



**DALDIRILMIŞ ÇARPAN EĞİK JETLERDE
KÜTLE TRANSFERİ**

Betül SOLAK

Yüksek Lisans Tezi

Temel İşlemler ve Termodinamik Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ

2017

Her Hakkı Saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DALDIRILMIŞ ÇARPAN EĞİK JETLERDEKÜTLE TRANSFERİ

Betül SOLAK

TEMEL İŞLEMLER VE TERMODİNAMİK ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2017**

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU



DALDIRILMIŞ ÇARPAN EĞİK JETLERDE KÜTLE TRANSFERİ

Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ danışmanlığında, Betül SOLAK tarafından hazırlanan bu çalışma, 09/02/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği / oy çokluğu~~ (3/3) ile kabul edilmiştir.

Başkan: Doç.Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ

İmza :

Üye : Yrd.Doç.Dr. Hakan TEMUR

İmza :

Üye : Yrd.Doç.Dr. Tuba YETİM

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **02.03/2017** tarih ve **..9...../..83.....** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DALDIRILMIŞ ÇARPAN EĞİK JETLERDE KÜTLE TRANSFERİ

Betül SOLAK

Atatürk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Temel İşlemler ve Termodinamik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ

Bu tez, bir jet hücresi içinde daldırılmış çarpan konvansiyonel jetin farklı açılarda konumlandırılan bir yüzeye çarptırılması durumunda gerçekleşen kütle transferi çalışmasını içermektedir. Daldırılmış çarpan jetlerin kullanıldığı akış ve kütle transferi çalışmaları, çarpma yüzeyi geometrisi, çarpma yüzeyi ile nozul arasındaki açı, jet akışının türbülanslık şiddetine, jet akış geometrisi, jet çıkışındaki hız profiline, jet ile çarpma yüzeyi arası mesafe vb. birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Deneyler, Re sayısının 5000 ile 40000, nozul ile çarpma yüzeyi mesafesinin 2-6, çarpma yüzeyi açısının 60° ile 90° aralığında ve 1692 Sc sayısında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çarpma yüzeyi üzerindeki lokal kütle transferi katsayıları elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akımı tekniği (ELDCT) kullanılarak belirlenmiştir.

Çarpma yüzeyi düzleminin nozul eksenine ile yaptığı açı 90° olan ilk durumda, çarpma yüzeyi üzerindeki gerçekleştirilen kütle transfer ölçümlerinin jet durgunluk noktası civarında bir maksimum verdiği tespit edilmiştir. Lokal kütle transfer katsayıları, radyal mesafedeki artışla azalmıştır. Jet Re sayısındaki artış lokal kütle transferi değerlerini artırdığı gözlenmiştir. Nozul-yüzey mesafesi 2'den 6'ya artırıldığında, tüm yüzey üzerinde kütle transfer katsayıları azalmıştır.

Çarpma yüzeyi düzleminin nozul eksenine ile dik açıdan farklı olan 60°, 70° ve 80°'lik açılarda konumlandırıldığı durumlarda, çarpma yüzeyi üzerinde kütle transferi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlere göre; açıdaki azalmayla birlikte maksimum kütle transferinin yeri, dik durumda (r/D)'nin sıfıra eşit olduğu geometrik jet durgunluk noktasından radyal yönde uzaklaşmıştır.

Açılı durumlarda yapılan deneyler, çarpma açısının azalması ile birlikte kütle transfer katsayılarının azaldığını göstermiştir. Maksimum lokal kütle transfer katsayılarının yeri, jet durgunluk noktasından itibaren duvar jet akışının hızının azalmadığı yönde değişmiştir. Lokal kütle transfer katsayıları kullanılarak lokal ve ortalama Sh sayıları hesaplanmıştır. Ortalama Sh sayıları, lokal değerlerin integrasyonu ile hesaplanmıştır. Ortalama Sh sayıları, jet Re sayılarının nozul-yüzey mesafesi ve çarpma açısının fonksiyonu olarak korele edilmiş ve aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir:

$$Sh = 0,033(Re^{0,78}) \left(\frac{H}{d}\right)^{-0,50} (\theta^{0,51})(Sc^{0,33})$$

Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlarla literatür sonuçlarının kıyaslanması sonunda aralarında iyi bir uyum olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak daldırılmış yüzeyle dik açı yapacak şekilde konumlandırılan jet akışı durumunda jet durgunluk noktası civarında yüksek kütle transferi katsayıları elde edilmiştir. Fakat jetin yüzey düzlemi ile açılı olarak konumlandırıldığı durumlarda kütle transferi katsayıları (r/D)=0'a göre simetrik olmayıp bu noktadan radyal yöndeki bir tek bölgede yüksek kütle transferi katsayıları verdiği gözlenmiştir.

2017, 99 sayfa

Anahtar Kelimeler: Daldırılmış çarpan jet, elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akım tekniği, kütle transfer katsayısı.

ABSTRACT

Master Thesis

MASS TRANSFER IN SUBMERGED IMPINGING OBLIQUE JET

Betül SOLAK

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
The Department of Unit Operations and Thermodynamics

Supervisor: Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ

This study includes the study of mass transfer in which a submerged impinging jet positioned at different angles to a target surface in the cell. The flow and mass transfer studies using submerged impinging jets depend on target surface geometry, the angle between the nozzle and the target surface, turbulent flow intensity, the geometry of jet flow, the velocity profile at the exit of nozzle. Experiments were carried out Reynolds number intervals between 5000 and 40000, in the range of (H/d) between 2 and 6, in the range of the angles 60°-90° and at the Sc number of 1692. Local mass transfer coefficients on the target surface were determined using the electrochemical limiting diffusion current technique (ELDCT).

When it is 90° the angle of impact in the first case, the jet impact on the surface mass transfer measurements performed in the vicinity of the stagnation point of a maximum is determined to give. Local mass transfer coefficients decreased with the increase in radial distance. It was observed that the increase in the Re numbers increased the local mass transfer values. The distance between the nozzle and the impact surface is increased from 2 to 6, over the entire surface mass transfer coefficient decreased. Impact surface of the nozzle axis with the plane of 60°, 70° and 80° are located as in cases where the impact on the surface mass transfer measurements were carried out. According to these measurements, the maximum mass transfer position on the surface was moved from the geometric stagnation point where the value of (r/D) is equal to zero to the radial direction.

Local and average mass transfer coefficients by using local Sh numbers were calculated. The average sh numbers were calculated by integration of the local values. The average sh numbers, the number of jet Re nozzle-to-surface distance and the angle of impact has been correlated as a function of the following equation has been obtained:

$$Sh = 0,033(Re^{0,78}) \left(\frac{H}{d}\right)^{-0,50} (\theta^{0,51})(Sc^{0,33})$$

A comparison of the results of the present study the results obtained from the literature, it was observed that a good fit between them at the end. As a result, is positioned at an angle perpendicular to the surface submerged, and the jet stream around the jet stagnation of the notes in the case of high mass transfer coefficients were obtained. But in cases where the impinging angle is different from the distribution of mass transfer coefficients of 90° with respect to (r/D)=0 is not symmetric, and the maximum mass transfer obtained in an area away from this point.

2017, 99 pages

Keywords: Immersed jet, Electrochemical limiting current technique, mass transfer coefficient.

TEŞEKKÜR

Bu tez, doğrudan veya dolaylı birçok kiŐinin emeğinin bir sonucudur. En başta, bana deneysel ve teorik çalışmanın inceliklerini sabırla öğreten, bu konudaki birikimini cömertçe paylaŐan, tezin her aŐamasında bana destek olan tez danıŐmanım Sayın Doç.Dr. M. Emin ARZUTUĞ'a çok teşekkür ederim.

ÇalıŐmamızın değişik aŐamalarında, okul, laboratuvar ve atölyede kendi yoğunluklarına rağmen bana hep zaman ayıran arkadaŐlarım Uğur KAHRAMAN, Kader ÇALIŐKAN'a, değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ferhet BÜLBÜL'e çok teşekkür ederim.

Betül SOLAK

Őubat, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ ve KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1. Çarpan Jetler ve Kullanım Alanları.....	4
2.2. Çarpan Jetlerle İlgili Hidrodinamik Çalışmalar	8
2.3. Çarpan Jetlerle İlgili Isı ve Kütle Transferi Çalışmaları	11
2.4. Eğik Jetlerle İlgili Çalışmalar.....	15
2.5. Kütle Transfer Katsayısı Ölçümü Tekniği (Elektrokimyasal Sınırlayıcı Difüzyon Akımı Tekniği)	33
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	40
3.1. Genel Deney Düzenegi.....	40
3.2. Elektrolit Çözeltisi Özellikleri ve Konsantrasyon Tayini	45
3.3. Elektrolit Çözeltisinin Fiziksel Özellikleri.....	48
3.4. Lokal Katotların Kalibrasyonu	49
3.5. Sınırlayıcı Akım Tespiti	49
3.6. Elektrot Alan Tayini	51
3.7. Sıcaklık Kalibrasyonu	53
3.8. Parametreler ve Deney Prosedürü	53
4. ARAŞIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	55
4.1. Nozul Reynolds Sayısı (Re) Parametresi	55
4.2. Nozul-Çarpma Yüzeyi Arası Açığı (θ) Parametresi.....	67
4.3. Boyutsuz Nozul-Çarpma Yüzeyi Mesafesi (H/d) Parametresi.....	77
4.4. Re - (H/d) – θ Parametreleri ile Sherwood Sayısı (Sh) Arasındaki İlişki	88
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	93

5.1. Sonuçlar.....	93
5.2. neriler.....	94
KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ	100



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Aktif elektrot yüzey alanı
C_{∞}	Reaksiyon veren türler için sıvı yığın konsantrasyonu (mol/m^3)
C_s	Reaksiyon veren türler için yüzey konsantrasyonu (mol/m^3)
D	Difüzyon kat sayısı (m^2/s)
dj	Jet çapı (m)
d	Ana katot disk çapı (m)
F	Faraday sabiti (96485 C/mol)
H	Jet çıkışı ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafe (m)
Ilim	Elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akımı (A)
k	Kütle transfer katsayısı (m/s)
n	Elektrokimyasal reaksiyon için elektron sayısı
R	Ana katot yarıçapı (m)
r	Disk yüzeyi üzerindeki radyal yöndeki mesafe (m)
V	Nozuldaki akış hızı (m/s)
Θ	Katot yüzeyi ve nozul çıkışı arasındaki açı

Kısaltmalar

Re	Jet Reynold sayısı ($d_j U_m \rho / \mu$)
Sc	Schmidt sayısı ($\mu / \rho D$)
Sh	Sherwood sayısı ($k d_j / D$)
Nu	Nusselt sayısı ($h d_j / k_f$)
H/d	Boyutsuz nozul –jet çarpma yüzeyi mesafesi
r/d	Boyutsuz çarpma yüzeyi mesafesi
ELDCT	Elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akımı tekniği

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Çarpan jetin akış bölgeleri	4
Şekil 2.2. Serbest jetin akış bölgeleri	6
Şekil 2.3. Daldırılmış çarpan jet akış profili	9
Şekil 2.4. Daldırılmamış çarpan jet akış profili	9
Şekil 2.5. Dik çarpan jetler	10
Şekil 2.6. Eğik çarpan jetler	10
Şekil 2.7. Sınırlayıcı akım grafiği	39
Şekil 3.1. Deneysel sistem, akış hatları ve elektriksel bağlantılar	41
Şekil 3.2. Deneysel sistem ve çarpan jet sistemi	42
Şekil 3.3. Jet çarpma yüzeyi ve çarpma yüzeyinin açılı olmasını sağlayan düzenek	43
Şekil 3.4. Veri okuma kartı ile bağlantı sağlayan kablo hattı ve soketler	43
Şekil 3.5. Veri okuma kartı ile bağlantılı çalışan direnç köprüsü	44
Şekil 3.6. Çarpma yüzeyi üzerinde nikel lokal elektrotların dizilişi	45
Şekil 3.7. 20 kat seyreltilmiş ferrisiyanür standart çözeltileri için elde edilen absorbans eğrisi	47
Şekil 3.8. Durgun ve akış olan şartlarda elde edilen polarizasyon eğrileri	49
Şekil 3.9. Sıcaklık Kalibrasyonu	53
Şekil 4.1. $(H/d)=2$ 'de 60° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi	55
Şekil 4.2. $(H/d)=4$ 'te 60° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi	57
Şekil 4.3. $(H/d)=6$ 'da 60° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi	58
Şekil 4.4. $(H/d)=2$ 'de 70° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısı üzerine etkisi	59
Şekil 4.5. $(H/d)=4$ 'te 70° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi	60

Şekil 4.6. (H/d)=6’da70°çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi.....	61
Şekil 4.7. (H/d)=2’de80°çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi.....	62
Şekil 4.8. (H/d)=4’te80°çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi.....	63
Şekil 4.9. (H/d)=6’da80°çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi.....	64
Şekil 4.10. (H/d)=2’de90°çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi.	64
Şekil 4.11. (H/d)=4’te90°çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi	65
Şekil4.12. (H/d)=6’da90°çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi	66
Şekil 4.13. (H/d)=2’de ve Re=5000’de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	67
Şekil 4.14. (H/d)=2’de ve Re=10000’de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	68
Şekil 4.15. (H/d)=2’de ve Re=20000’de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	69
Şekil 4.16. (H/d)=2’de ve Re=30000’de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	69
Şekil 4.17. (H/d)=2’de ve Re=40000’de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	70
Şekil 4.18. (H/d)=4’te ve Re=5000’de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	71
Şekil 4.19. (H/d)=4’te ve Re=10000’de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	72
Şekil 4.20. (H/d)=4’te ve Re=20000’de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	72

Şekil 4.21. (H/d)=4'te ve Re=30000'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	73
Şekil 4.22. (H/d)=4'te ve Re=40000'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	73
Şekil 4.23. (H/d)=6'da ve Re=5000'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	74
Şekil 4.24. (H/d)=6'da ve Re=10000'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	74
Şekil 4.25. (H/d)=6'da ve Re=20000'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	75
Şekil 4.26. (H/d)=6'da ve Re=30000'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	75
Şekil 4.27. (H/d)=6'da ve Re=40000'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi	76
Şekil 4.28. $\theta=60^\circ$ 'de ve Re=5000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	77
Şekil 4.29. $\theta=60^\circ$ 'de ve Re=10000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	78
Şekil 4.30. $\theta=60^\circ$ 'de ve Re=20000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	79
Şekil 4.31. $\theta=60^\circ$ 'de ve Re=30000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	79
Şekil 4.32. $\theta=60^\circ$ 'de ve Re=40000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	80
Şekil 4.33. $\theta=70^\circ$ 'de ve Re=5000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	80
Şekil 4.34. $\theta=70^\circ$ 'de ve Re=10000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	81
Şekil 4.35. $\theta=70^\circ$ 'de ve Re=20000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	81
Şekil 4.36. $\theta=70^\circ$ 'de ve Re=30000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	82
Şekil 4.37. $\theta=70^\circ$ 'de ve Re=40000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	82
Şekil 4.38. $\theta=80^\circ$ 'de ve Re=5000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	83
Şekil 4.39. $\theta=80^\circ$ 'de ve Re=10000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	83
Şekil 4.40. $\theta=80^\circ$ 'de ve Re=20000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	84
Şekil 4.41. $\theta=80^\circ$ 'de ve Re=30000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	84
Şekil 4.42. $\theta=80^\circ$ 'de ve Re=40000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	85
Şekil 4.43. $\theta=90^\circ$ 'de ve Re=5000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	85
Şekil 4.44. $\theta=90^\circ$ 'de ve Re=10000'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	86

Şekil 4.45. $\theta=90^\circ$ 'de ve $Re=20000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	86
Şekil 4.46. $\theta=90^\circ$ 'de ve $Re=30000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	87
Şekil 4.47. $\theta=90^\circ$ 'de ve $Re=40000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi.....	87
Şekil 4.48. $\theta=90^\circ$ ve $(H/d)=2$ şartlarında Re sayısı değişiminin Sh üzerine etkisi (Mevcut çalışma).....	88
Şekil 4.49. Farklı (x/B) boyutsuz radyal mesafe değerlerinde Re sayısının Sh üzerindeki etkisi[60].....	89
Şekil 4.50. $\theta=90^\circ$ 'de ve $Re=5000$ 'de (H/d) 'nin Sh üzerine etkisi.....	89
Şekil 4.51. $Sh-(H/d)$ oranı arasındaki bağıntı [67].....	90
Şekil 4.52. $Re=5000$ 'de ve $(H/d)=2$ 'de çarpma θ 'nın Sh 'a etkisi.....	90
Şekil 4.53. Nu sayısı ve Açık arasındaki bağıntı [58].....	91
Şekil 4.54. Sherwood (Sh)değerleri için genel kütle transferi korelasyonu.....	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. 20°C’de elektrolite ait fiziksel özellikler.....	48
Çizelge 3.2. Elektrot alanları hesaplama tablosu.....	52
Çizelge 3.3. Çalışma parametreleri.....	54



1. GİRİŞ

Genellikle endüstriyel sistemler zorlamalı konveksiyonlu ısı ve kütle aktarımı mekanizmalarına dayanmaktadır. Bu sistemlerdeki konvektif kütle, ısı ve momentum transferi hızlarının geliştirilmesi bu sistemlerin verimlerini ve etkinliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu amaçla kullanılan birçok teknik bilinmekte ve uygulanmaktadır. Bu teknikler aktif ve pasif teknikler olarak iki ana grupta toplanabilirler. Aktif tekniğin kullanıldığı sistemlerde, sisteme dışarıdan ekstra bir güç verilmek suretiyle ısı ve kütle transferi artırılmaya çalışılır. Pasif teknikler ise sisteme dışarıdan bir ilave güç gerektirmediği için daha avantajlıdır ve ekonomiktir. Aktarım sistemlerinin mekanizması içinde bazı akışkan ile transfer yüzeyinin temasını artıran bazı cisimlerin akışkan içine yerleştirilmesi ile ısı ve kütle transferi iyileştirilmektedir. Bu amaçla, sistemlerin içerisine swirl jeneratörü, helisel yay, pervane, çeşitli geometrilere türbülötörler yerleştirilmesi transfer olayını hızlandıran pasif teknikler olarak bilinirler. Pasif tekniklerin işletilmesi bir dış güç gerektiren aktif tekniklere göre daha ekonomik olduğu için endüstriyel uygulamalarda genellikle pasif teknikler tercih edilmektedir. Pasif tekniklerden olan daldırılmış çarpan jetler, bir hedef yüzey ile jet akışı arasında yüksek ısı-kütle transfer hızları sağlaması nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tekniğin kullanıldığı birçok akademik ve endüstriyel çalışma mevcuttur.

Daldırılmış ve daldırılmamış çarpan jetler; elektrolitik kaplama, tekstil sanayisinde, metallerin ısı işlemlerinde, boyama püskürtme sistemlerinde, püskürtmeli yazıcılarda, özellikle yüksek ısı akışıyla soğutma gerektiren elektronik devreler, güç santralleri gibi sistemlerde, gaz-sıvı temas sistemlerinde, yanma sistemlerinin yakıt hazırlama ünitelerinde ve yanma odalarının girişinde vb. birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Çarpan hava jeti uygulamaları, elde edilen yerel ısı transferi miktarları bakımından havayla zorlanmış taşınımın üst limitini oluşturmaktadır. Bu sebeple çarpan hava jetlerinin elektronik elemanların soğutulmasına yönelik uygulamaları büyük önem

taşımaktadır. Elektronik sistemlerin verimini etkileyen en önemli faktör çalışma sıcaklıklarıdır. Çalışma sıcaklığına bağlı olarak ortaya çıkan ısıl gerilmeler elektronik sistemlerin bozulmasının ve verimlerinin düşmesinin ana sebebidir. Sistemde çok ısınan elemanların tek çarpan jet ile soğutulması veya bütün devrenin jet dizileriyle soğutulması, elektronik sistemlerin korunması için önemli bir uygulama haline gelmiştir.

Nozul kesiti silindirik geometriye sahip olan çarpan jetler ısı-kütle transfer hızlarında önemli artışlar elde edildiğini göstermiştir [1,2,3]. Çarpan jetlerin endüstriyel uygulamaları birçok akışkan akışı ve ısı –kütle transfer hızları ile alakalı önemli çalışmaların sebep olmuştur. Birçok araştırmacı bir düz yüzey üzerine dik çarpan dairesel jet ile ilgilenmiştir. Eğik çarpan jetler uygulamada çok sık rastlanmasına rağmen daha az araştırma konusu olmuştur. Bu yüzden dik çarpan jet ile eğik çarpan jet çalışması hem eğik çarpan jetin özelliklerini hem de düz jete göre avantaj veya dezavantajlarını görmek için yapılmıştır.

Çarpan jetlerin ısı, kütle ve akış hidrodinamiği üzerindeki etkileri, nozul geometrisi, jet çıkış hız profili, jet-çarpma yüzeyi arası mesafe, jet akışının türbülanslık derecesi ve çarpma yüzeyi geometrisine bağlı olarak değişmektedir.

Bu çalışmada elektrokimyasal difüzyon akımı tekniği (ELCDT) kullanılacaktır. Bu teknik bir katı-sıvı temas yüzeyindeki kütle, ısı aktarım hızının ve kesme geriliminin hem lokal hem de ortalama değerlerini ölçmek amacıyla kullanılabilir. Bu tekniğin kullanılmasının en önemli nedeni, bir elektriksel alan içindeki kütle transferi karakteristiklerinin mevcut akış şartlarında bulunmasına imkan sağlamasıdır.

Mevcut çalışmanın amacı, eğik jetlerin ve yüzeye dik çarpan jetin kütle (ısı) transferi üzerinde herhangi bir etkisinin olup olmadığının belirlenmesidir. Bu amaçla farklı Reynolds sayılarında (5000 ile 40000), (H/d) 'nin 2 ile 6 aralığında değiştiği farklı boyutsuz jet çarpma yüzeyi mesafelerinde sıvı jetin çarptığı çarpma yüzeyi (katot) önce düz olacak şekilde deneyler yapıldı daha sonra çarpma yüzeyi farklı açılarda (60° , 70°

ve 80°) olacak şekilde eğik duruma getirilerek aynı şartlarda iki çalışma arasında ne gibi farkların olduğu, hangi durumda kütle transfer katsayısının artmakta olduğu gözlemlendi. Elde edilen kütle transfer katsayıları ile boyutsuz konvektif kütle transferi katsayıları elde edilerek dairesel çarpma yüzeyi üzerinde jet durgunluk merkezinden olan boyutsuz mesafe (r/R) boyunca kütle transferi katsayısı dağılımı hidrodinamik parametrelere Re , (H/d) ve çarpma yüzey açısına (θ) bağlı olarak verilmiş ve korelasyonlar türetilmiştir.



2. KAYNAK ÖZETLERİ ve KURAMSAL TEMELLER

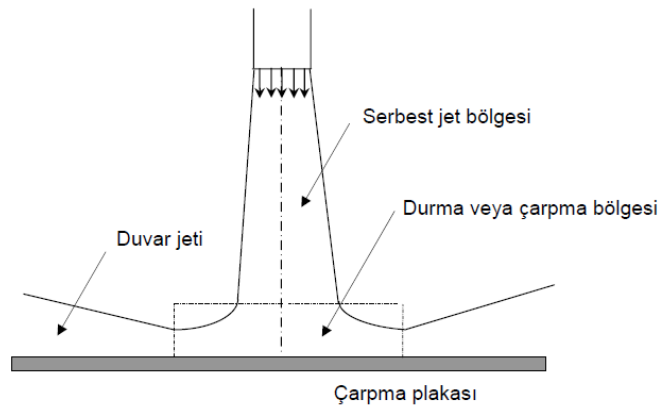
Bu bölümde önce çarpan akışkan jetleri ile ilgili kısa bir bilgi verilmiş daha sonra literatürde yapılan çalışmalar uygun konu başlıkları altında özetlenmiştir.

2.1. Çarpan Jetler ve Kullanım Alanları

Şiddetli türbülanslı akış olarak da nitelendirebileceğimiz jet akışı, normal akıştan çok daha şiddetli girdapların ve edilerin olduğu akış şeklidir. Hareket eden kütlelerin bir “itme kuvvetine” tabi tutulduğunda büyük hız değişiminin gerçekleştiği akımdır.

Jet akışında akışın temel yapısı kolaylıkla incelenebilir. Jet akışı özellikleri sebebi ile pasif tekniklerden olması, az akışkan gereksinimi, akış hızının fazla olması, bir kütlelerin nozul içine düşük hızla girip yüksek hızla çıkması birçok sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çarpan sıvı jetler normal akışkan akışından daha yüksek ısı kütle transfer hızı meydana getirmesi sebebi ile kullanım alanları giderek artmaktadır.

Bir yüzeye çarpan jet, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi serbest jet bölgesi, durma veya çarpma bölgesi ve duvar jeti olmak üzere özellikleri birbirinden farklı üç bölgeye ayrılabilir.

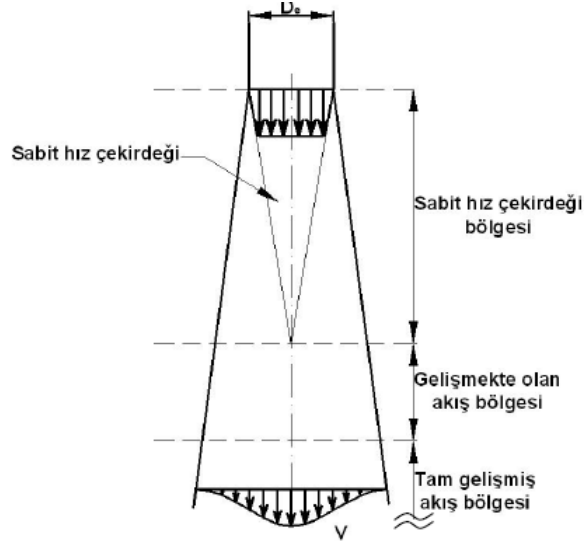


Şekil 2.1. Çarpan jetin akış bölgeleri

Serbest jet bölgesinde, jet ile durgun çevre arasında kütle, momentum ve enerji aktarımı söz konusudur. Bu etkileşim, jet içinde radyal yönde sabit olmayan bir hız profili oluşmasına, jetin serbest sınırının genişlemesine, toplam kütleli debinin artmasına, jet sıcaklığının değişmesine ve sabit hız çekirdeği bölgesinin daralmasına yol açar. Serbest jet bölgesinin karakteristiklerinden biri de bu bölgedeki akışın çarpma yüzeyinden etkilenmemesidir.

Durma veya çarpma bölgesinde akış, çarpma yüzeyinden etkilenmekte olup akışın çarpma yüzeyine dik durumdan paralel duruma dönmesi söz konusudur. Bu bölge içerisindeki hız, çarpma yüzeyine dik yönde azalırken, çarpma yüzeyine paralel yönde bir artış göstermektedir. Yüzeye paralel ve dik hızların sıfır olduğu durgunluk noktası da bu bölge içerisinde yer almaktadır. Durma bölgesinin karakteristiklerinden biri de çarpma yüzeyine yakın bölgede sınır tabakası analiziyle belirlenen, akışın ivmelenmesiyle sınır tabakasının incilmesi aynı zamanda çevreyle momentum aktarımı sebebiyle sınır tabakasının kalınlaşma etkilerinin birbirini dengelemesi sonucu sınır tabakası kalınlığının fazla değişmemesidir.

Duvar jeti bölgesindeki akış, çarpma yüzeyine paralel olup, çevrede durgun olarak bulunan akışkanla momentum aktarımının ve çarpma yüzeyi ile etkileşimin sonucu yavaşlar. Bu bölge içerisindeki hızlar çarpma yüzeyinde ve serbest yüzeyde sıfır değerine sahiptir. Durma ve duvar jeti bölgesinde jet ile çarpma yüzeyi arasındaki güçlü etkileşim bu bölgelerdeki yerel ısı transferini ve dolayısıyla ortalama ısı transferini etkiler. Serbest jet bölgesi, Şekil 2.2'de görüldüğü gibi kendi içerisinde sabit hız çekirdeği bölgesi, gelişmekte olan akış bölgesi ve tam gelişmiş akış bölgesi olmak üzere üç alt bölgeye ayrılabilir.



Şekil 2.2. Serbest jetin akış bölgeleri

Sabit hız çekirdeği bölgesinde hız lüle çıkışındaki hıza eşittir ve değişmemektedir. Bu bölgenin jet çıkışından itibaren uzunluğu, jet çıkış geometrisine, lüle çıkışındaki hız profiline ve türbülans yoğunluğuna bağlıdır. Çevre ile jet arasındaki momentum aktarımının neticesinde, jet merkezindeki hızın azalması gelişmekte olan akış bölgesinde kendini gösterir. Bu bölgenin sonunda akış tam gelişmiş hale ulaşır. Rajanatham tam gelişmiş bölgedeki jetin genişlemesinin ve hızdaki azalmanın doğrusal olduğunu belirtmiştir [1].

Viskanta, Re sayısına bağlı olarak dairesel serbest jetleri:

- Yayınımlı laminar jet, $Re < 300$
- Tam laminar jet, $300 < Re < 1000$
- Geçişli veya yarı türbülanslı jet, $1000 < Re < 3000$
- Tam türbülanslı jet, $Re > 3000$

şeklinde sınıflandırmıştır [2]. Ayrıca, çıkışta laminar olan bir jetin, çarpmadan önce hala laminar olup olmamasının aralarında jet Re sayısı, jet çıkışındaki hız profili, jet çarpma yüzeyi arası mesafe, jetin sınırlı olup olmadığı gibi etkenlerin bulunduğu birçok parametreye bağlı olduğunu belirtmiştir [2].

Çarpan jetlerin çok farklı alanlardaki uygulamalarına güzel örnekler içeren derleme makalesinde Jambunathan vd., türbülanslı çarpma jetlerinin ısı transferi özelliklerini belirlemek için yapılmış deneysel çalışmaları incelemiştir. Çarpan jetlerin ısı transferi karakteristiklerini etkileyen pek çok parametrenin çok geniş aralıklardaki değerlerinin ele alındığı çalışmada deneysel sonuçlarda farklılığa yol açan lüle geometrilerinin ayrıntıları, ölçüm teknikleri, boyutsuz değişkenlerin tanımlanma şekilleri belirtilmiştir. Çalışmada, incelenen veriler kullanılarak Nu sayısı için bir korelasyon elde edilmiş ve korelasyondaki Re sayısının üst değeri lüle – çarpma yüzeyi mesafesi ve durgunluk noktasından uzaklığın bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir [3].

Daha özel bir uygulama alanını oluşturan yüksek ısı üretiminin söz konusu olduğu elektronik elemanların, çarpan sıvı jetleri kullanılarak soğutulmasına yönelik çalışmaları Incropera ve Ramadh [4] yani yazdıkları derleme makalesinde mercek altına almışlardır. Çalışmada, dairesel ve iki boyutlu jetleri, arttırılmış ısı transferi uygulamalarını, jet sınırlandırmasının ve çıkış şartlarının etkilerini konu alan önceki çalışmalar ve bunlarla ilgili bulgular yorumlanıp açıklanmıştır [4].

Çarpan jet özellikle elektrolitik altın kaplamada kullanılır. Elektronik endüstrisinde altının korozyona karşı oldukça yüksek dirençli olması ve yüksek elektriksel iletkenlik sağlaması sebebiyle elektrolitik altın kaplama prosesi yaygın bir şekilde kullanılır.

Elektrolitik kaplama birçok teknolojik alanda önemli rol oynar. Spesifik uygulamaları kesme malzemeleri için yüzey kaplama aktif olarak soğutulan malzemeler kullanılmak üzere yüksek termal iletkenliğe sahip malzemelerin gerilmelerinin dağıtılması güneş enerjisi dönüşümünde ve zehirli artık uygulamalarında elektro kataliz için büyük yüzeyli elektro üretiminde yüzeylerin yağlanması ve aşınmaya dirençli yüzeyle olarak sıralanabilir.

Jet sıkıştırma aktif ısı ve kütle transferi yöntemlerinden biridir ve bu işlem yüksek kontrollü ısıtma, soğutma ve kurutma sistemlerinde kullanılır. Jet sistemleri elektronik bileşenlerin soğutmasında, ahşap kurutma, gaz türbinleri, soğutma sistemleri, tekstil,

kâğıt film endüstrisi, cam sanayi, metal plastik levhaların tavlama, endüstriyel gıda işleme v.b. Elektro kaplama işlemi korozyona karşı güçlendirmek, mikro sertlik, ısı stabilitesi ve direncinin artırmak aşınması ve çeşitli metallere oksidasyonu önlemektir. Teknik genel olarak havacılık, inşaat, enerji üretimi ve otomotiv sanayi kompozit yapmak için kullanılır.

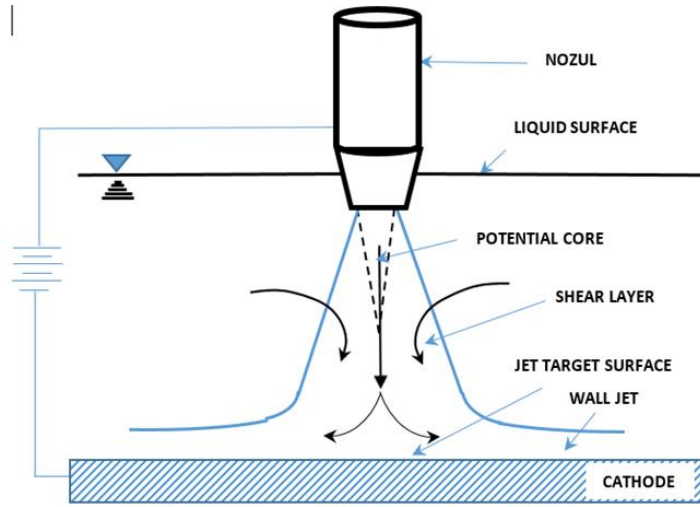
Jet Sistemleri:

Çok etkin yüzey konvektif aktarım hızları elde etmede çarpan jet sistemleri kullanılmaktadır. Endüstriyel ve teknolojik uygulamaları geniş bir yelpazeye sahiptir. Çarpan akış sistemlerinde yüksek konvektif aktarımları vardır. Metal plastik levhaların tavlama, cam plakaların temperlenmesinde tekstil, kâğıt, kaplama, türbin motorlarında v.b.

- Güneş enerjisi dönüşümlerinde
- Isıtma, soğutma ve kurutma sistemlerinde
- Metal ve plastik levhaların temperlenmesinde
- Cam veya çeliğin işlenmesi
- Elektrolitik altın kaplamada (yüksek dirençli ve elektriksel iletkenlikten dolayı)
- Tahtaların kurutulmasında (tahta, tekstil, kâğıt ve film endüstriyelerinde)
- jet motorları ve sıvı yakıt brülörlerinin kullanıldığı yanma sistemleri

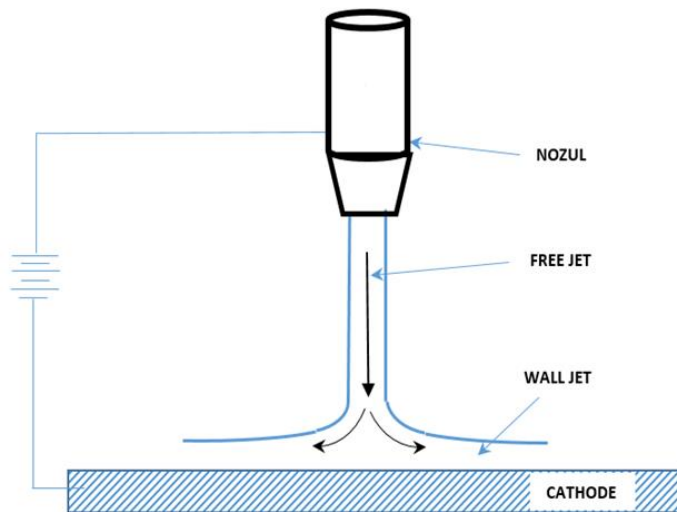
2.2. Çarpan Jetlerle İlgili Hidrodinamik Çalışmalar

Daldırılmış Çarpan Jet: Akışkan içine daldırılmış bir nozuldan çıkan ve nozul çıkış yeri ile çarpma yüzeyi arasında oluşan çarpan sıvı jetin profili ve hidrodinamik yapısı Şekil 2.3'de görülmektedir. Nozuldan çıkan akışkan (çözelti) tanktaki çözelti içerisinde oluşturduğu bir hız profili ile ilerler. Bir kısım durgunluk noktasına ve durgunluk bölgesine erişirken, bir kısımda duvar jet bölgesi oluşturur.



Şekil 2.3. Daldırılmış çarpan jet akış profili[2]

Daldırılmamış Çarpan Jet: Hava bulunan bir tank içine yerleştirilmiş nozuldan çıkan ve nozul çıkış yeri ile çarpma yüzeyi arasında oluşan çarpan sıvı jetin profili Şekil 2.3’de görülmektedir. Nozuldan çıkan akışkan (çözelti) hava içerisinde oluşturduğu bir hız profili ile ilerler. Bir kısım durgunluk noktasına ve durgunluk bölgesine erişirken, bir kısımda duvar jet bölgesi oluşturur. Çarpma yüzeyine yönlendirilen jet (sıvı jet) durgun hava ile çevrilidir. Elektrokimyasal kaplama prosesi, sıvı jet sınırları içindeki elektrik alanı içinde gerçekleşir.

