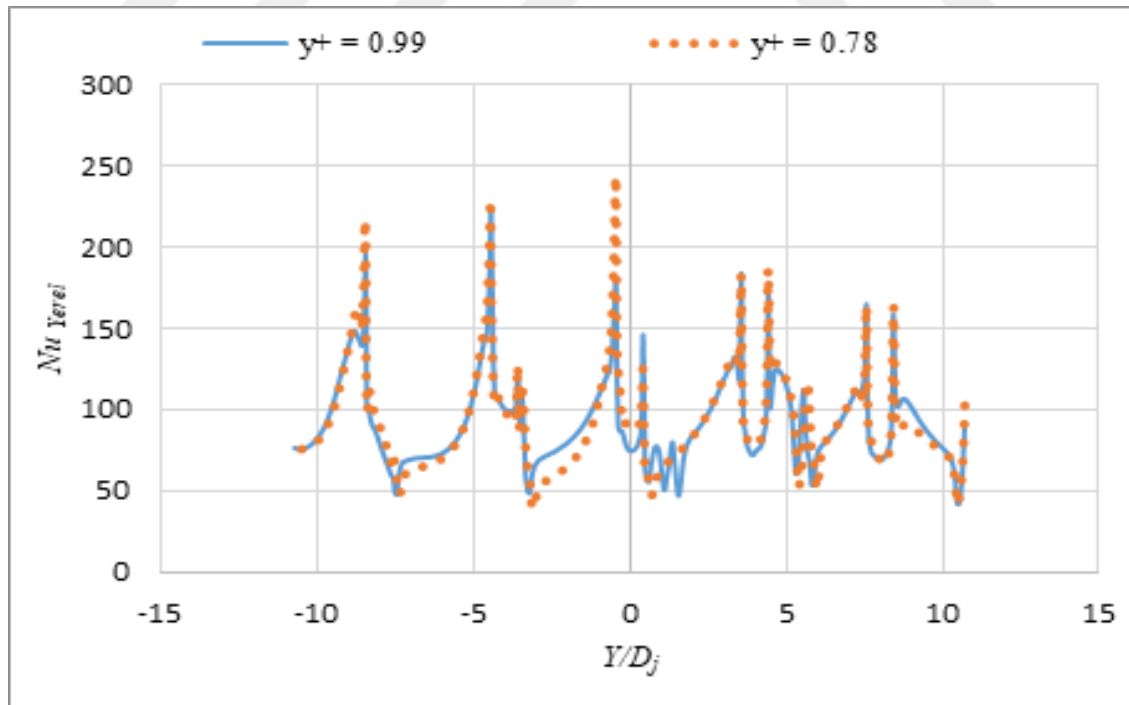
Şekil B9.3. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



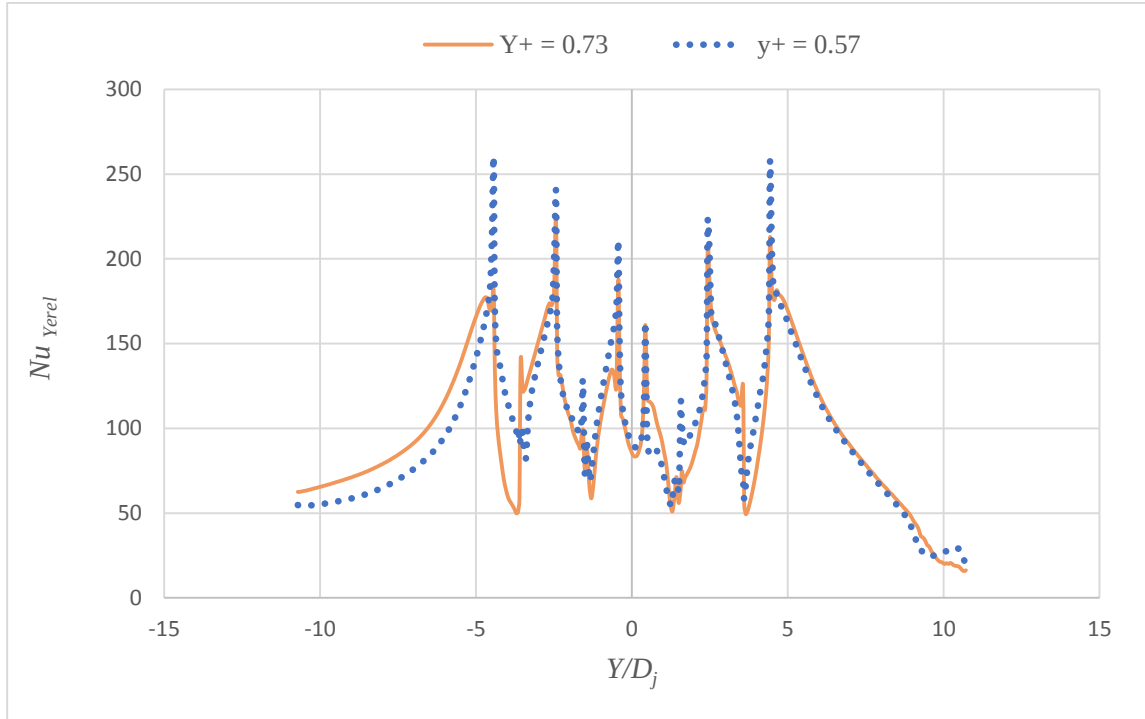
Şekil B9.4. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



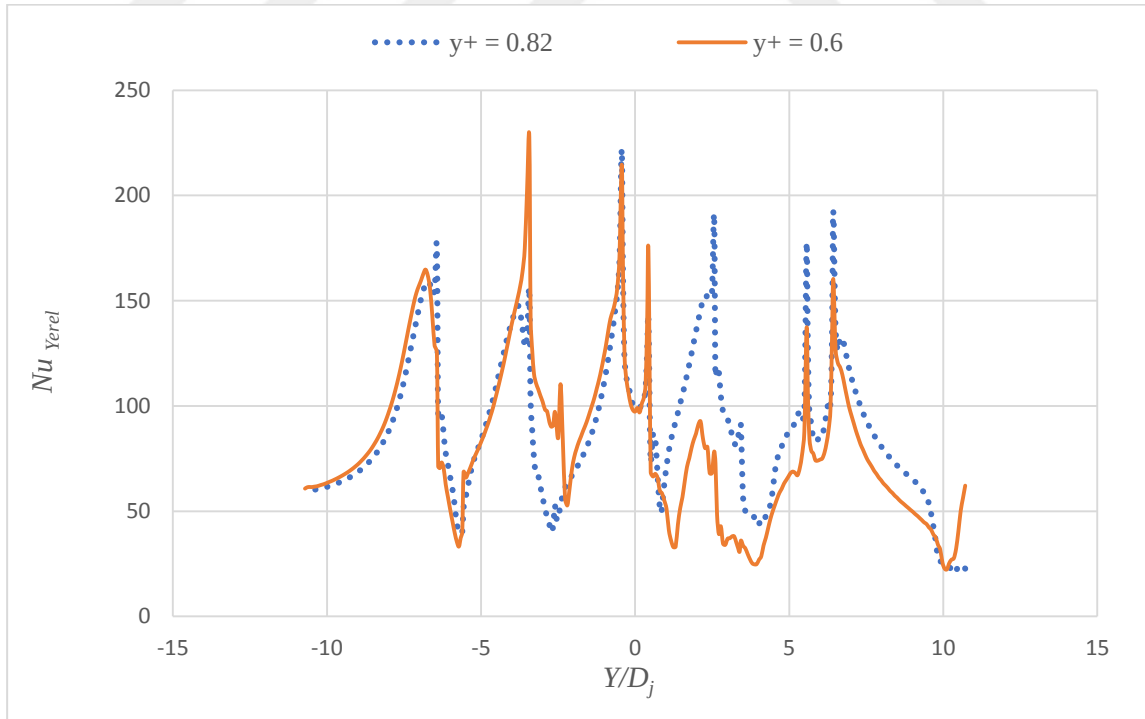
Şekil B9.5. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



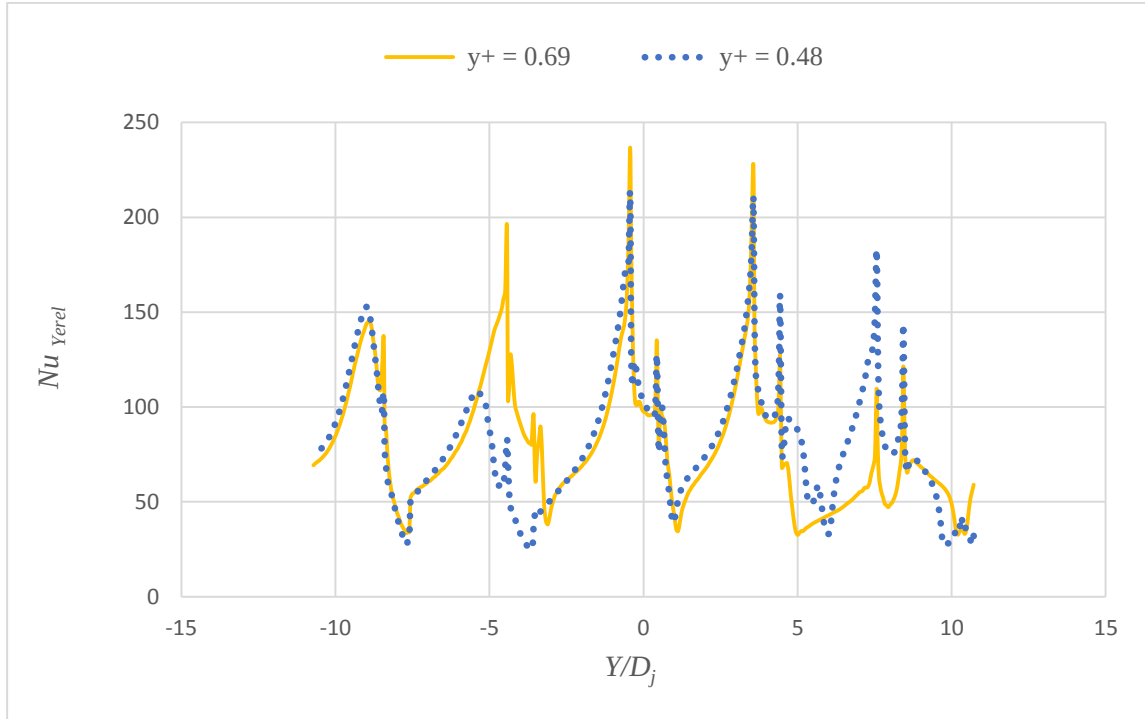
Şekil B9.6. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