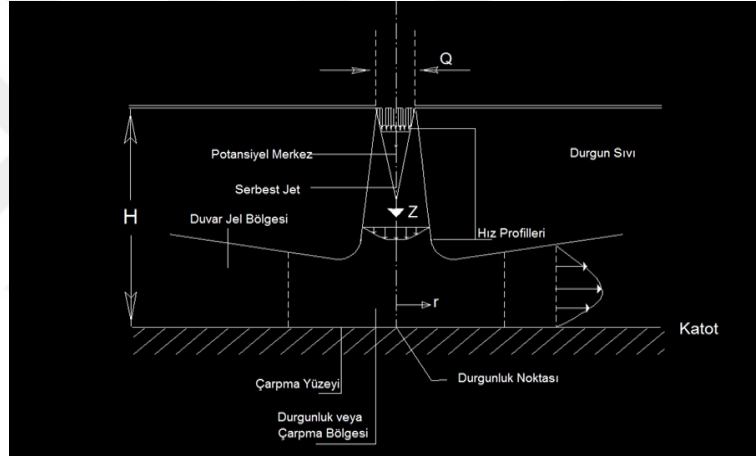


Şekil 2.4. Daldırılmamış çarpan jet akış profili[2]

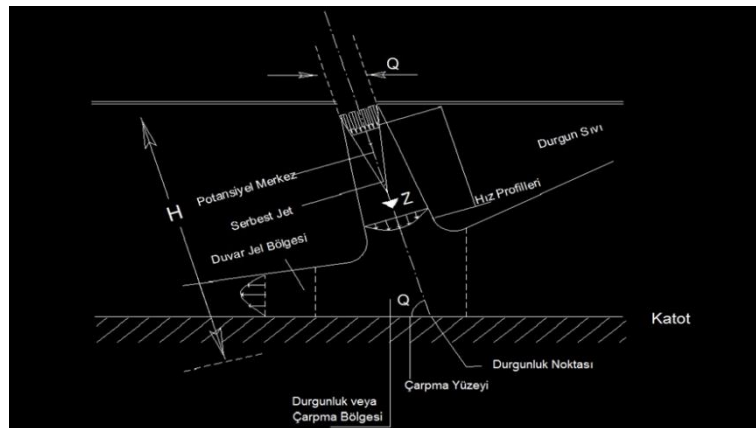
Daldırılmamış çarpan jetler daldırılmış olanlara kıyasla çarpma bölgesi (durgunluk bölgesi) yakınında bir dereceye kadar daha yüksek akım değerleri üretirler. Ayrıca duvar jet bölgesi daldırılmış jetlere göre daha dardır.

Daldırılmışta nozul dan çıkan sıvı sıvı ortamda hareket eder. Bu yüzden daldırılmamış jetlerde nozuldan gelen sıvı durgunluk noktasına daha yakın olacaktır (çünkü hava sıvıya oranla jetten çıkan sıvının hızına daha az etki yapmaktadır.)

Dik ve eğik çarpan jetler:



Şekil 2.5. Dik çarpan jetler



Şekil 2.6. Eğik çarpan jetler

Açılı jette jet açısı 90^0 den daha küçük seçildiği zaman durgunluk noktası, Sh sayısı jet merkezinden negatif x yönüne doğru yer değiştirir. Aynı nozul Re sayısındaki bir dik çarpan jet ile kıyaslandığı zaman eğik açılı bir çarpan jet durumunda negatif x yönünde kütle transfer katsayıları düşmüş ve pozitif x yönünde kütle transfer katsayıları artmıştır. 90^0 den büyük açılarda ise tam tersi bir durum söz konusudur [12].

2.3. Çarpan Jetlerle İlgili Isı ve Kütle Transferi Çalışmaları

Şara vd., yaptıkları çalışmada döner bir yüzey üzerine bir sıvı jetin çarptırılması durumunda meydana gelen kütle transferini anlatmaktadır. Kütle transfer katsayıları ELDCT tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Parametre olarak, 340.000-1.200.000 değerleri arasındaki döner Reynold sayıları (Re), 170.000-530.000 değerleri arasındaki jet Reynold sayıları ve 2-8 değerleri arasındaki arası jet-disk mesafesi (H/d) kullanılmıştır. Jet kullanılmayan dönen diske kıyasla çarpan jetlerin kütle transferinde büyük bir iyileştirmeye neden olduğunu ileri sürmüşlerdir.

En çok kullanılan aktif ısı ve kütle transferi iyileştirme tekniklerinden olan Çarpan jet tekniği, yüksek ve kontrollü lokal ısı/kütle transfer katsayısı sağlaması açısından oldukça kullanışlı olup ısıtma, soğutma ve kurulum sistemi gibi bir çok işlem çarpan jetler vasıtasıyla etkin bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu tekniğin uygulamaları yüksek sıcaklık gaz türbini soğutma sistemi, elektronik bileşenlerin soğutulması, ahşabın, tekstilin, kâğıdın kurutulması, film endüstrisi, cam işleme uygulamaları ve endüstriyel gıda işleme alanlarında görülmektedir.

Döndürme (diskin dönmesi), ikincil akış meydana getirmesi nedeniyle ısı/kütle transferinin iyileştirilmesinde kullanılan önemli bir tekniktir. Pratikte, birçok makine parçası hareketli parçalar içermektedir. Döner disk kullanılarak birçok sistemin iyileştirilmesi sağlanabileceğinden döner disk üzerine uygulanan ısı-kütle transfer tekniği yaygın kullanılan bir tekniktir.

Döner disk ile çarpan jet arasındaki ısı transferi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Ancak tüm bu çalışmalarda hava jeti kullanılmıştır. Su jetinin kullanıldığı sınırlı sayıdaki çalışmada (Carper, Womac, Faghri, Ozar) ise disk sabit tutulmuştur. Kısaca, döner disklerin ve sabit yüzeyler üzerine çarpan jetlerin ısı/kütle transferi üzerine birçok çalışma mevcut olsa da, döner yüzeyler üzerine sıvı çarpan jetler kullanılarak elde edilen ısı/kütle transferi uygulamaları literatürde oldukça sınırlıdır.

Kontrollü bir sıvı çarpan jetin döner yüzey üzerine uygulanması ile elde edilen deneysel verilere olan ihtiyaç herkesin malumu olup ELDCT tekniği kullanılarak yapılan bir lokal kütle transferi uygulaması bugüne kadar yapılmamıştır. İlaveten, çarpan jet sistemlerindeki yüzeysel ortalama ısı/kütle transferi özellikle soğutma, ısıtma ve kurulum işlemlerinde oldukça önemlidir. Bu nedenle, yüzeysel ortalama kütle transfer katsayısına ilişkin deneysel veri elde edilmesi ve jet kullanılan ve kullanılmayan döner yüzeyler üzerindeki kütle transfer ilişkisinin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, kapalı bir döner yüzey ile çarpan sıvı jet arasındaki lokal kütle transferi düşük disk hızında ELDCT tekniği kullanılarak incelenmiştir.

Sonuç olarak; bu çalışmada döner disk ile çarpan jet arasındaki lokal kütle transferi incelenmiş; doğrulama yapabilmek için ilaveten sabit disk üzerine çarpan jet uygulaması ve çarpan jetsiz döner disk ölçümleri de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar;

Jetin Re sayıları arttıkça kütle transfer katsayıları da artmakta. Fakat deneme yapılan dönüş hızında, lokal ve ortalama kütle transferi arasındaki ilişkide çarpan jetin etkisi büyük. Bu nedenle, sabit bir yüzeye uygulanan çarpan jet sonucu elde edilen kütle transfer katsayısı düşük hızlarda dönen bir diske uygulanan çarpan jet sonucu elde edilen kütle transfer katsayısına yakın bir değer vermektedir.

(H/d) 'nin artması ile birlikte kütle transferi de artmaktadır. (H/d) 'nin 5 ve 6 arasında olduğu durumlarda kütle transferi maksimum değere ulaşmakta, böylece (H/d) değeri artsa bile jet hızı ve disk dönüş hızına bağlı olarak kütle transferi azalmaktadır [5].

Lee *et al.* [6], yaptıkları araştırmada çarpan jetlerin nozul çıkışındaki akış hızını ele alarak ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Çarpan jetlerin yaygın özelliğinin durgunluk bölgesinde ısı transferinde artış, duvar jet bölgesinde ise ısı transferinde azalma şeklinde olduğunu belirtmişlerdir. Çarpan jet ısı transferini etkileyen en önemli faktörün nozul çıkışındaki akış hızı olduğunu, sıvının döner şekilde çıkması (swirling jets) transferi de etkilediğini belirtmişlerdir. Bu ilişkinin anlaşılabilmesi sayesinde arzu edilen ısı transferine ulaşılmasında kullanılması gereken nozul karakteristiğinin belirlenebileceği sonucuna varmışlardır [6].

Feroz ve Prasad, makalelerinde çoklu jetlerden oluşan düzeneğin çarpma bölgesindeki kütle transferi katsayısına ilişkin deneysel sonuçlar sunmaktadır [54]. Nozul demetinin boyutu, yüzey alanından olan mesafesi ve nozul çap genişliğinin kütle transfer katsayısı ile olan ilişkisi incelenmiştir. Kütle transferi nozul genişliği ile birlikte artmakta; nozulun yüksekliği, yüzey alanı ve elektrot boyutunun artması ile azalmaktadır. Ayrıca, kütle transfer katsayısı ile Reynolds sayısı arasındaki ilişki de incelenmiştir.

Daha önce yapılan çalışmalar tek jetli sistemleri incelemiştir. Tek jetli sistemlerde transfer oranı çoklu jetlere oranla daha yüksektir. Çarpan jetlerin hidrodinamiği şu şekildedir: nozuldan çıkan jetler yüzeye çarpmakta ve giderek yüzeyin uç kısımlarına doğru yayılmaktadır.

Rao (1971) ve Martin (1977) tarafından yüzeyde oluşan akış ve geçiş bölgeleri şöyledir: çarpma bölgesi, geçiş bölgesi, duvar jet bölgesi [55]. Çoklu nozullu sistemlerde de aynı bölgeler geçerlidir. Ancak ilaveten bitişik nozulda duvar jetlerinin çarpıştığı alanda ikincil bir durgunluk bölgesi oluşmaktadır.

Bu kapsamda, tekli ve çoklu nozul jet sistemleri benzer akış desenlerini göstermekle birlikte değişik seviyelerde türbülansa sahiptirler. Bu çalışmada bu akışkan davranışları çoklu nozul düzeneği üzerinden deneysel olarak incelenmiştir.

Çalışmada elde edilen sonuçlar;

- Oluşan farklı bölgeler ayrı ayrı incelenerek grafiksel analizleri yapılmıştır.
- Elektrotların merkeze olan uzaklıkları ile kütle transfer katsayıları karşılaştırılmış ve 3 farklı akış deseninin olduğu gözlenmiştir. Kütle transfer katsayısının çok yüksek olduğu durgunluk bölgesi, elektrodun merkeze uzaklığıyla birlikte azalan geçiş bölgesi ve azalmanın daha da yavaşladığı duvar jet bölgesi.
- İkinci ve üçüncü bölgeler arasındaki geçiş çok düzgün ve sakin olduğundan bu iki bölge tek bölge olarak incelenmiştir.
- Bu çalışmada sadece durgunluk bölgesi incelenmiştir.
- En yüksek KTK merkezdeki elektrotta meydana gelmekte.
- H mesafesi arttıkça, nozuldan çıkan jetin momentumu azalacağından KTK azalmakta
- Nozullan bağlı olduğu diskin çapı arttıkça, çarpan jetler tarafından kaplanan alan da artmakta ve KTK da artmaktadır.
- Nozul çapı arttıkça KTK da artmakta
- Elektrot çapı arttıkça KTK azalmakta[7].

Chen *et al.* [56] tarafından jetlerle yapılan araştırmada laminer çarpan slot-jet akışlarındaki doğrusal elektroda doğru yüksek Schmidt sayılı kütle transferi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu maksatla slot tabanlı Reynold numaraları 220-690 arası olacak şekilde kullanılmıştır. 100 mikrometre elektrotlar üzerinde elektrokimyasal metodlarla yapılan kütle transfer ölçümleri hesaplanan “wall shear” (duvar soyulması) değeri ile analitik bir ilişki kurularak karşılaştırılmıştır. Lokal soyulma (shear) Navier-Stokes denklemlerinin 2 boyutlu akış alanı simülasyonları vasıtasıyla elde edilmiştir. İzole edilmiş elektrot hattı ve küçük ebatlarda elektrot (100mikrometre) kullanımı durulma bölgesinde kütle transferini ve soyulma değişimlerine olanak sağlamaktadır. Hem deneysel hem de teorik sonuçlara göre, Nusselt sayısındaki en yüksek (zirve) değerler durgunluk bölgesinden yarım ila 1 jet genişliği uzaklıkta iken meydana gelmektedir.

Çarpan jet akışının avantajı, durgunluk bölgesindeki çok ince hidrodinamik sınır katmanları nedeniyle oluşan lokalize edilmiş kütle transferidir. Bu katmanların kalınlığı onlarca mikron kalınlığında olabilmektedir. Her ne kadar birçok endüstriyel

uygulamada türbülanslı akış incelense de yüksek durgunluk bölgesi basıncından kaçınılması gereken bazı uygulamalarda laminar jet akışları arzu edilmektedir.

2.4.Eğik Jetlerle İlgili Çalışmalar

Çalışmada daldırılmış eğik slot jetlerin lokal kütle transferi incelenmiştir. Slot nozuldan çıkan sıvı daldırılmış sabit bir yüzey üzerine çarpmakta 3 bölge oluşmaktadır: çarpma bölgesi, geçiş bölgesi ve kanal akış bölgesi.

Sensörün çok ince ve Schmidt sayısının çok yüksek olması nedeniyle genel anlamda bir kütle transfer katsayısı hesaplamasına gerek olmayıp duvar soyulma etkisi ile kütle transfer oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu maksatla Burnmeister ve Newman tarafından gösterilen sınır katman teorisi kullanılmış ve çarpan yüzeydeki soyulma etkisi iki boyutlu Navier-Stokes denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Deneylerde 24 litrelik elektrolit bileşeni kullanılmıştır. Bu bileşenin içerisinde 0.003 M potasyum ferrisiyanür, 0.003M potasyum ferrosiyanür ve 0.1 M potasyum klorür kullanılmıştır. Ferrisiyanür iyonundaki azalma katotta oluşmakta ve anotta tersine dönmektedir. Sistemin sıcaklığı 23+/-2 derece olup ferrisiyanür iyonun difüzyon katsayısı $D=0.8 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 'dir. Bu çalışmada, aktif kütle transfer bölgesi çarpan yüzey üzerinde oluşan çok ince bir şeritten oluşmaktadır. Testlerde 3 farklı akış oranı ve nozul-çarpma yüzeyi arası 3 farklı mesafe kullanılmıştır. Hem teorik hem de deneysel verilere göre durgunluk bölgesinde kütle transferi oldukça küçüktür. Ancak, durulma bölgesinde uzaklaştıkça Kütle transfer katsayılarında keskin bir yükseliş gözlenmektedir. Ardından, Nusselt sayısı hızlı bir şekilde düşmekte ve tam olgunlaşmış bir kanal akışındaki sabit değere yakın bir değere ulaşmıştır.

Durulma bölgesinde, kütle transferinin teorik sonuçları deneysel verilerden çok daha düşük çıkmaktadır. Bu sapmanın nedeni, sensör hattının doğru konumlandırılmamasından kaynaklanabilir. Durulma bölgesi civarında kütle transfer katsayısı çok hızlı arttığından, sensör hattındaki en ufak bir farklılık Nusselt sayısında

keskin artışlara neden olacaktır. Geçiş bölgesinde, teorik ve deneysel veriler düşük Reynolds sayılarında birbiri ile örtüşmektedir.

Sonuç olarak, daldırılmış bir yüzey üzerindeki elektrot hattı ile çarpan jetler arası kütle transferi incelenmiştir. Hem deneysel hem de sayısal incelemeler neticesinde kütle transferindeki en üst değerin direkt nozulun altında oluşmadığı görülmektedir. Nusselt sayısındaki bu en yüksek değere, nozul orta hattından yarım ile bir nozul genişliği uzaklaşıldığında erişilebilmektedir[8].

D-T.Ching ve M.Agarwal'ın yaptığı çalışmada; daldırılmış eğik çarpan yarı jet için lokal kütle transfer hızını ELCDT tekniği kullanarak bir çarpma yüzeyi üzerindeki mikro elektrotlar kullanılmıştır. Bu çalışma lokal Sherwood sayılarının durgunluk noktasında korelasyonunu türetmek için gerçekleştirilmiştir. Jet açısı, nozul ve Re sayısı ($Re_j = DV_j \delta / \mu$), boyutsuz nozul çarpma yüzeyi mesafesi (H/d), jet merkezinden olan boyutsuz radyal mesafe (r/R)'nin fonksiyonu olarak çarpan jetlerin duvar jeti akış rejimleri ve laminer sınır tabaka içinde durgunluk noktasında lokal Sherwood sayılarını korele etmek üzere verilir.

Nozuldan çıkan akışkan jeti, aynı tür durgun ve büyük bir akışkan içinden geçer ve 90°C den daha düşük bir açıda bir düz yüzey üzerine çarpar. Bir dik ve eğik çarpan jetin akış desenleri arasındaki farkı durgunluk bölgesi ve duvar jet bölgelerinde gözlemlenmiştir.

Eğik jette çarpma yüzeyi üzerindeki durgunluk noktası jet merkezinden negatif x yönünde yer değiştirdiği görülmüştür. Aynı nozul Re sayısında bir dik çarpan jet ile kıyaslandığı zaman eğik açılı bir çarpan jet durumunda negatif x yönünde kütle transfer katsayılarının düşmüş, pozitif x yönünde ise kütle transfer katsayılarının artmış olduğu bulunmuştur [9].

Jetin lüle veya orifisten çıkışından sonra çevredeki akışkanla etkileşimi sonucu jetin hız profilinde değişiklikler olmaktadır. Jet profilindeki bu değişim jet ve çevrenin aynı

akışkandan oluştuğu daldırılmış jet dediğimiz durumlarda çok daha çabuk gerçekleşmektedir. Uniform olmayan bir hız profilinin sözkonusu olduğu durumlarda jet merkezindeki en yüksek hızın ortalama hızdan daha yüksek olduğu da bilinmektedir. Buradan yola çıkarak Sparrow ve Lee, yarıklı jetler kullanarak, jet çıkışında uniform olmayan laminar hız profilinin ısı transferine etkisini teorik olarak incelemişlerdir. Isı transferinin belirlenmesinde kullanılan sınır tabakası analizi için gerekli girdiler sürtünmesiz akış analizinden elde edilmiş, uniform olmayan hız profili şartlarında elde edilen durgunluk noktası ısı transferi değerlerinin, uniform hız profili şartlarında elde edilen değerlerin hemen hemen iki katına yakın olduğu görülmüştür [10].

Çarpma bölgesindeki yüksek ısı transferi miktarları dikkatleri bu bölgeye çekmiş ve birçok çalışmaya konu olmuştur. Bunlardan biri de Giralt vd. tarafından gerçekleştirilmiştir. Kendilerinden önceki teorik çalışmalarda kullanılan sürtünmesiz akış çözümlerinin jet çapındaki artışı, jet hızındaki azalmayı ve hız profilinin değişiminin etkisini hesaba katamamalarından yola çıkarak, jet merkez hızındaki azalmaları ve basınç dağılımlarını ölçmüşlerdir. Çarpma bölgesinin başlangıcındaki sınır şartlarını belirlemek amacıyla sapmanın başladığı noktayı belirlemişler ve bu noktadaki hız ve türbülans değerlerini bulmuşlardır. Bu değerleri sınır tabakası çözümlerinde kullanıp, çözümlerini sürtünmesiz akış çözümleriyle karşılaştırmışlardır[11].

Durma bölgesindeki ısı transferi için yapılan analitik çalışmalarda çarpma yüzeyi üzerindeki sınır şartlarının etkisi de inceleme konusu yapılmış ve önemli sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmalardan birini Wang vd [12] durma bölgesindeki enerji denklemini çözerek gerçekleştirdiler. Çalışmalarında çarpma yüzeyi sıcaklığının veya ısı akısının çok az değiştiği durumlar için enerji denklemindeki radyal yöndeki iletim ihmal edilerek çözüme ulaşılmıştır. Isı akısı ve çarpma yüzeyi sıcaklığının radyal yönde kayda değer şekilde değiştiği durumlar içinse radyal yöndeki iletimin etkisi de hesaba katılarak enerji denklemi çözülmüştür. Sonuç olarak radyal yönde değişen ısı akısı ve çarpma yüzeyi sıcaklığının durma noktasındaki ısı transferini önemli ölçüde etkilediği

gösterilmiştir. Ayrıca durma bölgesinde hızların küçük olması sebebiyle radyal yönde baskın ısı transferi modunun iletim olduğunu belirtmişlerdir.

Çalışmadan elde edilen önemli bir bulgu da radyal yönde artan çarpma yüzeyi sıcaklığının ve ısı akısının Nusselt sayısını düşürdüğü, radyal yönde azalan çarpma yüzeyi sıcaklığı ve ısı akısının ise sabit ısı akısı veya sabit sıcaklık altındaki durgunluk noktası Nusselt sayılarını yükselttiği sonucudur [12].

Konuyla ilgili ilk çalışmalara baktığımızda çarpan jetlerin sadece zorlanmış taşınımı etkileyen parametrelerle incelenmeye çalışıldığı görülmektedir. Hatta çarpan jetler tabirinin bile yerleşmemiş olduğu göze çarpmaktadır. Bu çalışmalardan birini Perry, ortam sıcaklığından 400°C daha yüksek sıcaklıktaki jetleri kullanarak, çarpma yüzeyinin ısı transferi karakteristiklerini belirlemek için yapmıştır. çarpma yüzeyi eğiminin 15 dereceden 90 dereceye kadar değiştirildiği bu çalışmada taşınım ile ısı transferi katsayısının artan eğimle arttığı görülmüş, en yüksek değerine 90 derecede ulaştığı gözlenmiştir. Burada 90 derece dik çarpma jetini temsil etmektedir. Deneysel sonucunda Nu sayısı için elde edilen korelasyonların (H/d) oranını içermemesi ve sadece Re ve Pr sayılarının bir fonksiyonu olarak ifade edilmesi kayda değer bir durumdur [13].

Çarpan jetlerin akış karakteristiklerini ve ısı transferi özelliklerini etkileyen jet çarpma yüzeyi mesafesi oranı konuyla ilgili çalışmalarda dikkate alınan en önemli parametrelerden birisidir. Bu parametrenin etkisinin doğrudan hesaba katıldığı ilk çalışmayı bizim bilgimiz dahilinde ilk kez Huang gerçekleştirmiştir. Huang dairesel hava jeti ve jet dizilerinin ortalama ve yerel, taşınım ile ısı transferi katsayılarını 176°C sıcaklığında ısıtılmış hava kullanarak Re sayısının 1000 ile 10000 arası değerlerinde incelemiştir. Dairesel tek jet için yapılan çalışma sonucunda Nu sayısı, Re ve Pr sayısına ek olarak (H/d)'nin fonksiyonu olan bir katsayı cinsinden ifade edilmiş, böylece çarpan jetlerin performansları, bilinen zorlanmış taşınım korelasyonlarından farklı bir şekilde belki de ilk kez ifade edilmiştir. Jet dizileriyle yapılan deneyler sonunda, ısı transferinin uniform dağılımı için (H/d) değeri belirlenmeye çalışılmış

ayrıca açık alanın tüm jet çarpma yüzeyi alanına oranının en ekonomik güç tüketimi açısından değeri belirlenmiştir [14].

Gardon ve Akfırat kendilerinden sonraki birçok çalışmaya doğrudan veya dolaylı olarak ilham kaynağı olan ve çarpan jetlerin performansının lüle çıkışından önce başlayıp, çarpma yüzeyi üzerinde devam eden birçok etkene bağlılığını gösteren iki çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalardan ilkinde iki boyutlu hava jeti ve jet dizilerinin ısı transferi karakteristiklerini araştırmak amacıyla deneyler yapmışlardır. Bu deneysel çalışmada laminar ve türbülanslı rejimi kapsayan Re (450-22000) sayıları için, bir yüzeye çarpan jetlerin performansını etkileyen oldukça önemli bir faktör olan (H/d) oranları oldukça geniş bir yelpazede ($1/3-80$) incelenmiştir. Jet çapı çarpma yüzeyi mesafesi oranlarının altıdan küçük değerleri için durma noktasına ek olarak, çarpma noktasının her iki tarafında taşınım ile ısı transferi katsayılarının yerel en yüksek değerleri gözlenmiştir. Bu durum akışın laminar rejimden türbülanslı rejime geçişiyle açıklanmıştır [15].

İki boyutlu hava jetlerinin kullanıldığı ikinci deneysel çalışmada Gardon ve Akfırat, bir yüzeye çarpan jet akışından elde edilen yerel taşınım ile ısı transferi katsayısı verilerini, hız ve türbülans dağılımı ölçümlerini kullanarak, türbülansın ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlarından, ısı transferi karakteristiklerinin, sadece hıza ve mesafeye bağlı sınır tabakası kalınlığıyla belirlenemeyeceğini, jetteki türbülansın etkisinin de hesaba katılması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır. Jet içinde türbülans düzeyinin sürekli değiştiğini ve $(H/d) \leq 8$ değerleri için lüle geometrisinin ve türbülans artırıcıların jet içindeki türbülansı etkileyeceğini belirtmişlerdir [16].

Jet dizilerinin akış karakteristikleri ve ısı transferi performansları jetler arasındaki etkileşim sebebiyle tek jetlerden farklılıklar göstermektedir. Bu etkileşim sonucu sistemde çarpma yüzeyine dik akışa ek olarak çapraz akışta görülmektedir. Bu farkların etkilerini araştırmak amacıyla dairesel hava jeti dizileriyle yaptıkları deneylerde Kercher ve Tabakoff ısı transferini, çapraz akışın etkisini de hesaba katarak incelemişlerdir. Çalışmada çapraz akışın tek yönlü çıkışta ısı transferini olumsuz yönde

etkilediği belirtilmiş, ortalama Nusselt sayısı için korelasyonlar geliştirilmiştir. Korelasyonlar, jetlere dikyönde olan akışın, jet çapının, jetler arası mesafenin, jet-çarpma yüzeyi mesafesi oranının fonksiyonu olarak verilmiştir [17].

Sıcaklık ölçüm sensörlerinin belirli boyutlarda olması ve bazı kayıpları hesaba katamaması dezavantajlarının yanısıra yüzeyde arzulanan termal sınır şartlarının özellikle sabit duvar sıcaklığı sınır şartının kenar etkileri ve kayıplar sebebiyle sağlanmasında zorluklar çekilmektedir. Bahsedilen sebeplerden dolayı, yerel transfer katsayılarının belirlenmesinin gerektiği durumlarda naftalin süblimasyon tekniği bu dezavantajları gidermek için sıkça kullanılmıştır. Bu çalışmalardan birini taşınım ile ısı transferi katsayılarının belirlenmesi için ısı ve kütle transferi arasındaki analojinin kullanıldığı çalışmada Sparrow ve Wong jet çıkışındaki akışın laminar ve hız profilinin parabolik olduğu yarık jetler kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yerel kütle transferi katsayıları 5 farklı Re sayısı için 5 farklı H/D oranında belirlenmiştir. Naftalin süblimasyon tekniğiyle bulunan kütle transferi sonuçları, ısı ve kütle transferi arasındaki analogi kullanılarak ısı transferi sonuçlarına dönüştürülmüştür. Küçük H/D (2-5) oranları için jetin merkezdeki hızının bu orandan bağımsız olacağı, daha büyük oranlarda ise merkezdeki hızın azalmasının transfer katsayılarında düşüşe sebep olacağı fakat aynı zamanda karışma sebebiyle oluşan türbülansın tam tersi bir etki yapacağı yorumu yapılmıştır. İzah edilen durumla ilgili olarak, küçük Re sayılarında ($Re \leq 1200$) merkezdeki hızın azalması baskın olurken, daha yüksek Re sayılarında türbülansın daha etkili olabileceği sonucuna varılmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalarla yapılan karşılaştırmalar, jet çıkışındaki hız profilinin ısı transferini etkileyen bir faktör olduğu sonucunu getirmiştir [18].

Elektronik elemanların soğutulmasında kullanılan çarpan jetler genelde sınırlı çarpan jetlerdir. Her ne kadar elektronik elemanların soğutulmasıyla ilgili olmasa da sınırlı ve sınırsız jetlerin birlikte incelendiği ilk çalışmalardan birini rüzgar tüneline gerçekleştirildikleri deneysel çalışmada, Sparrow vd dışarıdan eklenen çapraz akışın etkisini sınırlı ve sınırsız jetler için değişik H/D oranlarında inceleyerek gerçekleştirmişlerdir. Bu durumda elde ettikleri taşınım ile ısı transferi katsayılarını

sadece çapraz akış durumunda elde edilen değerlerle karşılaştırmışlar, jet debisinin çapraz akış debisinden sekiz kat veya daha fazla olduğu durumlarda, en yüksek durma noktası ısı transferinin $(H/d) = 5-6$ civarında olduğu, daha küçük debi oranlarında ise daha küçük (H/d) değerlerinde en yüksek ısı transferi değerlerinin elde edildiğini belirtmişlerdir. Taşınım ile ısı transferi katsayılarının hesaplanmasında hava sıcaklığı yerine adyabatik duvar sıcaklığının kullanıldığı bilgisinin verilmesinde fayda vardır [19].

Yukarıda bahsedilen naftalin süblimasyon tekniği, tek jetlerin yanı sıra jet dizileriyle yapılan çalışmalarda da kullanılmıştır. Yine Koopman ve Sparrow ısı ve kütle transferi arasındaki analogiyi kullanarak, çarpan hava jeti dizileriyle deneyler yapmışlardır. Naftalin süblimasyon tekniğinin çarpan jet dizilerinin karmaşık ısı transferi katsayılarını belirlemede etkin bir araç olduğunu gösteren çalışmada yerel Sherwood sayısının, etkili soğutma veya ısıtma noktalarının belirlenmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir. Komşu jetlerin, duvar jeti bölgelerinin çarpışması sonucu jetler arası mesafenin orta noktasına yakın bölgelerde yüksek taşınım ile ısı transferi katsayıları gözlemlenmiş, bu çarpışmaların etkisinin, artan Re sayılarında ve azalan H/D oranlarında daha fazla olduğu görülmüştür. Durma noktasındaki transfer katsayısı değerlerinin H/D oranına bağlı olduğu gösterilmiştir. Transfer katsayılarının başta H/D ile artması jetin türbülans seviyesinin artması ile açıklanırken, sabit hız çekirdeğine ulaşıldıktan sonra, çarpma hızının düşmesi ve aynı zamanda türbülansın azalmasının transfer katsayılarının düşmesinden sorumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır [20].

Jet dizileriyle yapılan çalışmalarda tek jetlere oranla akış karakteristiklerini ve ısı transferini etkileyen daha fazla parametre bulunmaktadır. Bu parametreler üzerinde ayrıntılı çalışmalardan birinde Florschuetz vd. çapraz akış etkisindeki jet dizilerini kullanarak jetler arası mesafe, jet- çarpma yüzeyi mesafesi, jet dizilim şekli, delik çapı gibi parametrelerin taşınım ile ısı transferi katsayısına etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Havanın tek yönde dışarı çıkmaya zorlandığı çalışmada, çapraz akışın etkisinin akış yönündeki mesafeyle ve jet dizilimiyle değişimi belirlenmiştir. Üçgen dizilim şeklinde çapraz akışın ısı transferine olumsuz etkisinin daha belirgin olduğu

gözlemlenmiş, ayrıca akış yönünde, çapraz akış debisinin jet debisine oranının arttığı gözlemlenmiştir[21].

Benzer şekilde, Goldstein ve Behbahani çarpan hava jetlerinin çapraz akış altındaki yerel taşınım ısı transferi katsayılarını belirlemek için çalışmalar yapmışlardır. Çapraz akışın, $(H/d) \geq 12$ değerlerinde maksimum ısı transferini azalttığı, daha küçük oranlarda ise olumlu yönde katkıda bulunabileceği sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca bütün (H/d) değerlerinde en yüksek Nusselt sayısının elde edildiği noktanın durma noktasından çapraz akış yönünde kaydığını belirlemişlerdir [22].

Jetin, hız profilinden türbülans seviyesine kadar çeşitli özelliklerini etkileyen jet-çarpma yüzeyi mesafesi oranı literatürde oldukça geniş bir aralıkta incelenmiştir. Bu oranın 1'den küçük değerleri de inceleme konusu yapılmış ve daha yüksek oranlarda gözlemlenmeyen jet davranışları görülmüştür. Jet çapı – çarpma yüzeyi mesafesi oranının 1'den küçük değerleri için Lytle ve Webb, $3600 \leq Re \leq 27600$ aralığında yaptıkları deneysel çalışmada, basınç ölçümleri sonucunda akışın jet çarpma yüzeyi arasındaki boşlukta kayda değer şekilde ivmelendiğini gözlemlemişlerdir. Özellikle $(H/d) \leq 0.25$ değerlerinde gözlenen bu durum süreklilik denklemiyle uyum halindedir veya başka bir deyişle süreklilik denkleminin bir sonucudur. Akışkanın ivmelenmesi, ısı transferi ve türbülans seviyesinin artımını da beraberinde getirmiştir. Yine bahsedilen sebeple, durma noktasında yerel ısı transferinde bir minimum ve radyal yönde iki maksimum meydana gelmiştir. Daha dıştaki maksimum kesme geriliminden kaynaklanan türbülans artımıyla açıklanmış ve bu noktanın artan (H/d) ve Re sayılarıyla dışa doğru kaydığını görülmüştür. Daha içteki maksimum değeri $(H/d) \geq 0.25$ değerlerinde gözlemlenmemiştir. Ayrıca, yerel ve ortalama Nusselt sayılarının $(H/d) \leq 1$ durumlarında, (H/d) 'nin daha büyük değerlerine oranla daha yüksek değerlere ulaştığı belirtilmiştir [23].

Çarpan jetlerin endüstrideki uygulamalarına bakıldığında ısıtılmış hava jetlerinin de yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Böyle durumlarda doğal olarak jet sıcaklığı ortam sıcaklığından farklı olmakta, jet ve ortam arasındaki etkileşim sadece

momentum transferiyle sınırlı kalmamaktadır. Bu sıcaklık dolayısıyla da yoğunluk farkının jetlerin davranışlarına etkisini incelemek için Yu ve Monkewitz, $Re=4000$ civarında, ısıtılmış jetlerle deneyler yapmışlardır. Jet kararlılığını etkileyen en baskın özelliklerden biri olan jet çıkışındaki yoğunluğun ortam yoğunluğuna oranının etkisini incelemişlerdir. Bahsedilen oranın 0.73 ile 1 değerleri arasında gerçekleştirilen çalışmada, bu oranın 0.9'dan düşük değerlerinde iki boyutlu sıcak jetlerde kendiliğinden salınımlar olduğunu belirlemişlerdir. Akış gözleme deneylerinin sonucunda jet çıkışında büyük bir vorteks çifti belirlenmiş bu vorteks çiftinin etkisi sonucu sıcak jetlerin, uniform yoğunluklu jetlere oranla daha fazla genişlediği gözlemlenmiştir [24].

Hava ve su çarpan akışkan jetleri uygulamalarında en yaygın kullanılan akışkan türleridir. Buna ek olarak farklı termo fiziksel özelliklere sahip akışkanların performanslarının belirlenmesi de oldukça önemlidir. Dielektrik sıvı jetleriyle yaptıkları deneysel çalışmada Garimella ve Rice yerel taşınım laısı transferi katsayılarının, Re sayısı, (H/d) oranı ve lüle çapıyla değişimini incelemişlerdir. Aynı Re sayısı ve (H/d) oranı için, daha küçük çaplı lülelerin daha yüksek taşınım laısı transferi katsayısı değerleri gösterdiği, durma noktasındaki taşınım laısı transferi katsayısının $(H/d) \leq 5$ değerleri için fazla değişmediği, daha büyük mesafelerde ise azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu sonuçlardan deneylerindeki sabit hız çekirdeği mesafesinin $(H/d)=5$ civarında olduğu sonucunu çıkarmışlar bunlara ek olarak (H/d) 'nin 1 ve 2 değerlerinde durma noktasına ek olarak ısı transferinde ikincil maksimum değerler gözlemlemişler ve bu değerlerin (H/d) 'nin azalmasıyla daha belirgin olduğunu belirtmişlerdir [25].

Yüzeye bir açıyla çarpan jetler çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Eğik çarpan jetlerin sebep olduğu uniform olmayan ısıtma ve soğutma karakteristikleri sistem performansını etkilemektedir. Bu sebeple ısı transferi işlemlerinde eğikliğin etkisi araştırmalara konu olmuştur. Yan ve Saniei dairesel jetlerle yaptıkları çalışmada çarpma açısının ve H/D oranının yerel taşınım laısı transferi katsayılarına etkisini incelemişlerdir. Dik çarpmalarda mevcut olan simetrik yapının bozulduğunu ve asimetricliğin H/D oranının azalmasıyla arttığını belirlemişler, ayrıca maksimum ısı

transferinin durma noktasından daralan yöne doğru kaydığını gözlemlemişlerdir. Isı transferinin, maksimum olduğu noktadan itibaren değişimi incelendiğinde özellikle küçük H/D değerlerinde, daralma yönünde sürekli bir azalma görülürken genişleme yönünde ikincil maksimum noktaların olduğu gözlemlenmiştir. Çarpma yüzeyi eğikliğinin artmasıyla birlikte, maksimum ısı transferinin azaldığı ve gözlemlendiği noktanın daralma yönünde kaydığı tespit edilmiştir [26].

Çarpan jet uygulamalarında sistemin geometrik özelliklerinin yanı sıra akışkan özellikleri de inceleme konusu yapılmıştır. Akışkanın termofiziksel özelliklerinin, çarpan jetlerin ısı transferine etkisini incelemek için yaptıkları çalışmada Li ve Garimella Pr sayısının 0.7'den 25.2'ye kadar olan değerleri için korelasyonlar elde etmişlerdir. Korelasyon parametreleri olarak Re sayısı, Pr sayısı, orifisin çap-uzunluk oranı ve ısı kaynağı boyu-orifis çapı oranı kullanılmıştır. Daha önceki çalışmalarda genelde Pr sayısının üstü olarak atanan 0.4 değeri kullanılmayıp, değer korelasyon sonucunda elde edilmiştir. Durma noktası ve ortalama Nu sayıları bahsedilen bütün Pr sayıları aralığında elde edilmiş, ayrıca su, hava ve dielektirik sıvı için ayrı ayrı korelasyonlar türetilmiştir [27].

Dairesel ve iki boyutlu jetlerin yanısıra özellikle serbest jetler için eliptik geometriye sahip jetlerde çalışma konusu yapılmıştır. Büyük eksen- küçük eksen oranı 2 olan serbest eliptik jetlerle yaptıkları deneysel çalışmada Ho ve Gutmark, eksen değiştirme sebebiyle eksen değiştirme sebebiyle akış özelliklerinin, ortalama hızların, türbülans yoğunluğunun ve Reynolds gerilmelerinin küçük ve büyük eksen yönünde farklılıklar gösterdiğini bulmuşlardır. Ayrıca çevre havasının jet içerisine çekilmesinde eliptik jetlerin dairesel jetlere oranla çok daha etkili olduğu sonucuna ulaşmışlardır [28].

Yine serbest jetleri konu alan bir diğer çalışmada Hussain ve Husain eliptik geometriye sahip hava ve su jetlerini incelemişlerdir. Akış gözleme deneylerinin sonucunda küçük eksen yönündeki genişlemenin büyük eksendekine oranla daha fazla olduğunu bunun da eksen değiştirmeye sebep olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bu mekanizmanın jetlerin uyarılma frekansından etkilendiği deney sonuçlarından görülmüştür [29].

Eliptik geometriye sahip çarpan jetlerle ilgili ilk çalışmalardan birisi Lee vd. büyük eksen – küçük eksen oranı 2.14 olan jetlerle gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada $H/D=2$, $Re=10\ 000$ ve $20\ 000$ değerlerinde yerel Nusselt sayılarında ikinci ve üçüncü maksimum değerleri gözlemlemişlerdir. Ayrıca Nusselt sayısının Re sayısına bağımlılığının $H/D=10$ değerinde daha küçük değerlere oranla daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Sonuçlar küçük ve büyük eksen yönünde durgunluk noktasından uzaklığa bağlı olarak ifade edilmiştir [30].

Büyük eksen – küçük eksen oranının eliptik çarpan jetlerde durgunluk noktasındaki ısı transferine etkisi sınırsız jetler için Lee ve Lee tarafından incelenmiştir. Bahsedilen oranın 1, 1.5, 2, 3, 4, değerlerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada $(H/d)=2$ değerinde büyük eksen ile küçük eksen oranı 4 olan jetle en yüksek ısı transferi elde edilmiştir. $(H/d)>6$ değerlerinde eliptik jetlerle dairesel jetten daha düşük ısı transferleri elde edilmiştir [31].

Dairesel jet dizileriyle ilgili oldukça fazla çalışma bulunmasına rağmen eliptik jet dizileriyle ilgili çok az sayıda çalışma yapılmıştır. Yan vd. gerçekleştirdikleri oldukça kapsamlı çalışmada farklı büyük eksen – küçük eksen oranlarına sahip sınırlı jet dizilerinin akış ve ısı transferi özelliklerini incelemişlerdir. Eksen değiştirme mekanizmasını büyük eksen ile küçük eksen oranının 1 den büyük değerlerinde gözlemlemişler, en yüksek ısı transferi değerlerinin ise Re sayılarına bağlı olarak farklı büyük eksen ile küçük eksen oranlarında gerçekleştiğini bulmuşlardır [32].

Konu üzerindeki sayısal çalışmalar ilk başlarda laminar rejim üzerinde yoğunlaşmıştır. Van Heinen vd. iki boyutlu sınırlı çarpan jetlerin laminar rejimde ısı ve akış karakteristiklerini incelemek için yaptıkları sayısal çalışmada sonlu farklar yöntemiyle iki boyutlu Navier-Stokes ve enerji denklemlerini vortisite formülasyonu ile çözmüşlerdir. Çalışmada jet çıkışındaki hız profiline, Re sayısının, emmenin ve değişken termo fiziksel özelliklerin etkisi incelenmiştir. Parabolik hız profiliyle elde edilen durgunluk noktası ısı transferi değerlerinin düz profile oranla 1.5-2 kat daha yüksek değerler verdiği bulunmuş, bu durum parabolik jetin sahip olduğu yüksek

momentumla izah edilmiştir. Nu sayısı değerlerinin $Re=0.5$ ile oranlanması neticesinde farklı Re sayılarındaki boyutsuz ısı transferi değerlerinin bir eğri üzerinde gösterilebileceği görülmüştür. Ayrıca emmenin ısı transferini arttırıcı bir etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır [33].

Sayısal çalışmalarda momentum ve süreklilik denklemlerini tek bir denklem halinde ifade edip, eş zamanlı çözülecek denklemlerin sayısını azaltan akım fonksiyonu tanımlaması oldukça sık kullanılmıştır. Bunlardan birinde Saad vd. dairesel jetlerin, laminar akış şartlarında ısı transferi ve akış karakteristiklerini belirlemek için Navier-Stokes ve enerji denklemlerinin vortisite akım fonksiyonu formülasyonunu sayısal olarak çözmüşlerdir. Çalışmalarında ısı transferi St sayısı cinsinden ifade edilmiş ve Re sayısının artışıyla St sayısında bir azalma görülmüştür. Bu azalma, taşınım ile ısı transferi katsayısının, jet hızının 1'den küçük bir kuvvetiyle artmasıyla ilintilidir. Sonuçlarını benzer durumlar için deneysel kütle transferi ölçümleriyle karşılaştırmışlar ve uyum içinde olduğunu gözlemlemişlerdir. $1.5 < H/D < 12$ aralığında elde edilen sonuçlardan durgunluk noktasındaki ve ortalama ısı transferinin H/D oranından fazla etkilenmediği sonucuna ulaşmışlardır. Jet çıkışındaki hız profiline etkisini incelemek için düz ve parabolik hız profilleri için yaptıkları çözümlerde, parabolik çıkış hızı profillerinin kayda değer şekilde daha yüksek ısı transferi değerleri verdiği görülmüştür. Bu durum parabolik profilin durgunluk noktasındaki daha yüksek momentum düzeyiyle açıklanmıştır. Aynı durumla ilgili olarak parabolik profilin sürtünme katsayısı değerlerinin düz profilden elde edilenlerin 4 katı civarında olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca emmenin etkisi de incelenmiş ve ısı transferine olumlu katkı yaptığı görülmüştür [34].

Artırılmış ısı transferi uygulamalarına sayısal bir örnek olabilecek çalışmada, Owsenek vd. radyal ve aksel jetlerde, jet içerisinde oluşturulan spiral etkisini incelemişlerdir. Sıkıştırılmayan, laminar akış için boyutsuz Stokes ve enerji denklemlerini çözerek tanımladıkları spiral sayısının 0'dan 1'e kadar değişen değerleri için sonuçlar elde etmişlerdir. Oluşturulan spiralin aksel jetlerde Nu sayısında azalmaya sebep olduğu

görülürken, tam aksine radyal jetlerde oluşturulan spiralin hem yerel hem de ortalama Nu sayılarında kayda değer bir artışı beraberinde getirmiştir [35].

Laminer rejimde kararsız hal davranışlarının da hesaba katıldığı Chiriac ve Ortega tarafından gerçekleştirilen nümerik çalışmada $Re=250-750$ aralığında yarıklı jetler incelenmiştir. Re sayısının 585 ile 610 değerleri arasında akışta kararsız hal özellikleri görülmeye başlandığı ve bu rejimde Nu sayısının Re sayısına bağımlılığın azaldığı, doğrusal olmayan kararsız hal mekanizmasının ısı transferini artırdığı gözlemlenmiştir [36].

İki boyutlu ve dairesel jetlerin yanısıra farklı geometrilere sahip jetlerde sayısal olarak çalışılmıştır. Bu bağlamda Chattopadhyay, dairesel boşluklu laminer çarpma jetlerinin ısı transferi karakteristiklerini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada silindirik koordinatlardaki süreklilik, momentum ve enerji denklemleri iki boyutlu olarak çözülmüş, sonuçlar aynı kütleli debide dairesel çarpma jetleri sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Dairesel boşluklu çarpma jetleriyle, dairesel jetlere oranla daha düşük ısı transferi miktarlarının elde edildiği görülmüştür. Re sayısının tanımlanmasında kullanılan karakteristik uzunluğun seçiminde, dairesel jetle aynı kütleli debiyi veren kriter kullanılmış, bunun sonucunda da iç çap karakteristik uzunluk olarak alınıp, dış çap kütleli debilerin eşit olmasını sağlayacak şekilde seçilmiştir [37].

Çarpan akışkan jetleri pratik uygulamalarının yanısıra türbülans modellerin test edilmesi için de çok uygun akış özellikleri göstermektedir. Craft vd. çarpan jetlerin akış özelliklerini aşağıdaki şekilde özetlemiştir: “Durma noktası civarındaki akış nerdeyse dönmesiz normal uzama gösterirken çarpan jetin kenarlarına doğru akışta güçlü bir dönme ve akım çizgilerinin eğilmesi söz konusudur. Buna ek olarak çarpma noktasından uzakta akış karmaşık bir çarpma yüzeyine paralel akışa dönmekte ve maksimum kayma gerilmesi duvar bölgesinin dışında oluşmaktadır”[38]. Çarpan jet akışlarında yukarıda bahsedilen karmaşık yapı ve sayısal açıdan ele alınması çok uygun olan basit geometri sebebiyle türbülanslı çarpan jetlerle ilgili birçok sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir.

Shi vd. türbülanslı yarık jetleri standart k- ϵ ve RMS modelleri kullanarak inceledikleri çalışmada her iki modelinde ısı transferini belirlemede yetersiz kaldığını belirtmişlerdir [39]. Türbülanslı çarpan jet çalışmalarında üç farklı ikincil moment tipi türbülans modeli ve eddy viskozite modeliyle elde edilen sonuçlar Craft vd. tarafından karşılaştırılmıştır. Yazarlar, eddy viskozite modelinin ve temel Reynolds gerilmesi modelinin deneysel sonuçlarla pek uyumlu olmadığını belirtmişler, duvara yakın bölgeye yönelik düzeltmeler içeren modelin deneylerle uyumunun daha iyi olduğunu görmüşlerdir [38]. İkincil moment tipi modellerin deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu Dianat vd. tarafından yapılan çalışma da da belirtilmiştir [40].

Çarpan jetlerin türbülanslı akış şartlarındaki modellemesine yönelik olarak standart k- ϵ modeli ve düşük Reynolds sayısı modellerde oldukça yaygın kullanılmıştır. Gibson ve Harper tarafından k- ξ modeli kullanılarak yapılan çalışmada modelin standart k- ϵ modelinden daha iyi sonuçlar verdiği ancak türbülans kinetik enerji üretimini olduğundan fazla gösterdiği görülmüştür [41].

Sınırsız çarpan jetlerin yanısıra sınırlı türbülanslı jetlerde sayısal olarak incelenmiştir. Hosseinalipour ve Mujumdar sınırlı jetlerle yaptıkları çalışmada durma bölgesi Nusselt sayılarını düşük Reynolds sayılı bir model kullanarak belirlemişlerdir [42]. Yine sınırlı jetlerle Wang ve Mujumdar tarafından yapılan bir başka çalışmada farklı düşük Reynolds sayılı modeller test edilmiş modellerin yüksek jet çarpma yüzeyi mesafelerinde daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [43].

Çarpan jetlerle ilgili yukarıda bahsedilen deneysel çalışmalardan bazıları da arttırılmış ısı transferi kapsamında değerlendirilebilir. Aşağıda verilecek çalışmalarda ise aktif ve pasif ısı transferi artırma tekniklerinin doğrudan uygulandığı çalışmalar açıklanmıştır.

Pasif tekniklerden kanatçıklı yüzeyler kullanımına örnek teşkil eden, elektronik elemanların soğutulmasına yönelik yaptıkları çalışmada Hollworth ve Durbin, düz çarpma yüzeyi üzerine jet dizileriyle soğutulmak üzere 25x25x6.25 mm boyutlarında dikdörtgen geometrilik bloklar yerleştirmişlerdir. Bu bloklardan bazılarının ısıtılması ve

bunların çarpma yüzeyinin değişik yerlerine yerleştirilmesi yoluyla hem ısıtılan bloklardaki yerel ısı transferi karakteristiklerini hem de ısıtılan ve ısıtılmayan bloklar arasındaki boşluktaki ısı transferi karakteristiklerini ısıtılan çarpma yüzeyinin konumuna bağlı olarak incelemiştir. Ayrıca yapılan basınç ölçümlerinin sonucunda, toplam basınç düşümünün %90'a yakın bir kısmının orifis boyunca olduğunu belirlemiştir. Çarpan jet dizileri kullanılarak yapılan soğutmanın, benzer koşullar altında kanal akışıyla soğutmaya oranla %50 daha yüksek taşınım ile ısı transferi katsayıları verdiği görülmüştür [44].

Aktif artırılmış ısı transferi metodlarında sistemde elektrik, akustik alanlar ve titreşim oluşturmak için dışarıdan güç kullanımı söz konusudur. Liu ve Sullivan, hoparlörler vasıtasıyla $(H/d) \leq 2$ mesafelerinde akustik olarak uyarılmış jetlerin ısı transferi ve akış özelliklerini inceledikleri deneysel çalışmada uyarılma frekansının duvar jeti bölgesindeki ısı transferine etkisini belirlemiştir. Frekansa bağlı olarak akışın, değişen özelliklerinin de duman gözleme tekniği kullanılarak belirlendiği çalışmada, sonuçlar, duvar jeti bölgesinde uyarılma frekansının doğal frekansa yakın olduğu durumlarda bir ısı transferi artımının meydana geldiğini, uyarılma frekansının harmonik altı frekansa yakın olduğu durumlarda ise yerel ısı transferinde bir azalma meydana geldiğini göstermiştir. Akış gözleme sonuçlarını kullanarak bu durum açıklanmıştır. Uyarılma frekansının doğal frekansa yakın olduğu durumlarda, vortex eşleşmesinin çok sayıda küçük boyutta türbülans içeren yığın edisi üretmesi sonucu ısı transferinde artırım olmuş, uyarılma frekansının doğal frekansın harmonik altı frekansına yakın olduğu durumlarda ise büyük boyutta kuvvetli vortekslerin sınır tabakası ayrılmasına sebep olduğu görülmüş bu etki sonucunda ısı transferinde azalma meydana gelmiştir [45].

Aktif ısı transferi artırma teknikleri su jetlerinde de kullanılmıştır. Sheriff ve Zumbrennen su jetleri kullanarak yaptıkları çalışmada sinüzoidal ve kare dalga formlarının taşınım ile ısı transferine etkisini incelediler. Bu tür bir akış sağlamanın jet çıkışında bir kararsızlık oluşturabileceği, durgunluk bölgesinde kaotik bir akışkan hareketi sağlayabileceği ve sınır tabakasının yenilenmesine sebep olabileceği bunun da taşınım ile ısı transferini etkileyeceği düşünülerek yapılan çalışma sonucunda sinüzoidal

dalga formundaki akışla elde edilen Nusselt sayılarının kararlı akışa oranla daha düşük olduğu gözlemlenmiş, bunun sebebi kendilerinin yaptığı teorik çalışmadan elde edilen sinüzoidal dalga formları için sınır tabakası kalınlığının kararlı jetlere oranla daha yüksek olmasıyla açıklanmıştır. Kare dalga formlarında ise belli frekanslarda Nusselt sayısında %33'e varan oranlarda artışlar görülmüş bu durum sınır tabakası yenilenmesiyle açıklanmıştır [46]

Isı değiştirgeçlerinde çok yaygın şekilde kullanılan kanatçıklı yüzeyler elektronik elemanların çarpan jetlerle soğutulması uygulamalarında da kullanılmıştır. Değişik çapta ve sayıda lüle ve lüle dizileriyle yaptıkları çalışmada Brignoni ve Garimella kanatçıklı yüzeylerin ortalama taşınım ile ısı transferi katsayılarını düz yüzeylerle değişik parametrelere bağlı olarak karşılaştırmışlardır. Çarpma jetlerinin optimizasyonuna yönelik bir çaba olarak, kanatçıklı ve düz durum için ortalama taşınım ile ısı transferi katsayılarının Re sayısı, hava debisi, basınç düşümü ve pompa gücüyle değişimi incelenmiştir. Sabit Re sayısında büyük çaplı tek lülelerin ($D \geq 6.35\text{mm}$) kanatçıklı yüzeyde daha iyi ısı transferi performansı gösterdiği, sabit hava debisinde karşılaştırma yapıldığında ise daha küçük çaplı lülelerin daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir [47].

Yukarıda bahsedilen çalışmanın devamı niteliğindeki deneysel çalışmada El Sheikh ve Garimella farklı kanatçıklı yüzeyleri jet dizileriyle soğutmuşlar, kanatçık yüksekliği ve taban alanının etkisini incelemişlerdir. Sonuçları kanatçıksız durum için, aynı Re sayısı ve aynı kütleli debi için karşılaştırmışlardır. Ayrıca tek jet ve jet dizileri ile verim değişimi de incelenmiştir. Test edilen bütün durumlar için sabit Re sayısında, tek jetlerin aynı lüle çapındaki jet dizilerine oranla daha düşük taşınım ile ısı transferi katsayısı değerleri verdiği görülürken, karşılaştırma aynı toplam kütleli debide yapıldığında tek jetlerin daha yüksek taşınım ile ısı transferi katsayısı değerleri verdiği gözlemlenmiştir. Yüksek kanatçıkların ve küçük jetler arası mesafenin kullanıldığı durumdaki ısı transferi kanatçıksız yüzeye göre en yüksek değeri vermiştir [48].

Sınır tabakasının şekli ve kalınlığı ısı transferi ve akış özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Çarpan jetlerde, jetin çıkıştaki hız profiline ısı transferini etkilediği ayrıca basınç düşümünün büyük bir kısmının lüle içerisinde gerçekleştiği bilinmektedir. Bahsedilen durumların toplam etkisini belirlemek amacıyla Brignoni ve Garimella 3.18 mm çapında lüleler kullanarak lüle giriş eğiminin ısı transferi ve basınç düşümüne etkisini incelemişlerdir. Tanımlanmış oldukları performans katsayısı ile lüle giriş eğiminin toplam etkisini belirlediler. Yerel taşınım ısı transferi katsayılarını hesaplayabilmek için sadece 1 adet 36 gauge T tipi ısı çift ve travers mekanizması kullandılar. Lüle girişini eğimlendirmek suretiyle taşınım ısı transferi katsayısı basınç düşümü oranında %30'a varan artışlar elde etmişlerdir [49].

Özellikle ısı değiştirgeçlerinde kanal içerisindeki akış içerisine akışta dönmeler oluşturacak parçalar yerleştirilmesi çok yaygın bir uygulamadır. Çarpan jetlerde de benzer mekanizma ile ısı transferi arttırımı ihtimalini araştırmak için Lee vd. türbülanslı akımda dairesel jetleri kullanarak, lüle çıkışına eklenen spiral oluşturucuların ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Re sayısının 23000 değerinde sabit tutulduğu çalışmada H/Doranları 2'den 10'a kadar değiştirildi, dört farklı spiral sayısında yerel ve ortalama taşınım ısı transferi katsayıları için ölçümler yapılmış, sonuçlar spiral oluşturucular kullanılmayan durumlarla karşılaştırılmıştır. (H/d)'nin 2 değeri için ortalama Nu sayılarının spiral kullanılan akımda daha yüksek olduğu gözlenmiş, ancak (H/d)≥10 durumunda spiral etkisinin yok olduğu sonucuna ulaşılmıştır [6].

Benzer mantıkla, Zhou ve Lee, lüle çıkışından önce yerleştirilen, ağ yapının akış karakteristiklerini değiştireceğini bunun da ısı transferini etkileyeceğini düşünerek, lüleden önce farklı yoğunlukta ağ yapıları yerleştirerek deneyler yaptılar. Sonuçlar ağ yapının durma bölgesindeki ısı transferini (H/d) < 4 değerleri için az da olsa arttırdığını fakat daha büyük H/D değerlerinde ağ yapının arttırdığı türbülans yoğunluğu, jet momentumunun azalmasıyla dengelenmiş ve düz duruma göre daha düşük ortalama Nusselt sayıları elde edilmiştir [50].

Çarpma yüzeyi üzerinde kanatçıklı yüzeyler eklenmesine ek olarak, fazla alan arttırımı veya azalmasına sebep olmayan çıkıntı ve çukurlukların etkisi de arttırılmış ısı transferi çalışmaları kapsamında incelenmiştir. Ekkad ve Kontrovitz çarpma yüzeyi üzerinde oluşturdukları kare ve üçgen dizimli farklı derinlikteki çukurlukların ısı transferine etkisini inceledikleri çalışmada çapraz akış etkisinde dairesel jet dizilerini kullanmışlardır. Bulguları, kullanılan çukurlukların bulunduğu çarpma yüzeyinin düz yüzeye oranla taşınımın ısı transferi değerlerinde bir azalmaya sebep olduğunu göstermiştir [51].

Benzer şekilde, çarpma yüzeyi üzerinde oluşturulan 19.9x19.9x6.4mm boyutlarında bir çıkıntılı yüzeyin kullanıldığı çalışmada Fleischer ve Nejad çıkıntılı yüzeyde elde edilen Nu sayısı değerlerini düz yüzey ile karşılaştırmışlardır. Değişik çapta dairesel jetlerin kullanıldığı çalışmada Nu sayısında düz yüzeye karşılaştırıldığında %5 ile %15 arasında değişen artışlar gözlemlenmiş, artışların azalan Re sayılarında ve artan jet çaplarında daha belirgin olduğu görülmüştür [52].

Royne ve Day jet dizileri ile yaptıkları çalışmada orifis tipi jetlerin çıkış açılarını ve kalınlığını değiştirerek bunun basınç düşümü ve ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Çıkışa doğru daralan orifis tipi jetler ile daha yüksek ortalama ısı transferi elde edildiği ayrıca daha büyük orifis kalınlığına sahip jetlerle daha düşük basınç düşümleri oluştuğunu belirttiler [53]. Yine jet dizileriyle yapılan bir çalışmada Yan vd. çarpma yüzeyi üzerine açılı olarak yerleştirilen çıkıntılarının ısı transferine etkisini sıvı kristal ölçüm tekniği kullanarak incelemişlerdir. Yerleştirme açısına bağlı olarak ısı transferinde artma ve azalmalar görülürken en yüksek ısı transfer artımı 45 derece açıyla eşit aralıklarla yerleştirilmiş çıkıntılarla elde edilmiştir [32].

Literatür araştırmasından da görüleceği gibi, çarpan jetlerle ilgili birçok deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışmada ilk olarak daha önce çok az incelenmiş olan, çarpan jetlerde kütle transferi, doğal taşınımın yerel ve ortalama ısı transferine etkisi, deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Literatürde çok farklı jet geometrileriyle çalışılmıştır. Aynı zamanda Düz ve eğik yüzeyli çarpan jetlerin kütle

transferi üzerine etkileri ayrı ayrı araştırılmıştır. Ancak bunların sistematik bir şekilde bir arada aynı şartlarda karşılaştırılması pek yoktur. Bu amaca yönelik olarak düz zeminli (katot) ve eğik zeminli (katot) çarpan jetler aynı kütleli debiler ve (H/d) oranları kullanılarak deneysel ve sayısal olarak incelenmiş performansları karşılaştırılmıştır. Çarpan jetlerle elde edilen kütle transferi ve eğik-düz zeminli katot yüzeyi çok ilgilidir. Çalışmamızda, bu sebeple düz ve eğik yüzeyli (katot) jetler için ayrıntılı ELDCT tekniği kullanılarak kütle transferleri hesaplanmış böylece eğik ve düz yüzeyli çarpan jetlerin benzerlik ve farkları ortaya konmuş, ayrıca kütle transferi sonuçlarını yorumlamada kullanılabilecek veriler elde edilmiştir.

2.5. Kütle Transfer Katsayısı Ölçümü Tekniği (Elektrokimyasal Sınırlayıcı Difüzyon Akımı Tekniği)

Çalışmamızda ELDCT (Elektrokimyasal sınırlayıcı difüzyon akımı) tekniği kullanılmıştır. Özellikle sıvıların kullanıldığı kimya mühendisliği alanındaki uygulamalarda, difüzyon kontrollü şartlar altında uygulanan elektrokimyasal reaksiyon metodu (sınırlayıcı difüzyon akımı tekniği) yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü bu metod, bir katı-sıvı ara yüzeyindeki kütle transferi hızının ve kesme geriliminin hem ortalama değerlerini hem de lokal değerlerini ölçmek için kullanılabilir. Katotda ölçülen sınırlayıcı akım yoğunluğunun kütle, momentum transfer hızı hesaplanabilmektedir (Mizushina 1971). Difüzyon kontrollü proseslerde sınırlayıcı elektroliz akımı ölçümü, kütle (ısı) transferi hızlarının belirlenmesi ve belirli hidrodinamik olayların araştırılması için kullanışlı ve doğru sonuç veren bir tekniktir (Berger 1983). Sınırlayıcı akım tekniğinin kullanılmasındaki amaç, elektrik alanı içindeki kütle aktarım değerlerinin verilen akış şartlarında bulunmasıdır. Bu metod yüksek schmidt sayısına sahip akışkanlarda, duvar akılarının belirlenmesinde de geniş bir uygulama alanına sahiptir. Ayrıca oldukça memnun edici sonuçların elde edilmesi sebebi ile özellikle caziptir (Vallis 1978)

Katı yüzeyler ve akışkanlar arasındaki kütle transfer hızlarının ölçümü için yaklaşık yarım asırdır kullanılan sınırlayıcı akım tekniği, Mizushina (1971), Wragg (1977),

Burdukov (1972), Selman ve Tobias (1971), Hanratty (1972), Berger and Zia (1983), Bourne *et al.* (1985), Yapıcı vd (1994), Tanaka ve Hasibe (1995), Taama *et al.*(1996), Ravan *et al.* (2001), Bouet *et al.* (1992), Virgine *et al.* (1998) tarafından uygulanmıştır.

Ard arda konsantrasyon polarizasyonu ve kimyasal polarizasyonun oluşturduğu elektrot reaksiyonlarında, iyonlar kimyasal ve fiziksel değişimin meydana geldiği elektrot yüzeyine taşınırlar. Elektrokimyasal reaksiyon kullanılmasıyla kütle transferi hızlarının ölçümünde, kimyasal polarizasyonu ihmal etmek daha iyi ve daha kullanışlıdır. Çünkü sıvı-katı ara yüzeyinde konsantrasyon sıfır olarak kabul edildiği zaman, kütle transfer katsayıları sınırlayıcı akımdan çok kolay bir şekilde elde edilir.

Çözelti yığımından elektrot yüzeyine iyonlar genellikle üç şekilde taşınırlar.

1. İyon göçü: Elektroliz hücresi içerisindeki elektriksel potansiyel gradyeni sebebi ile oluşan elektriksel alan içinde yüklü parçacıkların hareketi.
2. Difüzyon: Bir konsantrasyon gradyeni veya bir kimyasal potansiyel gradyeni etkisi altındaki türlerin hareketi.
3. Konveksiyon: Karışma veya hidro dinamik taşınım. Yani bir akışkan akışı ile beraber gerçekleşen taşınım. Genellikle tabi konveksiyon ve zorlamalı konveksiyon sebebi ile oluşan akışkan akımı ve durgunluk bölgeleri, laminar ve türbülent akışla karakterize edilen akışkan akımları durumunda gerçekleşen taşınım.

Sistem içerisinde geçen toplam elektrik akımı, difüzyon, migrasyon ve yığın akışı için gerekli akımların toplamına eşittir.

$$I_{\text{Toplam}} = I_{\text{difüzyon}} + I_{\text{migrasyon}} + I_{\text{yığın}}$$

Bir elektroliz hücresi içinde transfer olayının, kararlı halde ve elektrolit yüzeyine dik y doğrultusunda ve tek yönlü olarak gerçekleştiği kabulü ile bir elektrot için tek boyutlu kütle transferi Nerst-Planck eşitliği ile verilir.

$$N_A = -D_{AB}(\partial C_A / \partial y) + (z_A F / RT) D_{AB} C_A (\partial \theta / \partial y) + C_A V_y \quad (2.1)$$

Eşitliğin sağ tarafındaki üç terim; difüzyon, iyon göçü ve konveksiyonun katkısını göstermektedir. Eşitlikteki son terim olan konveksiyon, redox prosesinde görülmez. Çünkü film tabaka içindeki elektrot yüzeyine dik net yığın akışı ihmal edilebilir. Fakat bu terim, elektrot yüzeyinde metal birikimi prosesinde ihmal edilemez. Çünkü bir yığın akışı vardır. Bununla birlikte bu, terimin etkisi normal şartlar altında çok küçüktür.

İyon göçü(migration), çözelti içine pasif elektrolitin aşırısının ilavesiyle ihmal edilebilir seviyeye indirgenebilir. Kullanılan pasif elektrolitler elektrot yüzeyinde reaksiyon vermezler ve mevcut reaksiyon veren türlerle kıyaslandıklarında, nispeten yüksek konsantrasyona ve yüksek iletkenliğe sahiptirler. Eklenen bu elektrolit yüksek iletkenliği sebebi ile çözeltinin ohmik direncini ihmal edilebilecek kadar küçük bir değere indirir. Böylece elektrot yakınında yüksek bir potansiyel grad yeni yoktur ve sıfır olarak kabul edilir. Sistemin tamamen difüzyon kontrollü olması istenir. Bu nedenle iyon göçü etkisi yok edilir. Sınır tabaka içinde yığın akış katkısı da difüzyon hızı yanında ihmal edilebilecek seviyede olduğundan

$$I_{\text{Toplam}} = I_{\text{difüzyon}}$$

olur. İyon göçününde sıfır olarak kabul edilmesi ile elektrik akımının hepsi elektrot yüzeyinde reaksiyon veren iyonların reaksiyonundan kaynaklanır. Böylelikle eşitlik,

$$N_A = -D_{AB}(\partial C / \partial y) \quad (2.2)$$

halini alır. Genel durumda eşitliğin integrasyonu ile kütle transfer hızı için aşağıdaki ifade verilir.

$$-D_{AB} / \partial y = k_{ve} \partial C = C_{\infty} - C_S \text{ olarak alınırsa,}$$

$$N_A = k(C_\infty - C_S) \quad (2.3)$$

Burada C_∞ : akışkan yığılı konsantrasyonu, kmol/m^3

C_S : elektrot yüzeyindeki konsantrasyon, kmol/m^3

k: kütle transfer katsayısı, m/s

Elektrot yüzeyinde meydana gelen reaksiyon çok hızlıdır, elektrot yüzeyine gelen iyonlar hemen reaksiyon vererek tüketilir. Sistem sınırlayıcı akım durumunda film içinde difüzyon kontrollü olduğundan dolayı, elektrot yüzeyinde konsantrasyon

$$C_S = 0 \quad (2.4)$$

Olacağından, eşitlik aşağıdaki hale gelir.

$$N_A = k C_\infty \quad (2.5)$$

Faraday Kanununa göre, reaksiyon veren iyonların yüzeye aktarımı, sınırlayıcı akım miktarı ile doğru orantılı olup aşağıdaki şekilde verilir.

$$N_A = I_L / zFA \quad (2.6)$$

Burada, I_L =sınırlayıcı akım, A

A=elektrot alanı, m^2

F=Faraday sabiti, 96485 Cmol^{-1}

Denklem (1.3) ve (1.4) birleştirilince

$$k = I_L / zFA C_\infty \quad (2.7)$$

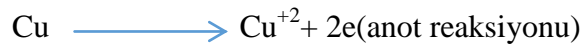
elde edilir. Aktif iyon bulunduran bir elektrolit çözeltisine daldırılan iki elektrot arasına bir gerilim uygulanıp bu gerilim zamanla arttırıldığı zaman üç bölgeden oluşan gerilim akım eğrisi elde edilir. Bu şekilde sınırlayıcı akımı veren plato kolaylıkla görülmektedir (Şekil 3.2)

1.BÖLGE: Uygulanan gerilim düşük olduğu zaman elektrot yüzeyi üzerindeki reaksiyon hızı, reaktanların yüzeye aktarım hızından (reaktanın film tabakasından difüzyon hızı)daha yavaş veya bu hıza eşittir.

2.BÖLGE: Belirli bir gerilimden sonra reaksiyon hızı, reaktanın film tabakasından elektrot yüzeyine aktarım hızından daha hızlı olur. Böylece akımın sabit kaldığı bir plato bölgesi elde edilir. Bu durumda elektrot yüzeyine ulaşan reaktan reaksiyonla hemen tüketilir ve elektrot yüzeyi üzerinde reaktan konsantrasyonu sıfır olur. Bu halde proses iyonların film tabakasından difüzyonu ile kontrol edilir. Bu bölgede elde edilen akıma “Sınırlayıcı Difüzyon Akımı” adı verilir.

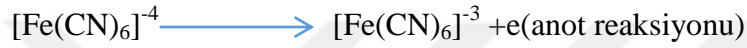
3.BÖLGE: Sistemde ikinci bir reaksiyon başlamıştır. Bu durumda çözücü ayrışması, yani katotta H₂gazı, anotta O₂gazı oluşmaya başlar.

Literatürde en çok kullanılan elektrolit sistemleri, katodik bakır birikimi reaksiyonu olan inert elektrolit olarak H₂SO₄ içeren sulu CuSO₄ çözeltisi ve inert elektrolit olarak NaOH veya KOH kullanılan ferri ve ferro siyanür içeren bir çözeltidir.



NaOH'in aşırısının katıldığı bu ikinci çözeltide inert bir elektrot yüzeyinde ferrisiyanür iyonları ferrosiyanür iyonlarına katodik olarak indirgenir. İlk sistem katot yüzeyinde bir metal birikim prosesi içerdiğinden kütle transfer yüzeyi fiziksel olarak değişmektedir.

Halbuki ferrisiyanür sisteminde katot yüzeyinde böyle bir birikim söz konusu değildir. Ferro-ferrisiyanüredox çifti en iyi elektrolittir. Çünkü alkali çözeltilerde stabildir ve katod üzerindeki kimyasal polarizasyonu o kadar küçüktür ki, kritik akış hızı çok yüksektir. Bir diğer avantajı ise katot ve anotta zıt yönlerde aynı reaksiyon meydana geldiği için çözeltinin bileşimi sabittir (Mizushina 1971). Sistemde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyon aşağıdaki gibidir.

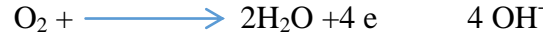


Bu elektroliti kullanmanın dezavantajı ise ferrisiyanür ve daha çok ferrosiyanürün, HCN oluşumuyla gerçekleşen fotokimyasal bozunmasıdır.



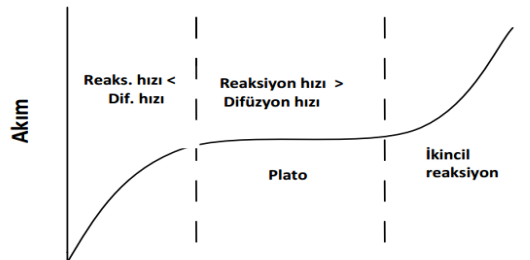
Oluşan HCN çözeltiyi kirletir ve elektrot yüzeyini zehirler. Bu nedenle çözelti, sistemin herhangi bir noktasında ışığa maruz bırakılmamalı sistemin ışık geçiren bölümleri, bir opak malzeme ile kaplanarak ışığa karşı izole edilmelidir. Özellikle akış hattında saydam olan flovmetre vb. ölçüm cihazlarını ve bağlantı elemanlarının kaplanması elektrolitin bozulmaması açısından büyük önem taşımaktadır (Berger and Ziai 1983)

Elektrolit ve elektrotların havayla temas etmelerinin etkileri komplekstir ve ölçümler üzerine havanın gerçek etkileri ile ilgili daha çok belirsizlik mevcuttur. Havanın bozucu etkisi kanıtlanmış bileşeni oksijendir. Fakat bunun yanı sıra H_2S gazıda muhtemelen çözeltinin alkalitesi nedeniyle absorbe edilebilir. Dolayısıyla bu maddede bir diğer potansiyel elektrot zehiridir. Katot üzerinde O_2 ile ilgili olması muhtemel yan reaksiyon Aggerwaal ve Talbot (1979) tarafından önerilmiştir.