Şekil B9.7. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



Şekil B9.8. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



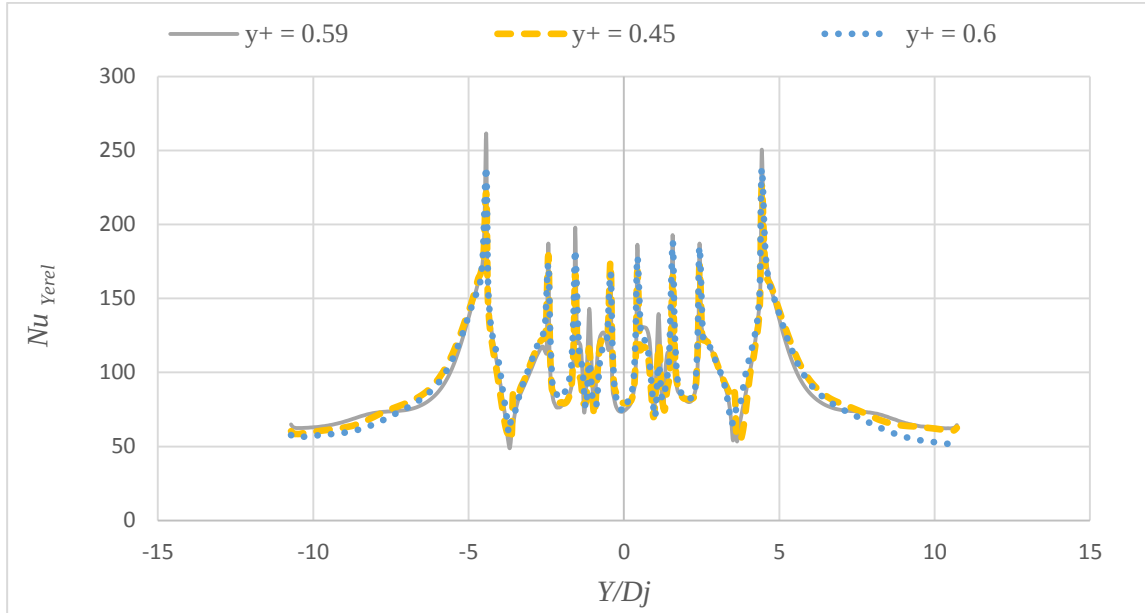
Şekil B9.9. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

Tablo B9.1. Çukur şekilli plakada maksimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı

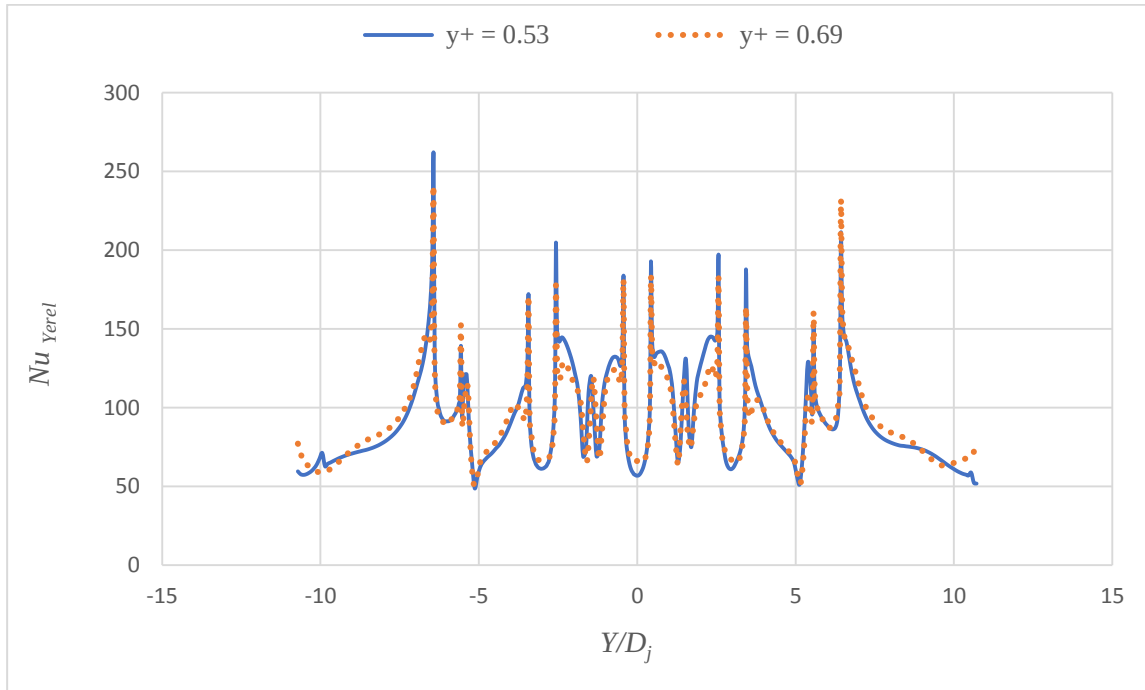
Çukur şekilli plaka, maksimum çapraz akış					
$D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$, $Re = 20000$					Nu_{ort} hata oranı (%)
$Z_n/D_j = 2$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.45	0.85	0,7
		Nu_{ort}	43,6	43,9	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.9	0.76	0,9
		Nu_{ort}	59,0	58,5	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.86	0.86	0,0
		Nu_{ort}	66,0	66,0	
$Z_n/D_j = 3$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.58	0.75	1,9
		Nu_{ort}	40,9	41,7	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.67	0.51	0,0
		Nu_{ort}	59,5	59,5	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.99	0.78	0,0
		Nu_{ort}	64,1	64,1	
$Z_n/D_j = 4$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.73	0.73	0,0
		Nu_{ort}	43,9	43,9	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.82	0.6	0,8
		Nu_{ort}	55,6	56,0	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.69	0.69	0,0
		Nu_{ort}	61,7	61,7	

Ek B10. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu,

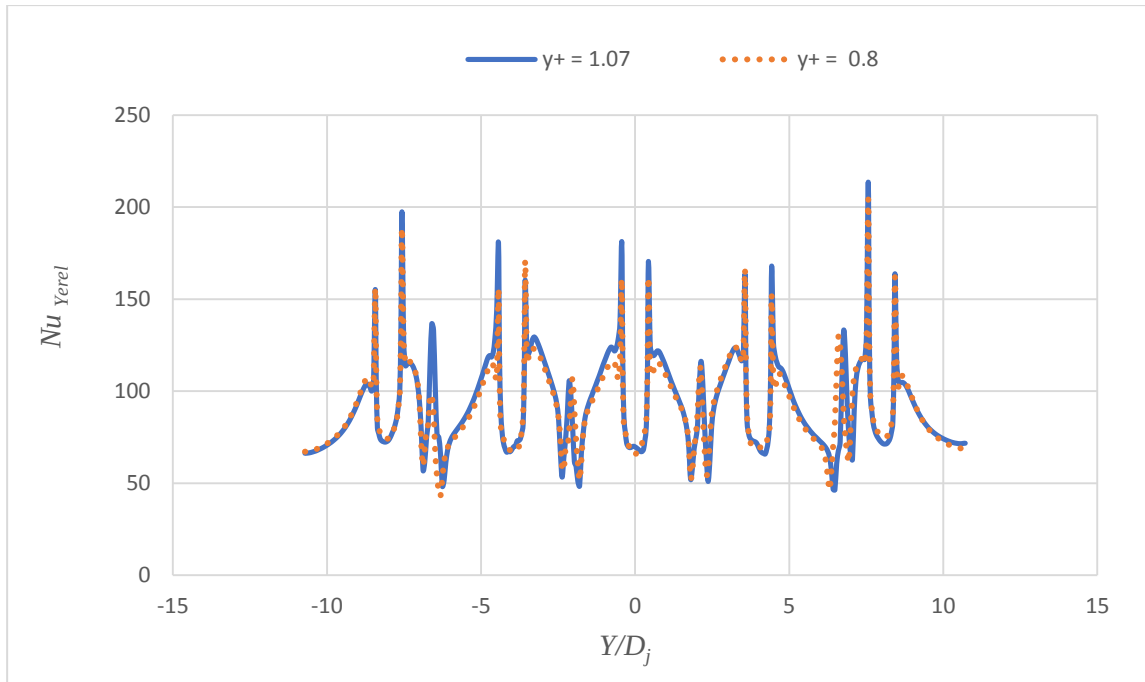
$Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



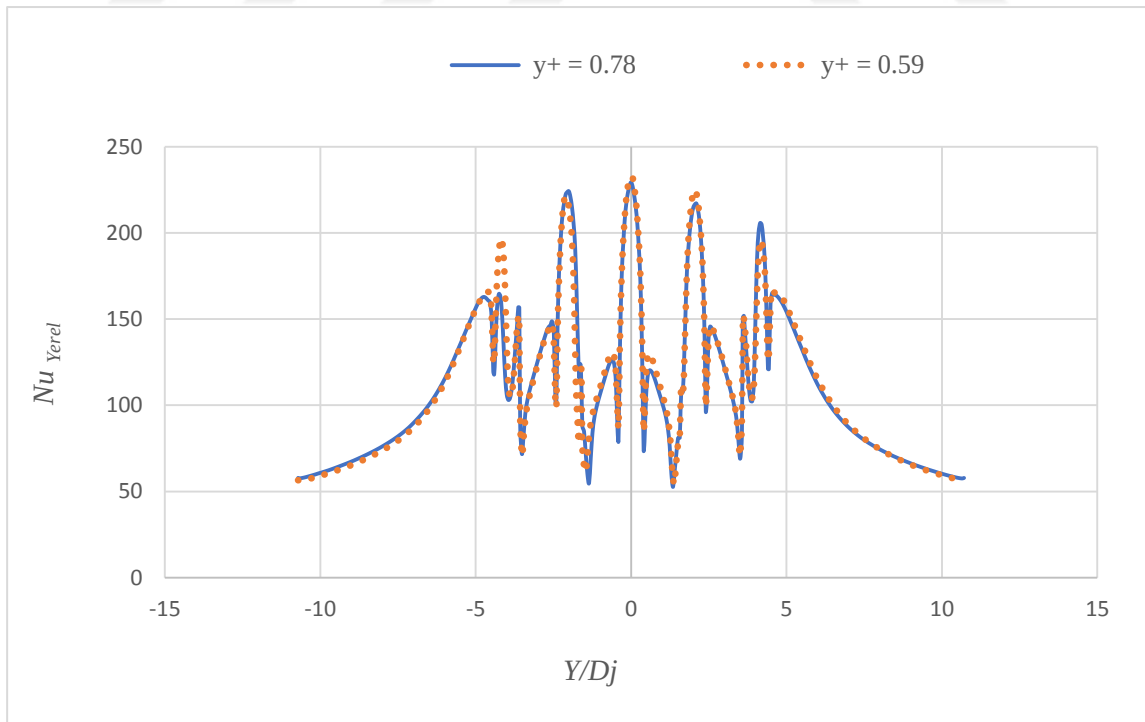
Şekil B10.1. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