Fakat bu reaksiyon oluşmasına ihtimal verilmemektedir. Çünkü bu reaksiyonun deşarj potansiyeli, difüzyon kontrollü şartların mevcut olduğu normal voltaj aralığından oldukça yüksektir. Bununla birlikte, elektrolit içinde oksijenin bulunması elektrot yüzeyi üzerinde oksit filmi oluşumuna yol açabilir veya ferrosiyanürün oksidasyonunun olması daha muhtemeldir. Bu sebeplerden ötürü çözelti içinde bulunan çözünmüş oksijen, inert bir gaz (N_2) ile sürüklenip uzaklaştırılmalıdır. Havanın daha küçük yüzdeli diğer bileşenleri, çözelti kirleticileri ve elektrot zehirleyicileri olarak bazik çözeltide çözünebilir. Mesela H_2S 'ün elektrodu pasifleştirmek suretiyle absorbe edildiği düşünülmektedir. Elektrot zehirleyicileri farklı şekillerde hareket eder. Genellikle ya yarışan reaksiyonların oluşumunu hızlandırdığı için difüzyon kontrollü şartlar hiçbir zaman gerçekleşmesin diye kimyasal polarizasyonu arttırarak veya alternatif olarak elektrot yüzeyinin bazı kısımlarını bloke etmek suretiyle, reaksiyon için elektrodu elverişsiz hale getirir (Berger and Ziai 1983)

Sınırlayıcı akım tekniği taşınım olayı ölçümlerine uygulandığı zaman, genellikle anot alanı katot alanından büyük alınarak hücre dizayn edilir. Elektrot alanlarının bu şekilde seçilmesiyle anottaki akım yoğunluğunun katottakinden daha küçük olması sağlanır ve proses katodik kontrollü olur. Böylece anottaki prosesin akım-gerilim eğrisinin şekli üzerinde hiçbir etkisi olmaz. İlave olarak prosesin katodik kontrollü olduğundan emin olmak için, ferrosiyanür konsantrasyonu ferri siyanürden yüksek yapılır.



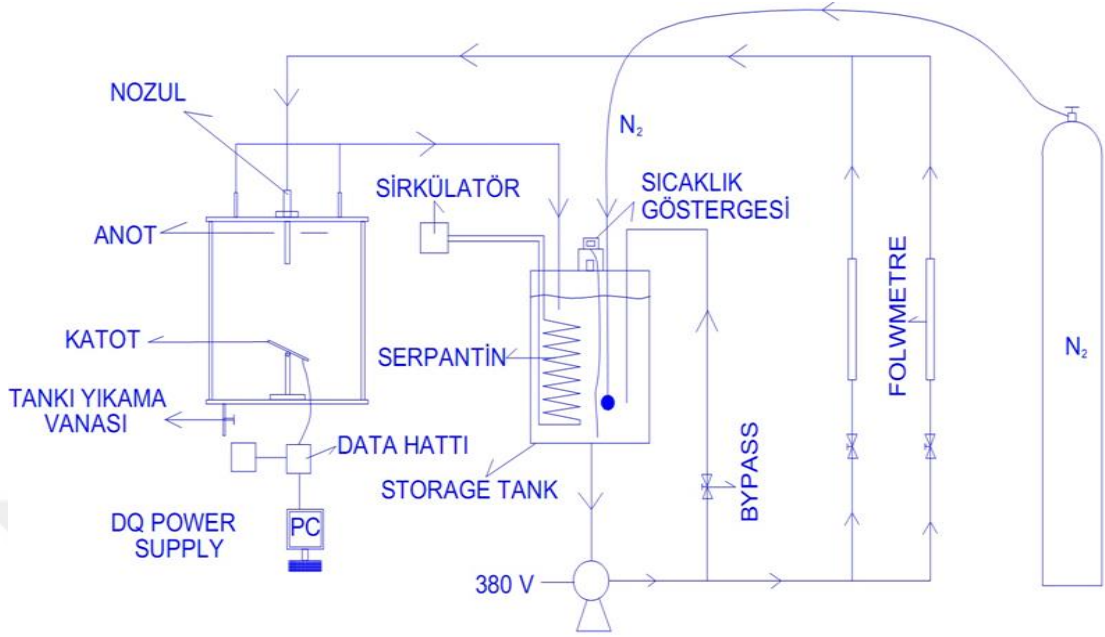
Şekil 2.7. Sınırlayıcı akım grafiği

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği deney düzeneği ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Deney sistemi elektrokimyasal olayların cereyan ettiği çarpan jet hücresi, çarpma yüzeyi ve üzerindeki lokal elektrotlar, akış hattı, akış ölçerler ve depolama tankı, çarpma yüzeyindeki elektrotlardan akım değerlerini okuyan data kartı, sıcaklık ölçerler (ısılıçift), çarpma yüzeyinin açılı olmasını sağlayan düzenek ve açı belirleme, kullanılan elektrolitin bileşimi ve konsantrasyon tayini ve ayrıca kütle transferi için kullanacağımız ELDCT ölçüm tekniği ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

3.1. Genel Deney Düzeneği

Çalışma kapsamında çarpan akışkan jetleriyle deneyler Atatürk Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında yapılmıştır. Deney düzeneğini oluşturan tüm parçalar elektrolit ile reaksiyon vermeyen delrin, PVC, polietilen plexiglass ve nikel metalinden yapılmıştır. Deney sistemi ise ayrıntılı olarak Şekil 3.1’de ve Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu sistemde depolama tankında azot atmosferinde tutulan elektrolit bir plastik pompa vasıtası ile emilerek akış ölçerler ve vana bulunan bir hat içinden geçerek jet hücresine ulaşmakta ve nozuldan püskürmek suretiyle kapalı durumdaki jet hücresi içinde çarpma yüzeyine çarptırılmaktadır. Daha sonra jet hücresinin üst kapağından basınç altında çıkarak tekrar depolama tankına dönmektedir. Depolama tankı içinde bulunan bir ısıl çift yardımı ile ve bir sıcak su sirkülatörü ile sıcaklık sürekli olarak izlenmekte ve elektrolit 20°C’de tutulmaktadır. Plastik küresel vanalar ve değişken alanlı inline akış ölçerler yardımı ile nozul çıkışındaki jet hızı istenen değerlerde tutulmaktadır.



Şekil 3.1. Deneysel sistem, akış hatları ve elektriksel bağlantılar

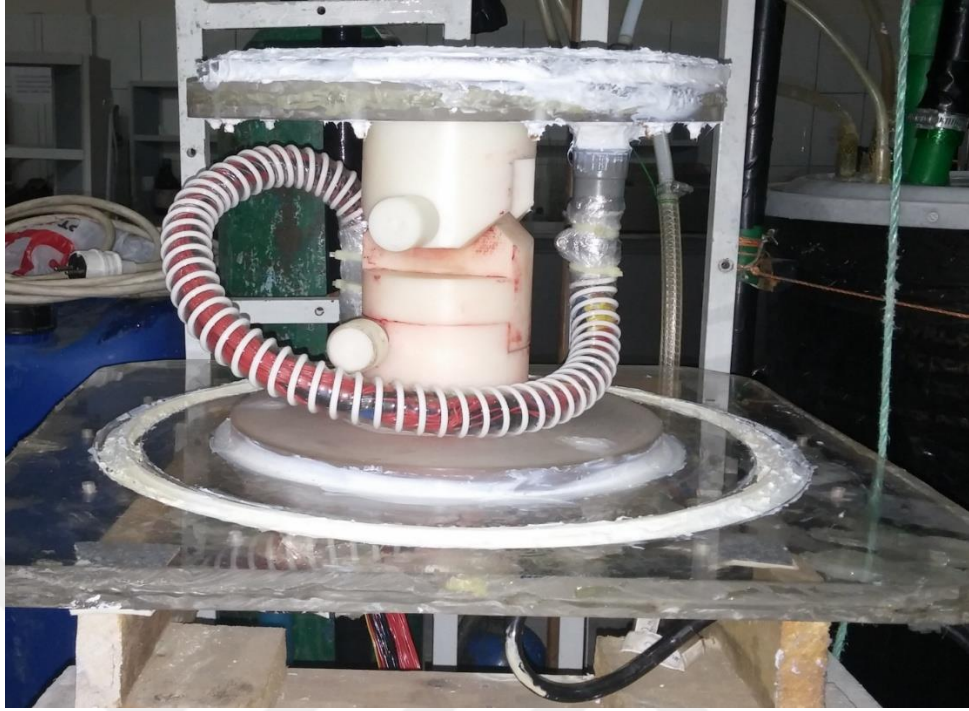
Jet hücresi, dikey konumda yerleştirilen yaklaşık 38 L'lik iç hacme sahip, 38cm yüksekliğinde, 36cm çapında ve 2,3cm et kalınlığında silindirik polietilen boru ile 2cm kalınlığında plexiglasstan yapılmış 0,5m×0,5m ebatlarında kare şeklinde üst ve alt kapaktan oluşmaktadır (Şekil 3.2). Üst kapak üzerinde çarpma yüzeyi ile arasındaki mesafe ayarlanabilen bir termoplastik malzemeden (polioksimetilen) yapılmış nozul, %99,90 saflıkta nikel levhadan yapılmış, 340 mm çapında ve 3 mm kalınlıkta dairesel bir anot ve çıkış hattına bağlanan dört adet üççeyrek inç'lik PVC bağlantı elemanını taşımaktadır. Alt kapakta plexiglasstan yapılmış olup üstünde delrin denilen bir termoplastikten yapılmış çarpma yüzeyinin açılı olarak konumlandırılmasını sağlayan bir düzenek taşımaktadır (Şekil 3.2). Çarpma levhası dairesel geometrili çapı 16,75 cm olan plexiglasstan yapılmış olup üzerine 3 mm çapında 97 adet lokal elektrotlar yerleştirilmiştir. Bu elektrotların elektrolit ile temas eden ve jetin çarptığı yüzeyleri plexiglass ile aynı seviyede olacak şekilde yüzeye gömülmüş olup yüzeyleri parlatılmış pürüzsüz olarak imal edilmiştir. Diğer uçlarına ise, veri okuma kartına gidecek olan kablolar lehimlenmiştir. Plakanın altından çıkan kablolar bir plexiglass levha ile örtülü olup elektrolit ile teması yoktur. Lokal katotlara bağlı olan kablolar bir plastik hortum ile jet hücresi dışına alınarak 25 pinlik soketler ile veri okuma kartına ve DC güç kaynağına bağlanmıştır. 25 pinlik soketlerle yapılan elektrik bağlantısı ile

elektriksel temasın en iyi seviyede olması sağlanmış ve böylece lokal elektrotlardan ölçülen mikroamper seviyesindeki akım ölçümleri en ideal şekilde okunmuştur (Şekil 3.3).

Alt ve üst kapak ile dikey silindirik hücrenin temas eden kısımlarının her birine O-ring kanalları açılmış olup sızdırmazlık problemi bu kanallara yerleştirilen 6 mm çapında O-ring ile sağlanmıştır. Dikey silindirik hücrenin dışına gelecek şekilde alt ve üst kapağa dairesel bir hat üzerinde karşılıklı olarak 12 noktadan delikler açılmış ve bu deliklerden 50 cm uzunlukta vidalar geçirilerek üst ve alt kapağın dış kısımlarından civatalarla sıkıştırmak suretiyle hücrenin elektroliti sızdırmaması sağlanmıştır. Böylelikle nozuldan çarpma yüzeyine çarpan sıvı jet üst kapaktaki dört çıkıştan dışarı alınmıştır. Bu suretle bir elektrolit içine daldırılmış durumdaki bir nozuldan akışkan püskürtülen şartlarda, çarpan jet akımı sağlanmaktadır.



Şekil 3.2. Deneysel sistem ve çarpan jet sistemi



Şekil 3.3. Jet çarpma yüzeyi ve çarpma yüzeyinin açılı olmasını sağlayan düzenek



Şekil 3.4. Veri okuma kartı ile bağlantı sağlayan kablo hattı ve soketler

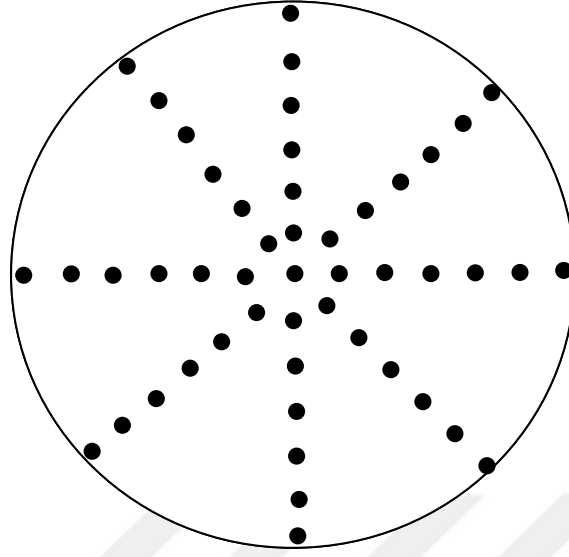
Jet hücresi içerisinde jet hidrodinamik parametrelerinin kütle transferi üzerindeki etkisini belirlemek için sabit voltaj şartlarında çalışılmıştır. Böylece lokal elektrotlardan mikroamper seviyesinde geçen akım değerlerinin okunması ve kaydedilmesi için ve bilgisayar kontrollü bir veri okuma kartı ile bir direnç köprüsü (Şekil 3.5) kullanılmıştır. Veri okuma kartı ve bilgisayar arasındaki iletişim ise Genie programı kullanılarak

sağlanmıştır. Çarpma yüzeyi üzerinde radyal yönde merkezden itibaren sıralanan her bir grup elektrot bir sokete bağlanarak sırayla aynı şartlarda ölçüm alındı.



Şekil 3.5. Veri okuma kartı ile bağlantılı çalışan direnç köprüsü.

Çarpma yüzeyi üzerinde lokal elektrotların dizilişi Şekil 3.6'da görülmektedir. Bu elektrotlar bir plexiglass malzeme üzerine yerleştirildiği için çarpma yüzeyi boyunca bir sınır tabaka oluşumu olmamakta, bununla birlikte lokal olarak kütle transferinin davranışı hakkında bilgi vermemektedir. Elektrotların merkez elektrodunun her iki yönünde de yerleştirilmesi, çarpma yüzeyi açılı olarak konumlandırıldığında tüm yüzey üzerinde radyal yönde kütle transfer katsayılarının davranışının belirlenebilmesine imkan sağlamaktadır. Lokal elektrotlar, bir yüzey üzerinde lokal kütle transferi katsayılarını ölçmek amacıyla kullanılmıştır [12].



Şekil 3.6.Çarpma yüzeyi üzerinde nikel lokal elektrotların dizilişi

Deneysel sistem belirlenen (H/d) değerine, çarpma yüzeyi açısına ve nozul Re sayısına ayarlandıktan sonra, hidrodinamik olarak kararlı hal şartlarının sağlanması için 5'er dakika, elektrotlar arasına akım verildikten sonra ise 3'er dakika beklenerek hem hidrodinamik ve hem dekonsantrasyon sınır tabakalarının kararlı hale gelmesi sağlanmıştır.

3.2. Elektrolit Çözeltisi Özellikleri ve Konsantrasyon Tayini

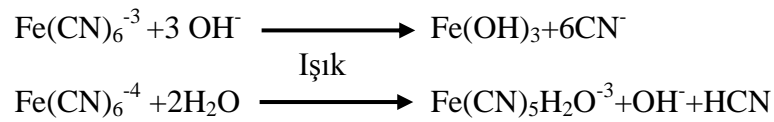
Deney sisteminde kullanılan elektrolit çözeltisi 80L olarak hazırlanmış olup bileşimi aşağıda verilmiştir:

- 0.005 M $K_3Fe(CN)_6$
- 0.020 M $K_4Fe(CN)_6$
- 0.500 M NaOH

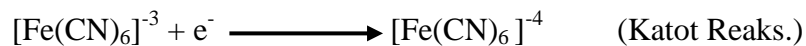
Burada kullanılan KOH destekleyici elektrolit olarak görev yapmaktadır. Elektrokimyasal jet hücresinde kullanılan elektrolit hazırlanırken hem ferrisiyanür konsantrasyonu ferrosiyanürünkenden daha düşük seçilmiş hem de anot alanı katot

alanından çok büyük seçilerek reaksiyonun katot yüzeyinde gerçekleşmesi, böylece sistemin katodik kontrollü olması sağlanmıştır.

Elektrolit içindeki aktif iyonlar olan ferisiyanür ile ferrosiyanürün ışık ve havanın oksijeninin etkisi ile bozunması ve ayrıca elektrolit içindeki çözücünün buharlaşması nedeniyle konsantrasyon değişir. Bu nedenle belirli zaman aralıklarında (haftada bir) elektrolit içindeki ferrisiyanür konsantrasyonu ölçülerek kaydedilmiş ve konvektif kütle transferi değerlerinin hesaplanmasında bu değerler kullanılmıştır. Elektrolitin, havanın oksijeninden etkilenecek bozunmaması için deneysel çalışmaların başından sonuna kadar sürekli olarak depolama tankına azot beslenmiştir. Elektrolit, ışık gördüğü zaman bozulduğu için jet hücresi, çözelti depolama tankı ve akış hattı ışığa karşı yalıtılmıştır. Elektrolit çözeltisi hazırlanırken, aktif iyonların (ferrisiyanür, ferro siyanür) ilavesinden önce, 0.5 M KOH çözeltisi hazırlanmış ve içinden azot gazı geçirilerek çözünmüş oksijen bazik çözeltiden sürüklenmeye çalışılmıştır. Aksi takdirde, ferrisiyanür ve ferrosiyanür iyonları oksijenle reaksiyon verebilir. Çünkü potasyum ferrosiyanür ışık ile yavaş yavaş HCN oluşturarak bozunur. Bazik ortamlarda potasyum ferrisiyanürün bozunma reaksiyonu ve potasyum ferrosiyanürün ışıkla olan bozunma reaksiyonu aşağıda görülmektedir:



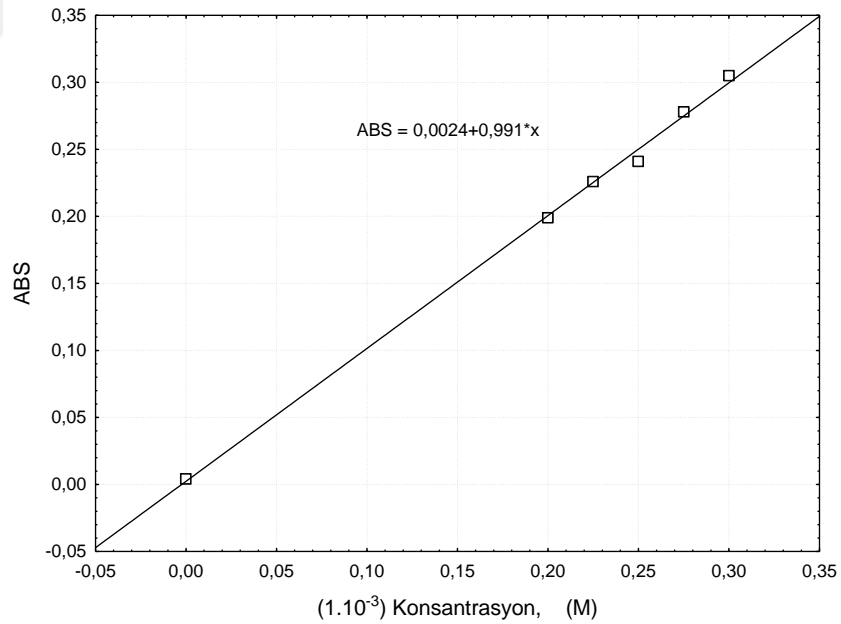
Reaksiyonlardan da görüldüğü gibi elektrolitin bozulması ferrisiyanür iyonunun konsantrasyon değişimiyle ölçülmüştür. Çünkü kullanılan sınırlayıcı akım difüzyon tekniğine göre; ferrisiyanür iyonunun katot yüzeyinde ferrosiyanüre indirgemesi sırasında geçen akımı doğrudan etkileyecek olan ferrisiyanür iyon konsantrasyonundaki değişimdir. Elektrolit konsantrasyonu, katotta ferrisiyanürün ferrosiyanüre indirgenmesi, anotta ise tam tersinin olması nedeniyle normalde sabit kalır. Sistemde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyon aşağıdaki gibidir:





Kullanılan sistem malzemeleri elektrolitin kuvvetli bazik yapısından etkilenmeyen malzemelerden yapıldığı için elektrolit kirlenmemiştir.

Elektrolit konsantrasyon ölçümü için onbinde bir hassasiyette hazırlanan bir kör numune ile 5 farklı konsantrasyondaki ferri-ferrosiyaniür standart çözeltileri spektrofotometrede okutulup, elde edilen absorban değerleri ile kalibrasyon eğrisi elde edilir (şekil.3.7.20). Daha sonra çalışılan elektrolitten alınan numunelerin spektrofotometrede absorbanları belirlenip konsantrasyon değerleri elde edilir. Elde edilen doğrunun grafiği veya eğrinin denklemi de kullanılarak konsantrasyon belirlenebilir.



Şekil 3.7. 20 kat seyreltilmiş ferrisiyaniür standart çözeltileri için elde edilen absorban eğrisi

Ferrisiyaniür konsantrasyonu tayini için 20°C'de çalışan sistemden alınan elektrolit, bir mikropipet yardımıyla 20 kat seyreltilerek konsantrasyon tayini için kullanılacak spektrofotometre cihazının okuma sınırlarına getirilmiştir. Hazırlanan numunenin

konsantrasyonu Shimadzu UV-160A marka spektrofotometre cihazında kuvars küvetler kullanılarak ölçülmüştür. Her konsantrasyon tayini için 3 ölçüm yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Çözelti konsantrasyonu belirlenirken hesaplamalarda 20 kat seyreltme dikkate alınır.

Elektrokimyasal jet hücresinde kullanılan elektrolit hazırlanırken hem ferrisiyanür konsantrasyonu ferrosiyanürünkinden daha düşük seçilmiş hem de anot alanı katot alanından çok büyük seçilerek reaksiyonun katot yüzeyinde gerçekleşmesi, böylece sistemin katodik kontrollü olması sağlanmıştır.

Çözelti ışık ve havanın oksijeninin etkisi ile bozulduğu için belirli zaman aralıklarında konsantrasyon ölçümü yapılarak kaydedilmiş ve konvektif kütle transferi değerlerinin hesaplanmasında bu değerler kullanılmıştır. Çözeltinin havanın oksijeninden etkilenecek bozulmaması için deneysel çalışmaların başından sonuna kadar sürekli olarak depolama tankına azot beslenmiştir.

3.3. Elektrolit Çözeltisinin Fiziksel Özellikleri

Kullanılan sistemde doğru bir şekilde alınan elektrokimyasal ölçümlerden, konvektif kütle transfer katsayılarını hesaplamak için gerekli olan fiziksel özellikler, sıcaklık ve bileşimin fonksiyonu olarak uygun teknikler ve ölçüm cihazları ile elde edilmiştir (Bourne *et al.* 1985). Mevcut çalışmada kullanılan elektrolitin 20°C'deki reolojik özellikleri (kinematik viskozite, yoğunluk, difüzyon katsayısı ve Pr sayısı) Bourne vd'nin çalışmasından alınmıştır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. 20°C'de elektrolite ait fiziksel özellikler [67]

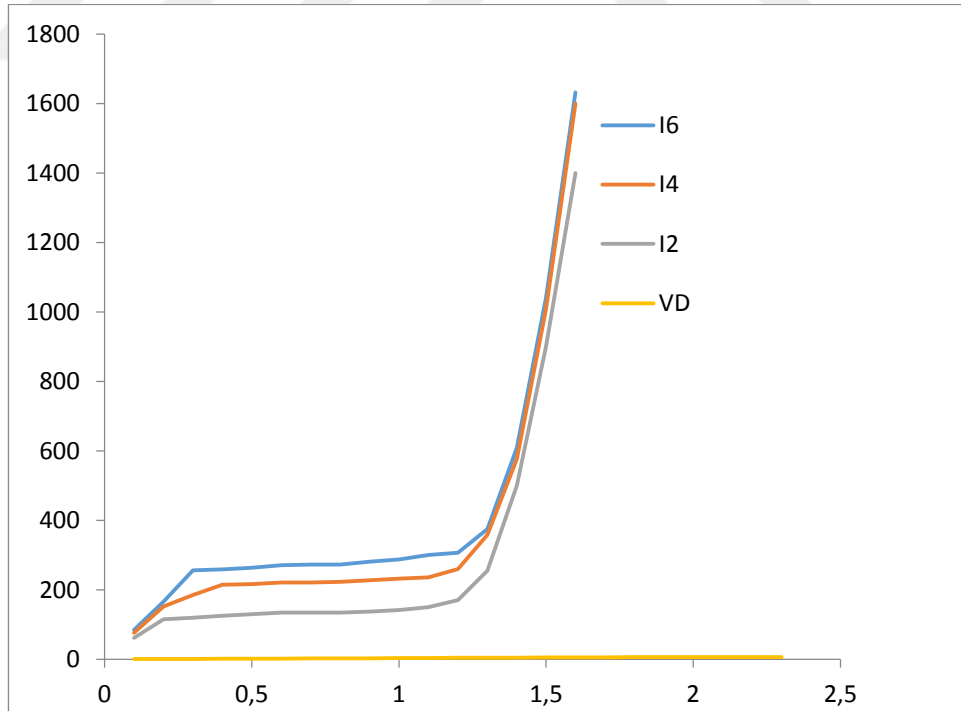
$D_{\text{ferri}}(\text{m}^2\text{s}^{-1})$	$6.350 \cdot 10^{-10}$
$\rho(\text{kg m}^{-3})$	1027.23
$\mu(\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1})$	$1.1223 \cdot 10^{-3}$
$\nu(\text{m}^2\text{s}^{-1})$	$1.0925 \cdot 10^{-6}$
Sc	1692

3.4. Lokal Katotların Kalibrasyonu

Çarpma yüzeyi üzerindeki lokal elektrotların elektroaktif yüzey alanları tespit edilmiştir. Öncelikle durgun ortamda ve $T=20^{\circ}\text{C}$ 'de sınırlayıcı akımı veren voltaj tespit edildi. $V_{SA}=1.0$ volt olarak alındı (Şekil 3.8). Böylece elektrot alanlarının tespitinde 1.0 V gerilim kullanıldı.

3.5. Sınırlayıcı Akım Tespiti

Hareketli ve durgun şartlarda sınırlayıcı akım ayrı ayrı tespit edilmiştir. Elektrik kablomuzun bir ucu ampermetreye, diğer ucu da voltmetreye bağlanarak ölçüm gerçekleştirildi. 6, 4, 2 GPM debilerinde ölçümler yapılarak polarizasyon eğrileri çizildi. (V=Volt, I= mA)



Şekil 3.8. Durgun ve akış olan şartlarda elde edilen polarizasyon eğrileri

Lokal elektrotların alan tayini için Cottrell Eşitliği kullanıldı (Rieger 1994).

$$I_D = zFAC_o \sqrt{\frac{D_o}{\pi t}}$$

- I_D : Sınırlayıcı difüzyon akımı, Amper
 z : Redoks tepkimesinde alınıp verilen elektron sayısı
 F : Faraday sabiti, 96485 C/mol
 A : Elektrot alanı, m^2
 C_o : Elektrolit içinde ferrisiyanür konsantrasyonu, mol/m^3
 D_o : Ferrisiyanür için difüzyon katsayısı, m^2/s

Lokal elektrot alanları tayin edilirken aşağıdaki basamaklar izlendi:

1. Pompa çalıştırılarak elektrolitin hücre içinden geçişi temin edildi ve bu arada sistem depolama tankı içine yerleştirilen bir serpantin ve bir sirkülör vasıtasıyla, gerek soğutma gerekse ısıtma yapılarak $20^\circ C$ 'de termal dengeye getirildi.
2. Daha sonra pompa durdurularak sistemdeki akışkanın durgun hale gelmesi sağlandı.
3. Akabinde anoda karşılık sadece alanı tayin edilecek bir lokal katot ile kurulan elektroliz hücresi ile bir güç kaynağına seri olarak bağlanan Manip A10 markalı bir analog ampermetre ile devre kuruldu. Kullanılan ampermetre, $50 \mu A$ üst okuma sınırına ve $1 \mu A$ okuma hassasiyetine sahip bir analog ampermetre olup sadece alan ölçümlerinde kullanıldı. 1.0 volt değerine ayarlı güç kaynağı, salise okuma hassasiyetindeki bir dijital kronometre ile aynı anda çalıştırılıp, 10, 15 ve 20. saniyelerdeki μA olarak o elektrottan geçen akım değeri ampermetre ile kaydedildi. Her bir elektrot için ölçümler 3 kez tekrarlandı. Her bir elektrot için elde edilen akım değerleri, Cottrell eşitliği kullanılarak alan tayini yapıldı ve bulunan üç alan değerinin aritmetik ortalaması o elektrotun alanı olarak kütle transferi katsayısı hesaplamalarında kullanıldı.
4. Ölçüm yapıldığı gün, elektrolit konsantrasyonu spektrofotometre ile tespit edildi.

Merkezdeki elektrot 1 mm çapında olup onun alan tayininde 9, 11 ve 15. saniyelerde ölçüm alınmıştır (Çizelge 3.2). Okuma yapılan zaman değerleri, ampermetrede en kolay okuma yapılabilen zamanlar olarak tespit edilmiş ve bu zamanlara tekabül eden akım değerleri okunmuştur. Aynı şekilde 2mm çaplı nokta elektrotlar için ise 10, 15 ve 20. saniyeler en uygun ölçüm zamanları olarak tespit edilmiştir (Çizelge 3.3). Zamana karşı okunan akım değerleri ve 1 mm ile 2 mm çapındaki lokal katotların hesaplanan alanları, sırasıyla Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilmiştir. Çizelge 3.4'te ise, her bir lokal katoda ait ortalama alan değerleri ile radyal yönde jet durgunluk noktasından olan boyutsuz mesafeleri görülmektedir.

3.6. Elektrot Alan Tayini

Elektrot alan tayini Cottrell eşitliği kullanılarak yapılır.

$$A_1 = \pi D^2 = \pi (3 \text{ mm})^2 / (1000)^2$$

$$A = 28,26 \cdot 10^{-6} \text{ (Elektrot Alanı)}$$

$$A_2 (m^2) = \frac{I_0 (\text{Amper})}{n \cdot f \cdot Co \sqrt{\frac{DAB}{\pi \cdot t}}} \text{ (Cottrell Eşitliği)}$$

$$k = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{n \cdot f \cdot Co \sqrt{\frac{DAB}{\pi}}} = \text{Sabit Sayı}$$

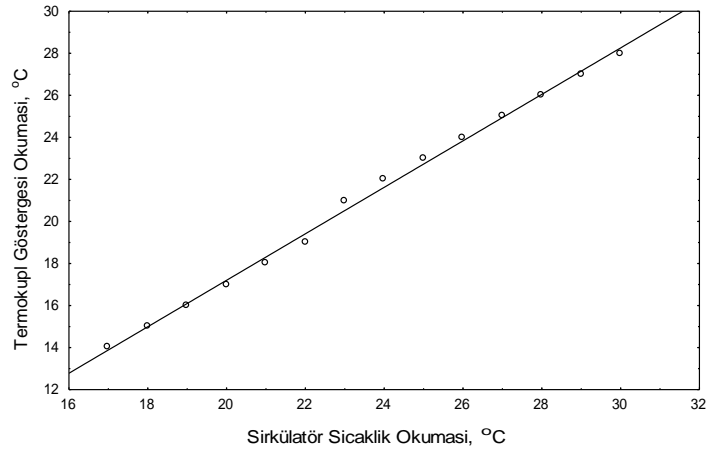
Bir sokette 13 elektrot mevcut olduğu için her bir lokalelektrot için ayrı hesaplama yapılmıştır.

Çizelge 3.2. Elektrot alanları hesaplama tablosu

	A 1 (m ²)	k	AKIM KATSAYISI	$\sqrt{\pi}$	n (e ⁻)	F (cou/mol e ⁻)	C _∞ (mol/m ³)	\sqrt{DAB} (m ² /sn)	A2 (m ²)	I _o (µa)	\sqrt{t} (sn)	A1-A2
	GERÇEK ALAN	SABİT	0,000001	1,772454	e ⁻	Faraday Sabiti	5	$\sqrt{7,28E-10}$	HESAPLANAN ALAN	Ölçülen akım	Ölçülen zaman	
	ALAN	SABİT	0,000001	1,772454	1	96485	5					
ORTALAMA												
1	0,00002826	1,36169E-07	0,000001	1,772454	1	96485	5	2,69815E-05	1,12791E-06	10,67	0,75	2,71E-05
2	0,00002826	1,36169E-07	0,000001	1,772454	1	96485	5	2,69815E-05	3,20377E-06	24,33	0,94	2,51E-05
3	0,00002826	1,36169E-07	0,000001	1,772454	1	96485	5	2,69815E-05	2,10118E-06	17,67	0,85	2,62E-05
4	0,00002826	1,36169E-07	0,000001	1,772454	1	96485	5	2,69815E-05	4,16585E-06	34,00	0,87	2,41E-05
5	0,00002826	1,36169E-07	0,000001	1,772454	1	96485	5	2,69815E-05	3,66244E-06	26,67	0,98	2,46E-05
6	0,00002826	1,36169E-07	0,000001	1,772454	1	96485	5	2,69815E-05	4,96418E-06	37,67	0,94	2,33E-05
7	0,00002826	1,36169E-07	0,000001	1,772454	1	96485	5	2,69815E-05	3,85294E-06	32,67	0,84	2,44E-05
8	0,00002826	1,36169E-07	0,000001	1,772454	1	96485	5	2,69815E-05	6,27591E-06	36,00	1,24	2,2E-05
9	0,00002826	1,36169E-07	0,000001	1,772454	1	96485	5	2,69815E-05	5,52853E-06	37,67	1,04	2,27E-05
10	0,00002826	1,36169E-07	0,000001	1,772454	1	96485	5	2,69815E-05	2,51235E-06	23,00	0,78	2,57E-05
11	0,00002826	1,36169E-07	0,000001	1,772454	1	96485	5	2,69815E-05	5,55363E-06	39,00	1,02	2,27E-05
12	0,00002826	1,36169E-07	0,000001	1,772454	1	96485	5	2,69815E-05	4,75727E-06	39,33	0,86	2,35E-05
13	0,00002826	1,36169E-07	0,000001	1,772454	1	96485	5	2,69815E-05	3,93505E-06	27,00	1,04	2,43E-05

3.7. Sıcaklık Kalibrasyonu

Sıcaklık kalibrasyonu depolama tankındaki elektrolitin sıcaklığının sürekli olarak ölçülmesini sağlayan Ni-CrNi termokupl için yapılmıştır. Sıcaksu banyosunda çok hassas bir termometre ile bilinen bir sıcaklığa ayarlanan sıcak su, termokupl ile de ölçüm yapılarak bu ölçüm değerleri bilinen sıcaklıklara karşı grafik edilmiştir. Sistemde çalışma sıcaklığı 23°C olup bu değere karşı gelen değer dikkate alınarak tüm çalışmalarda aynı sıcaklık değeri kullanılarak difüzyon katsayısının değişmemesi ve 23°C'deki değerinin sabit kalması temin edilmiştir.



Şekil 3.9. Sıcaklık Kalibrasyonu

3.8. Parametreler ve Deney Prosedürü

Deneylere başlamadan önce sistem içinden %5'lik KOH çözeltisi geçirilerek akış hattı ve depo temizlenmiştir. Daha sonra saf su dolaştırılarak sistem yıkanmıştır.

- Öncelikli olarak ıslak halde 1000 numara zımparalama ile parlatılmış lokal katotların ve anodun yüzeyi, organik kirliliklerden arındırılmak üzere metil alkol ile silinip saf su ile yıkanır.
- Ana katot, lokal katotlar ve anodun elektrik bağlantıları da bir ölçü aracı ile kontrol edilir.

- Daha sonra çarpma yüzeyi açısı ayarlanır, sızdırmazlık sağlayano-ringler kontrol edilir ve jet hücresi cıvata ve somun ile kapatılır.
- Hücrenin üstünden istenen nozul-çarpma yüzeyi mesafesi ayarlanır ve nozul dönmeyecek şekilde sabitlenir.
- Ana katot ve lokal katotların yüzeyleri katodik temizleme yaptırılarak temizlenir. Bu amaçla temizlenecek elektrot katot olacak şekilde bağlanarak bir elektroliz devresi kurulur. Sonra anot ve katot arasına 5 dakika süreyle 4 volt gerilim uygulanarak katodik temizleme yapılır. Katot yüzeyinde oluşan H_2 gazı kabarcıkları katot yüzeyindeki elektriksel direnç oluşturan kirlilikleri kopararak katot yüzeyinin aktif hale gelmesini sağlayacaktır.
- Daha sonra elektrot alanlarının belirlenmesi kalibrasyon işlemindeki prosedür uygulanır.

Hücre çarpma yüzeyi açısının ayarlanması için her söküldüğünde, katot yüzeyleri temizlendikten sonra elektrotlar kalibre edildi ve sonra kapatıldı. Daha sonra pompa çalıştırılarak akış ölçerlerden birisinde istenilen debide akış sağlandı. Sistemin termal dengeye gelmesi sağlandıktan sonra, her parametre değişimi öncesinde hidrodinamik dengenin sağlanması amacıyla 5 dakika boyunca sistem çalıştırıldı ve akabinde 2 dakika süreyle hücreye 1.0 volt gerilim uygulandı. 2 dakika sonunda bilgisayardan Genie programı ile 40 sn boyunca ölçüm alındı ve kapatıldı. Böylece elde edilen akım verileri incelenen parametre ve şartlar için bilgisayarda açılan dosyalara kaydedildi.

İzotermal şartlarda ve sabit voltaj şartlarında çalışılan sistemde,(H/d) oranı, çarpma yüzeyi açısı, nozul Re sayısı (debi) parametre olarak seçilmiş ve bunların etkisi incelenmiştir. Çalışma parametreleri çizelge 7'de gösterilmektedir.

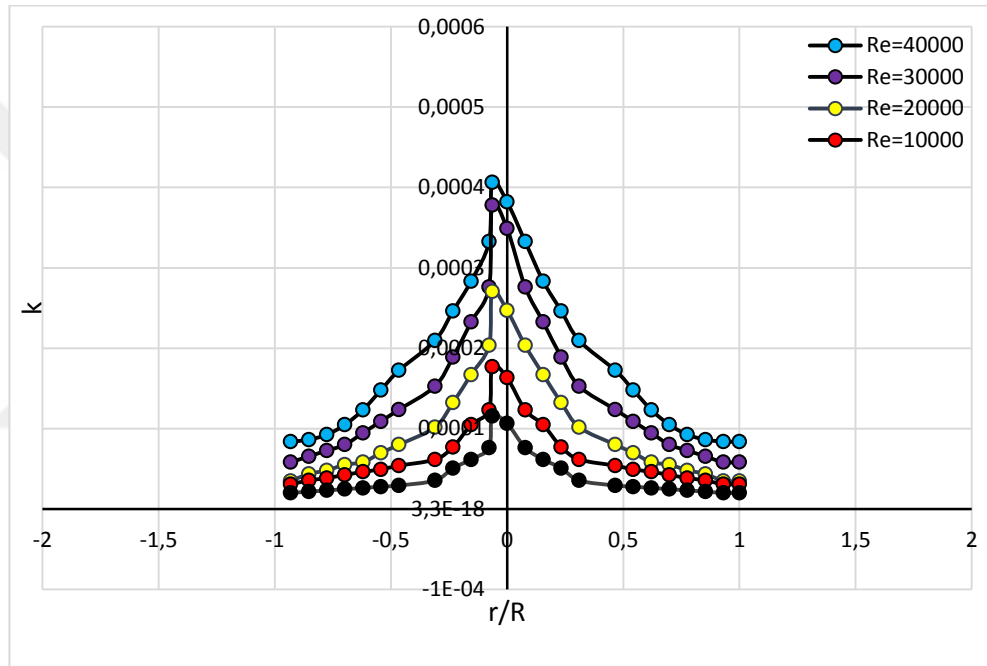
Çizelge 3.3. Çalışma parametreleri

H/d	2	4	6		
Çarpma Yüzeyi açısı	90°	80°	70°	60°	
Nozul Re Sayısı	5000	10000	20000	30000	40000

4. ARAŞIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Nozul Reynolds Sayısı (Re) Parametresi

Elektrotun merkeze olan uzaklığının çarpan yüzeyin çapına oranı ile kütle transfer katsayısı farklı Reynolds sayıları ele alınarak grafik edilmiştir.



Şekil 4.1. $(H/d)=2$ 'de 60° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi.

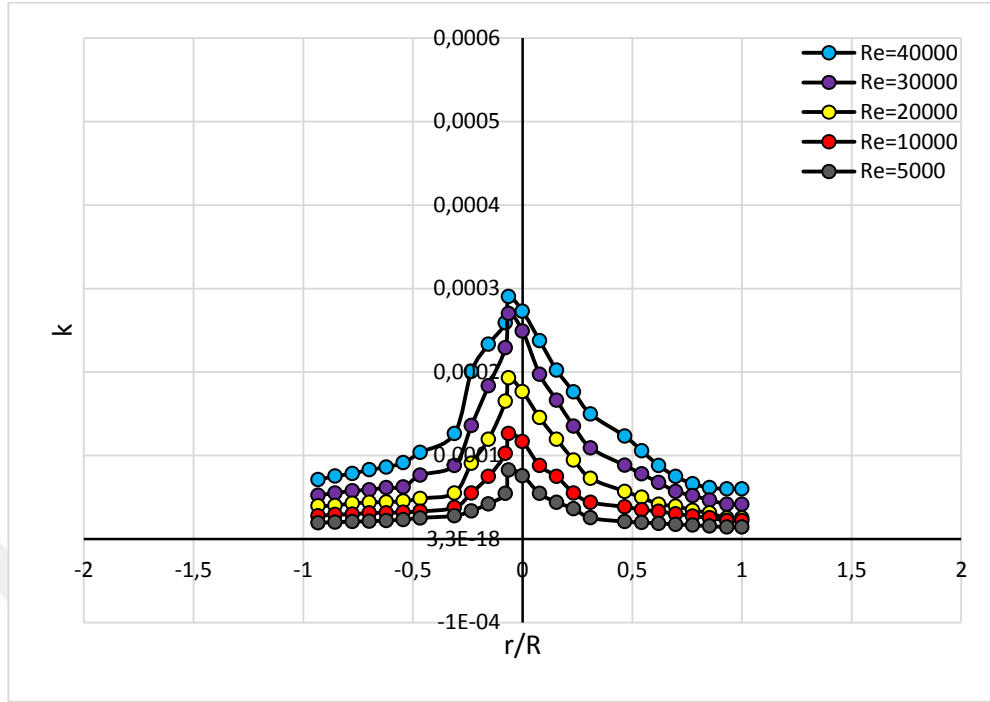
Grafikte de görüldüğü gibi Re sayısı arttıkça çarpma yüzeyinin merkezine doğru kütle transfer katsayısı artmakta merkezden uzaklaştıkça kütle transfer katsayısı azalmaktadır. Sabit bir r/R oranında göz önüne alırsak Re sayısı arttıkça kütle transfer katsayısı da artmaktadır. Qian Chen, Vijay Modi [56] nin çarpan slot jetlerde kütle transferi deneyinden elde ettiği sonuçlarda da görüldüğü gibi Reynold sayısı arttıkça çarpma yüzeyinin merkezine doğru Sh sayısı ve kütle transfer katsayısı artmaktadır. Çarpma merkezinden uzaklaştıkça sürtünme artacağı ve türbülans özelliği azalacağı için kütle transferi azalmaktadır.

Şekil 4.1’de $(H/d)= 2$, çarpma yüzeyi 60° ve dört farklı Re değerinde belirlenmiştir. Re sayısındaki artışla birlikte maksimum kütle transferi değeri artmıştır ve ayrıca Re sayısındaki artışa bağlı olarak max kütle transferi veren noktanın yeri yani boyutsuz mesafesi (r/R) ’nin değeri sola doğru kaymıştır.

D-T.Ching ve M.Agarwal’ın yaptığı çalışmada; daldırılmış eğik çarpan yarık jet için lokal kütle transfer hızını ELCDT tekniği kullanarak bir çarpma yüzeyi üzerindeki mikro elektrotlar kullanılmıştır. Bu çalışma lokal sherwood sayılarının durgunluk noktasında korelasyonunu türetmek için gerçekleştirilmiştir. Jet açısı, nozul ve Re sayısı $(Re_j=DV_j\delta/\mu)$, boyutsuz nozul çarpma yüzeyi mesafesi (H/d) , jet merkezinden olan boyutsuz radyal mesafe (r/R) ’nin fonksiyonu olarak çarpan jetlerin duvar jeti akış rejimleri ve laminer sınır tabaka içinde durgunluk noktasında lokal sherwood sayılarını korele etmek üzere verilir.

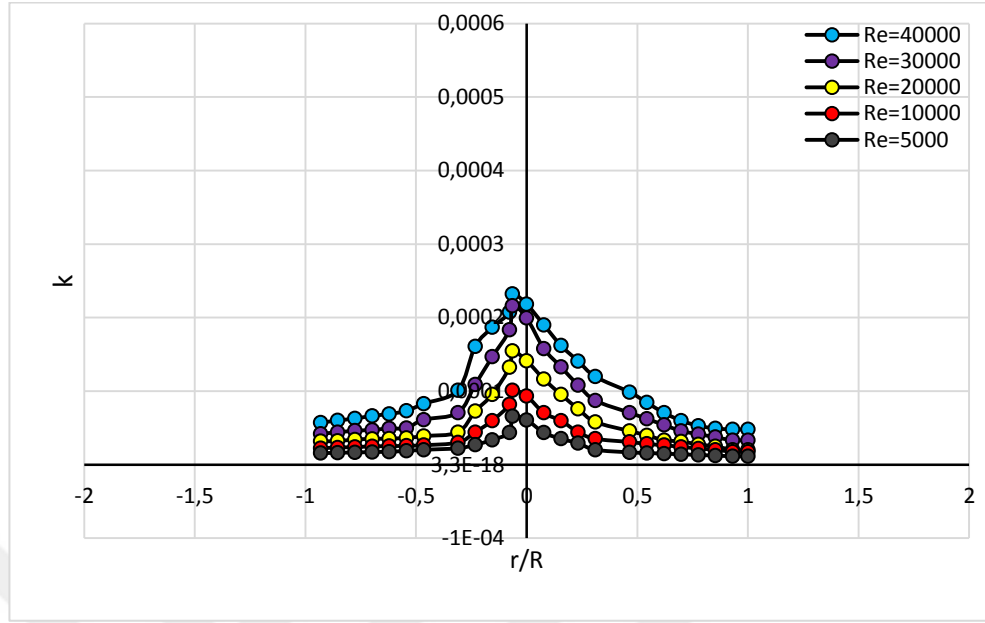
Nozuldan çıkan akışkan jeti, aynı tür durgun ve büyük bir akışkan içinden geçer ve 90° ’den daha düşük bir açıda bir düz yüzey üzerine çarpar. Bir dik ve eğik çarpan jetin akış desenleri arasındaki farkı durgunluk bölgesi ve duvar jet bölgelerinde gözlemlenmiştir.

Eğik jette çarpma yüzeyi üzerindeki durgunluk noktası jet merkezinden negatif x yönünde yer değiştirdiği görülmüştür. Aynı nozul Re sayısında bir dik çarpan jet ile kıyaslandığı zaman eğik açılı bir çarpan jet durumunda negatif x yönünde kütle transfer katsayılarının düşmüş, pozitif x yönünde ise kütle transfer katsayılarının artmış olduğu bulunmuştur [9].



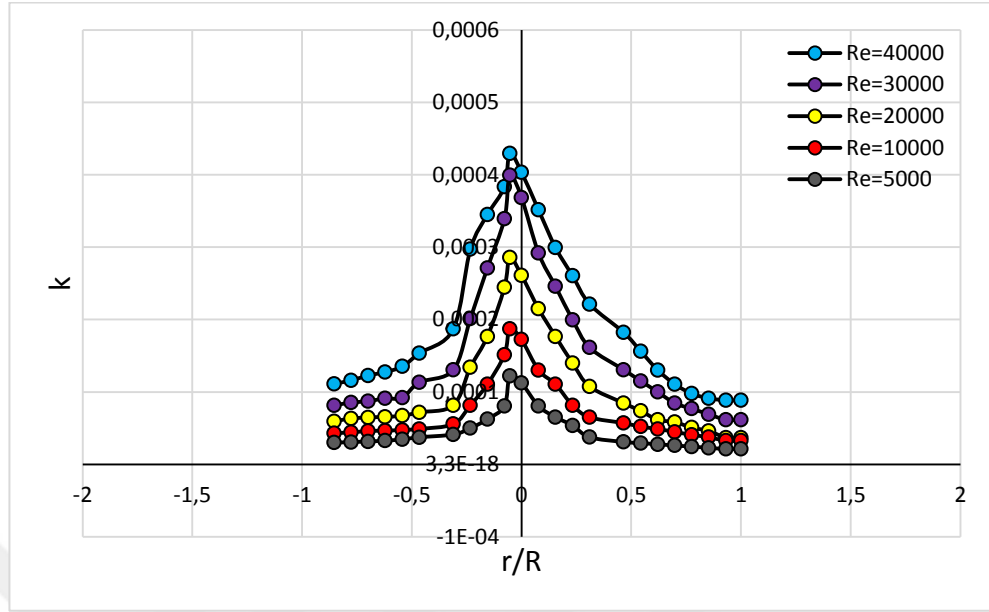
Şekil 4.2. $(H/d)=4$ 'te 60° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi

Şekil 4.1'de (H/d) değeri alınmış olup Şekil 4.2'de (H/d) değeri 4 alınmıştır. Buradaki farklılıklara bakıldığında Re sayısına göre kütle transferindeki artışın daha düşük olduğu görülmektedir. Re sayısı ve çarpma yüzeyi açısı sabit alındığında, Şekil 4.2'de boyutsuz nozul-çarpma yüzeyi mesafesi arttıkça kütle transfer katsayısının düştüğü görülmektedir. Bunların sebebi şöyle açıklanabilir; Jetin merkezindeki hızın azalması yani Re sayısının azalması türbülansı azaltacağı için kütle transfer katsayısında düşüşe sebep olacaktır. Re sayısı arttıkça türbülans artacağı için hızda artacak ve kütle transferi de bu durumda artış gösterecektir. H/d nin artması durgunluk noktasındaki çarpma hızının düşmesine ve türbülansın azalmasına sebep olacaktır, bu sebeple kütle transfer katsayısını düşürecektir.



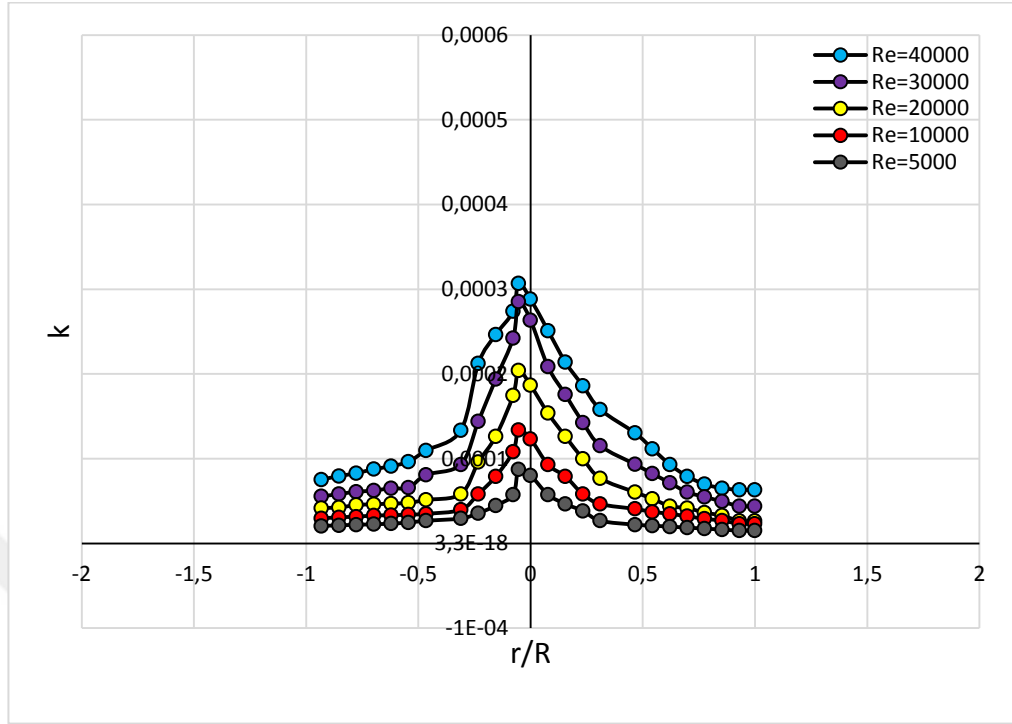
Şekil 4.3. $(H/d)=6$ 'da 60° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi

Şekil 4.2 ile Şekil 4.3 karşılaştırıldığında yalnızca (H/d) değerlerinin farklılaşması sonucu kütle transfer katsayıları değişmektedir. (H/d) oranı arttıkça kütle transfer katsayısı düşmektedir. (H/d) 'nin artması durgunluk noktasındaki çarpma hızının düşmesine ve türbülansın azalmasına sebep olacaktır, bu sebeple kütle transfer katsayısını düşürecektir.



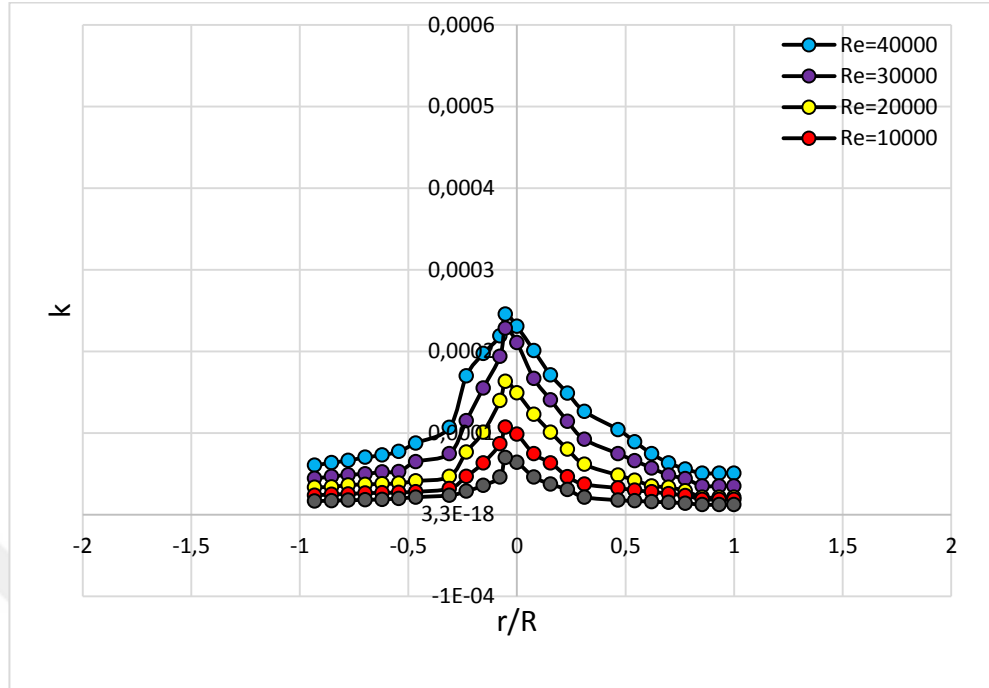
Şekil 4.4. $(H/d)=2$ 'de 70° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısı üzerine etkisi.

Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de çarpma yüzeyi eğimi 60° alınmıştır. Fakat Şekil 4.3'de çarpma yüzeyi eğimi 70° olarak değiştirilmiştir. Bu değişim dikkate alınarak (H/d) 'nin 2 olduğu Şekil 4.1 ile karşılaştırıldığında, Re sayısının 10000-40000 aralığında yüzey çarpma açısı arttıkça merkezde kütle transfer katsayısının da arttığı görülmektedir.



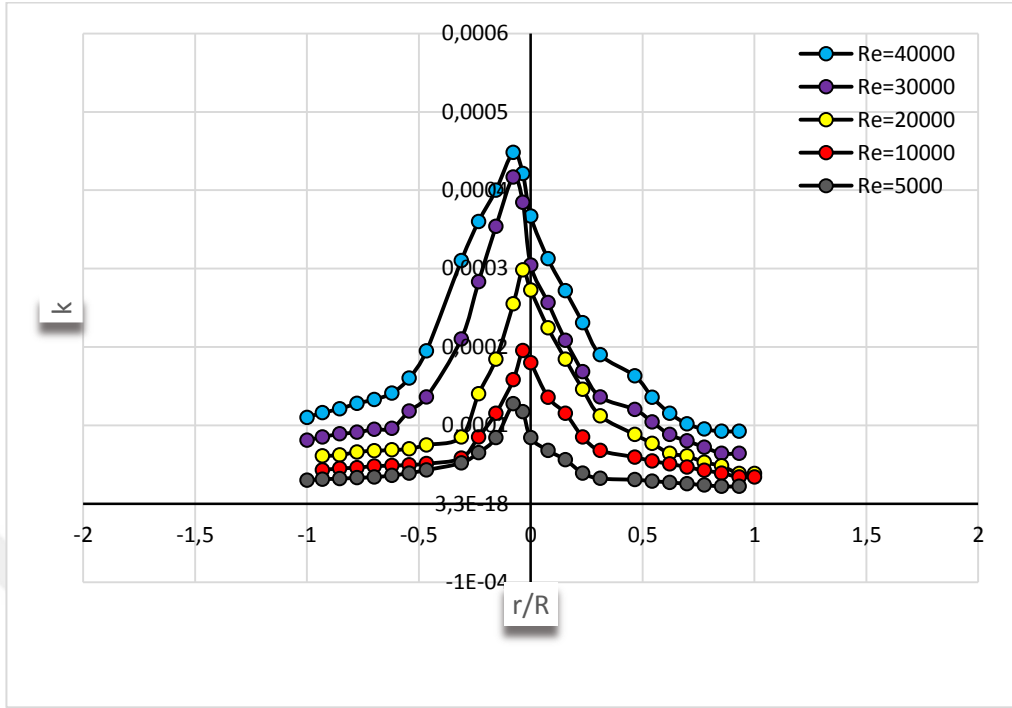
Şekil 4.5. $(H/d)=4$ 'te 70° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi

Çarpma yüzeyi açısı ve (r/R) değerleri sabit alındığında, (H/d) oranı arttıkça Re sayısının artması ile kütle transferine olan olumlu etkisinde azalma olduğu Şekil 4.4 ile Şekil 4.5'in karşılaştırılmasında görülmektedir. Yani Re sayısının artması kütle hızını, türbülansı arttırmakta bu yüzden kütle transferinde de artışa sebep olmaktadır. Yalnız H/d oranı arttıkça durgunluk noktasındaki sabit hız azaldığı için kütle transferi azalmakta buna bağlı olarak Re sayısının kütle transferi üzerine olan olumlu etkisinde de bir miktar azalma gözlemlenmektedir.



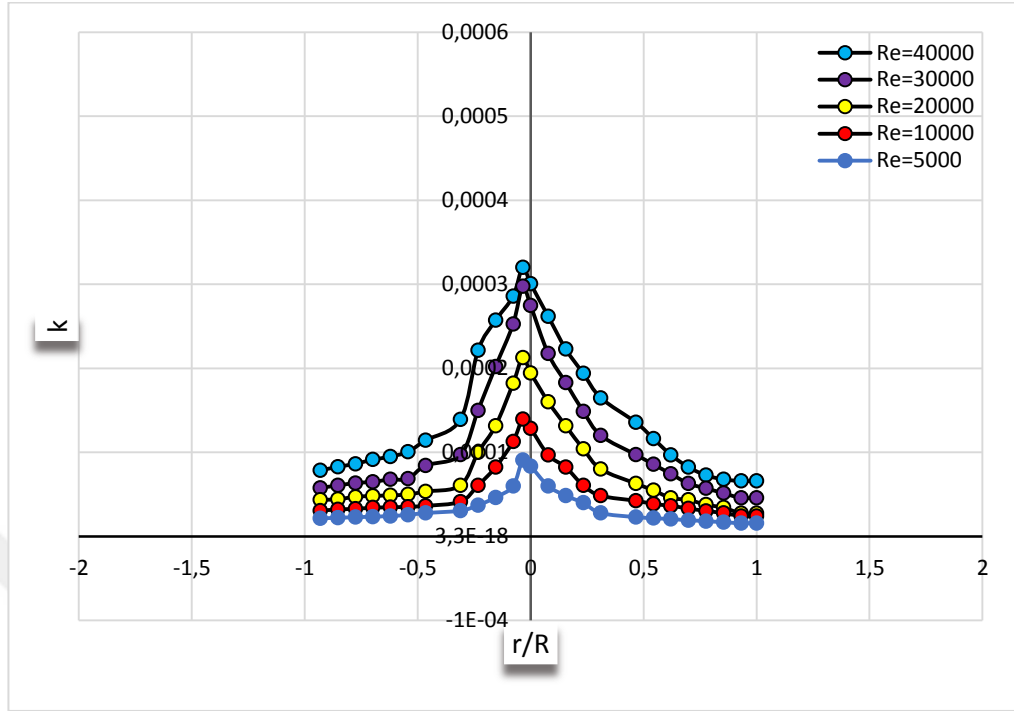
Şekil 4.6. $(H/d)=6$ 'da 70° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi

(H/d) oranı arttıkça kütle transfer katsayısı azalmakta, Re sayısının artması ile daha düşük (H/d) oranlarına kıyasla daha az bir oranda kütle transferi artışı görülmektedir. Aynı Re sayısı ele alındığında (H/d) oranının artmasıyla kütle transferi azalmaktadır.



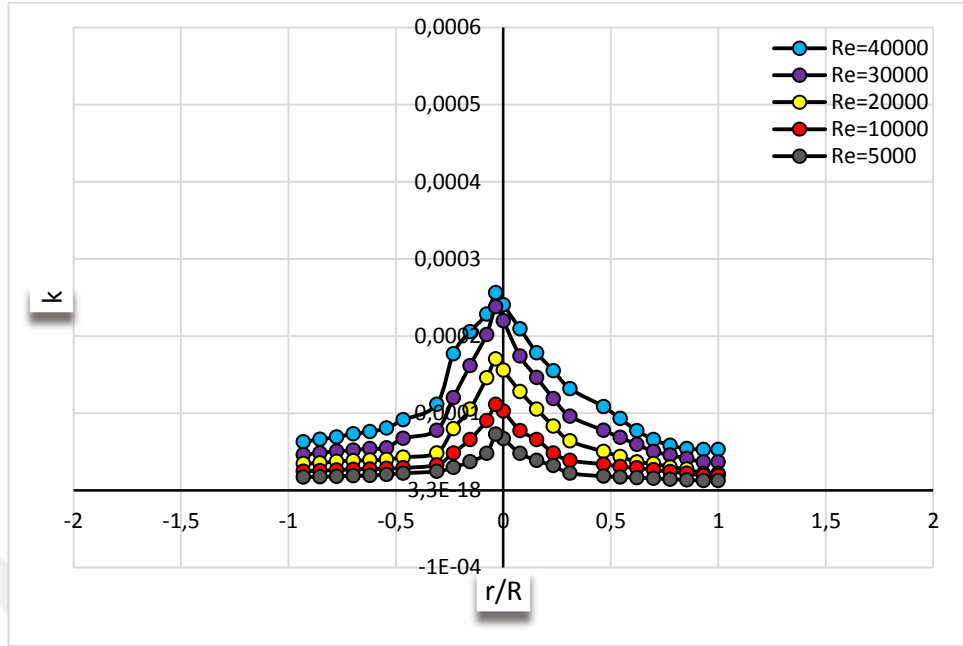
Şekil 4.7. (H/d)=2'de 80° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi

Şekil 4.1, Şekil 4.4 ile Şekil 4.7 karşılaştırıldığında görülmektedir ki (H/d)'nin 2 olduğu durumda, Re sayısının 10000 ile 40000 aralığında açının artmasına bağlı olarak kütle transfer katsayısı da artmaktadır.



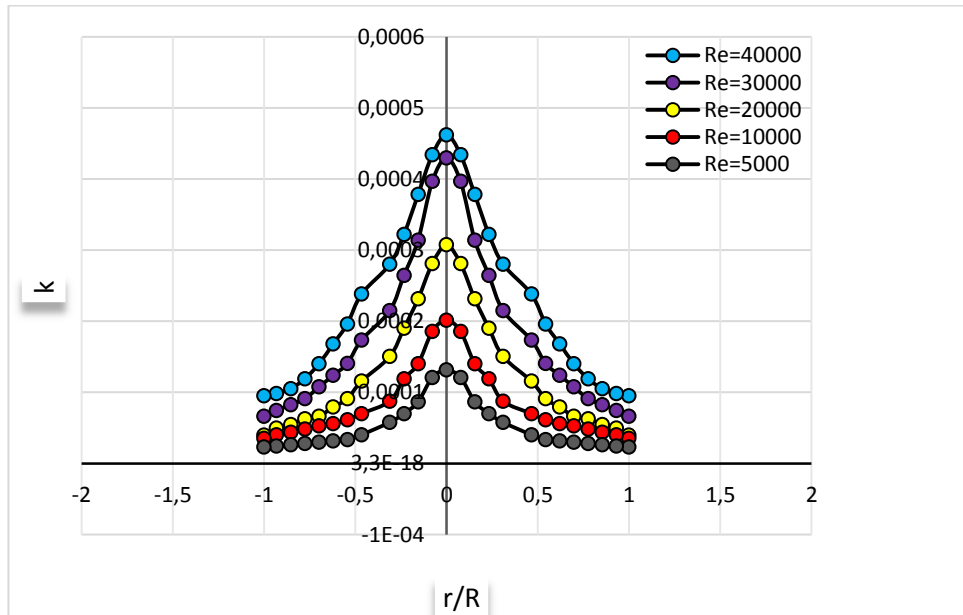
Şekil 4.8. (H/d)=4'te 80° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi

Açı azaldıkça (r/R)'nin negatif yönünde durgunluk noktasında bir kayma görülmektedir. Buna bağlı olarak (r/R)'nin negatif yönünde kütle transfer katsayıları düşmüş ve + yönünde kütle transfer katsayıları artmıştır. (r/R)'nin negati yönünde duvar jet bölgesi azaldığı için türbülans akışta azalacak ve buna bağlı olarak kütle transferi de azalacaktır. (r/R)'nin pozitif yönünde de duvar jet bölgesi ve türbülans akım artacaktır. Yine görülmektedir ki Re sayısı arttıkça H/d ve açığa bağlı olarak kütle transferinde de çeşitli oranlarda artış görülmektedir.

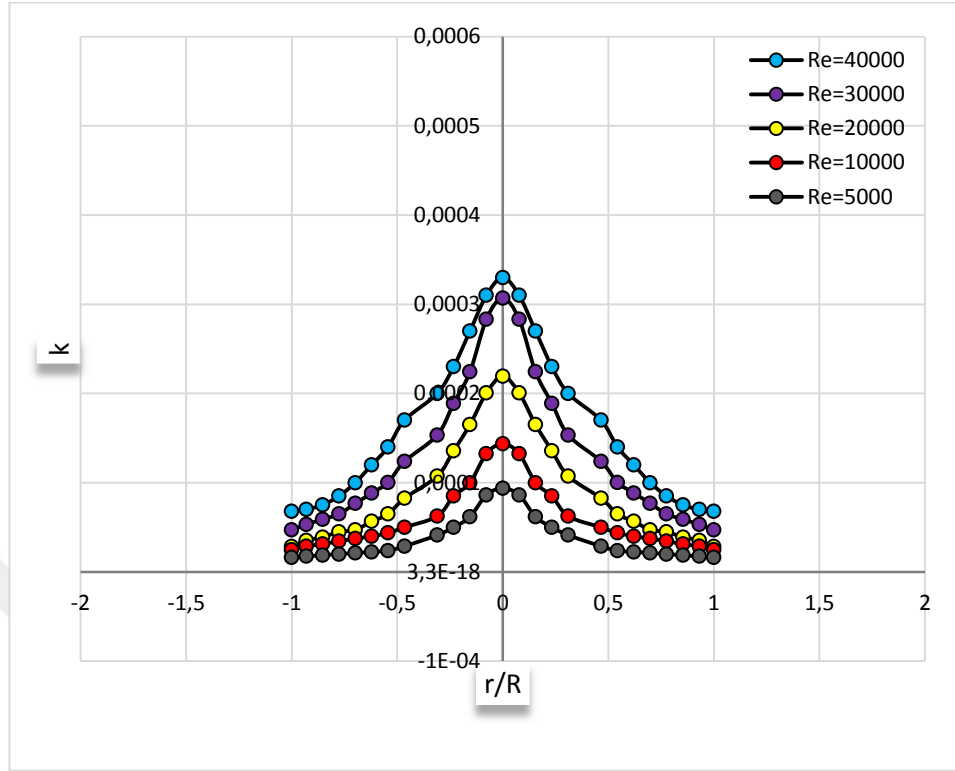


Şekil 4.9. (H/d)=6'da 80° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi.

Yine Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 karşılaştırıldığında (H/d) oranı arttıkça kütle transfer katsayısının düştüğü görülmektedir.

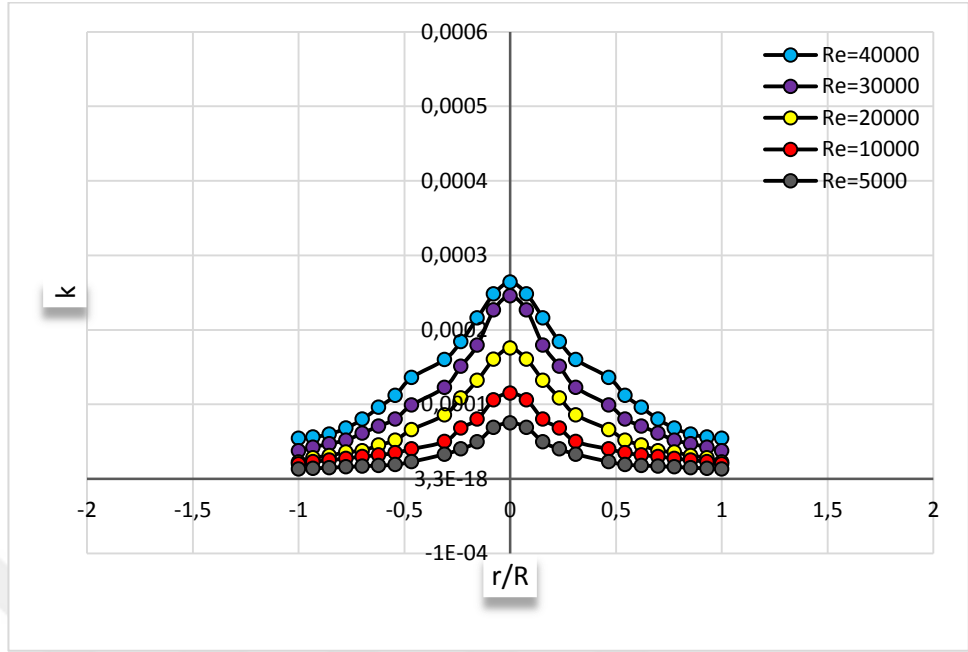


Şekil 4.10. (H/d)=2'de 90° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi.



Şekil 4.11. $(H/d)=4$ 'te 90° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi

Açı 90° iken maximum kütle transferi değerleri $(r/R)=0$ 'da görülmektedir. Aynı durum Ching ve Agarwal [12], Perry [16], Albert Tong [58] gibi araştırmacılar tarafından da elde edilmiştir. Re sayısı arttıkça kütle transfer katsayısı artmaktadır. Yine (H/d) oranına bağlı olarak kütle transferindeki artış oranı değişim göstermektedir.



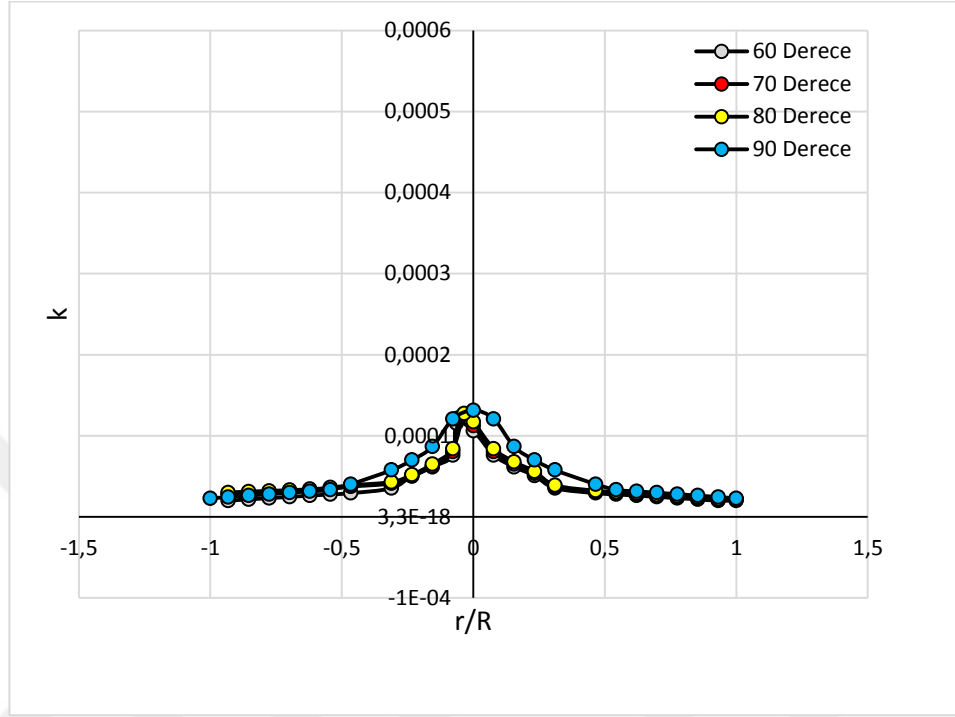
Şekil 4.12. $(H/d)=6$ 'da 90° çarpma açılı durumda Re sayısının kütle transfer katsayısına etkisi

Çarpma yüzeyinin 90° olduğu durumda da yine sabit Re sayısında (H/d) oranı arttıkça kütle transfer katsayısının azaldığı görülmektedir.

Bu şekillerden çıkardığımız genel sonuç;

Çarpma yüzeyi ile nozul eksenindeki açı 90° olan durumda maksimum kütle transferi $(r/R)=0$ 'da meydana gelmiştir. Fakat çarpma açısı 90° 'den farklı olacak şekilde ayarlandığında, maksimum kütle transferi meydana gelen nokta $(r/R)=0$ 'dan negatif yönde kaymıştır. Sabit çarpma yüzeyi açısı ve sabit (H/d) durumunda, Re sayısı arttıkça (r/R) 'nin pozitif ve negatif değer aldığı tüm çarpma yüzeyi üzerinde kütle transfer katsayısı artmıştır.