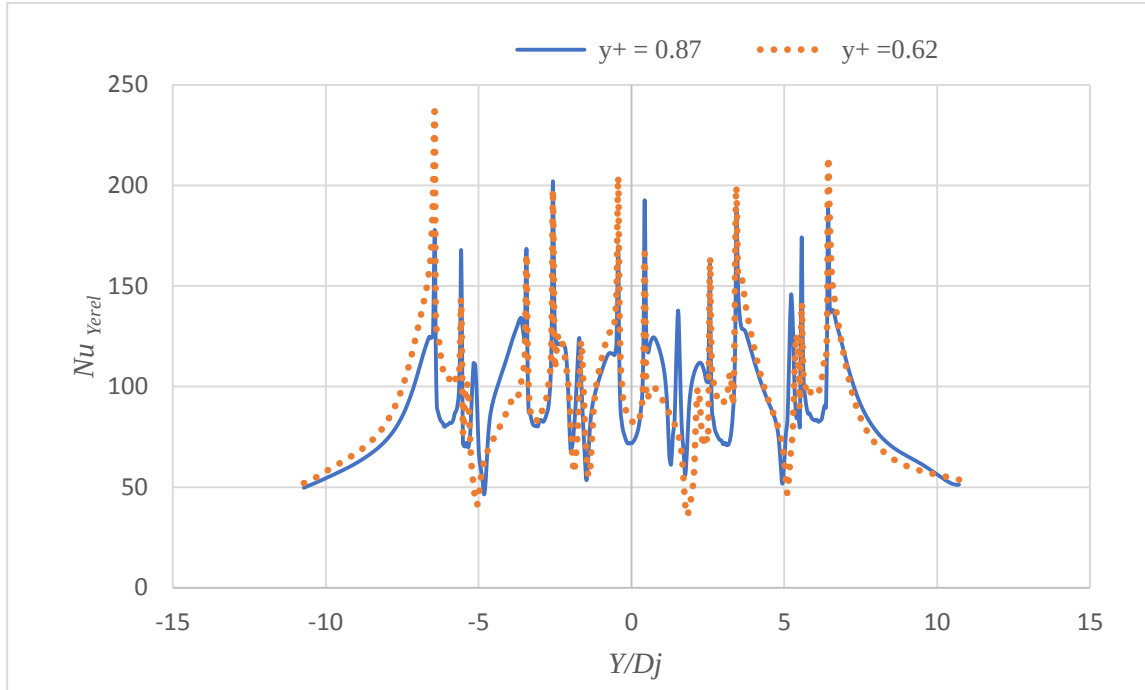
Şekil B10.2. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



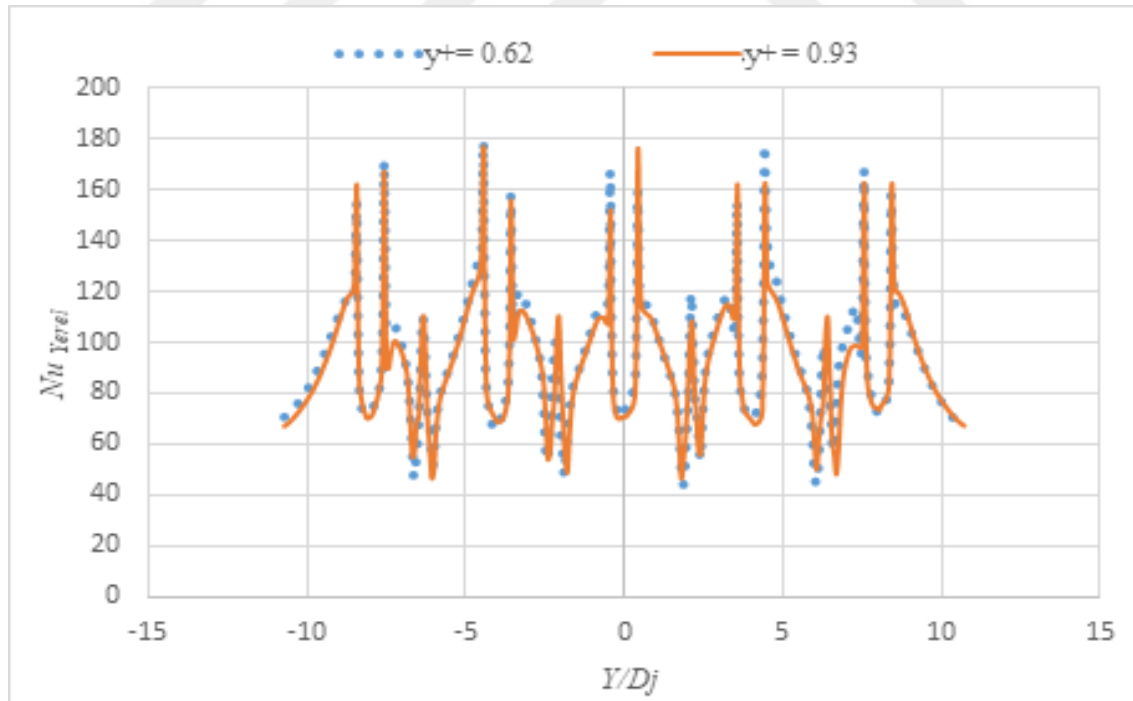
Şekil B10.3. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



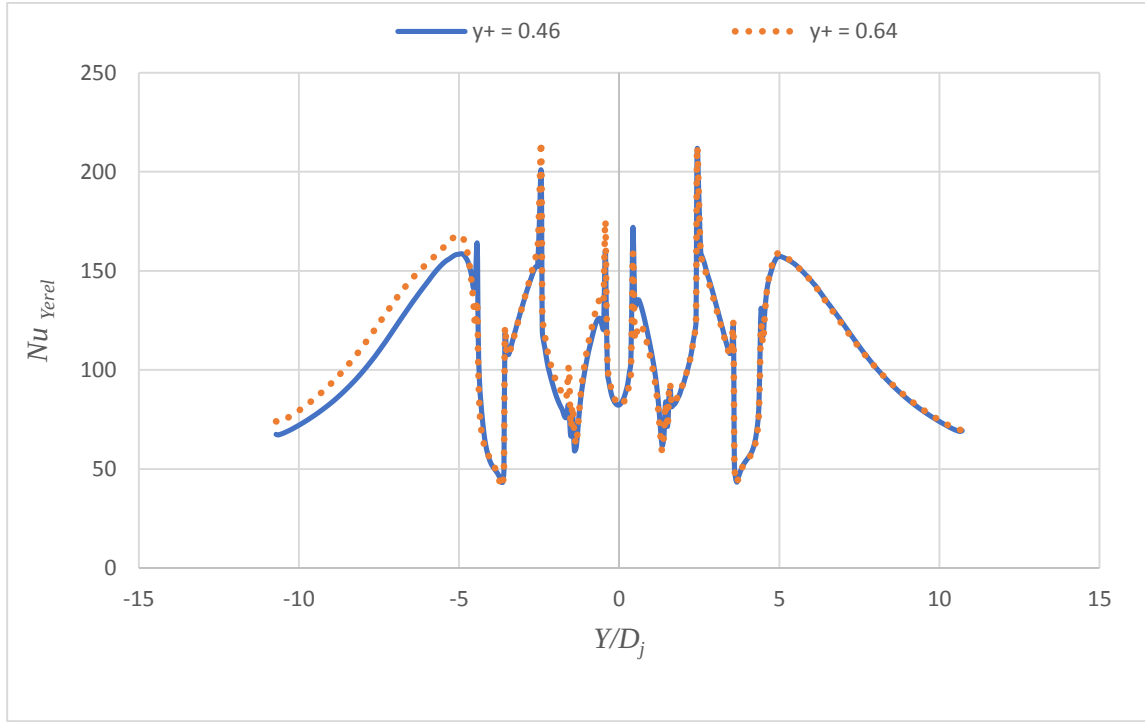
Şekil B10.4. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



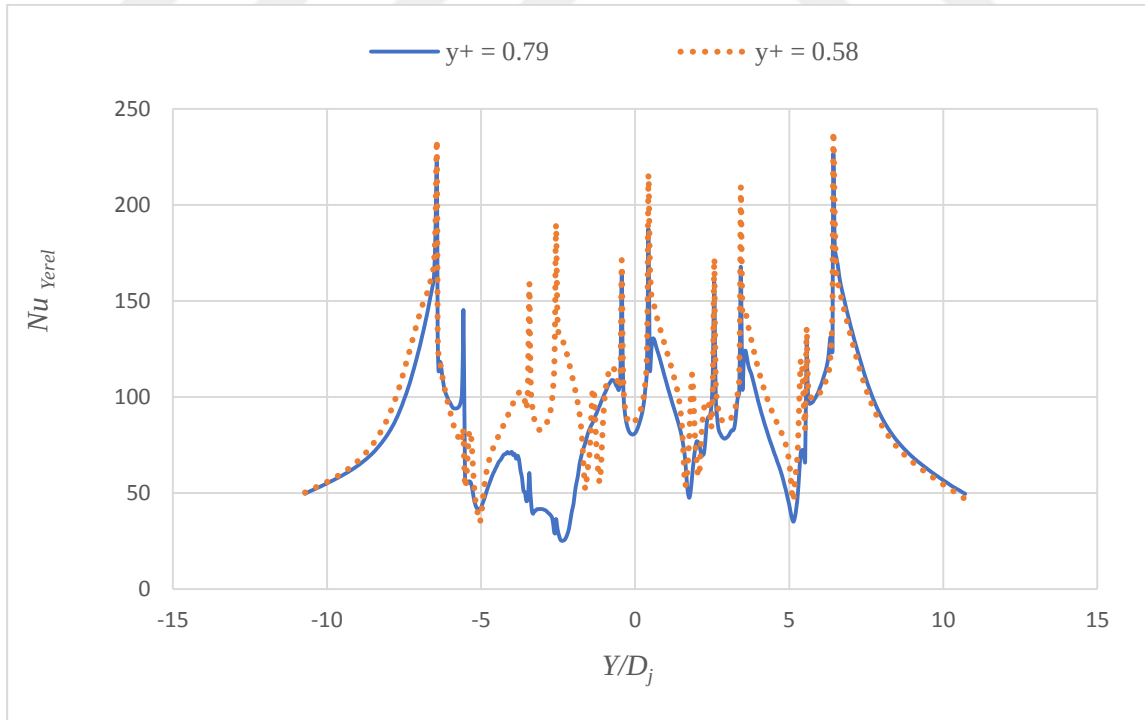
Şekil B10.5. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