4.2. Nozul-Çarpma Yüzeyi Arası Açı (θ) Parametresi



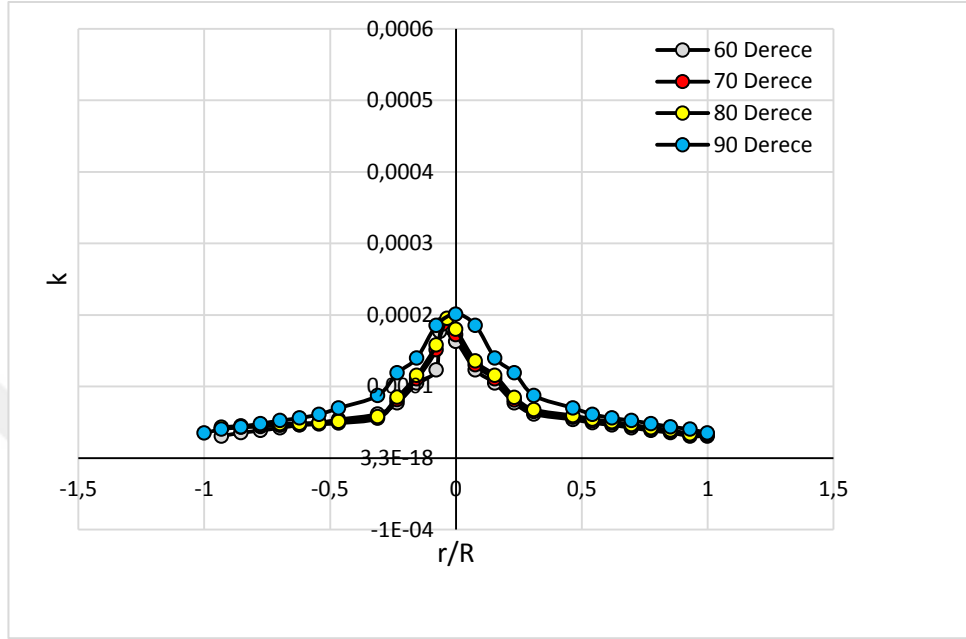
Şekil 4.13. $(H/d)=2$ 'de ve $Re=5000$ 'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi

Şekil 4.13'de görüldüğü gibi sabit (H/d) oranı (2) ve sabit Re sayısında (5000) Nozul çarpma yüzeyi arasındaki açı arttıkça merkezde kütle transfer katsayısı da artmaktadır.

θ değeri azaldıkça r/R nin negatif yönünde kayma meydana gelmektedir. Yani çarpma yüzeyi mekezi sol tarafa doğru kaymaktadır. Bu durumda r/R merkezinde kütle transfer katsayısı azalmaktadır. r/R nin negatif yönünde kütle transfer katsayısı ve duvar jet bölgesi azalmakta ve ters yönde artış göstermektedir.

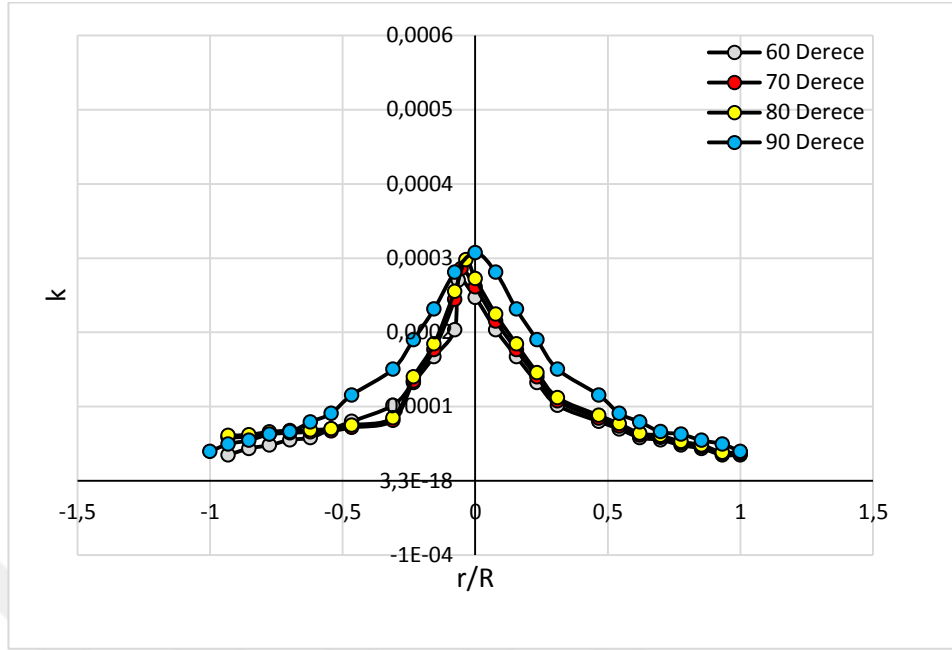
Albert Tong [58] Eğik serbest jette ısı iletimi makalesinde belirttiği üzere farklı açılarda (X/W) (boyutsuz radyal mesafe) ile Nu eğrisinde açı arttıkça Nu sayısının arttığı görülmüştür. Ayrıca X/W (boyutsuz radyal mesafe)'nin sıfır olduğu noktada Nu sayısı 90° de maximum değeri göstermektedir. Bu açı düştükçe hem Nu sayısı merkezde

düşmekte hemde negatif x yönünde bir yer değişim görülmektedir. Duvar jet bölgesi pozitif x yönünde artış göstermiş ve bu bölümde transfer artmıştır.

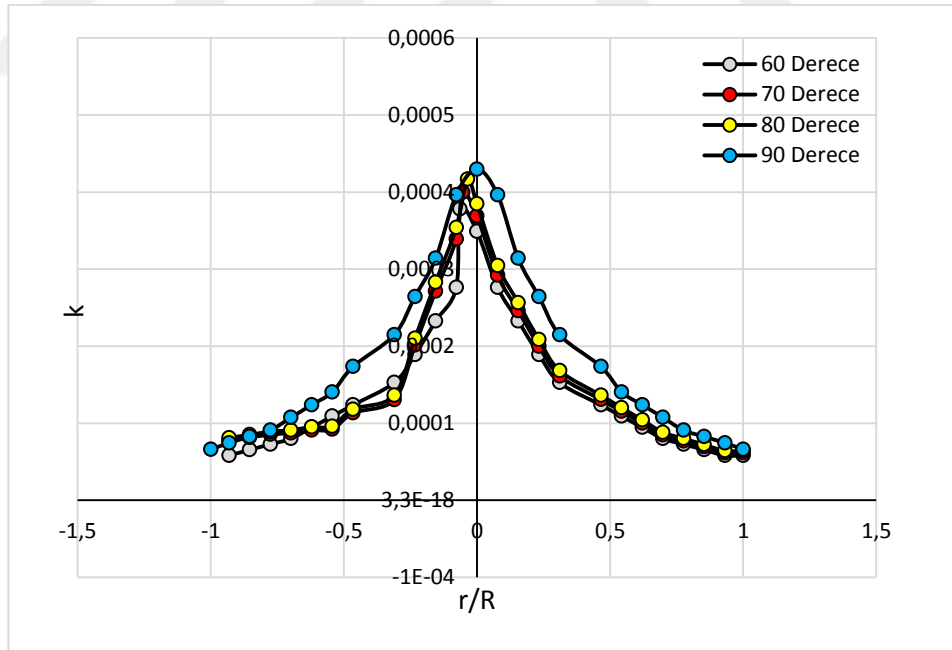


Şekil 4.14. (H/d)=2'de ve Re=10000'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi

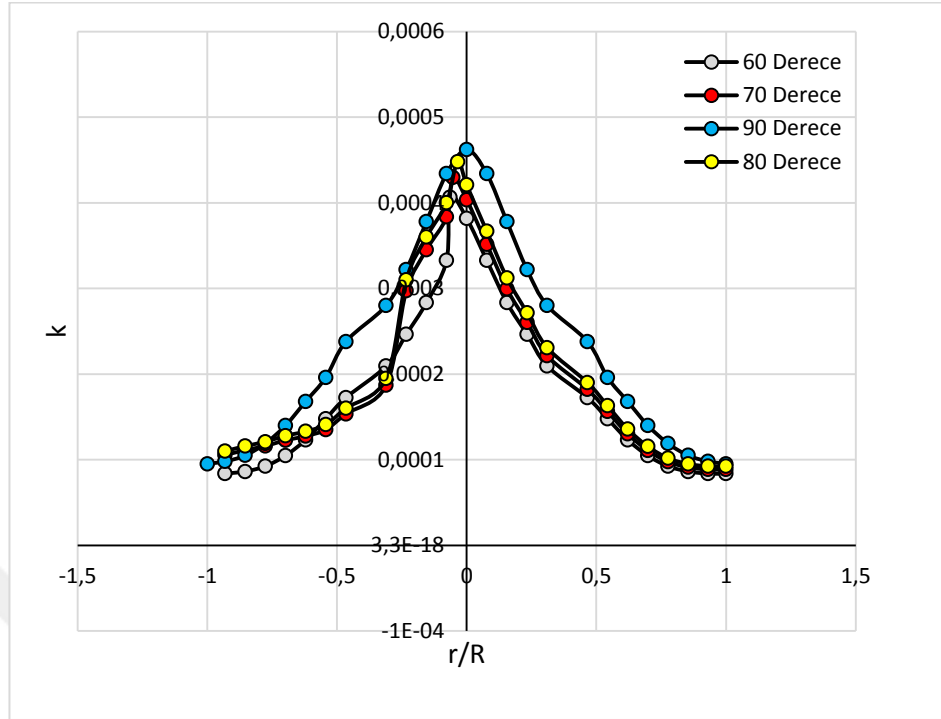
Şekil 4.14 ve Şekil 4.13 karşılaştırıldığında sabit (H/d) oranı (2) ve aynı Nozul çarpma yüzeyi arasındaki açı değişimlerinde Re sayısı 5000 den 10000 e çıkarıldığında kütle transfer kat sayısının arttığı görülmektedir.



Şekil 4.15. $(H/d)=2$ 'de ve $Re=20000$ 'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi

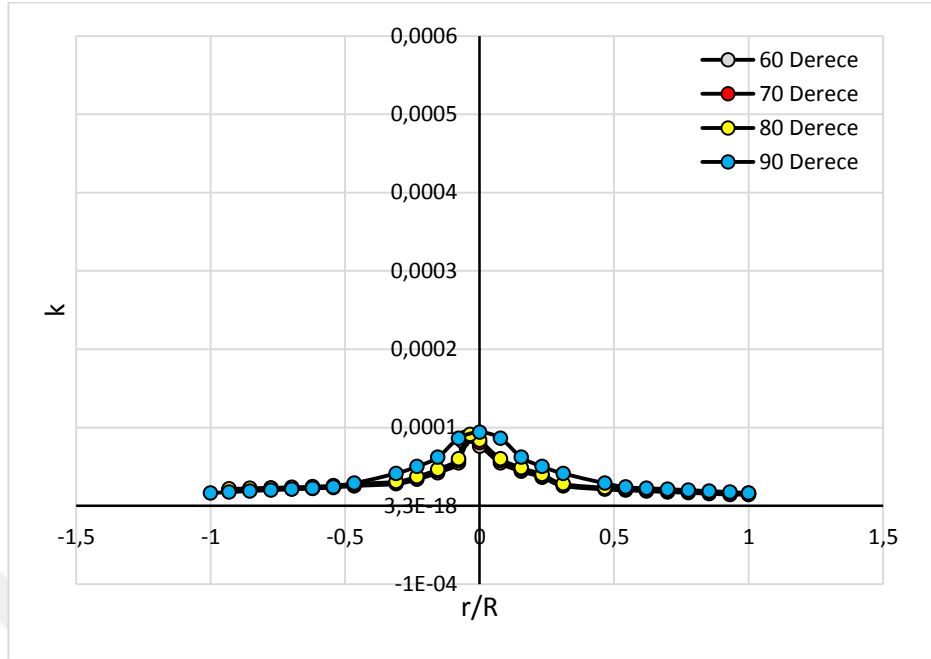


Şekil 4.16. $(H/d)=2$ 'de ve $Re=30000$ 'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi



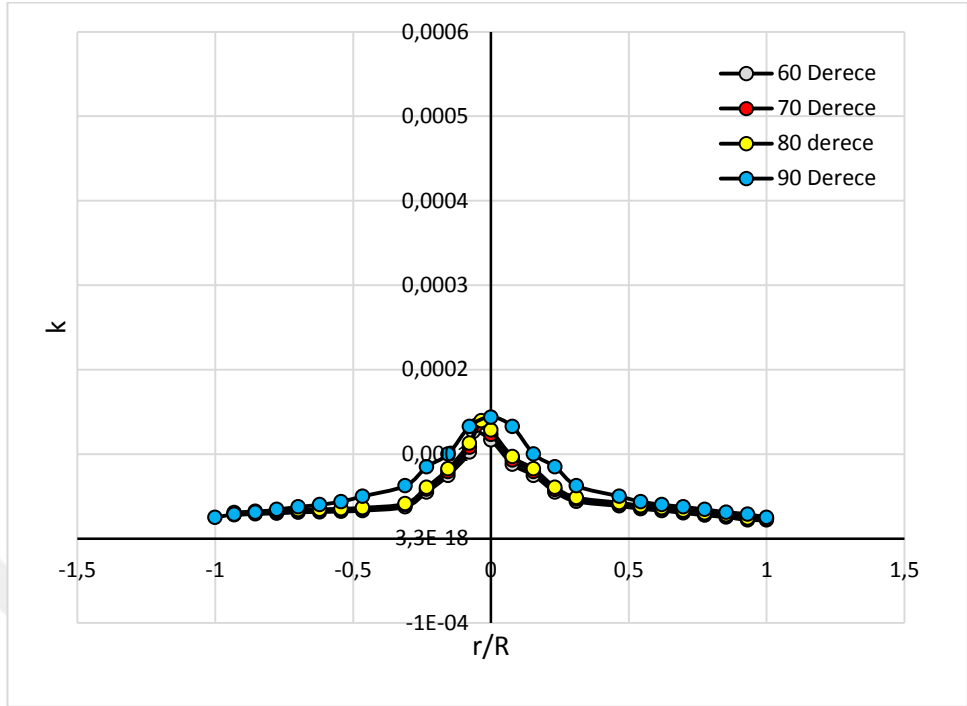
Şekil 4.17. (H/d)=2'de ve Re=40000'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi

Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 de aynı (H/d) oranında aynı Nozul çarpma yüzeyi arasındaki açı değişimlerinde Re sayısı arttıkça Kütle transfer katsayısının arttığı görülmektedir.

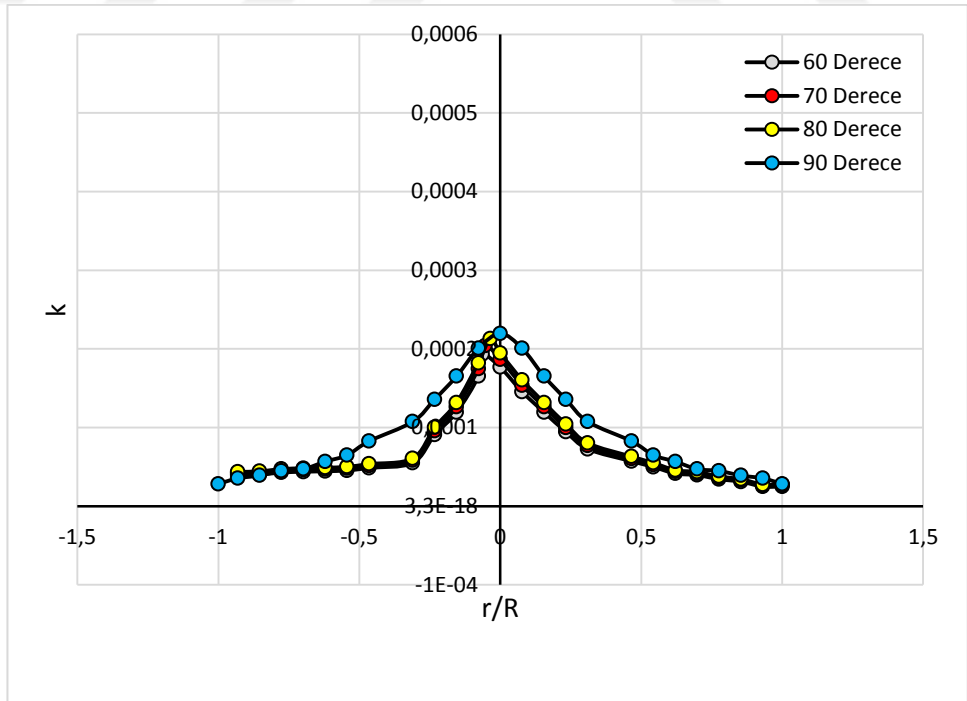


Şekil 4.18. $(H/d)=4$ 'te ve $Re=5000$ 'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi

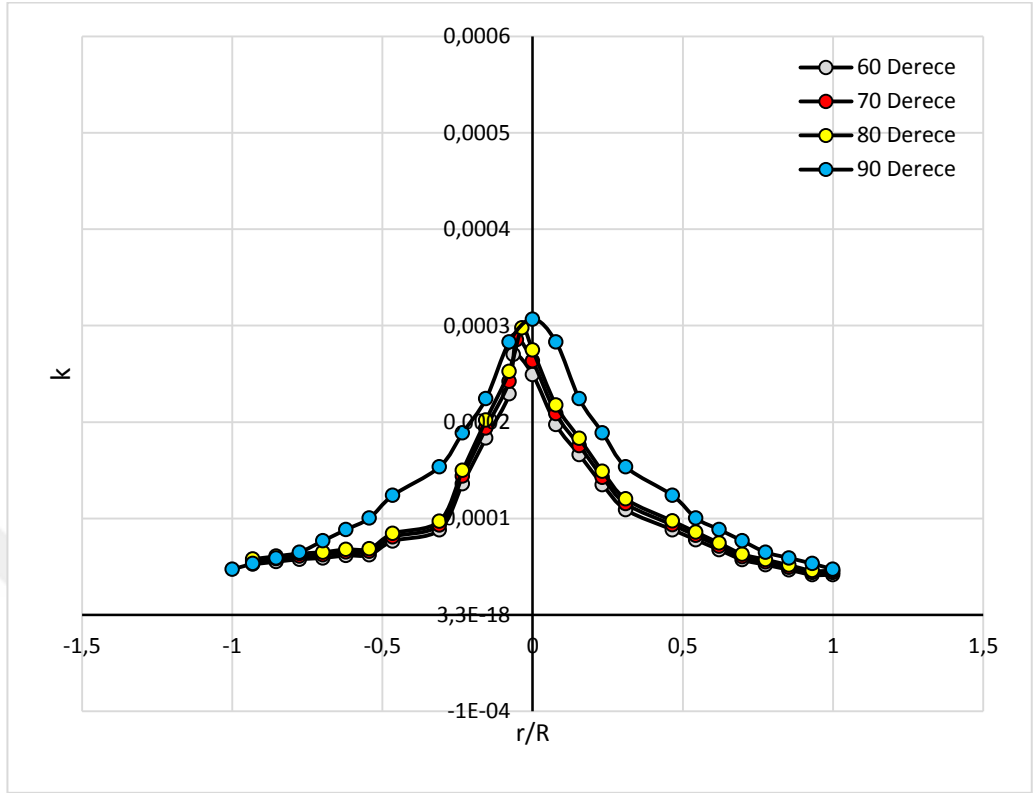
Şekil 4.13, Şekil 4.18 ile karşılaştırıldığında Re değerleri ve Nozul çarpma yüzeyi arasındaki açı değişimleri aynıdır. Fakat (H/d) oranı değiştirilmiştir. Buradan da görülmektedir ki (H/d) oranı arttıkça kütle transfer katsayısı azalmaktadır.



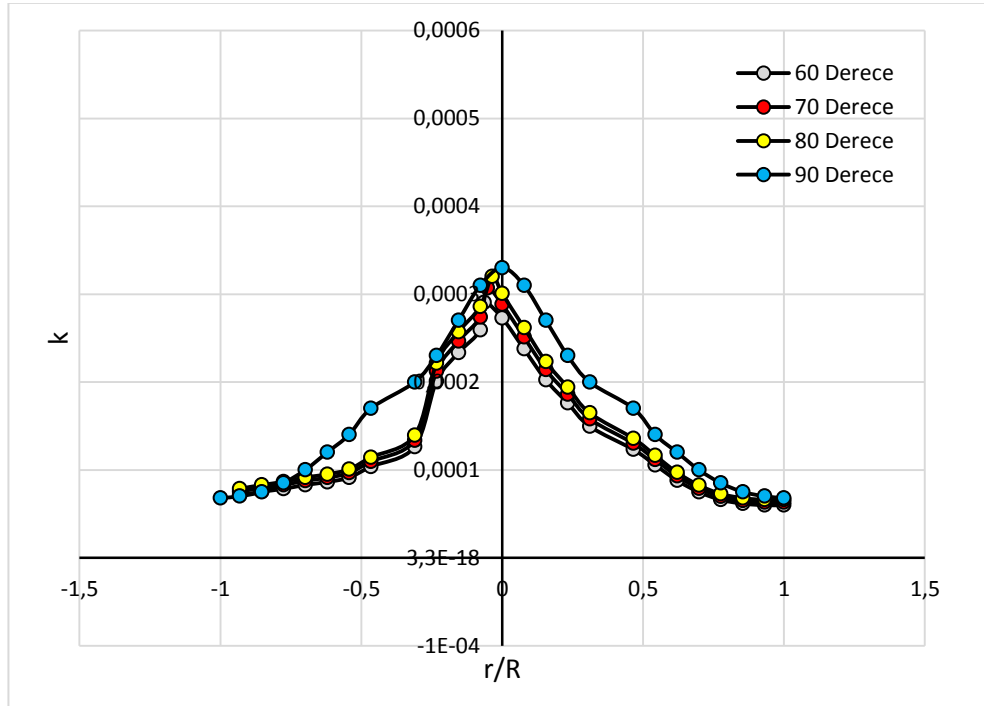
Şekil 4.19. $(H/d)=4$ 'te ve $Re=10000$ 'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi



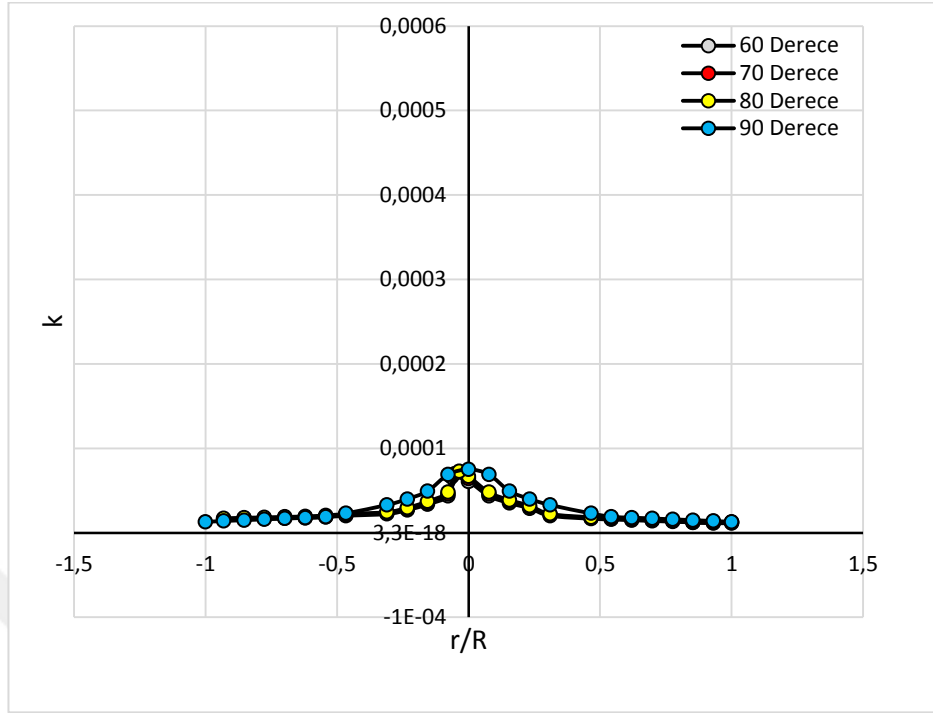
Şekil 4.20. $(H/d)=4$ 'te ve $Re=20000$ 'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi



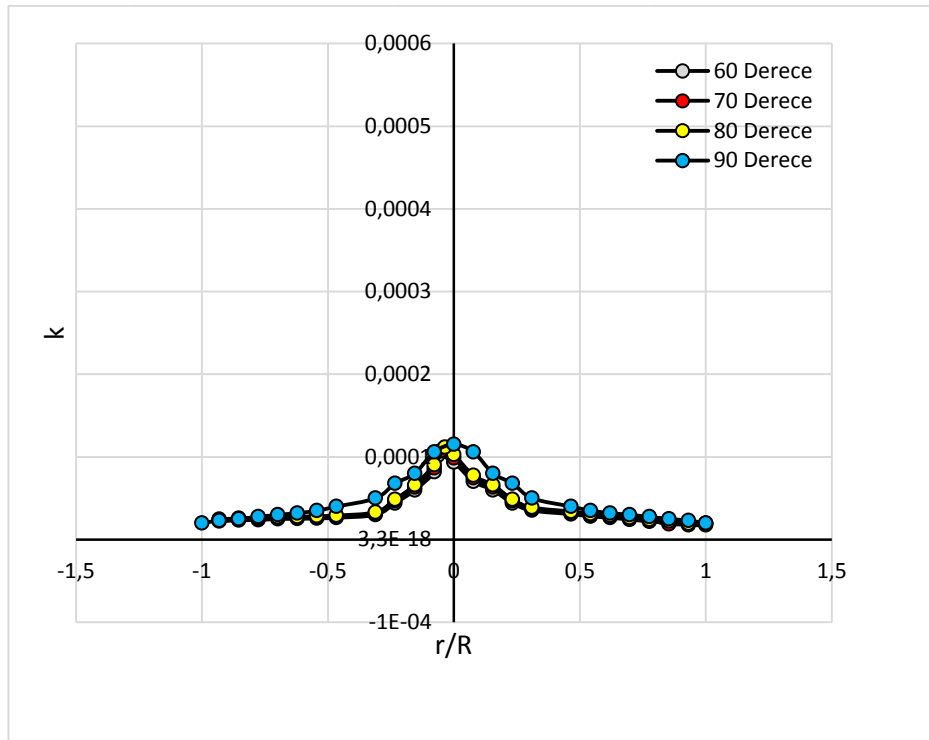
Şekil 4.21. $(H/d)=4$ 'te ve $Re=30000$ 'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi



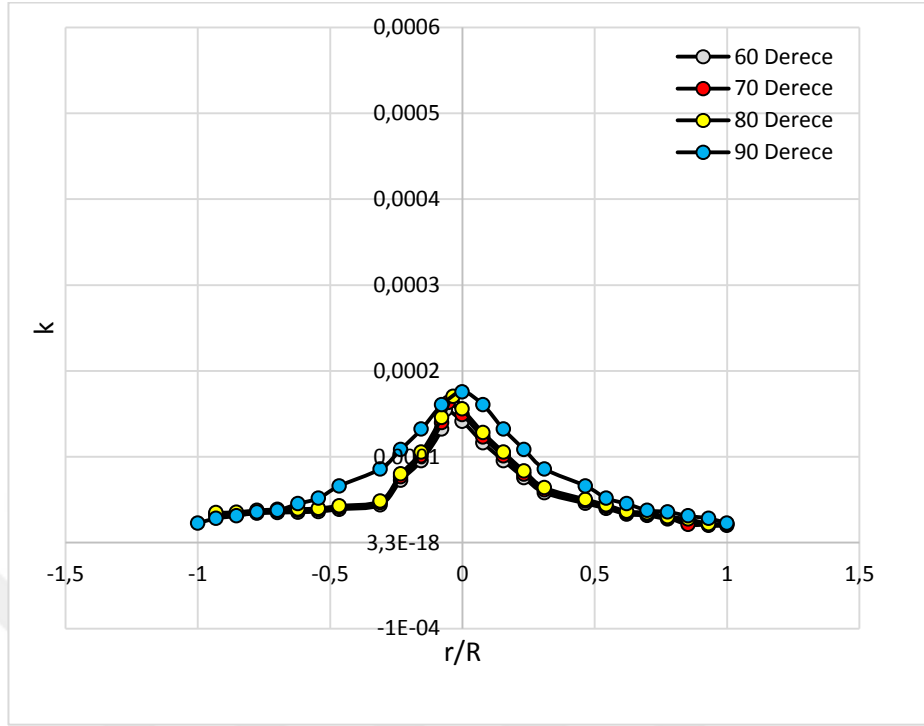
Şekil 4.22. $(H/d)=4$ 'te ve $Re=40000$ 'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi



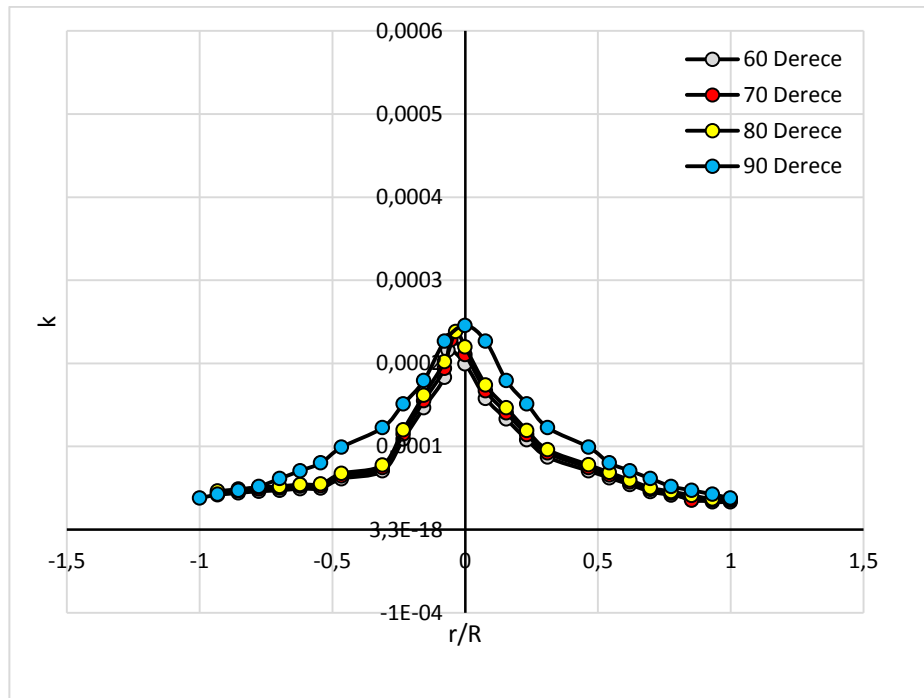
Şekil 4.23. $(H/d)=6$ 'da ve $Re=5000$ 'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi



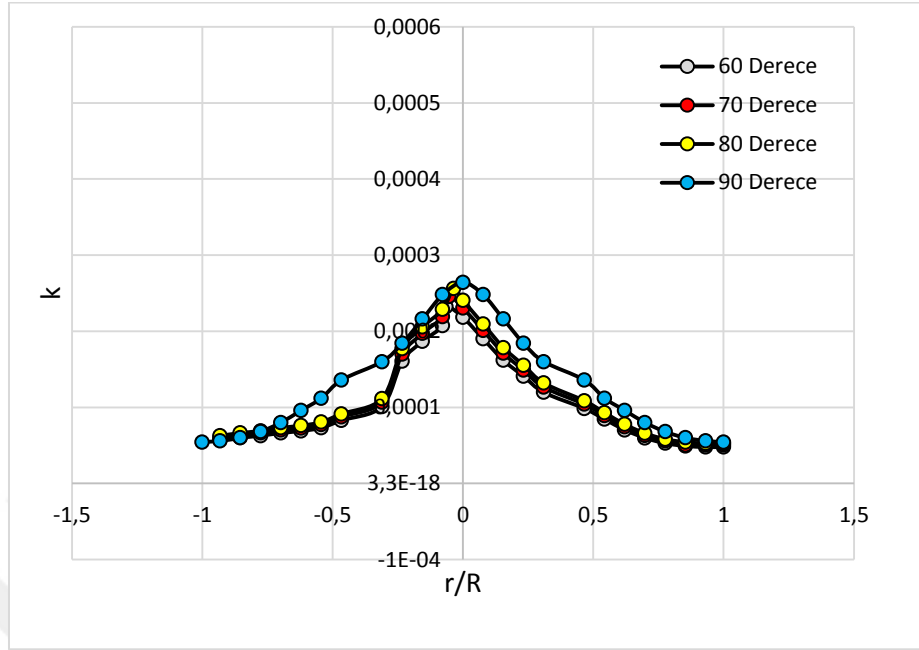
Şekil 4.24. $(H/d)=6$ 'da ve $Re=10000$ 'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi



Şekil 4.25. $(H/d)=6$ 'da ve $Re=20000$ 'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi



Şekil 4.26. $(H/d)=6$ 'da ve $Re=30000$ 'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi

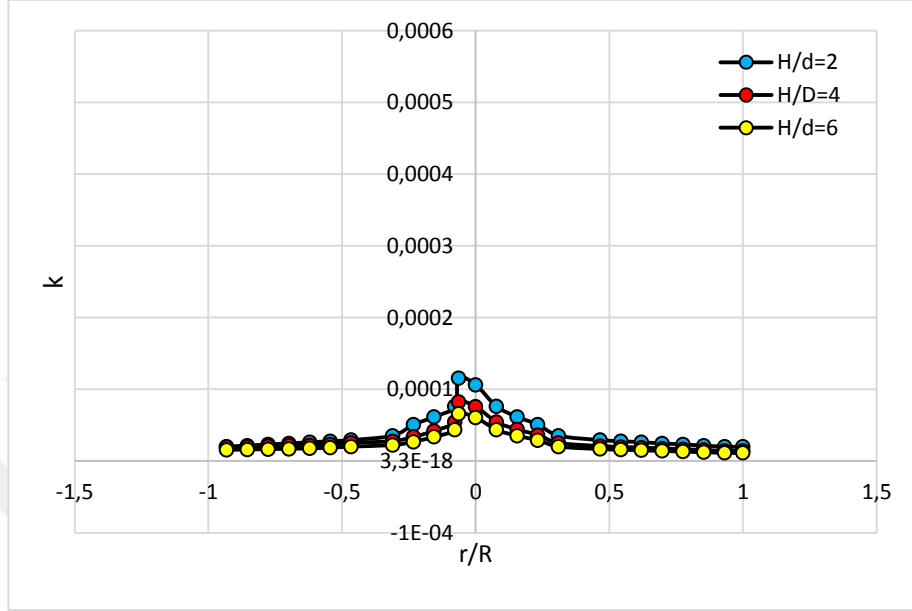


Şekil 4.27. $(H/d)=6$ 'da ve $Re=40000$ 'de çarpma açısının kütle transfer katsayısına etkisi

Bu şekillerden çıkardığımız genel sonuç;

Sabit bir Re sayısında ve sabit bir (H/d) oranında Nozul çarpma yüzeyi arasındaki açı arttıkça merkezde kütle transfer katsayısı da artmaktadır. Sabit Re sayısında ve sabit Nozul çarpma yüzeyi değerlerinde (H/d) oranı arttıkça kütle transfer katsayısı düşmekte, Sabit (H/d) ve sabit Nozul çarpma yüzeyi değerlerinde Re sayısı arttıkça kütle transfer katsayısı da artmaktadır. Bu bölümde Nozul çarpma yüzeyi açısı parametresinin kütle transferine çeşitli şartlarda etkisi ele alınmıştır.

4.3. Boyutsuz Nozul-Çarpma Yüzeyi Mesafesi (H/d) Parametresi



Şekil 4.28. $\theta=60^\circ$ 'de ve $Re=5000$ 'de (H/d)'nin kütle transfer katsayısına etkisi

Şekil 4.28 de sabit bir çarpma yüzeyi açısında ve sabit bir Re sayısında (H/d) oranının kütle transfer katsayısına etkisi gösterilmektedir. Burada (H/d) değeri arttıkça kütle transfer katsayısının düştüğü görülmektedir.

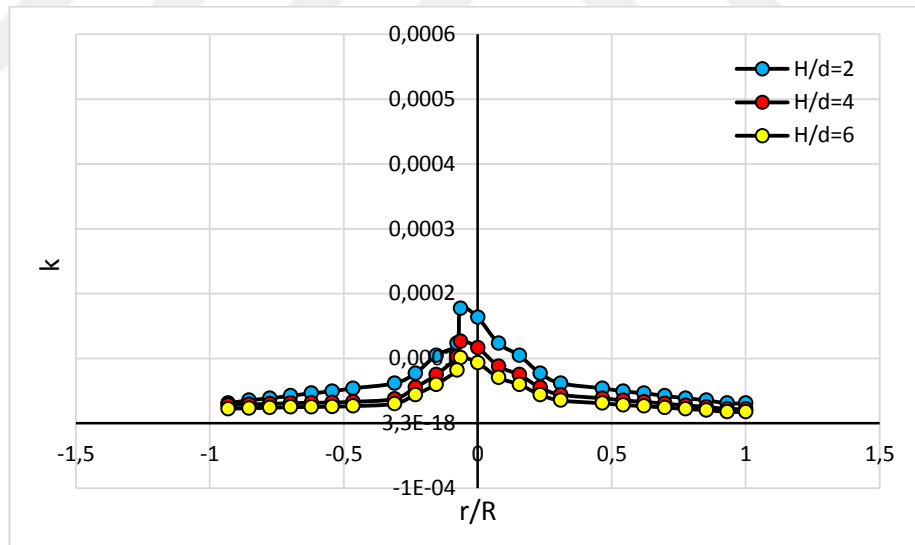
(H/d)'nin artması ile çarpma yüzeyi üzerinde kütle transferi katsayısı azalmaktadır. Açıya bağlı olarak (r/R)'nin merkezi üzerindeki kütle transfer katsayısı değişim göstermektedir. Açılı azaldıkça (r/R)'nin merkezinde de kütle transfer katsayısı azalacaktır ve negatif (r/R) yönüne doğru kayma meydana gelecektir.