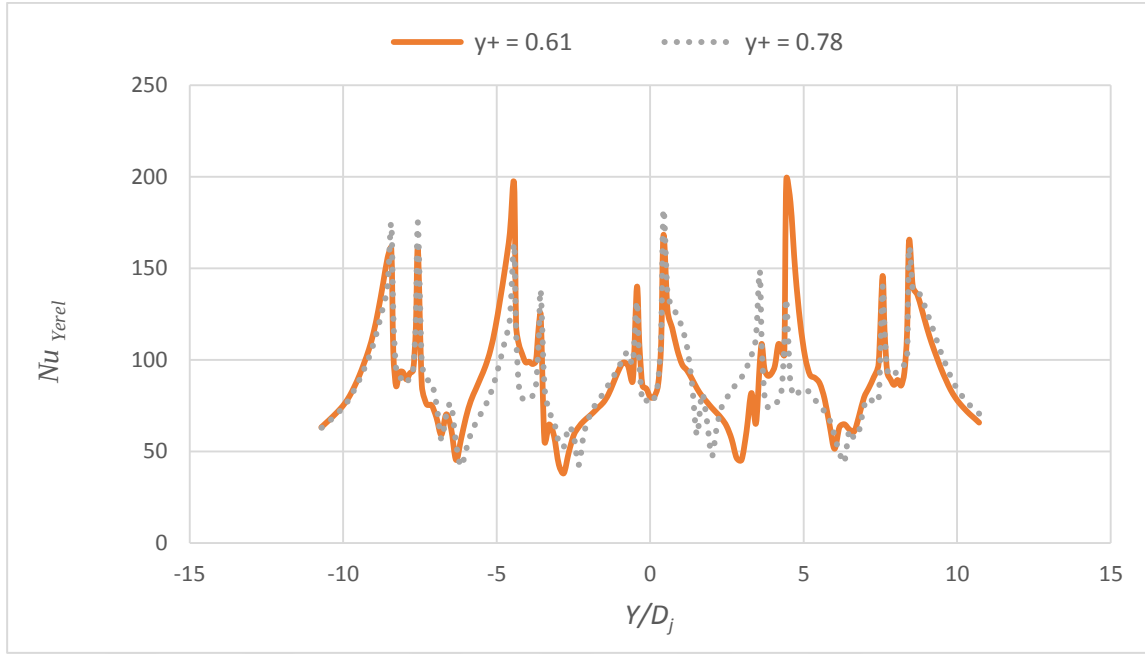
Şekil B10.6. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



Şekil B10.7. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



Şekil B10.8. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$



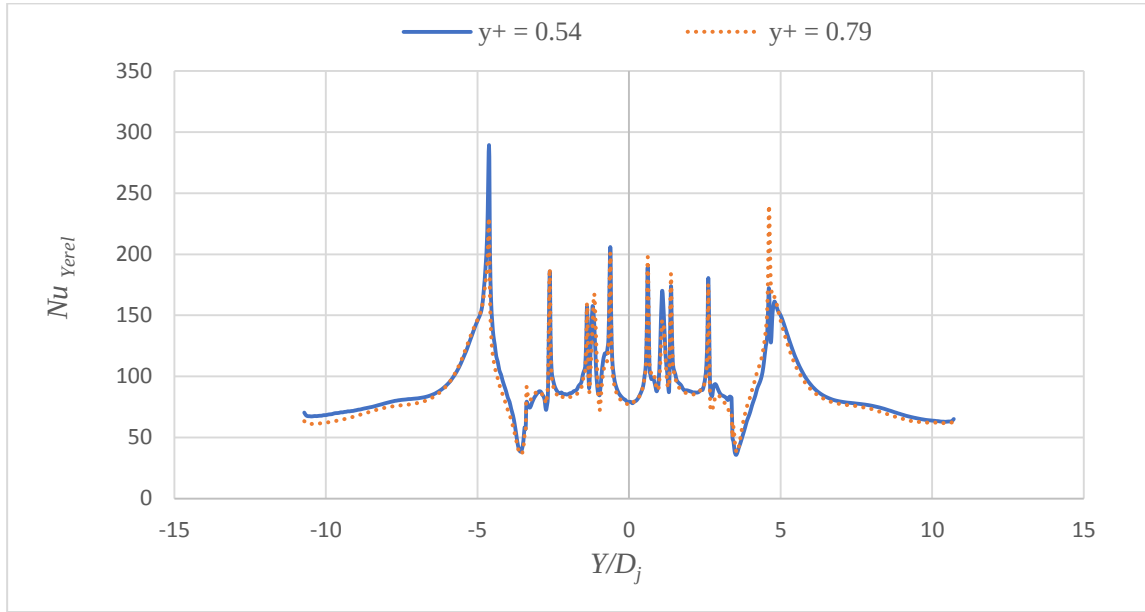
Şekil B10.9. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1$

Tablo B10.1. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akış, $D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$

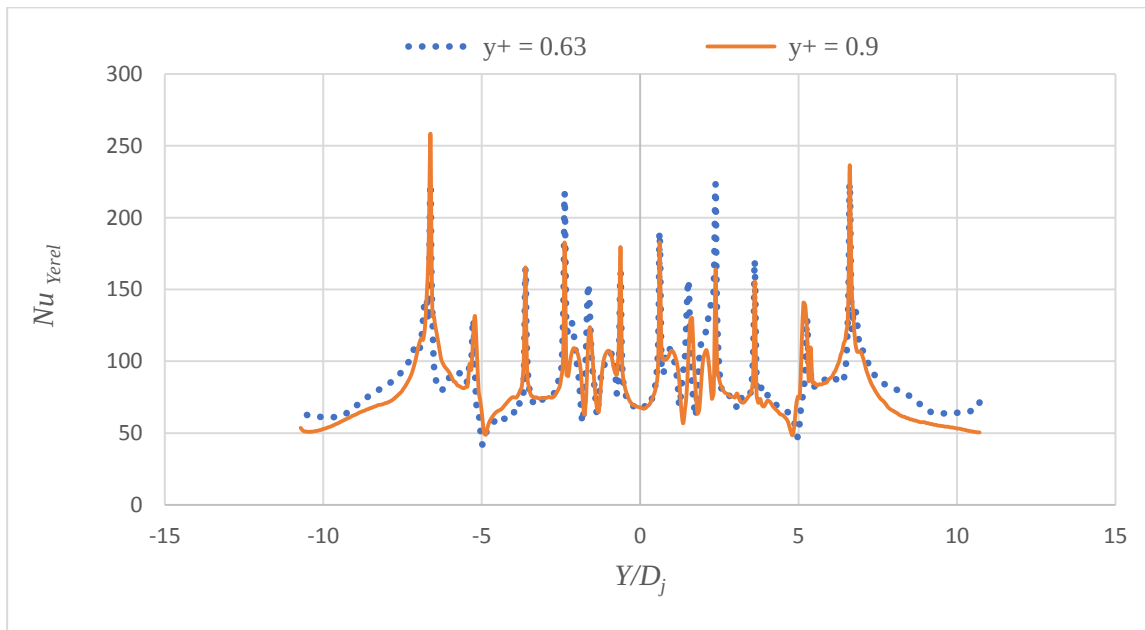
Minimum Çapraz Akış					
$D_d/D_j = 1$, $t/D_d = 0.25$, Çukur Şekilli Plaka, $Re = 20000$					Nu _{Ort} hata oranı (%)
$Z_n/D_j = 2$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.59	0.445	0,8
		Nu _{ort}	54,2	54,6	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.69	0.53	0,9
		Nu _{ort}	62,3	61,7	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	1.07	1.07	0,0
		Nu _{ort}	68,7	68,7	
$Z_n/D_j = 3$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.78	0.59	8,4
		Nu _{ort}	87,7	80,3	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.62	0.87	0,9
		Nu _{ort}	62,3	62,9	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.62	0.93	1,0
		Nu _{ort}	65,4	64,7	
$Z_n/D_j = 4$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.46	0.64	2,8
		Nu _{ort}	60,1	61,7	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.79	0.58	1,1
		Nu _{ort}	73,3	74,1	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.78	0.78	0,0
		Nu _{ort}	59,0	59,0	

Ek B11. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu,

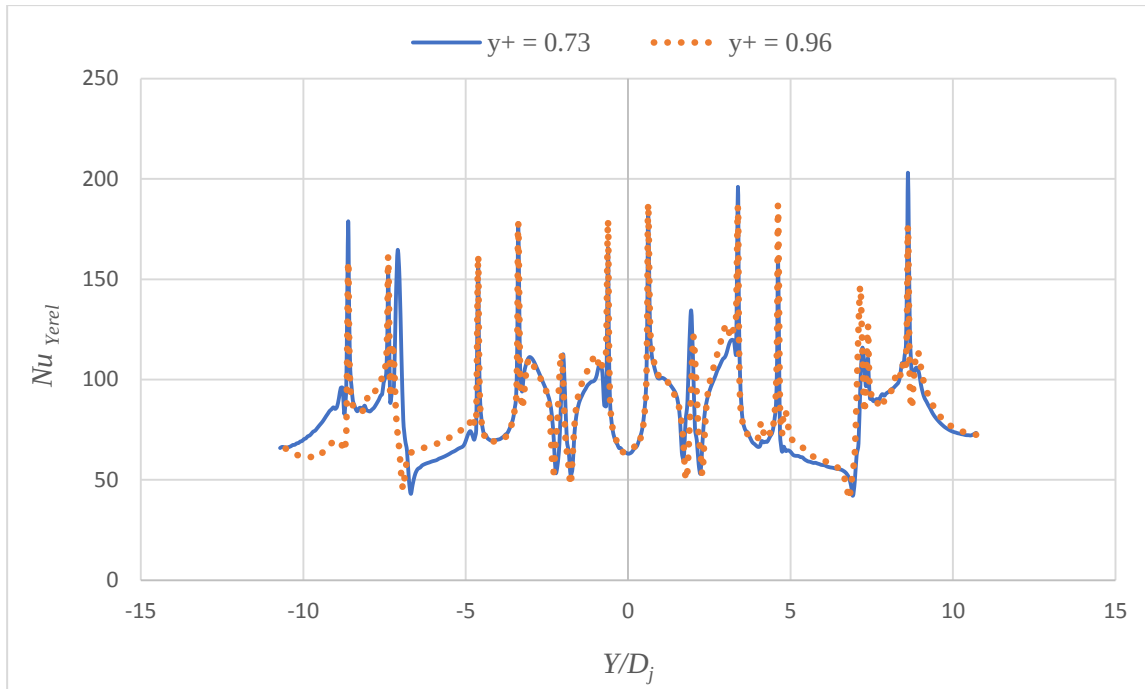
$Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



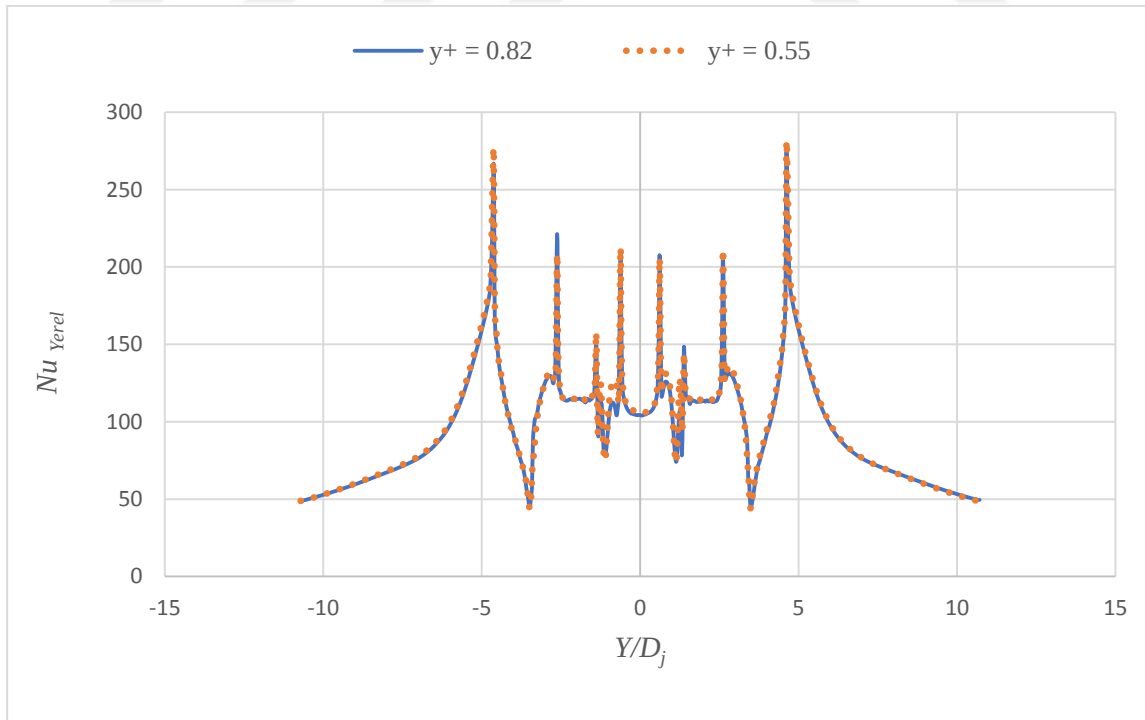
Şekil B11.1. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



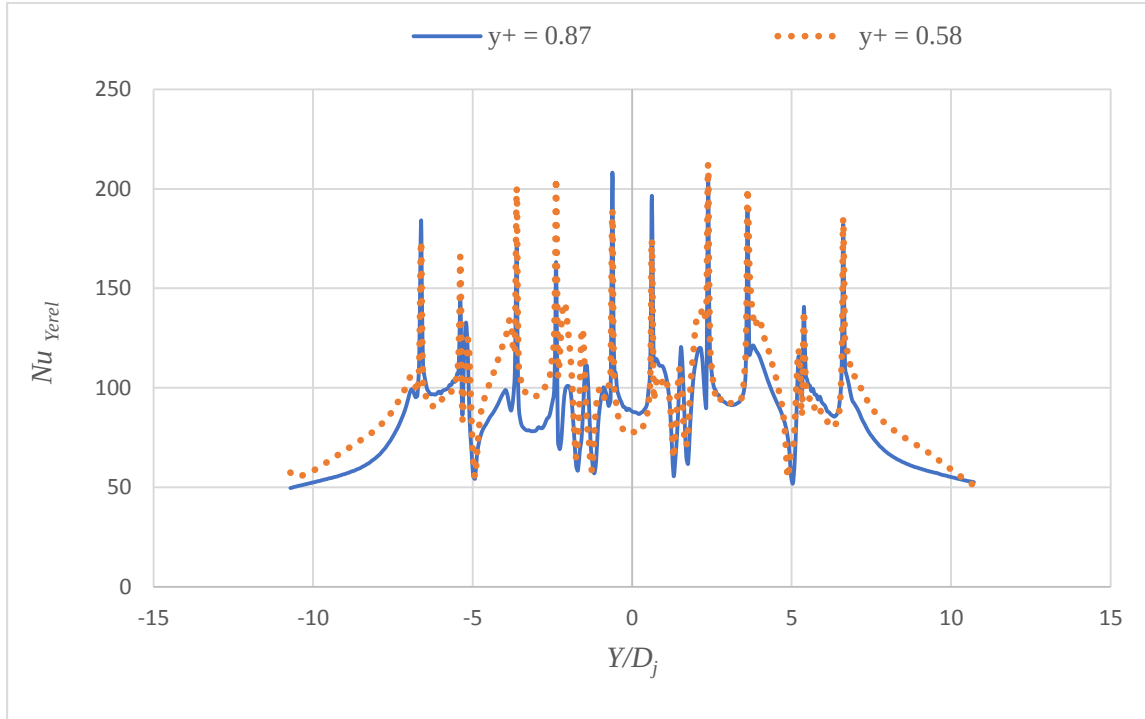
Şekil B11.2. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



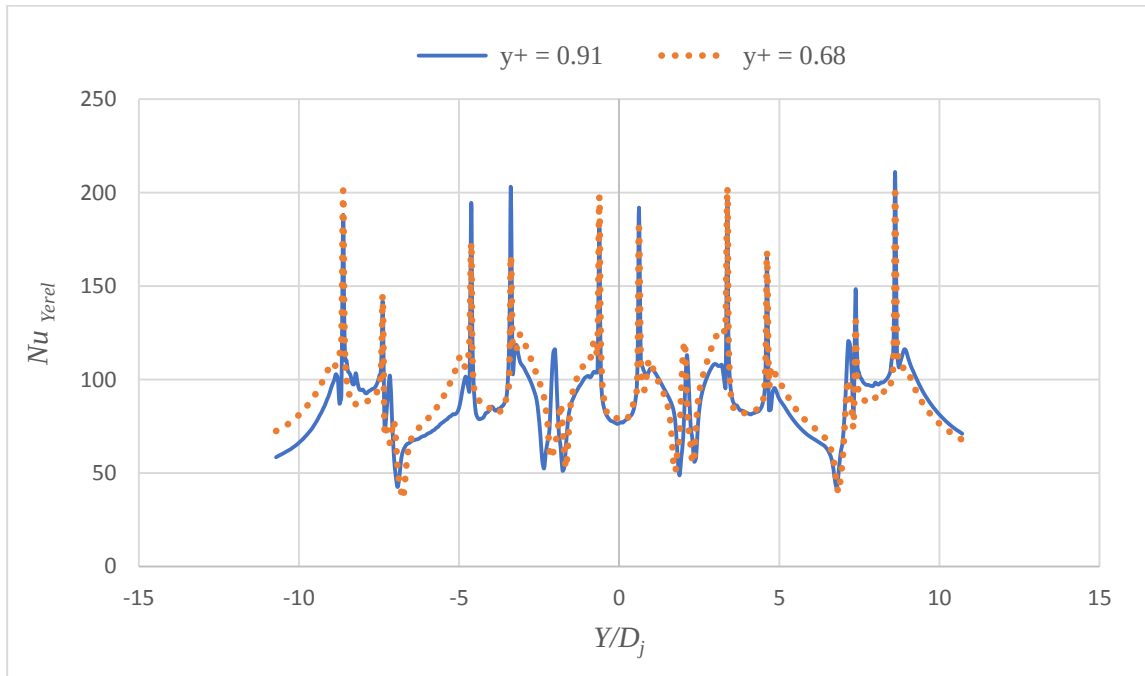
Şekil B11.3. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



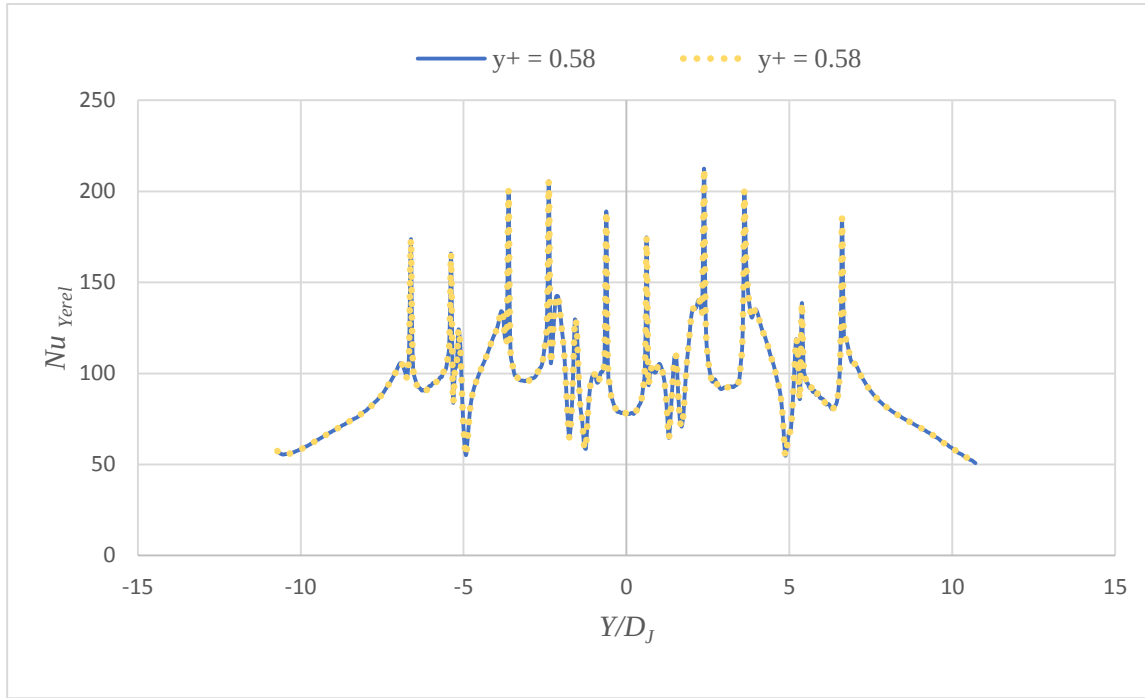
Şekil B11.4. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