Ching ve Agarwal'ın yaptığı çalışmada; daldırılmış eğik çarpan yarık jet için lokal kütle transfer hızını ELCDT tekniği kullanarak bir çarpma yüzeyi üzerindeki mikro elektrotlar kullanılmıştır. Bu çalışma lokal sherwood sayılarının durgunluk noktasında korelasyonunu türetmek için gerçekleştirilmiştir. Jet açısı, nozul ve Re sayısı ($Re_j = DV_j \delta / \mu$), boyutsuz nozul çarpma yüzeyi mesafesi (H/d), jet merkezinden olan boyutsuz radyal mesafe (r/R)'nin fonksiyonu olarak çarpan jetlerin duvar jeti akış

rejimleri ve laminer sınır tabaka içinde durgunluk noktasında lokal sherwood sayılarını korele etmek üzere verilir.

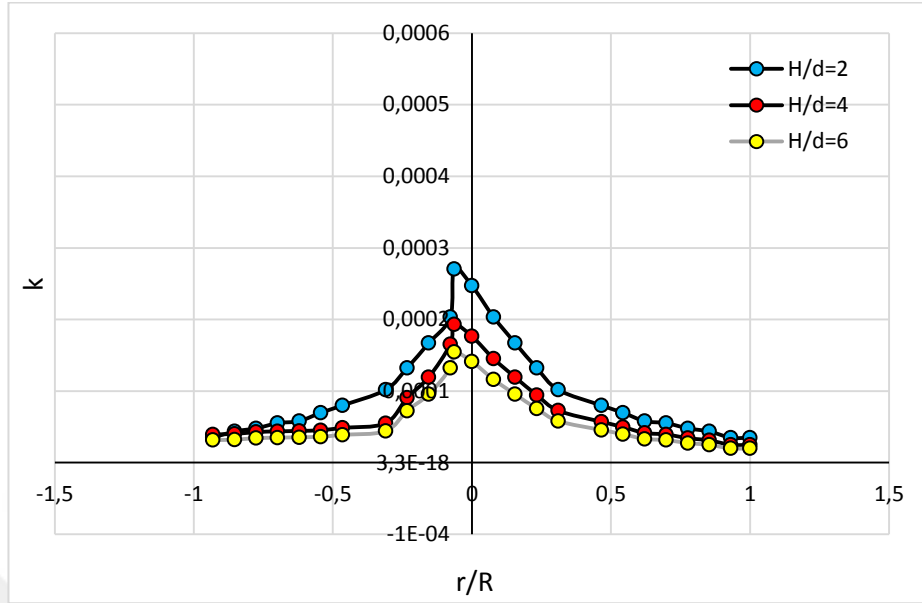
Nozuldan çıkan akışkan jeti, aynı tür durgun ve büyük bir akışkan içinden geçer ve 90°C den daha düşük bir açıda bir düz yüzey üzerine çarpar. Bir dik ve eğik çarpan jetin akış desenleri arasındaki farkı durgunluk bölgesi ve duvar jet bölgelerinde gözlemlenmiştir.

Eğik jette çarpma yüzeyi üzerindeki durgunluk noktası jet merkezinden negatif x yönünde yer değiştirdiği görülmüştür. Aynı nozul Re sayısında bir dik çarpan jet ile kıyaslandığı zaman eğik açılı bir çarpan jet durumunda negatif x yönünde kütle transfer katsayılarının düşmüş, pozitif x yönünde ise kütle transfer katsayılarının artmış olduğu bulunmuştur [9].

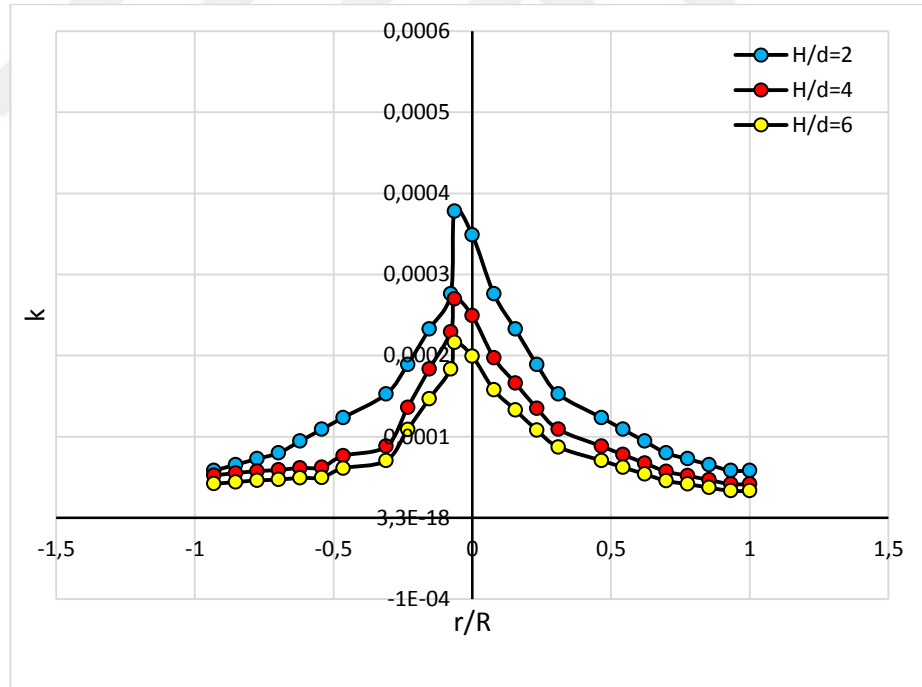


Şekil 4.29. $\theta=60^\circ$ 'de ve $Re=10000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi

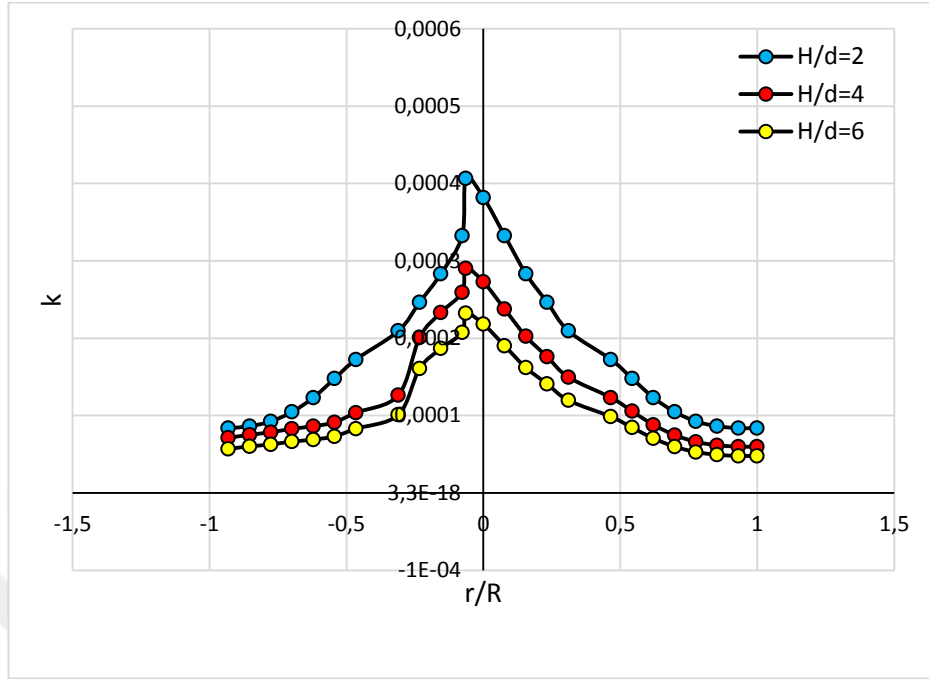
Şekil 4.29'da görüldüğü gibi Re sayısı arttığında Kütle transfer kat sayısında da artış meydana gelmektedir.



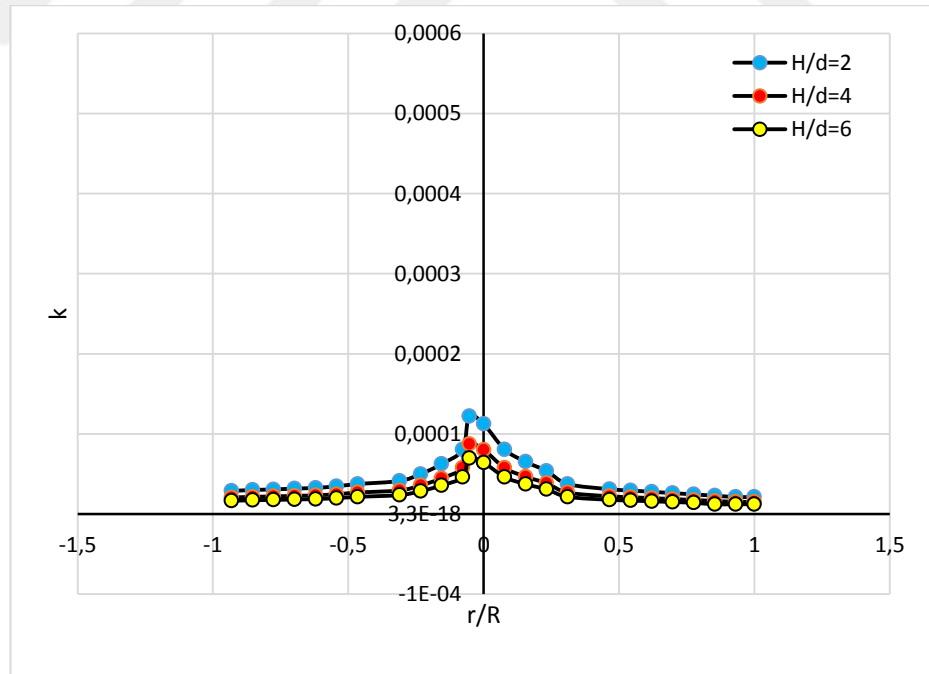
Şekil 4.30. $\theta=60^\circ$ 'de ve $Re=20000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



Şekil 4.31. $\theta=60^\circ$ 'de ve $Re=30000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



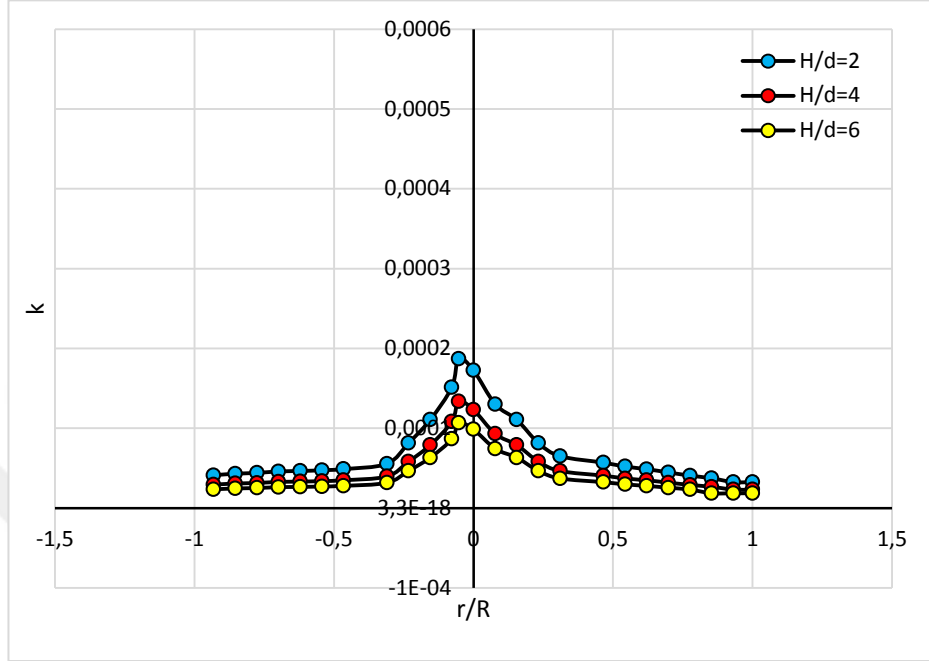
Şekil 4.32. $\theta=60^\circ$ 'de ve $Re=40000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



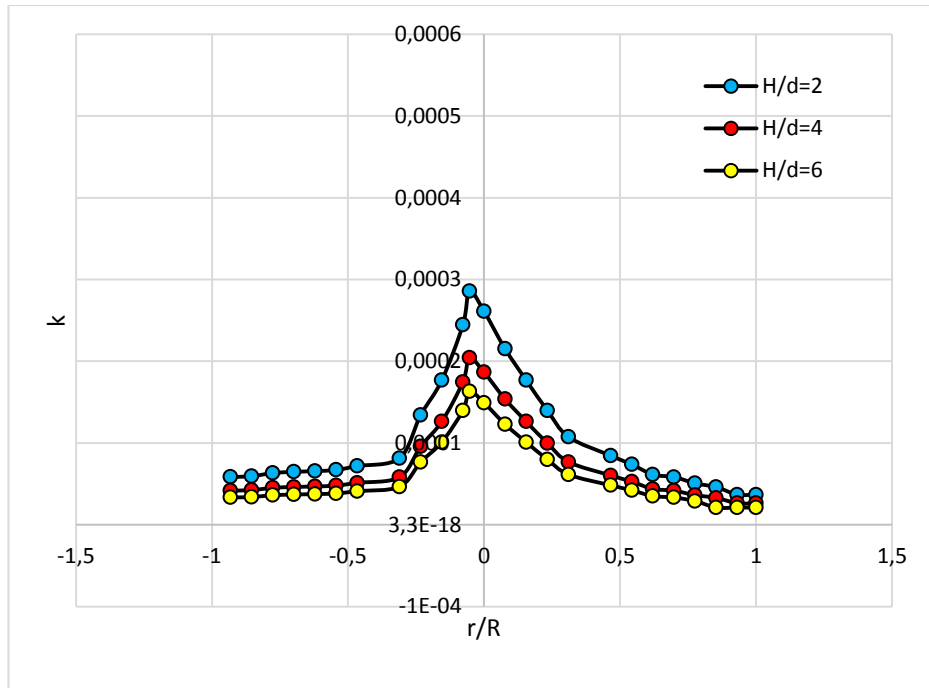
Şekil 4.33. $\theta=70^\circ$ 'de ve $Re=5000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi

Şekil 4.28 ile Şekil 4.33 karşılaştırıldığında aynı Re sayısı ve aynı (H/d) oranlarında Çarpma yüzeyi açısının değişimi ile kütle transferinin değiştiği görülmektedir.

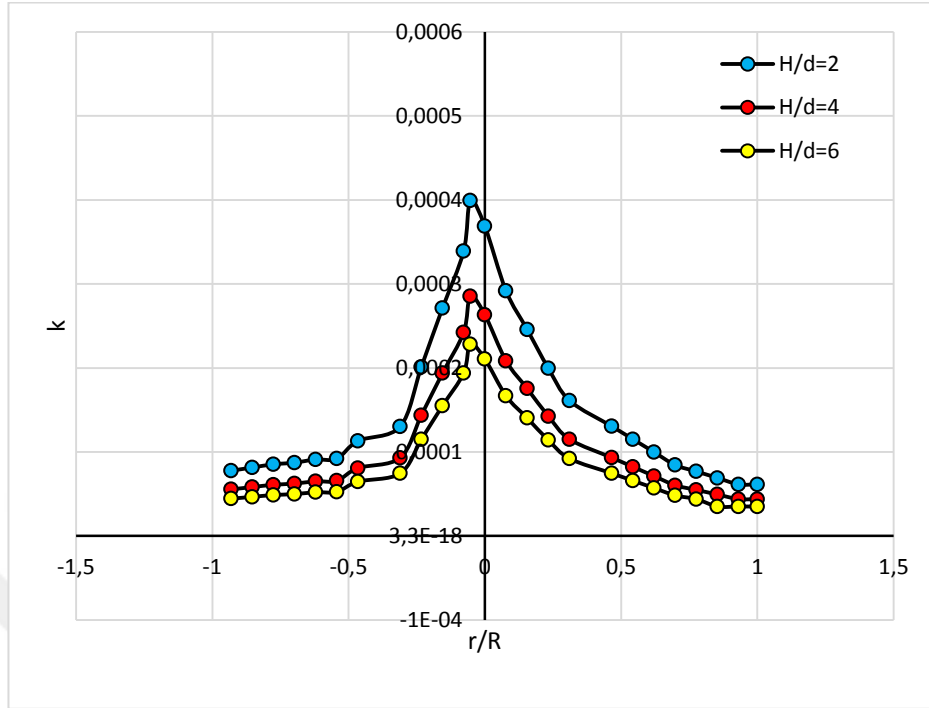
Çarpma yüzeyi açısının artması ile kütle transfer kat sayısında artacaktır.



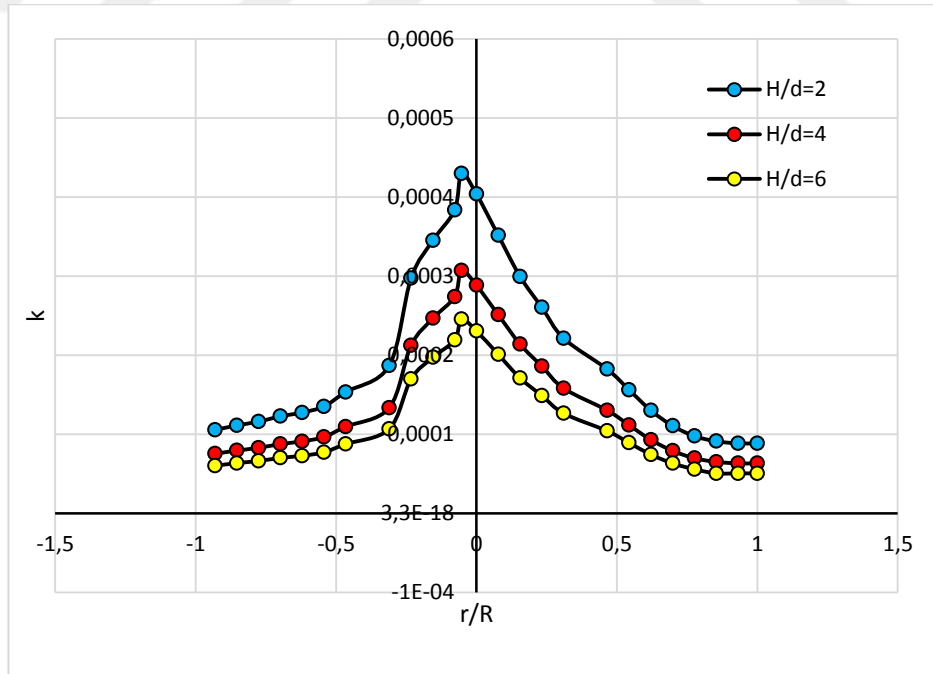
Şekil 4.34. $\theta=70^\circ$ 'de ve $Re=10000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



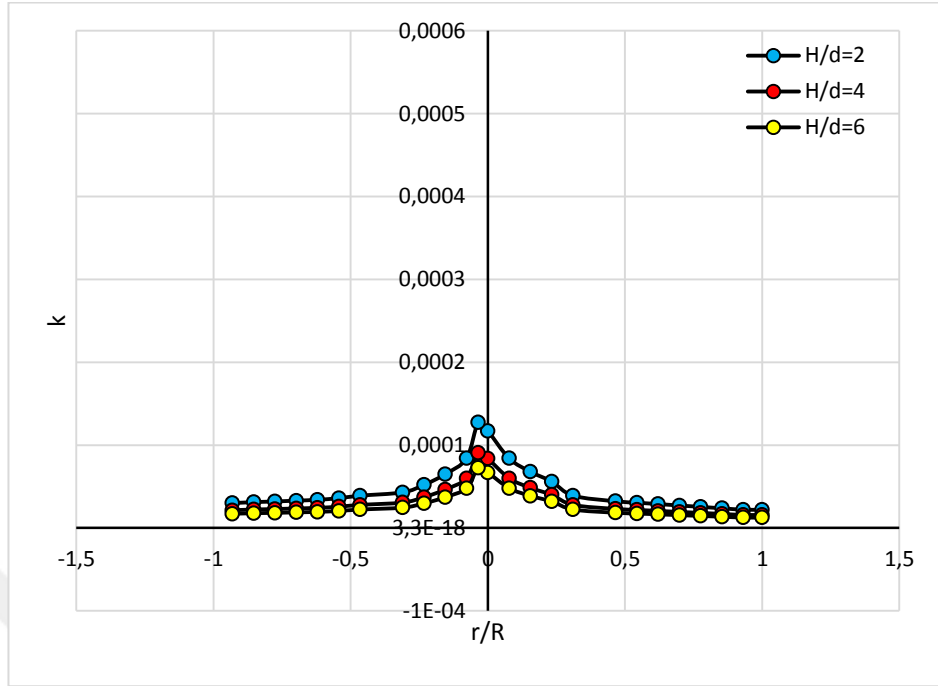
Şekil 4.35. $\theta=70^\circ$ 'de ve $Re=20000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



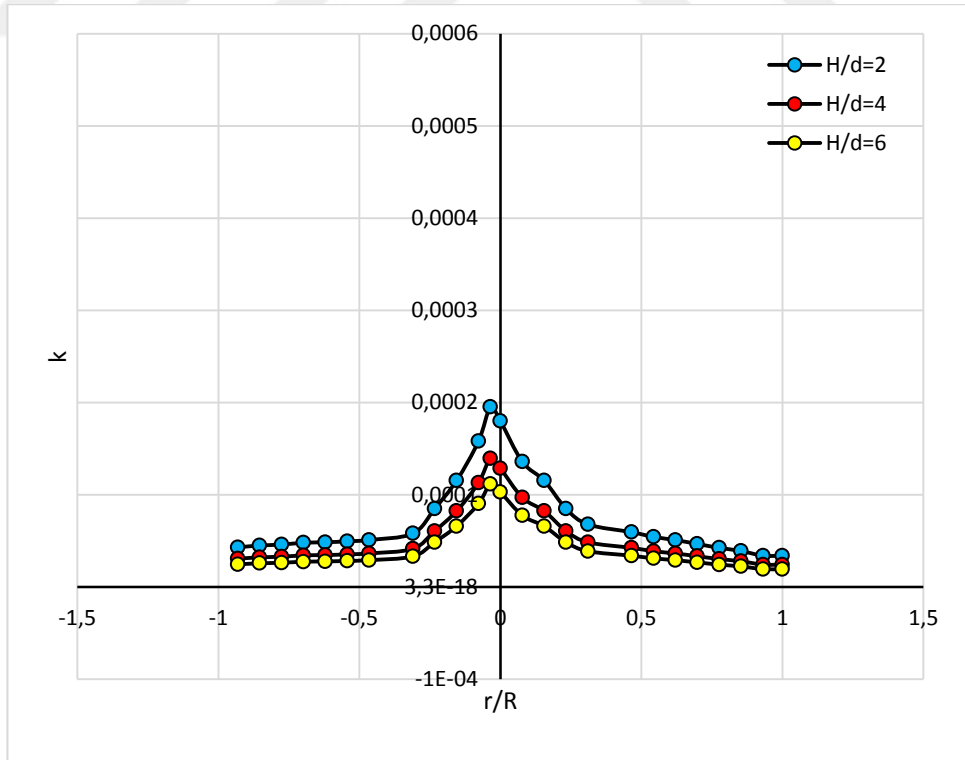
Şekil 4.36. $\theta=70^\circ$ 'de ve $Re=30000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



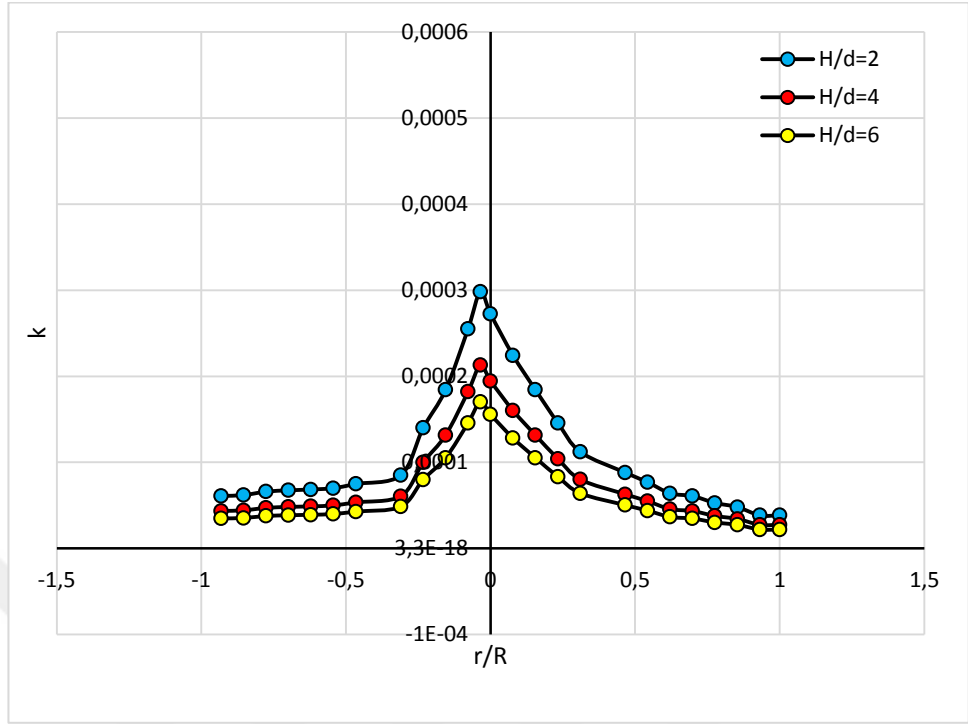
Şekil 4.37. $\theta=70^\circ$ 'de ve $Re=40000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



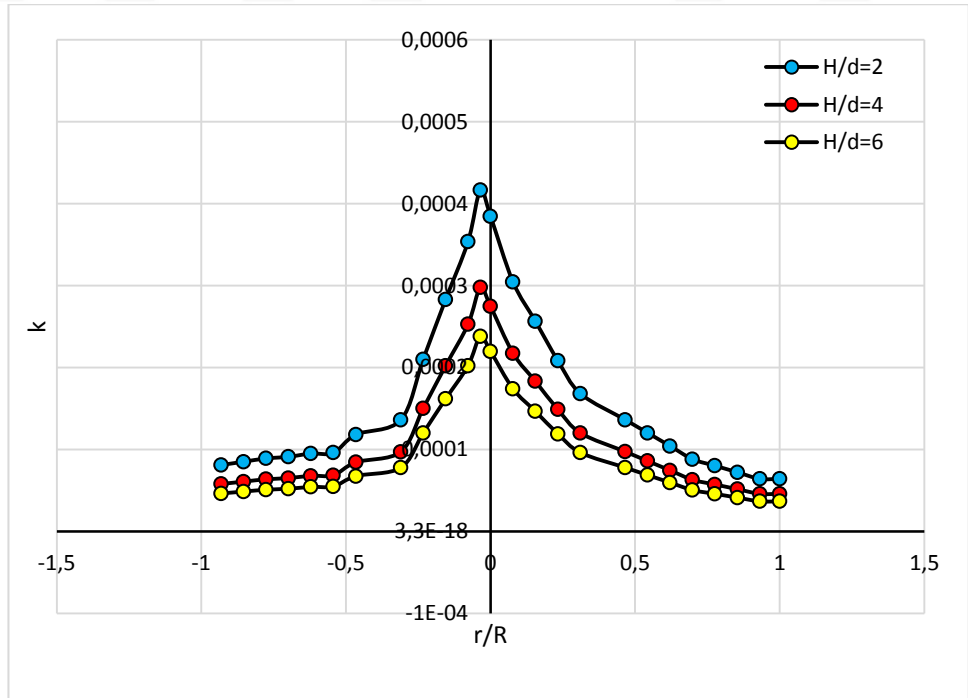
Şekil 4.38. $\theta=80^\circ$ 'de ve $Re=5000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



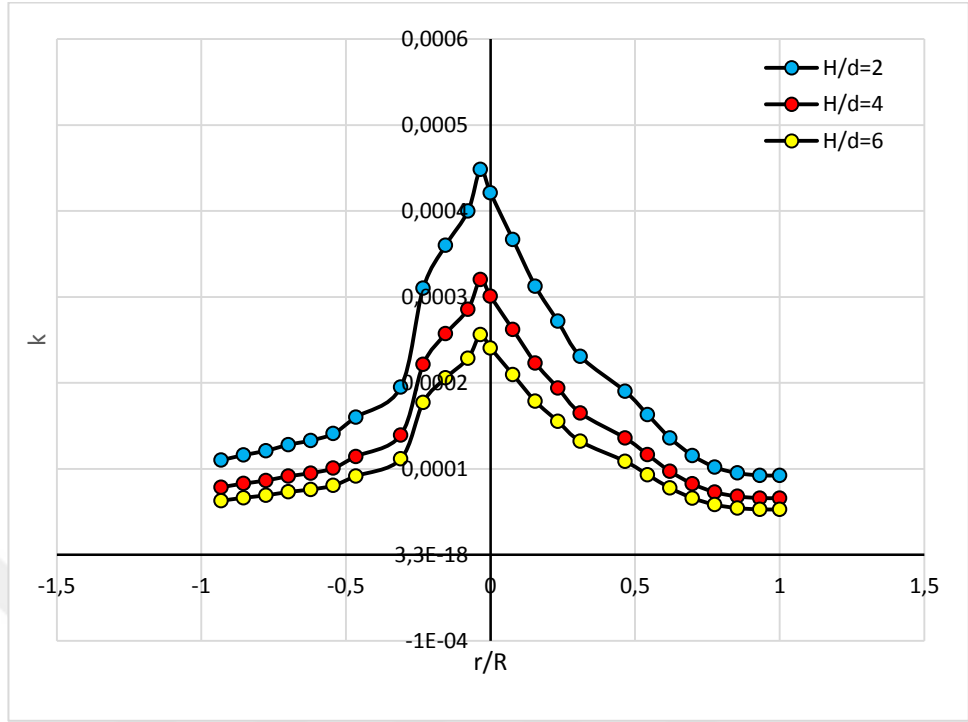
Şekil 4.39. $\theta=80^\circ$ 'de ve $Re=10000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



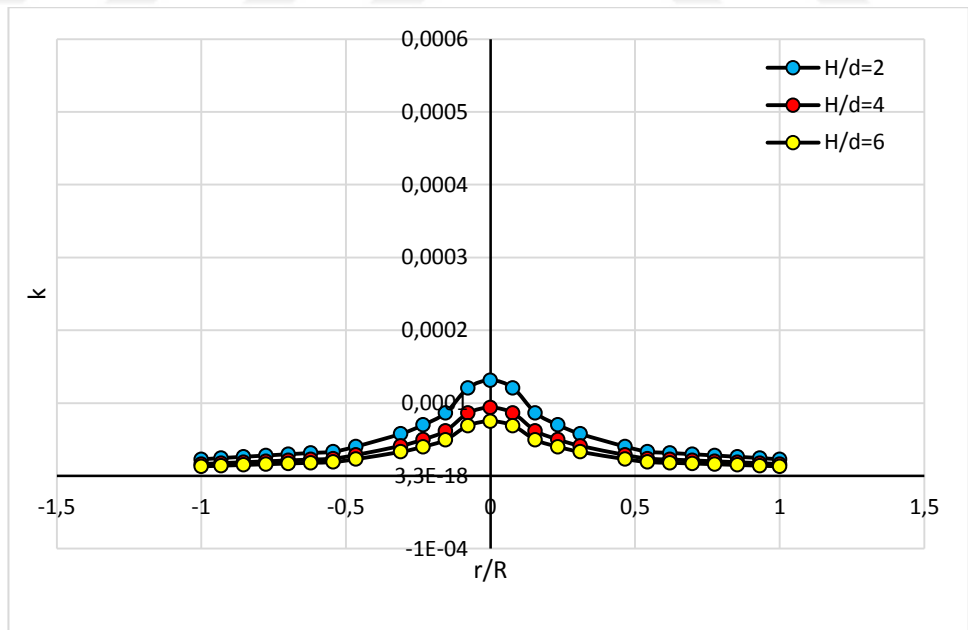
Şekil 4.40. $\theta=80^\circ$ 'de ve $Re=20000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



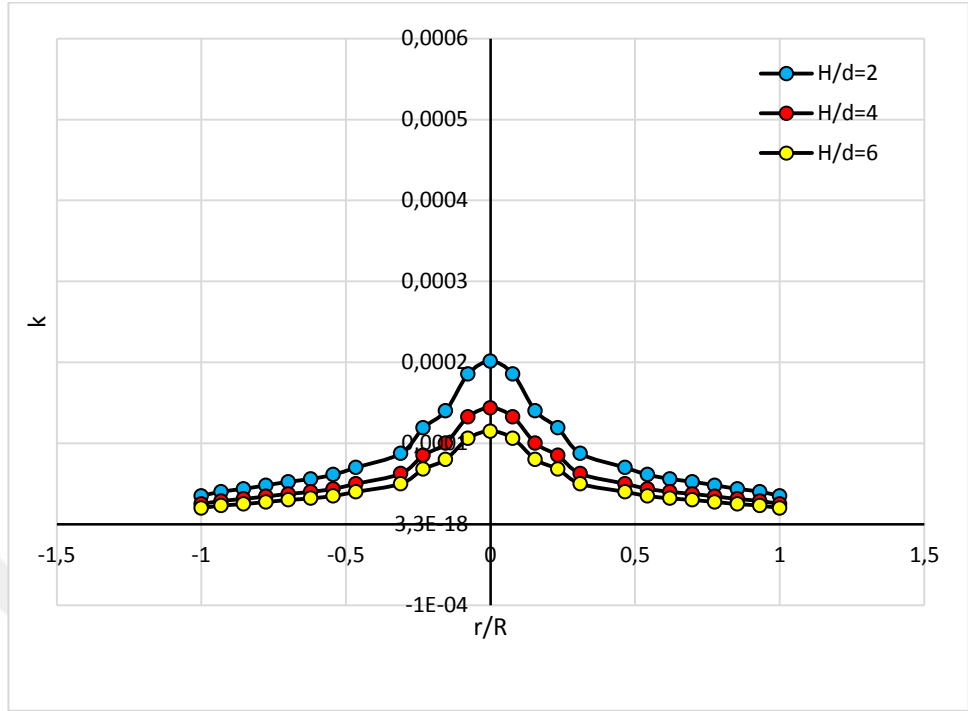
Şekil 4.41. $\theta=80^\circ$ 'de ve $Re=30000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



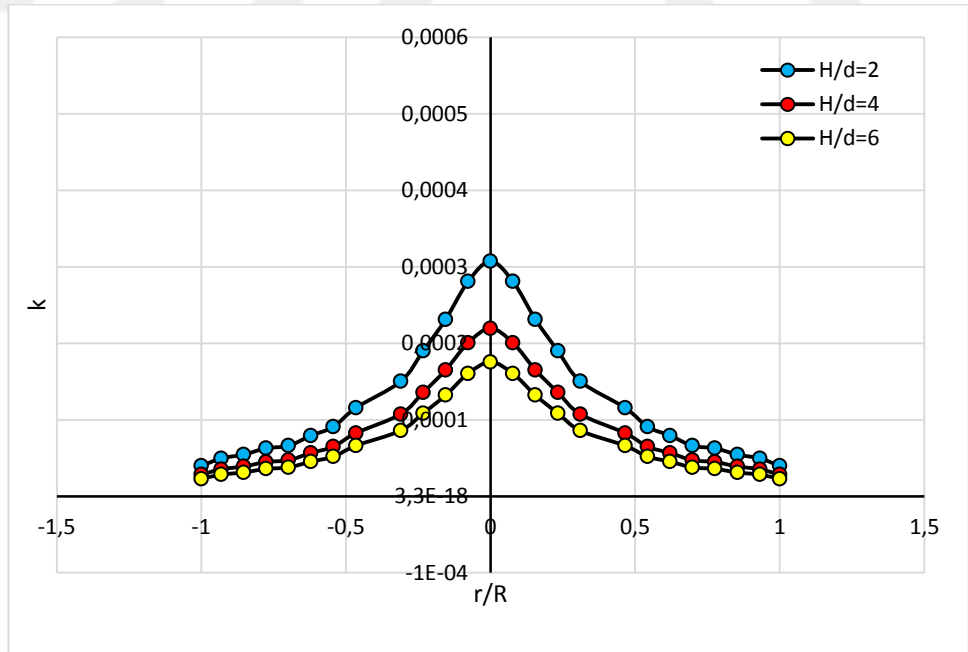
Şekil 4.42. $\theta=80^\circ$ 'de ve $Re=40000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



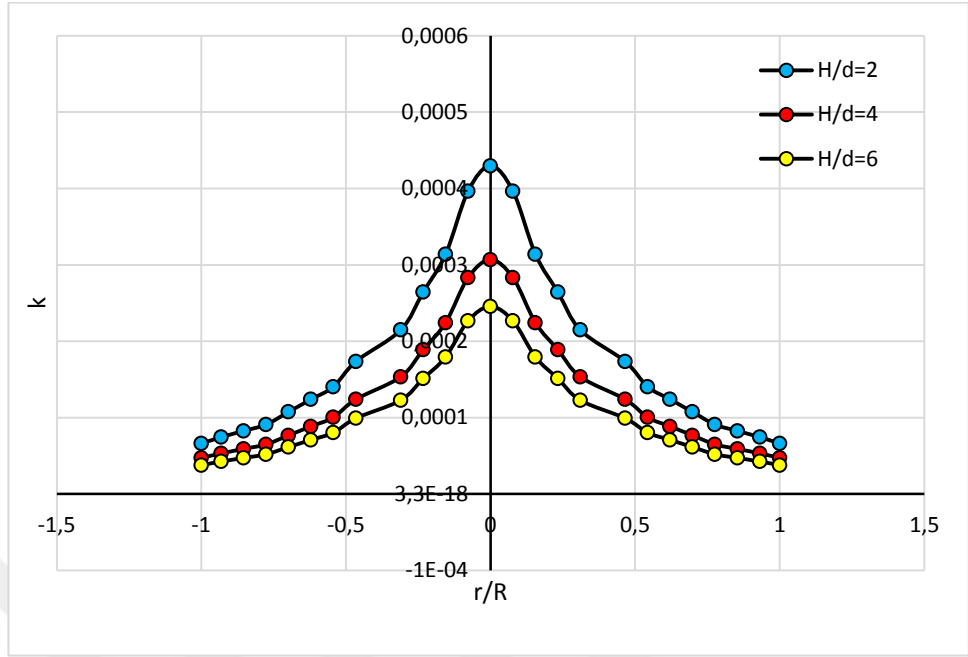
Şekil 4.43. $\theta=90^\circ$ 'de ve $Re=5000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



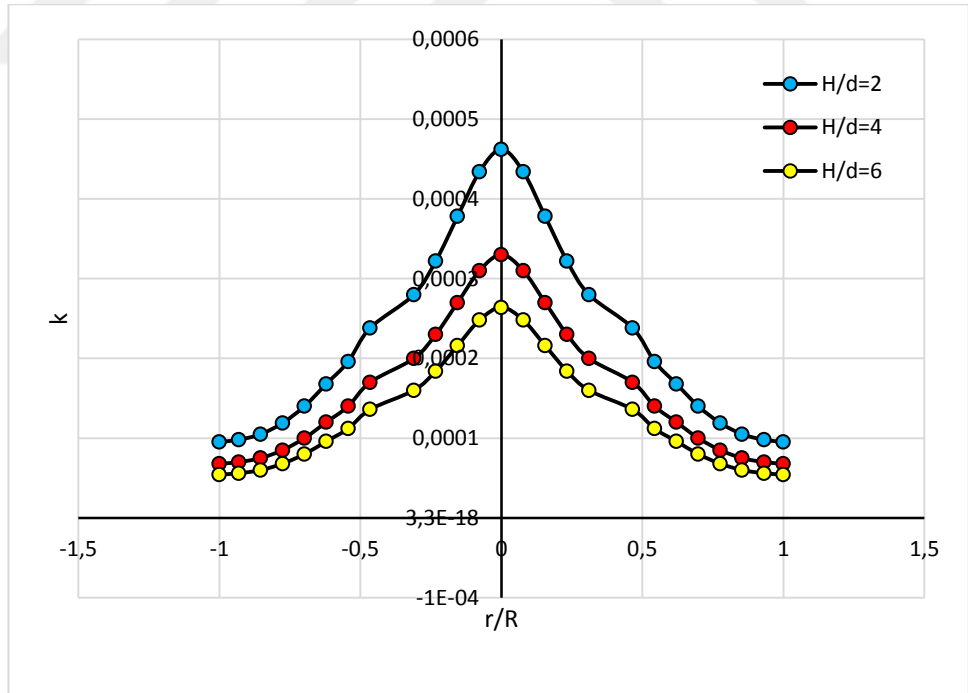
Şekil 4.44. $\theta=90^\circ$ 'de ve $Re=10000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



Şekil 4.45. $\theta=90^\circ$ 'de ve $Re=20000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi



Şekil 4.46. $\theta=90^\circ$ 'de ve $Re=30000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi

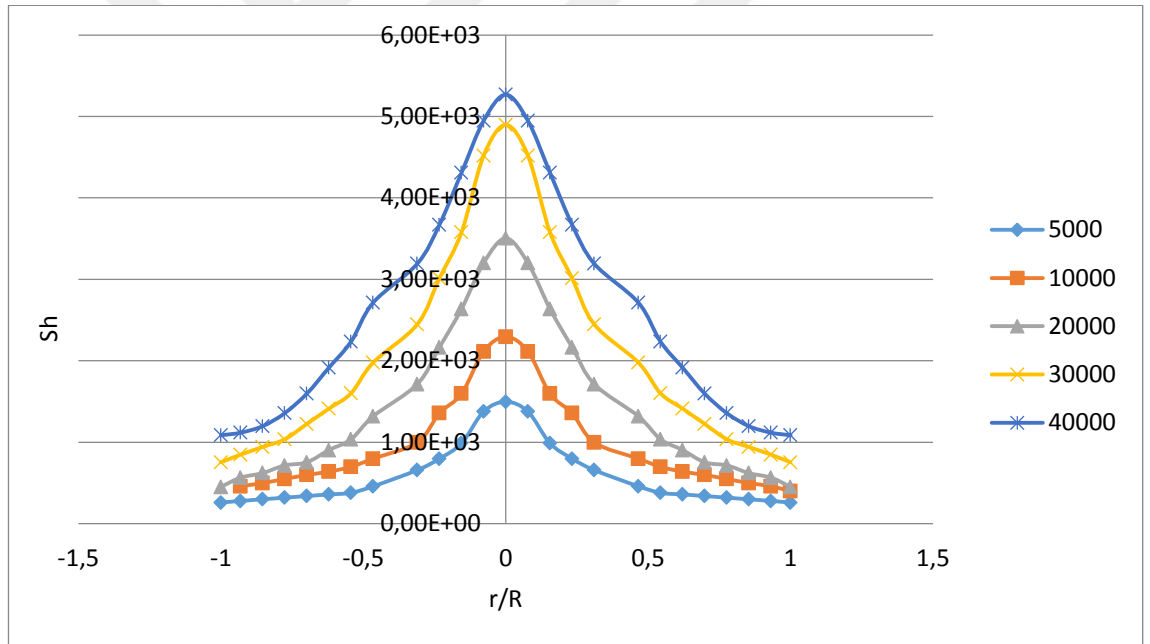


Şekil 4.47. $\theta=90^\circ$ 'de ve $Re=40000$ 'de (H/d) 'nin kütle transfer katsayısına etkisi

Bu şekillerden çıkardığımız genel sonuç;

Çarpma yüzeyi ile nozul eksenindeki açı 90^0 olan durumda maksimum kütle transferi $(r/R)=0$ 'den meydana gelmiştir. Fakat çarpma açısı 90^0 'den farklı olacak şekilde ayarlandığında, maksimum kütle transferi meydana gelen nokta $(r/R)=0$ 'den negatif yönde kaymıştır. Sabit çarpma yüzeyi açısı ve sabit Re durumunda, (H/d) arttıkça (r/R) 'nin pozitif ve negatif değer aldığı tüm çarpma yüzeyi üzerinde kütle transfer katsayısı azalmaktadır.

4.4. Re - (H/d) - θ Parametreleri ile Sherwood Sayısı (Sh) Arasındaki İlişki

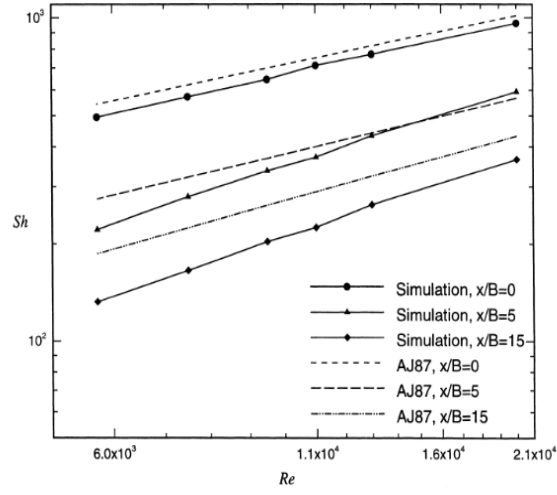


Şekil 4.48. $\theta=90^0$ ve $(H/d)=2$ şartlarında Re sayısı değişiminin Sh üzerine etkisi (Mevcut çalışma).

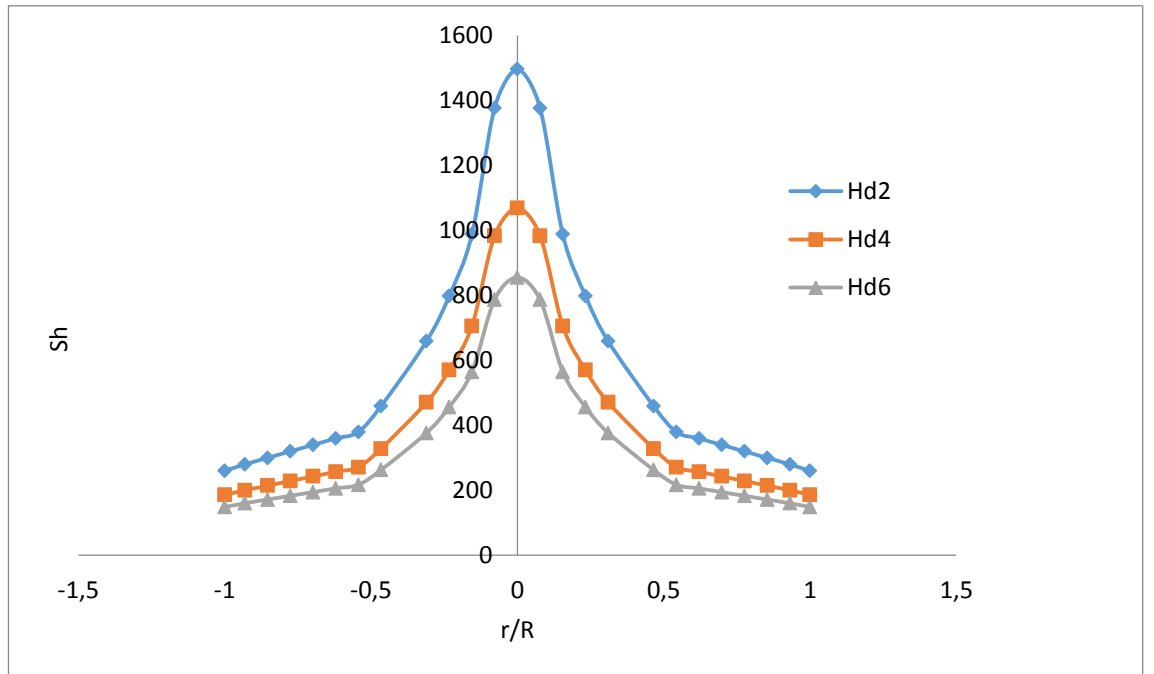
Şekil 4.48'e göre mevcut çalışmada Sh değeri Reynold sayısının artması ile artış göstermektedir.

Qian Chen, Vijay Modi [60]'nin çarpan slot jetlerde kütle transferi çalışmasında elde ettiği sonuçlara göre Sh sayısı (x/B) boyutsuz radyal mesafenin sıfır olduğu değerde

maksimum değere ulaşmaktadır. Aynı zamanda Re sayısı arttıkça Sh sayısı da artış göstermektedir (Şekil 4.49).

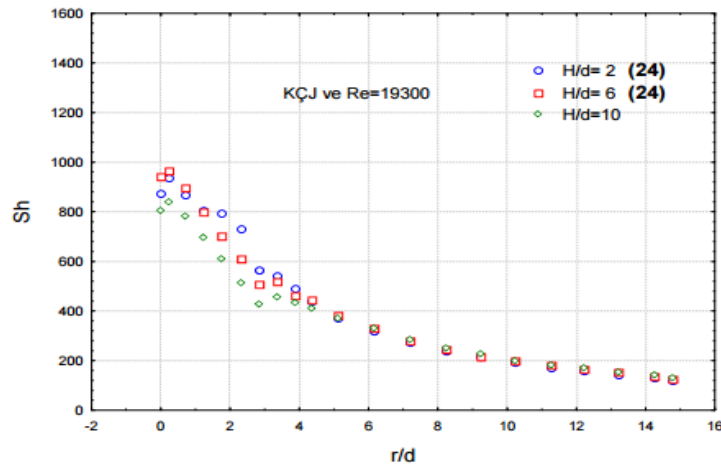


Şekil 4.49. Farklı (x/B) boyutsuz radyal mesafe değerlerinde Re sayısının Sh üzerindeki etkisi[60].

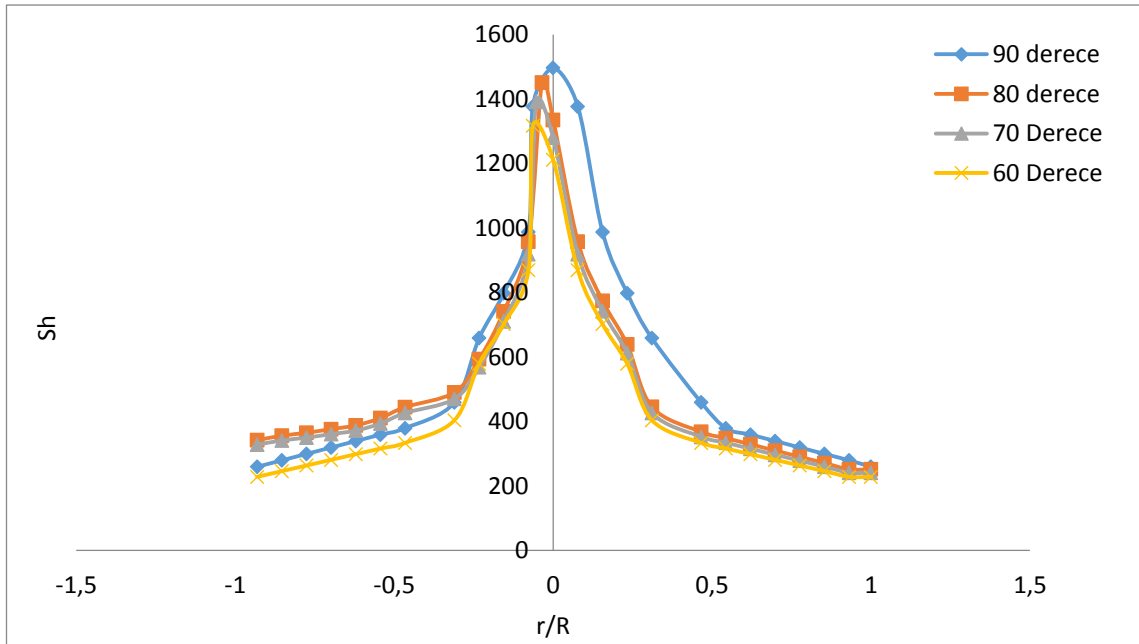


Şekil 4.50. $\theta=90^\circ$ 'de ve $Re=5000$ 'de (H/d) 'nin Sh üzerine etkisi.

Mevcut çalışmada (H/d) oranı artışıyla birlikte kütle transfer katsayısı ve buna bağlı olarak Sh sayısı azalmaktadır. Arzuğ vd'nin [61] konveksiyonel çarpan jetler üzerine yapmış olduğu kütle transferi çalışmasında da benzer durum gözlenmiştir: Araştırmacılar tarafından Sh sayısının (H/d) deki artış ile azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.51).



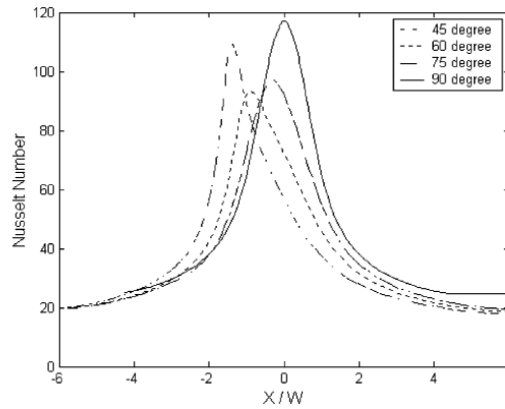
Şekil 4.51. Sh -(H/d) oranı arasındaki bağıntı [67]



Şekil 4.52. $Re=5000$ 'de ve (H/d)=2'de çarpma θ 'nın Sh 'a etkisi

Şekil 4.52'ye göre nozul ile çarpma yüzeyi arasındaki açı azaldıkça, maksimum Sh değerinin çarpma yüzeyi üzerindeki yeri $(r/R)=0$ 'dan (r/R) ekseninin negatif yönüne doğru kaymıştır. Ayrıca çarpma açısı azaldıkça maksimum Sh değerleri azalmıştır. Jet akışının çarpma açısına bağlı olarak pozitif (r/R) yönüne doğru yönlendirilmesine bağlı olarak (r/R) 'nin pozitif yönünde Sh değeri artmaktadır ve aksi yönde ise Sh değerlerinde azalma gözlenmektedir.

Tong [58] eğik serbest jetlerle ilgili çalışmasında farklı jet çarpma açılarında, boyutsuz radyal mesafe (x/w) üzerinde elde ettikleri Nu dağılımına göre açı artışına bağlı olarak Nu sayısının arttığı görülmektedir. Ayrıca 90° çarpma açısı olan jet durumunda, boyutsuz radyal mesafe (x/w) 'nin sıfır olduğu noktada maximum Nu sayısı değeri görülmektedir. Çarpma açısındaki azalmaya bağlı olarak maksimum Nu sayılarının meydana geldiği noktanın yeri çarpma yüzeyi üzerinde (x/w) 'nin negatif olduğu yönde bir yer değiştirme göstermektedir (Şekil 4.53).



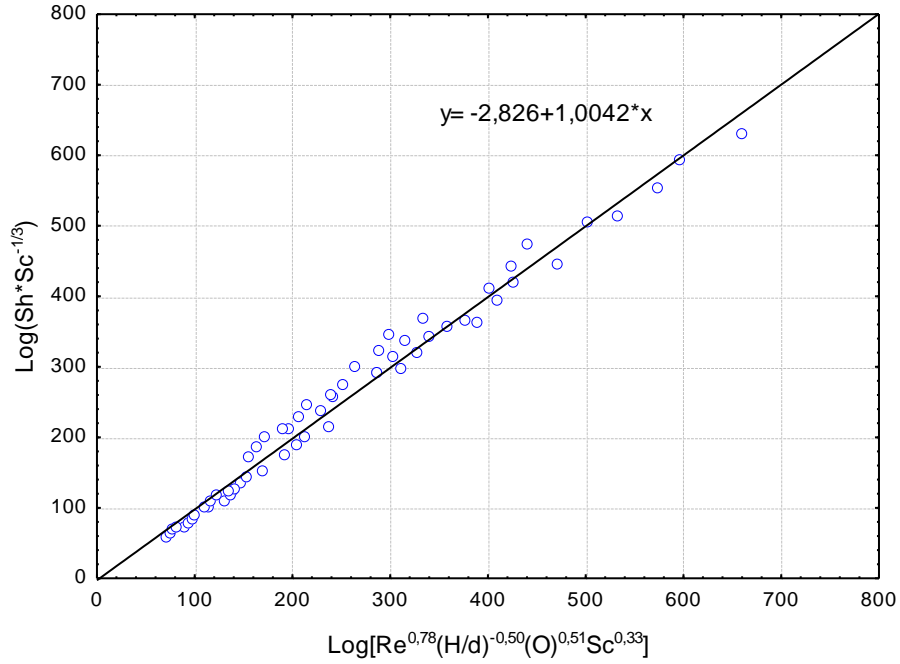
Şekil 4.53. Nu sayısı ve Açı arasındaki bağıntı [58]

Çalışmamızdan elde edilen veriler göz önünde bulundurularak $Sh-(H/d)-Re-(r/R)-\theta$ parametrelerini içeren bir korelasyon üretilmiştir;

$$Sh = 0,033(Re^{0,78}) \left(\frac{H}{d}\right)^{-0,50} (\theta^{0,51})(Sc^{0,33})$$

$2 < H/d < 6$ aralığında ($r^2=0,98$)

Çok değişkenli regresyon analizi kullanılarak çarpma yüzeyinin yatay yani $\theta=90^0$ ve açılı olduğu ($\theta=60^0$, 70^0 ve 80^0) durumlarda elde edilen tüm ortalama Sh değerleri ile tüm Re, (H/d), (θ) ve Sc değerleri arasında bir matematiksel model kurulmuştur. Türetilen bu genel model, grafiksel olarak Şekil 4.54’de sunulmuştur.



Şekil 4.54. Sherwood (Sh)değerleri için genel kütle transferi korelasyonu.

$$Sh = 0,033(Re^{0,78}) \left(\frac{H}{d}\right)^{-0,50} (\theta^{0,51})(Sc^{0,33})$$

Görüldüğü gibi korelasyon katsayısı r^2 'nin değeri 0.982 olup 1'e yakındır. Bu nedenle kurulan bu matematiksel modelin Re, (H/d), (θ) ve Sc bağımsız değişkenleri ile Sh bağımlı değişkeni arasındaki ilişkiyi iyi temsil ettiği söylenebilir. Burada Re, θ ve Sc'in Sh sayısı üzerinde pozitif etkiye, (H/d)'nin ise negatif etkiye sahip olduğu korelasyona bakarak söylenebilir. Korelasyon katsayımız yüksek çıkmıştır. Bu durumda deneysel verilerden elde edilen model denklem, deneysel sistemde Sh sayısı etkileyen parametreler arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmanın sonuçları, deney şartları dikkate alınarak aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Lokal kütle transfer katsayıları dağılımı 90° olan durumda jet durgunluk noktası etrafında bir simetriye sahiptir. Fakat çarpma yüzeyinin açılı olduğu durumlarda jet durgunluk noktası etrafında simetri bozulmaktadır.
- Jet çarpma yüzeyinin açılı olduğu durumlarda çarpma yüzeyinin eğiminin azaldığı yönde diğer tarafa kıyasla duvar jeti gelişimi daha büyük olmaktadır. Ayrıca duvar jeti gelişimine bağlı olarak kütle transfer katsayılarının arttığı gözlenmektedir.
- Reynolds sayılarındaki artışla beraber kütle transfer katsayılarının arttığı belirlenmiştir.
- Boyutsuz nozul-çarpma yüzeyi mesafesindeki artışla beraber ise lokal kütle transfer katsayılarının azaldığı gözlenmiştir.
- Küçük Re sayılarında çarpma yüzeyi açısının, tüm çarpma yüzeyi üzerinde kütle transferi katsayısı dağılımına herhangi bir etkisi gözlenmemiştir. Fakat Re sayısının 20000 ile 40000 değerleri arasındaki akışlarda açının etkisi gözlenmiştir.
- Çarpma yüzeyi açısının 90° 'den 60° 'ye doğru değiştirilmesi ile birlikte, çarpma yüzeyi üzerinde maksimum kütle transferi gözlenen jet durgunluk noktasının radyal yönde $r=0$ noktasından itibaren duvar jetin geliştiği yönün zıttı istikametinde kaydığı tespit edilmiştir.
- Aynı çarpma yüzeyi açısı ve aynı Re sayısı şartlarında jet durgunluk noktasının (H/d) 'ye bağlı olmadığı belirlenmiştir.
- Sh sayısı, Reynold sayısının artışı ile artış göstermektedir. Kütle transferinin artmasında Sh sayısının artmasına sebep olmaktadır.
- Boyutsuz nozul-çarpma yüzeyi mesafesindeki artışla beraber ise Sh sayısı azalmaktadır.
- Çarpma açısı 90° 'den 60° 'ye doğru azaldıkça k değerindeki gibi Sh sayısının çarpma yüzeyi üzerindeki maksimum değerinin yeri $(r/R)=0$ noktasından negatif (r/R) yönüne

doğru kaymaktadır. Bununla birlikte negatif (r/R) yönünde Sh değerleri azalmakta ve pozitif (r/R) yönünde artmaktadır. Jet çarpma yüzeyinin açılı olduğu durumlarda çarpma yüzeyinin eğiminin azaldığı yönde diğer tarafa kıyasla duvar jeti gelişmektedir. Ayrıca duvar jeti gelişimine bağlı olarak Sh sayısının arttığı gözlenmektedir.

Geometrik jet durgunluk noktası civarında yüksek kütle ($ı$) transferi istendiği durumlarda 90° 'lik jetin kullanımının, fakat $r=0$ 'dan daha uzak bölgelerde yüksek kütle ($ı$) transfer hızları elde edilmek istendiğinde eğik jetlerin ve özellikle 60° 'lik jetin kullanımının uygun olduğu görülmektedir.

Eğer bir yüzey üzerinde tek yönde yüksek Kütle ($ı$) transfer hızı isteniyorsa eğik jetlerin kullanımı önerilmektedir. Özellikle çok düşük açılı çarpan jet kullanımının kütle transferi açısından büyük bir avantaj sağlamadığı, fakat yüksek kesme gerilimi elde edilmek istendiğinde fayda sağladığı tespit edilmiştir. Kullanılan akışkana ve kullanım alanına göre bir optimumun belirlenmesi gerekmektedir.

Bu tezde sunulan çalışma, elektrokimyasal ölçüm tekniği kullanılarak daldırılmış bir çarpanjetin düzgün bir yüzeye eğik konumda çarptırılmasıyla elde edilen lokal kütle transfer katsayılarının dağılımının araştırıldığı Chin ve Agarwal [9] tarafından ELDCT kullanılarak eğik yarık jetlerle yapılan kütle transferi çalışmasına benzer olarak yapılan birkaç çalışmadan birisidir. Literatürde genellikle eğik jetler üzerinde ısı transferi çalışmaları yapılmıştır. Hsueh and Chin (1986), Bensmaili and Coeuret (1990), Chin and Agarwal (1991), Yapıcı *et al.* (1999)'de ve Arzutug *et al.* (2003) elektrokimyasal ölçüm tekniği ile Ni katotlar kullanarak boş nozullu normal jetlerde ve çok nozullu jetlerde lokal kütle tranfer katsayılarını ölçmüşlerdir.

5.2. Öneriler

Aşağıda yapılan öneriler, çarpan eğik jetlerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde ileri düzeyde yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından önemlidir.

- Farklı sistem sıcaklıklarında ve farklı çözeltiler kullanılarak fiziksel değişikliklerin etkisini gözlemek amacıyla geniş (Sc/Pr) aralığında deneyleri tekrarlamak.
- Eğik jet karakterinin daha iyi belirlenebilmesi için, hız ve kütle transferi dalgalanmasını belirleyen frekans analizi yapmak.
- Aynı geometri için CFD modelleri kullanılarak ısı ve kütle için modelleme yapılarak elde edilen sonuçların, bu çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırmasını yapmak.



KAYNAKLAR

- [1] Rajaratnam, N., "Turbulent Jets", Elsevier, New York, 26-50 (1976).
- [2] Viskanta, R., "Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 6(2): 111-134 (1993).
- [3] Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M. A., Button, B. L., "A review of heat transfer data for single circular jet impingement", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 13(2): 106-115 (1992).
- [4] Incropera, F.P., Ramadhyani, S., "Single phase, liquid jet impingement cooling of high performance chips", *Proc. NATO Adv. Study Institute on Cooling of Electronics Systems*, 277-327 (1994).
- [5] O.N.Şara, J.Erkmen, S.Yapıcı, M.Çopur "Electrochemical mass transfer between an impinging jet and a rotating disk in a confined system" (2007)
- [6] Lee, D. H., Won, S.Y., Kim, T.T., Chung, Y.S., "Turbulent heat transfer from a flat surface to a swirling round impinging jet" *Int. J. Heat Mass Transfer*, 45:223-227 (2002).
- [7] Feroz, Prasad "Mass transfer coefficients at the stagnation point with submerged impinging multi-jet flow of fluid electrolyte" (2005)
- [8] Chen, Chalupa, West, Modi "High Schmidt mass transfer in a laminar impinging slot jet flow" (1999-2000)
- [9] Chin, D.-T. and Agarwal, M., "Mass Transfer from an Oblique Impinging Slot Jet", *J. Electrochem. Soc.*, 138, issue 9: 2643-2650 (1991).
- [10] Sparrow, E.M., Lee, L., "Analysis of flow field and impingement heat/mass transfer due to a nonuniform slot jet", *Journal of Heat Transfer*, 97: 191-197 (1975).
- [11] Giralt, F., Chia, C. J., Trass, O., "Characterization of the impingement region in an axisymmetric turbulent jet", *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 16(1): 21-(1977).
- [12] Wang, X. S., Dagan, Z., Jiji, L. M., "Heat transfer between a circular free impinging jet and a solid surface with non-uniform wall temperature or wall heat flux-1. Solution for the stagnation region", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 32(7): 1351-1360 (1989).
- [13] Perry, K. P., "Heat transfer by convection from a hot gas jet to a plane surface", *Institution of Mechanical Engineers Proceedings*, 168: 775-784 (1954).
- [14] Huang, G. C., "Investigations of heat-transfer coefficients for air flow through round jets impinging normal to a heat transfer surface", *Journal of Heat Transfer*, 85: 237-245 (1963).
- [15] Gardon, R., Akfirat, J. C., "The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 8:1261-1272 (1965).
- [16] Gardon, J., Akfirat, J. C., "Heat transfer characteristics of impinging two-dimensional air jets", *Journal of Heat Transfer*, 88: 101-108 (1966).
- [17] Kercher, D. M., Tabakoff, W., "Heat transfer by a square array of round air jets impinging perpendicular to a flat surface including the effect of spent air", *Journal of Engineering for Power*, 92: 73-82 (1970).
- [18] Sparrow, E. M., Wong, T. C., "Impingement transfer coefficients due to initially laminar slot jets", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18(5): 597-605 (1975)

- [19] Sparrow, E. M., Goldstein, R. J., Rouf, M. A., "Effect of nozzle-surface separation distance on impingement heat transfer for a jet in a crossflow", *Journal of Heat Transfer*, 97: 528-533 (1975).
- [20] Koopman, R. N., Sparrow, E. M., "Local and average transfer coefficients due to an impinging row of jets", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 19: 673-683 (1976)
- [21] Florschuetz, L. W., Berry, R. A., Metzger, D. E., "Periodic streamwise variations of heat transfer coefficients for inline and staggered arrays of circular jets with crossflow of spent air", *Journal of Heat Transfer*, 102: 132-137 (1980).
- [22] Goldstein, R. J., Behbahani, A. I., "Impingement of a circular jet with and without crossflow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 25(9): 1377-1382 (1982).
- [23] Lytle, D., Webb, B. W., "Air jet impingement heat transfer at low nozzle plate spacings", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 37(12): 1687-1697 (1994).
- [24] Yu, M. H., Monkewitz, P. A., "Oscillations in the near field of a heated two-dimensional jet", *J. Fluid Mech.*, 255: 323-347 (1993).
- [25] Garimella, S. V., Rice, R. A., "Confined and submerged liquid jet impingement heat transfer", *Journal of Heat Transfer*, 117: 871-877 (1995)
- [26] Yan, X., Saniei, N., "Heat transfer from an obliquely impinging circular air jet to a flat plate", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 18(6): 591-599 (1997).
- [27] Li, C. Y., Garimella, S. V., "Prandtl-number effects and generalized correlations for confined and submerged jet impingement", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 44: 3471-3480 (2001).
- [28] Ho, C. M., Gutmark, E., "Vortex induction and mass entrainment in a small aspect ratio elliptic jet", *Journal of Fluid Mechanics*, 179: 383-405 (1987).
- [29] Hussain, F., Husain, H. S., "Elliptic jets part I. Characteristics of unexcited and excited jets", *Journal of Fluid Mechanics*, 208: 257-320 (1989)
- [30] Lee, S. J., Lee, J. H., Lee, D. H., "Local heat transfer measurements from an elliptic jet impinging on a flat plate using liquid crystal", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 37(6): 967-976 (1994).
- [31] Lee, J., Lee, S. J., "The effect of nozzle aspect ratio on stagnation region heat transfer characteristics of elliptic impinging jet", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 43: 555-575 (2000).
- [32] Yan, W. M., Mei, S. C., Liu, H. C., Soong, C. Y., Yang, W. J., "Measurement of detailed heat transfer on a surface under arrays of impinging elliptic jets by a transient liquid crystal technique", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47: 5235-5245 (2004).
- [33] Van Heinen, A. R. P., Mujumdar, A. S., Douglas, W. J. M., "Numerical prediction of the flow field and impingement heat transfer caused by a laminar slot jet", *Journal of Heat Transfer*, 98: 654-658 (1976).
- [34] Saad, N. R., Douglas, W. J. M., Mujumdar, A. S., "Prediction of heat transfer under an axisymmetric laminar impinging jet", *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 16(1): 148-154 (1977).
- [35] Owsenek, B. L., Cziesla, T., Mitra, K., Bisvas, G., "Numerical investigation of heat transfer in impinging axial and radial jets with superimposed swirl", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40(1): 141-147 (1997).
- [36] Chiriac, V. A., Ortega, A., "A numerical study of the unsteady flow and heat transfer in a transitional confined slot jet impinging on an isothermal surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45: 1237-1248 (2002).

- [37] Chattopadhyay, H., "Numerical investigations of heat transfer from impinging annular jet", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47: 3197-3201 (2004).
- [38] Craft, T. J., Graham, L. J. W., Launder, B. E., "Impinging jet studies for turbulence model assessment-II. An examination of the performance of four turbulence models", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36(10): 2685-2697(1993).
- [39] Shi, Y. L., Ray, M. B., Mujumdar, A. S., "Computational study of impingement heat transfer under a turbulent slot jet", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 41: 4643-4651 (2002).
- [40] Dianat, M., Fairweather, M., Jones, W. P., "Predictions of the concentration field of an impacting turbulent jets", *Proc. 10th Turbulent Flow Symposium, The Pennsylvania State University*, 12-19 (1995).
- [41] Gibson, M. M., Harper, R. D., "Calculation of impinging jet heat transfer with the low Reynolds number $k-\xi$ turbulence model", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 18: 80-87 (1999).
- [42] Hosseinalipour, S. M., Mujumdar, A. S., "Comparative evaluation of different turbulence models for confined impinging and opposing jet flows", *Numerical Heat Transfer Part A*, 28: 647-666 (1995).
- [43] Wang, S. J., Mujumdar, A. S., "A comparative study of five low Reynolds number $k-\epsilon$ models for impingement heat transfer", *Applied Thermal Engineering*, 25: 31-44 (2005).
- [44] Hollworth, B. R., Durbin, M., "Impingement cooling of electronics", *Journal of Heat Transfer*, 14(3): 607-613 (1992).
- [45] Liu, T., Sullivan, J. P., "Heat transfer and flow structures in an excited circular impinging jet", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 39(17): 3695-3706 (1996).
- [46] Sheriff, H. S., Zumbrunnen, D. A., "Effect of flow pulsations on the cooling effectiveness of an impinging jet", *Journal of Heat Transfer*, 116: 886- 895 (1994).
- [47] Brignoni, L. A., Garimella, S. V., "Experimental optimization of confined air jet impingement on a pin fin heat sink", *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology*, 22(3): 399-404 (1999).
- [48] El Sheikh, H. A., Garimella, S. V., "Heat transfer from pin fin heat sinks under multiple impinging jets", *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 23(1): 113-120 (2000).
- [49] Brignoni, L. A., Garimella, S. V., "Effects of nozzle inlet chamfering on pressure drop and heat transfer in confined air jet impingement", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 43: 1133-1139 (2000).
- [50] Zhou, D. W., Lee, S. J., "Heat transfer enhancement of impinging jets using mesh screens", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47: 2097-2108 (2004).
- [51] Ekkad, S. V., Kontrovitz, D., "Jet impingement heat transfer on dimpled target surfaces", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 23: 22- 28 (2002).
- [52] Fleischer, A. S., Nejad, S. R., "Jet impingement cooling of a discretely heated portion of a protruding pedestal with a single round air jet", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28: 893-901 (2004).
- [53] Royne, A., Dey, C. J., "Effect of nozzle geometry on pressure drop and heat transfer in submerged jet arrays", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49: 800-804 (2006).

- [54] Shaik Feroz – V.S.R.K.Prasad, Mass Transfer Coefficients at the Stagnation Points with Submerged Impinging Multi-Jet Flow of Fluid Electrolyte
- [55] Subba Rao, B., Krishna, M.S. and Raju, J.G.J.V., “Ionic Mass Transfer with Submerged Jets-I”, Per. Pol. Ch 17, 185-195, 1971. Martin, H., “Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surface”, Advances in Heat Transfer, 13, 1-60, 1977
- [56] Qian Chen, Vijay Modi Mass transfer in turbulent impinging slot jets
- [58] Albert Y. Tong, On the impingement heat transfer of an oblique free surface plane jet
- [67] Arzutuğ, M. Emin, YAPICI, Sinan Konvansiyonel ve swirl çarpan jetlerle kütle transferi.



ÖZGEÇMİŞ

Betül SOLAK, 03.03.1981 Erzurum doğumlu olup ilköğretimini Kars'ta, orta öğretimini Erzincan'da ve Lise öğrenimini Erzurum'da yerine getirmiştir. 2000 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliğindeki lisans eğitimini 2004 yılında tamamlamıştır. 2012 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansa başlamıştır. Özel bir şirkette Kimya Mühendisi olarak halen çalışmaktadır.