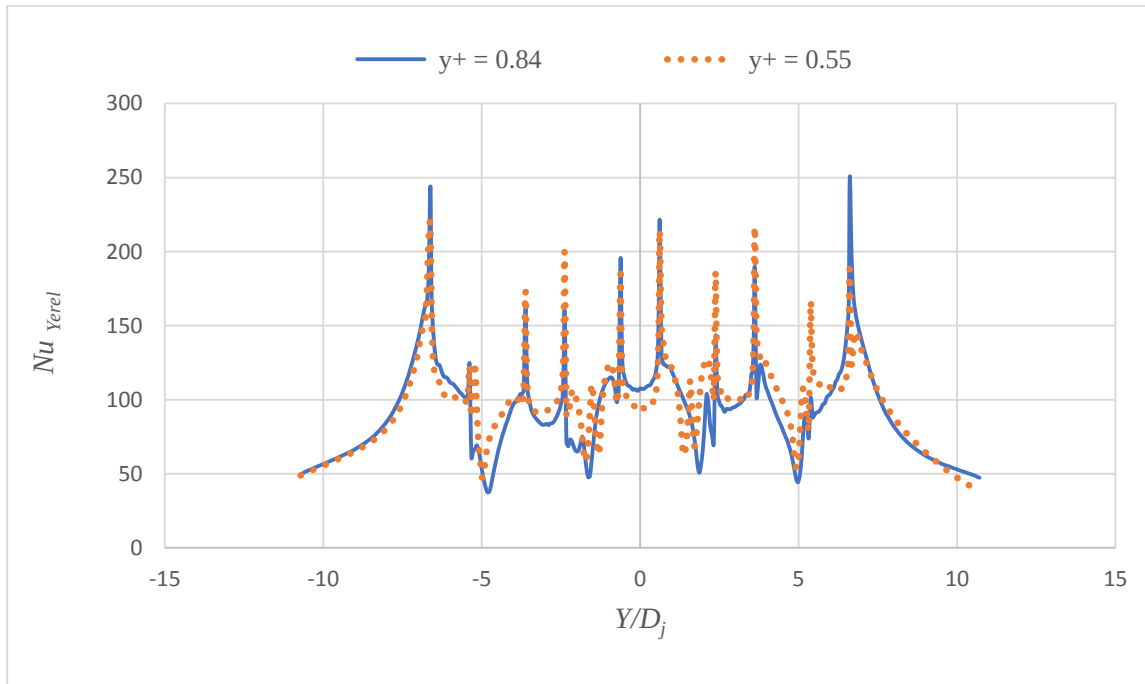
Şekil B11.5. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



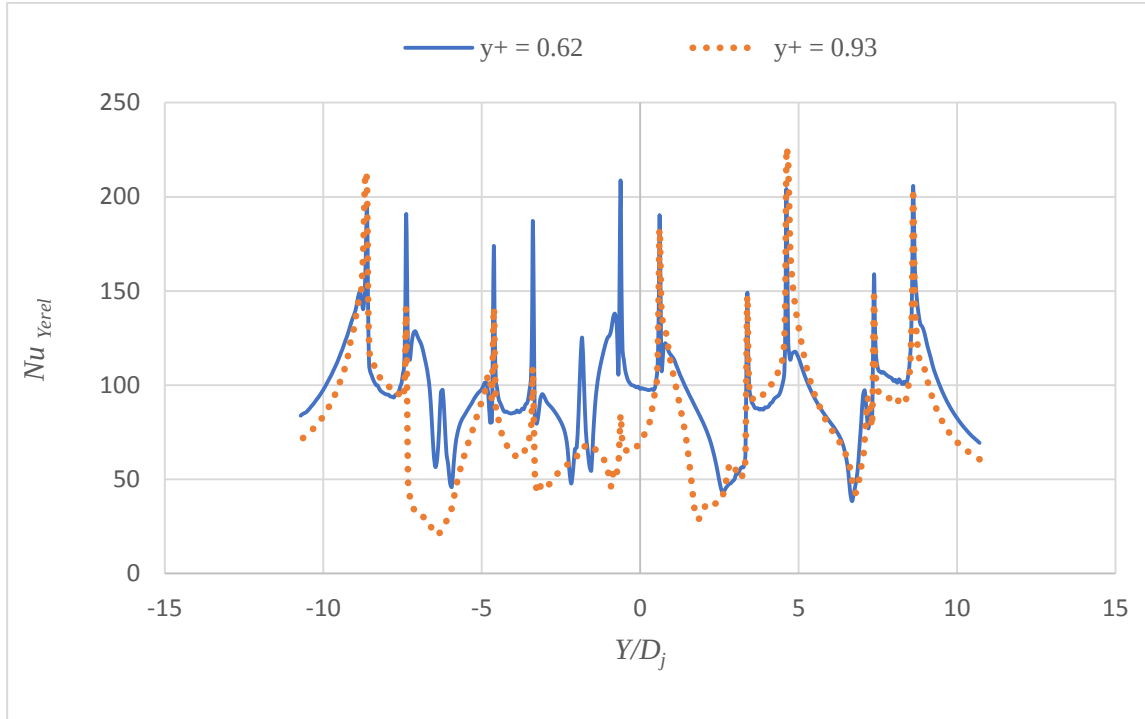
Şekil B11.6. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



Şekil B11.7. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



Şekil B11.8. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$



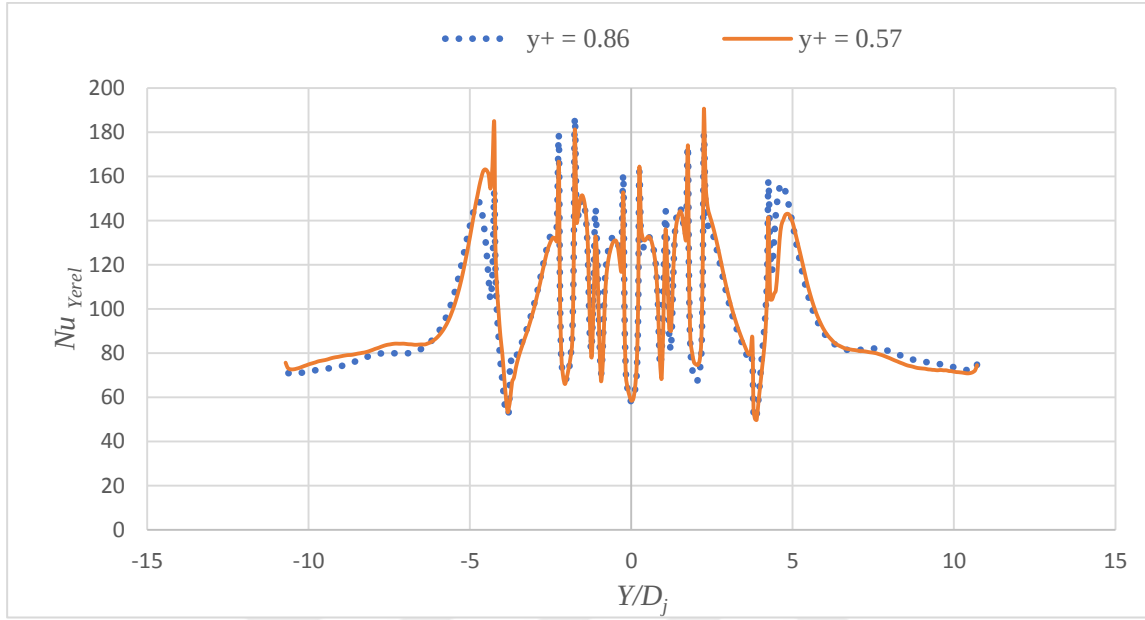
Şekil B11.9. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 1.43$

Tablo B11.1. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu

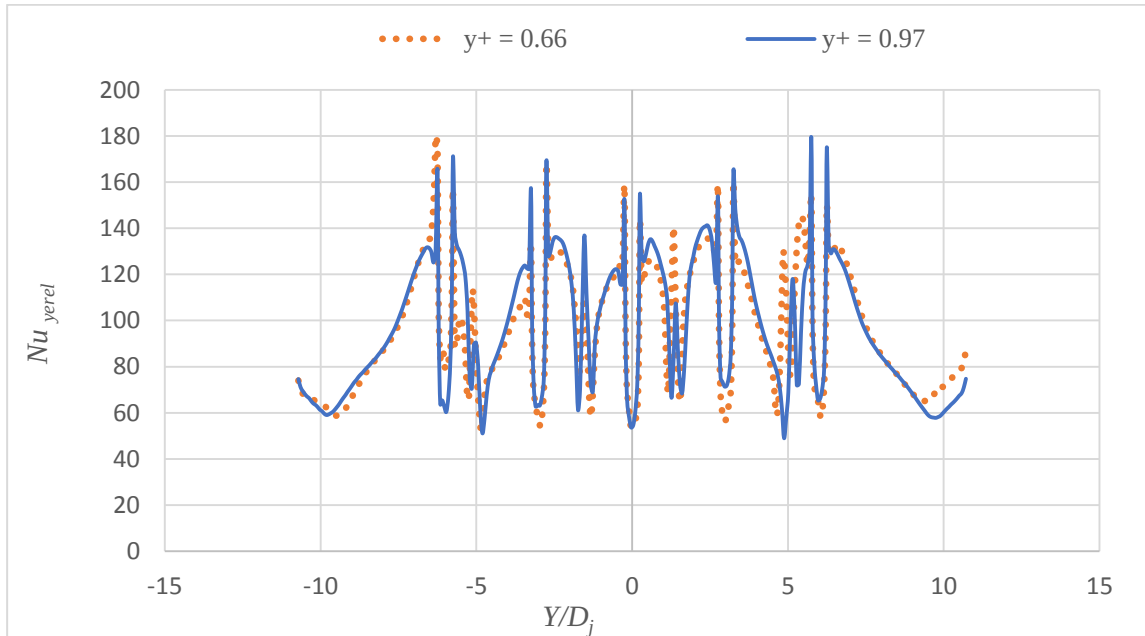
Çukur şekilli plaka, Minimum çapraz akış					
$D_d/D_j = 1.43$, $t/D_d = 0.25$, $Re = 20000$					Nu_{ort} hata oranı (%)
$Z_n/D_j = 2$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.54	0.79	7,8
		Nu_{ort}	70,9	65,4	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.63	0.9	3,6
		Nu_{ort}	62,9	60,6	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.73	0.73	0,0
		Nu_{ort}	74,9	74,9	
$Z_n/D_j = 3$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.82	0.55	1,5
		Nu_{ort}	102,6	101,0	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.87	0.58	1,9
		Nu_{ort}	62,3	63,5	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.91	0.68	2,2
		Nu_{ort}	73,3	74,9	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.55	0.84	10,1
		Nu_{ort}	74,9	67,3	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.62	0.62	0,0
		Nu_{ort}	74,1	74,1	

Ek B12. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu,

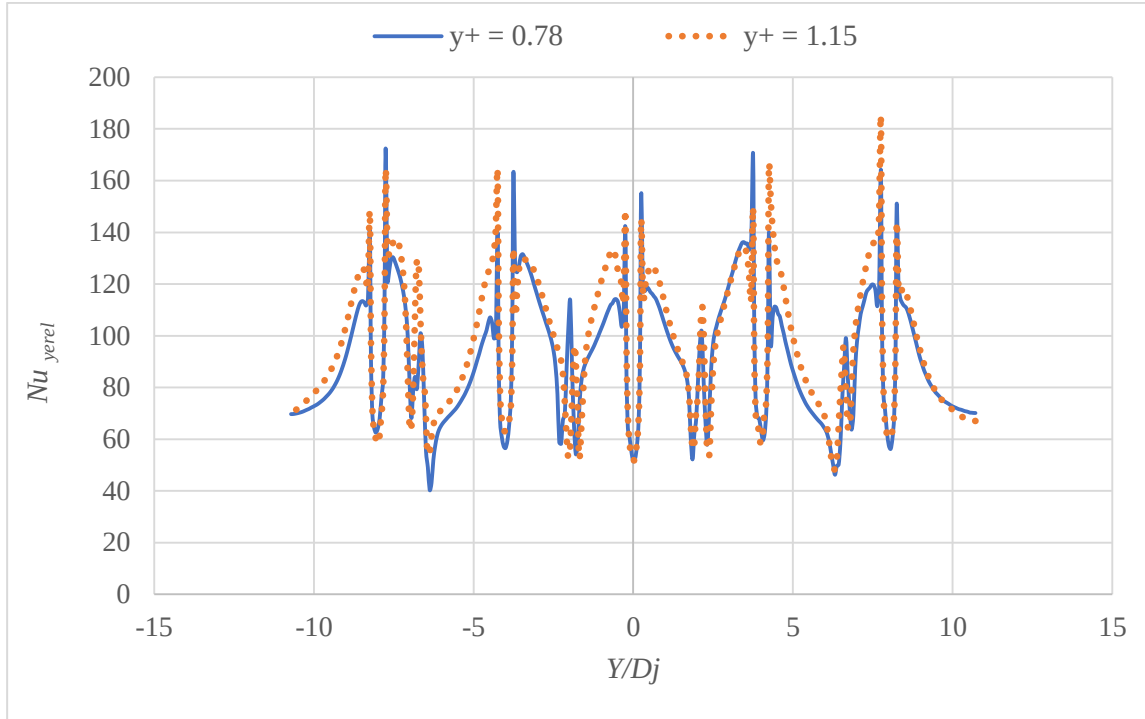
$Re = 20000$, $t/D_d = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



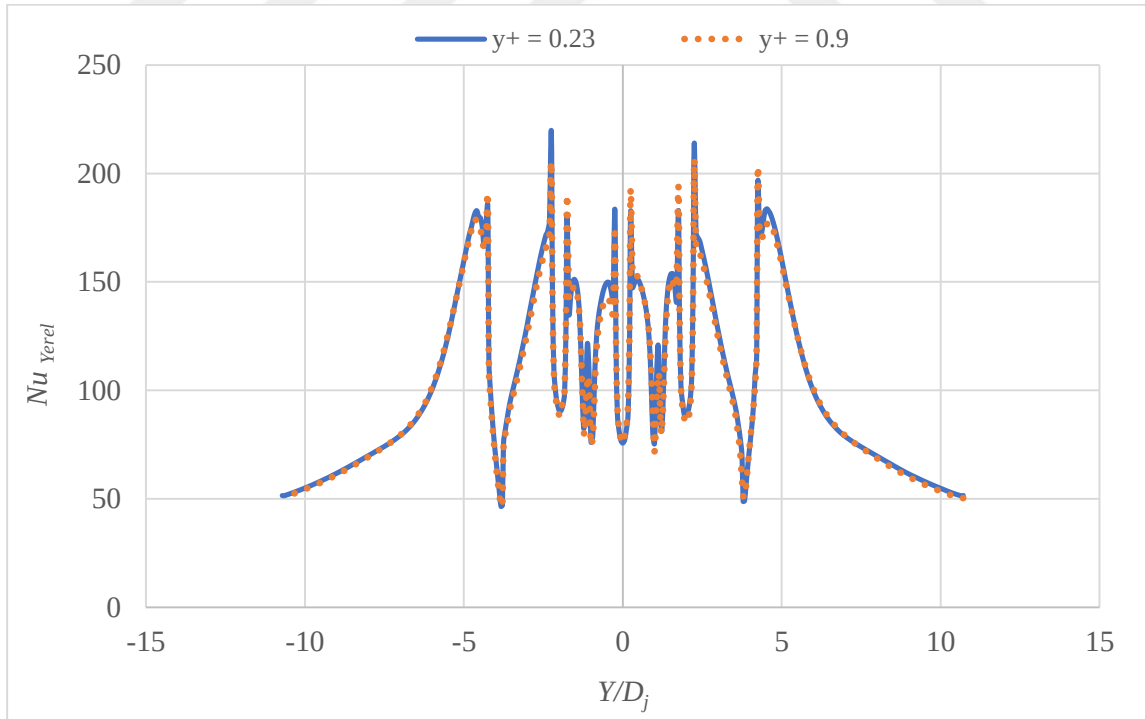
Şekil B12.1. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



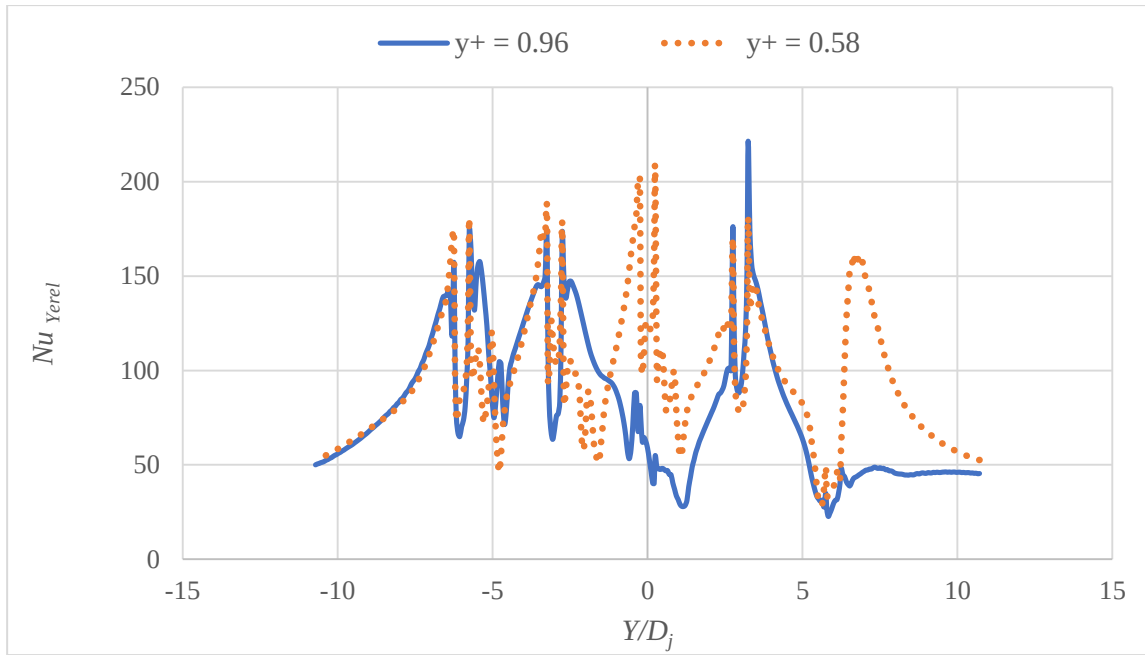
Şekil B12.2. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



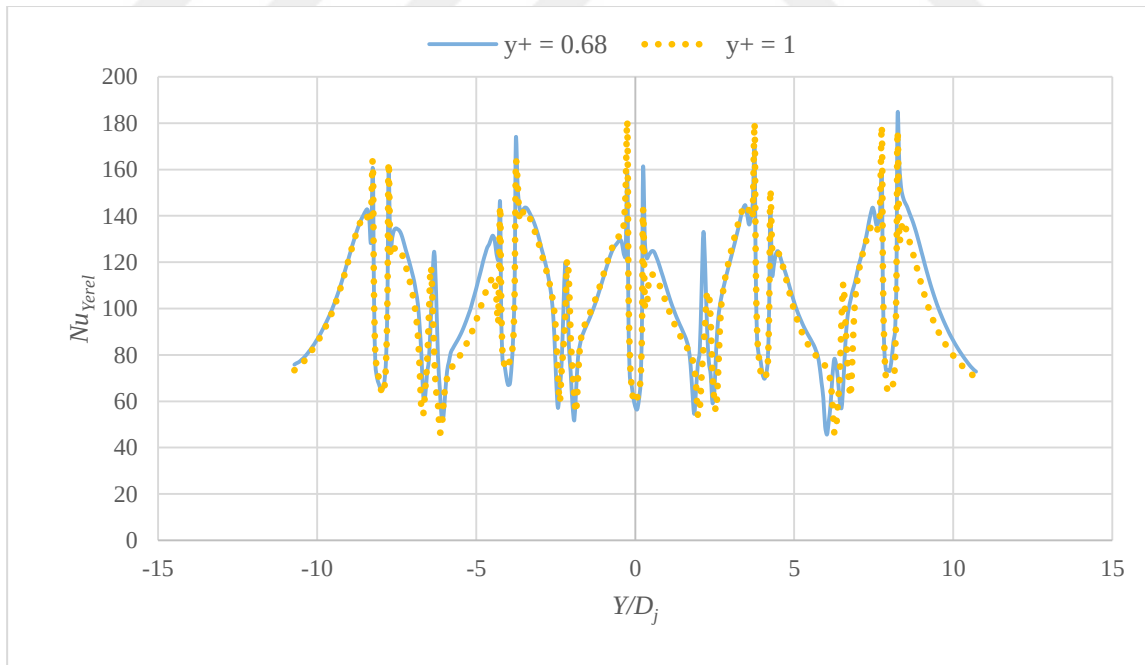
Şekil B12.3. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 2$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



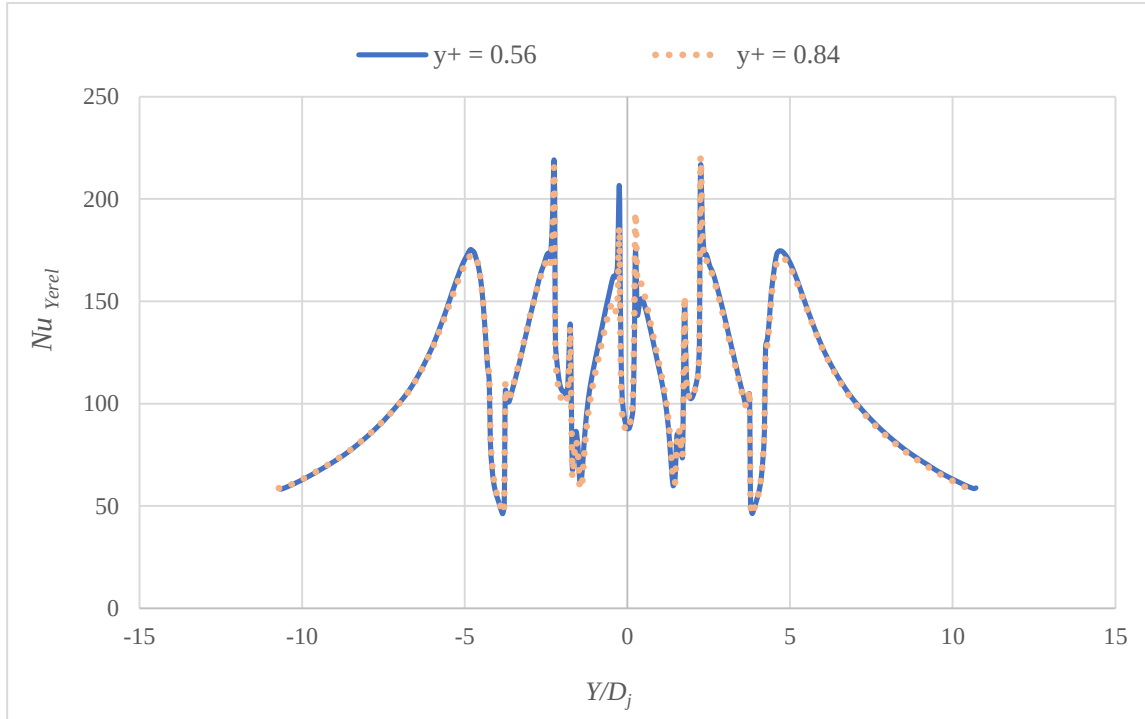
Şekil B12.4. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



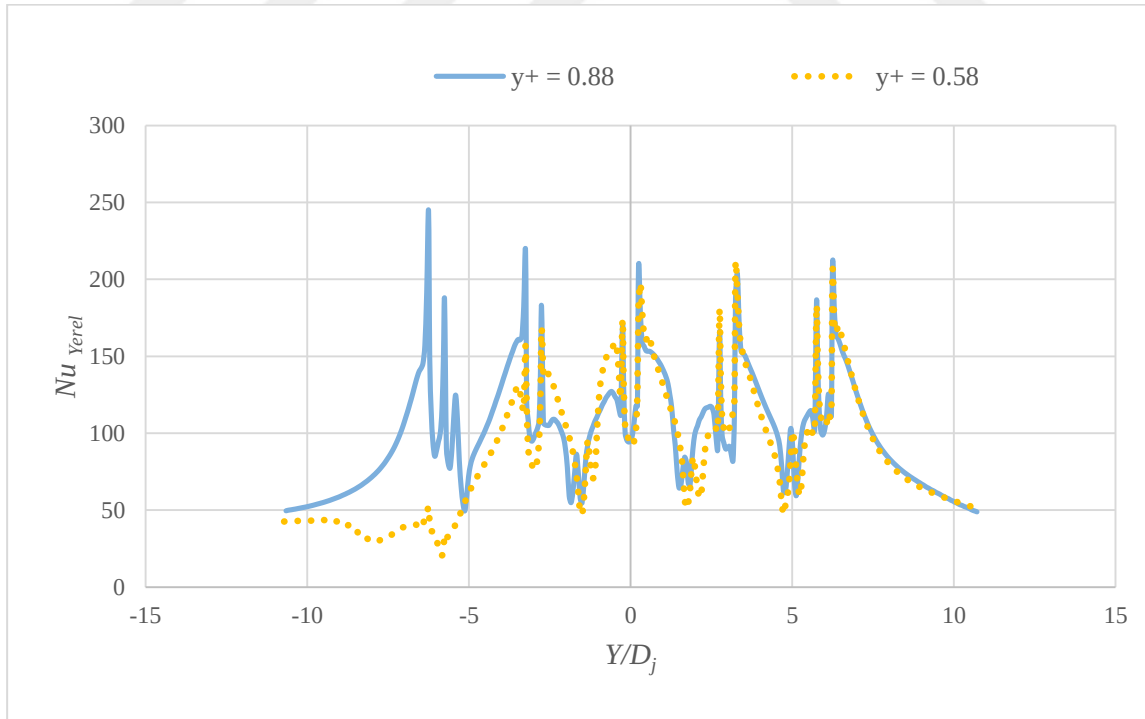
Şekil B12.5. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



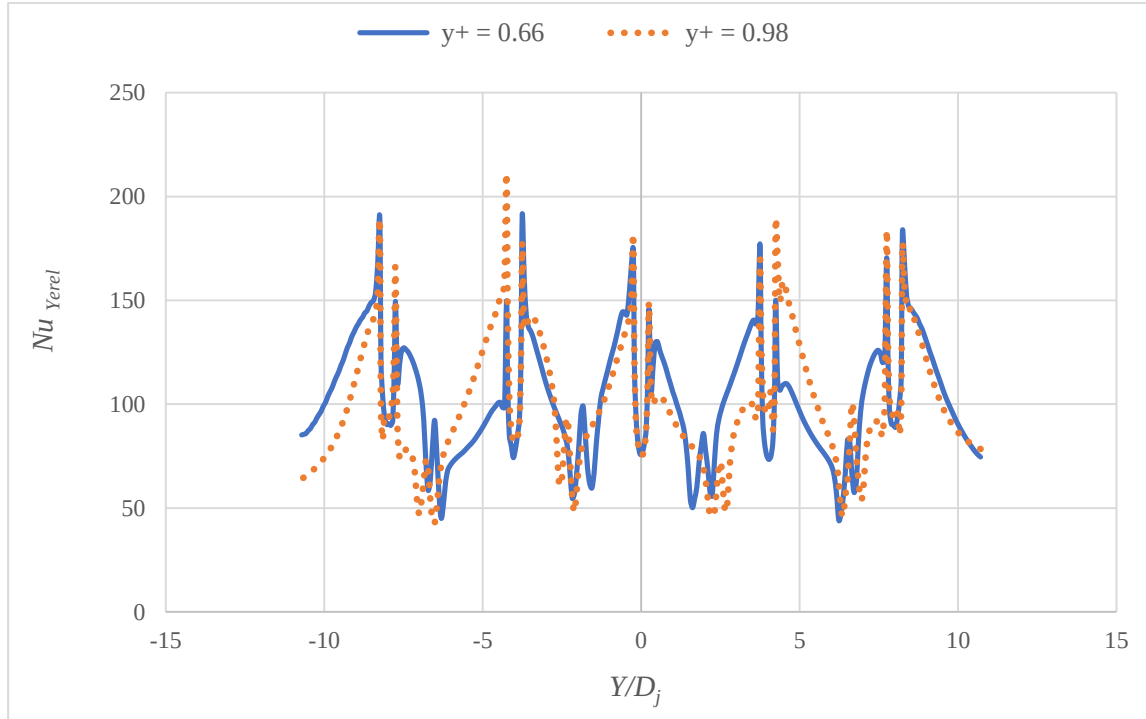
Şekil B12.6. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 3$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



Şekil B12.7. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 2$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



Şekil B12.8. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 3$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$



Şekil B12.9. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta ağ doğruluğu, $Z_n/D_j = 4$, $X_n/D_j = 4$, $Re = 20000$, $t/D_j = 0.25$, $D_d/D_j = 0.57$

Tablo B12.1. Çukur şekilli plakada minimum çapraz akışta alan ortalama Nusselt sayısı

Çukur şekilli plaka, minimum çapraz akış					
$D_d/D_j = 0.57$, $t/D_d = 0.25$, Çukur Şekli Plaka, $Re = 20000$					Nu _{Ort} hata oranı (%)
$Z_n/D_j = 2$	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.66	0.97	1.9
		Nu _{ort}	65.4	64.1	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.78	0.78	0.0
		Nu _{ort}	76.6	76.6	
$Z_n/D_j = 3$	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.96	0.58	0.0
		Nu _{ort}	70.2	70.2	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.68	1	4.5
		Nu _{ort}	78.4	74.9	
$Z_n/D_j = 4$	$X_n/D_j = 2$	y^+	0.56	0.84	5.8
		Nu _{ort}	136.1	128.2	
	$X_n/D_j = 3$	y^+	0.88	0.58	2.2
		Nu _{ort}	74.9	73.3	
	$X_n/D_j = 4$	y^+	0.66	0.66	0.0
		Nu _{ort}	74.1	74.1	

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Urfa’da doğdu. İlk ve ortaokulu Urfa Siverek’te, liseyi Ankara Halide Edip Lisesinde tamamladı. 2010 yılında Erciyes Üniversitesinde Makine Mühendisliği lisans bölümünden mezun oldu. 2012 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında tezli yüksek lisansa başladı. 2014 yılında yüksek lisansı tamamlayarak ilgili bölümden mezun oldu. Aynı yıl Bingöl Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde doktora programına kayıt yaptırdı. 2012 yılında Bingöl Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Termodinamik ve Enerji Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı.