

33727

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

ISITILAN DÜZLEM BİR PLAKAYA DİK VE EĞİK HAVA JETİ

ÇARPMASINDA ISI TRANSFER KAREKTERİSTİKLERİNİN

DENEYSEL İNCELENMESİ

Mak. Yük. Müh. Kadir BİLEN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"Doktor"

Ünvanının Verilmesi için Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23.11.1994

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 24.02.1995

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tahir YAVUZ

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Teoman AYHAN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Gürbüz ATAGÜNDÜZ

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN

KASIM - 1994

TRABZON

T.C. YÜSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada, yüksek hızlı, yuvarlak bir hava jetinin düz bir levha üzerine dik ve eğik açılarda çarpması halinde, ısı transfer karakteristiklerini incelemek üzere, Atatürk Üniversitesi Makina Müh. Bölümü laboratuvarlarında deneysel ölçümler yapılmıştır.

Doktora tezi danışmanlığımı üslenerek gerek konu seçimi, gerekse çalışmaların yürütülmesi sırasında ilgisini esirgemeyen sayın hocam Tahir YAVUZ'a, teşekkür etmeyi zevkli bir görev bilirim.

Ayrıca çalışmalarımda deney setinin kurulmasına yardımcı olan teknisyen Ahmet CEBE'ye, çalışma boyunca maddi desteğini gördüğüm Atatürk Üniversitesi Araştırma Fonu yöneticilerine sonsuz şükranlarımı sunarım.

Trabzon, Kasım 1994

Kadir BİLEN

## İÇİNDEKİLER

|   |      |
|---|------|
| ÖNSÖZ.....                                | II   |
| İÇİNDEKİLER.....                          | III  |
| ÖZET.....                                 | VI   |
| SUMMARY.....                              | VII  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                        | VIII |
| TABLO LİSTESİ.....                        | XII  |
| SEMBOL LİSTESİ.....                       | XIII |
| 1. GENEL BİLGİLER.....                    | 1    |
| 1.1. Giriş.....                           | 1    |
| 1.2. Literatür Araştırması.....           | 3    |
| 1.3. Çarpan Jet.....                      | 9    |
| 1.4. Çarpan Jet Akım Bölgeleri.....       | 10   |
| 1.4.1. Serbest Jet Bölgesi.....           | 11   |
| 1.4.2. Durgunluk veya Çarpma Bölgesi..... | 12   |
| 1.4.3. Duvar veya Yan Jet Bölgesi.....    | 12   |
| 1.5. Isı Transfer Katsayısı.....          | 12   |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....                | 14   |
| 2.1. Deneysel Yöntem.....                 | 14   |
| 2.1.1. Sıvı Kristale Giriş.....           | 14   |
| 2.1.1.1. İzolasyonsuz (Saf) Sıvılar ..... | 16   |

|        |   |           |
|--------|---|-----------|
| 1.1.2. | Mikrokapsüllü Form.....   | 17        |
| 1.1.3. | Etiket Plakalar.....  | 17        |
| 1.2.   | Sıvı Kristalin Özellikleri.....                                       | 18        |
| 1.3.   | Sıvı Kristal ile Sıcaklık Ölçülmesi.....                              | 18        |
| 1.4.   | Sıvı Kristalin Kalibrasyonu.....                                      | 20        |
| 2.     | Deney Düzeneği.....   | 22        |
| 2.1.   | Giriş.....  | 22        |
| 2.2.   | Basınçlı Hava ve Akım Kontrolü.....                                   | 24        |
| 2.3.   | Sabit Sıcaklık Banyosu.....   | 25        |
| 2.4.   | Jet Çarpma Levhası.....   | 26        |
| 2.5.   | Lüle Dizaynı.....   | 28        |
| 2.6.   | Test Plakası Üzerinde Renk Halkası Yarıçapı<br>ve Zamanın Ölçümü..... | 28        |
| 2.7.   | Yüzeyin Sıvı Kristal ile Kaplanması.....                              | 32        |
| 2.8.   | Sıvı Kristalin Renk ve Sıcaklık İlişkisi.....                         | 33        |
| 3.     | Isı Transfer Katsayısında Kullanılan<br>Denklemler.....               | 35        |
| 3.1.   | Zamana Bağlı Isı İletim Denklemi ve<br>Sınır Koşulları.....           | 35        |
| 3.2.   | Başlangıç Koşulu $F(x)$ 'in Hesaplanması.....                         | 36        |
| 3.2.3. | Başlangıç Koşulunda Yüzeyde Taşınım<br>Katsayısının Bulunması.....    | 37        |
| 3.3.   | Sonlu Farklar ile Denklemin İfadesi.....                              | 39        |
| 3.4.   | Elamanda Isı Transfer Katsayısının<br>Hesaplanış Metodu.....          | 44        |
| 4.     | Bilgisayar Programına Verilerin Giriş<br>Değerleri.....               | 46        |
| 5.     | Bilgisayar Programı ve Sonuçları.....                                 | 46        |
|        | <b>BULGULAR.....</b>  | <b>48</b> |
| 1.     | Giriş.....  | 48        |
| 2.     | Maksimum Isı Transfer Noktası.....                                    | 50        |
| 3.     | Lokal Isı Transfer Katsayılar Dağılımları.....                        | 51        |
| 4.     | Eş (Sabit) Isı Transfer Katsayı Çizgileri.....                        | 59        |
| 5.     | Maksimum Isı Transfer Katsayısı.....                                  | 59        |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 3.6    | Durgunluk Noktasında Levha Kalınlık Yönünde<br>Zamana Bağlı Sıcaklık Dağılımı..... | 79  |
| 3.7.   | Deney Sonuçlarından Elde Edilen Ampirik<br>Bağıntılar.....                         | 79  |
| 3.7.1. | Dik Çarpan Jetlerde Nusselt Sayısı Dağılımı.....                                   | 79  |
| 3.7.2. | Eğik Çarpan Jetlerde Nusselt Sayısı Dağılımı.....                                  | 81  |
| 4.     | İRDELEME VE DEĞERLENDİRME.....   | 82  |
| 4.1.   | Giriş.....   | 82  |
| 4.2.   | Maksimum Isı Transfer Noktası.....   | 82  |
| 4.3.   | Lokal Isı Transfer Katsayılar Dağılımı.....  | 84  |
| 4.4.   | Eş (Sabit) Isı Transfer Katsayı Çizgileri.....                                     | 86  |
| 4.5.   | Maksimum Isı Transfer Katsayısı.....   | 87  |
| 4.6.   | Ortalama Nusselt Sayısı.....   | 88  |
| 5.     | SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....  | 91  |
| 6.     | KAYNAKLAR.....   | 94  |
| 7.     | EKLER.....   | 98  |
| 8.     | ÖZGEÇMİŞ.....  | 105 |

## ÖZET

### ISITILAN DÜZLEM BİR PLAKAYA DİK VE EĞİK HAVA JETİ ÇARPMASINDA ISI TRANSFER KAREKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Yüksek hızlı hava jetleri; kağıt ve cam imalat tesisleri, metallerin ısıtma işlemleri ile elektriksiz ve elektronik ekipmanların soğutulma işlemlerinde genellikle yaygın bir şekilde kullanılır. Bu çalışmada yuvarlak bir lüleden (borudan) çıkan tam gelişmiş hava jeti, düz bir levha üzerine dik ve eğik açılarda çarptırılarak, levha üzerinde ısı transfer karakteristikleri çeşitli parametrelere bağlı olarak incelenmiştir. Deneylerde Reynold sayısı  $10\ 000 \leq Re \leq 40\ 000$ , lüle levha aralığı  $6 \leq H/D \leq 14$ , jet eğim açısı  $45 \leq \theta \leq 90$  derece ve lüle çapı 15 mm. alınmıştır. Deneylerde levha üzerindeki sıcaklıklar, sıvı kristal metodu ile ölçülmüştür.

Maksimum ısı transferi potansiyel özü dışında yaklaşık sekiz lüle çapı mesafesinde meydana gelmiştir. Durgunluk noktasında jet eğim açısının azalması ile ısı transfer katsayısı da azalmıştır. 45 derece jet eğim açısında, durgunluk noktası ısı transfer katsayısı normal (dik) çarpan jete oranla,  $H/D=7,10,14$  için sırasıyla %6, %18, %22 oranında azalma meydana getirmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmış, iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: jet çarpması, Dik olmayan jet çarpması  
Çarpan jet ile soğutma, Jet konveksiyon  
ısı transferi, Durgunluk noktası ısı  
transferi

## SUMMARY

### AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF A NORMAL AND OBLIQUE AIR JET IMPINGING ON HEATED FLAT PLATE

The high speed air jets are widely used in the paper and glass production industries, metals annealing, and cooling of electrical and electronic equipments. In this study, depending on some parameters, the heat transfer characteristics of a normal and an oblique circular fully developed air jet impinging on heated flat plate have been experimentally. In the experiments, the ranges of parameters were taken between 10 000- 40 000 for Reynolds numbers, 6-14 H/D which is the ratio of distance between plate and lüle exit to lüle diameter, and 45-90 degrees for jet inclination angle. Lüle diameter was kept constant to be 15 mm. The temperature variation on the flat plate during the jet impingement were measured by using the calibrated liquid crystal.

It was found that maximum heat transfer occurred out of the potential core, approximately at the distance of eight jet diameters length from the lüle exit. At the stagnation point, it was observed that the heat transfer coefficient decreases with decreasing jet inclination angle. For the 45 der. jet inclination angle, the stagnation heat transfer coefficient for H/D=7,10,14 reduced respectively %6, %18, %22 compared with that of normal impinging jet. Results experimentally determined from this study are good in agreement with the data given in the literature for the normal impingement.

Key Words: Jet impingement, Obliquely jet impingement,  
Jet impingement cooling, Jet convective heat  
transfer, Stagnation point heat transfer.

## ŞEKİL LİSTESİ

|   |    |
|---|----|
| Şekil 1. Çarpma levhası ve koordinatları<br>a) perspektif görünüş, b) üstten görünüş.....   | 10 |
| Şekil 2. Çarpan jet akım bölgeleri.....   | 11 |
| Şekil 3. Yüzeyde tabaka içinde asılı sıvı kristal<br>molekülleri.....                       | 19 |
| Şekil 4. Sıvı kristal renklerinin bakış açısına<br>bağımlılığı.....                         | 20 |
| Şekil 5. Sıvı kristalin kalibrasyon su kabı.....  | 21 |
| Şekil 6. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....   | 22 |
| Şekil 7. Deney düzeneğinin genel görünüşü.....  | 23 |
| Şekil 8. Debi ölçer ve basınçlı hava tankı.....   | 24 |
| Şekil 9. Sabit sıcaklık banyosu ve sisteme bağlantısı..                                     | 26 |
| Şekil 10. Bakır levha üzerinde sıvı kristal renklerinin<br>net olmayan geçiş çizgileri..... | 27 |
| Şekil 11. Lüle şekli ve boyutları.....  | 28 |
| Şekil 12. Renk halkası yarıçapını bulmak için<br>kullanılan saydam ölçekli levha.....       | 29 |
| Şekil 13. Çalışmada renk halkası yarıçapı ölçümünde<br>kullanılan ölçek.....                | 29 |
| Şekil 14. Renklerin görsel kaydedilişi.....   | 30 |
| Şekil 15. Yüzeye ince uygulanmış sıvı kristalin<br>renkleri.....                            | 31 |
| Şekil 16. Tabaka kalınlığı artırılmış sıvı kristalin<br>parlak renkleri.....                | 31 |
| Şekil 17. Çarpma levhası yüzeyinde sıvı kristal<br>film kalınlığı.....                      | 32 |
| Şekil 18. Sıvı kristalin renk aralığı ve ortalama<br>renk bant sıcaklıkları.....            | 34 |
| Şekil 19. Levha kalınlığında sınır koşulları.....   | 36 |
| Şekil 20. Sonlu farklar çözümü için levha kalınlığının<br>M parçaya bölünüşü.....           | 39 |



|   |    |
|---|----|
| Şekil 21. Sabit sıcaklık sınır koşulu.....  | 40 |
| Şekil 22. Orta noktada sonlu farklar kafesi.....  | 41 |
| Şekil 23. Konveksiyon sınır koşulu.....   | 42 |
| Şekil 24. Sayısal çözümde ısı transfer katsayısının<br>bulunuşu.....  | 45 |
| Şekil 25. Renk aralıkları genişliği<br>a) İlk görüldüğünde, b) Son kısımda.....   | 49 |
| Şekil 26. Maksimum ısı transfer noktası ile geometrik<br>çarpma noktası arasındaki uzaklığın, jet<br>eğim açısına göre değişimi, $Re=30.000$ .....                            | 50 |
| Şekil 27. Isıtılan levhaya dik çarpan jet durumunda<br>sıvı kristalin renk konum ve zaman ilişkisi,<br>$Re=40\ 000$ , $H/D=7$ , $TOP=53.7^{\circ}C$ , $TOA=22^{\circ}C$ ..... | 56 |
| Şekil 28. Nusselt sayısının, durgunluk noktası<br>uzaklığına göre değişimi, $H/D=6$ .....   | 54 |
| Şekil 29. Nusselt sayısının durgunluk noktası<br>uzaklığına göre değişimi $H/D=7$ .....   | 55 |
| Şekil 30. Nusselt sayısının, durgunluk noktası<br>uzaklığına göre değişimi, $H/D=8$ .....   | 56 |
| Şekil 31. Nusselt sayısının, durgunluk noktası<br>uzaklığına göre değişimi, $H/D=10$ .....  | 57 |
| Şekil 32. Nusselt sayısının, durgunluk noktası<br>uzaklığına göre değişimi, $H/D=12$ .....  | 58 |
| Şekil 33. Nusselt sayısının, durgunluk noktası<br>uzaklığına göre değişimi, $H/D=14$ .....  | 59 |
| Şekil 34. Levha üzerinde X eksenini boyunca, Nusselt<br>sayıları dağılımı, $\varnothing=75^{\circ}$ , $H/D=7$ , $Re=30\ 000$ ....   | 61 |
| Şekil 35. Levha üzerinde X eksenini boyunca, Nusselt<br>sayıları dağılımı, $\varnothing=60^{\circ}$ , $H/D=7$ , $Re=30\ 000$ ....   | 62 |
| Şekil 36. Levha üzerinde X eksenini boyunca, Nusselt<br>sayıları dağılımı, $\varnothing=45^{\circ}$ , $H/D=7$ , $Re=30\ 000$ ....   | 63 |
| Şekil 37. Levha üzerinde X ve Y eksenleri boyunca,<br>lokal Nusselt sayıları dağılımı,<br>$\varnothing=75^{\circ}$ , $H/D=10$ , $Re=30\ 000$ .....                            | 64 |
| Şekil 38. Levha üzerinde X ve Y eksenleri boyunca,<br>lokal Nusselt sayıları dağılımı,<br>$\varnothing=60^{\circ}$ , $H/D=10$ , $Re=30\ 000$ .....                            | 65 |

- Şekil 39. Levha üzerinde X ve Y eksenleri boyunca,  
 lokal Nusselt sayıları dağılımı,  
 $\varnothing=45^\circ$ ,  $H/D=10$ ,  $Re=30\ 000$ .....66
- Şekil 40. Levha üzerinde X eksenini boyunca, lokal Nusselt  
 sayıları dağılımı,  $\varnothing=75^\circ$ ,  $H/D=14$ ,  $Re=30.000$ ...67
- Şekil 41. Levha üzerinde X eksenini boyunca, lokal Nusselt  
 sayıları dağılımı,  $\varnothing=60^\circ$ ,  $H/D=14$ ,  $Re=30\ 000$ ...68
- Şekil 42. Levha üzerinde X eksenini boyunca, lokal Nusselt  
 sayıları dağılımı,  $\varnothing=45^\circ$ ,  $H/D=14$ ,  $Re=30\ 000$ ...69
- Şekil 43. Çarpma levhası üzerinde, eş Nusselt sayısı  
 çizgileri,  $\varnothing=90^\circ$ ,  $H/D=10$ ,  $Re=30\ 000$ .....70
- Şekil 44. Çarpma levhası üzerinde, eş Nusselt sayısı  
 çizgileri,  $\varnothing=75^\circ$ ,  $H/D=10$ ,  $Re=30\ 000$ .....71
- Şekil 45. Çarpma levhası üzerinde, eş Nusselt sayısı  
 çizgileri,  $\varnothing=60^\circ$ ,  $H/D=10$ ,  $Re=30\ 000$ .....72
- Şekil 46. Çarpma levhası üzerinde, eş Nusselt sayısı  
 çizgileri,  $\varnothing=45^\circ$ ,  $H/D=10$ ,  $Re=30\ 000$ .....73
- Şekil 47. Durgunluk noktası Nusselt sayısının,  
 Lüle-levha aralığına göre değişimi.....74
- Şekil 48. Levha Kalınlığında sıcaklığın  
 zamana göre değişimi,  
 $Re= 10\ 000$ ,  $H/D=7$ ,  $T_{OP}=63.8^\circ C$ ,  $T_{OA}=15.9^\circ C$ ....75
- Şekil 49. Levha Kalınlığında sıcaklığın  
 zamana göre değişimi,  
 $Re= 10\ 000$ ,  $H/D=10$ ,  $T_{OP}=57.3^\circ C$ ,  $T_{OA}=15.8^\circ C$ ...75
- Şekil 50. Levha Kalınlığında sıcaklığın  
 zamana göre değişimi,  
 $Re= 10\ 000$ ,  $H/D=14$ ,  $T_{OP}=57.3^\circ C$ ,  $T_{OA}=15.2^\circ C$ ...76
- Şekil 51. Levha Kalınlığında sıcaklığın  
 zamana göre değişimi,  
 $Re= 30\ 000$ ,  $H/D=7$ ,  $T_{OP}=64.4^\circ C$ ,  $T_{OA}=15.8^\circ C$ ....76
- Şekil 52. Levha Kalınlığında sıcaklığın  
 zamana göre değişimi,  
 $Re= 30\ 000$ ,  $H/D=10$ ,  $T_{OP}=57.8^\circ C$ ,  $T_{OA}=16^\circ C$ .....77
- Şekil 53. Levha Kalınlığında sıcaklığın  
 zamana göre değişimi,  
 $Re= 30\ 000$ ,  $H/D=14$ ,  $T_{OP}=57.4^\circ C$ ,  $T_{OA}=15.1^\circ C$ ...77

- Şekil 54. Levha Kalınlığında sıcaklığın zamana göre değişimi,  
Re= 40 000, H/D=7,  $T_{OP}=64.7^{\circ}C$ ,  $T_{OA}=15.9^{\circ}C$ ....78
- Şekil 55. Levha Kalınlığında sıcaklığın zamana göre değişimi,  
Re= 40 000, H/D=10,  $T_{OP}=58.6^{\circ}C$ ,  $T_{OA}=16^{\circ}C$ .....78
- Şekil 56. Levha Kalınlığında sıcaklığın zamana göre değişimi,  
Re= 40 000, H/D=14,  $T_{OP}=58.3^{\circ}C$ ,  $T_{OA}=15.2^{\circ}C$ ....79
- Şekil 57. Nusselt sayısının, literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırılması.....85

## TABLO LİSTESİ

|   |     |
|---|-----|
| Tablo 1. Sıvı kristalin renk ve sıcaklıkları.....   | 34  |
| Tablo 2. Maksimum Nusselt sayısının, jet eğim açısı ve lüle-levha aralığına göre değişimi, $Re=30.000$ .....                                    | 60  |
| Tablo 3. Maksimum durgunluk noktası Nusselt sayısının, Reynolds sayısı ve jet eğim açısına göre değişimi.....                                   | 60  |
| Tablo 4. Eğik jetlerde Nusselt sayısı için elde edilen eğrilerin (denklem) katsayıları.....   | 81  |
| Tablo 5. Ortalama jet ve doğal taşınım Nusselt sayıları, $R=10$ .....   | 90  |
| Ek Tablo 1. Bilgisayar Programı.....  | 98  |
| Ek Tablo 2. Nusselt sayısının, durgunluk noktasından uzaklık ve lüle-plaka mesafesine göre değişimi, $Re=10.000$ , $\varnothing=90^\circ$ ..... | 100 |
| Ek Tablo 3. Nusselt sayısının, durgunluk noktasından uzaklık ve lüle-plaka mesafesine göre değişimi, $Re=20.000$ , $\varnothing=90^\circ$ ..... | 101 |
| Ek Tablo 4. Nusselt sayısının, durgunluk noktasından uzaklık ve lüle-plaka mesafesine göre değişimi, $Re=30.000$ , $\varnothing=90^\circ$ ..... | 102 |
| Ek Tablo 5. Nusselt sayısının, durgunluk noktasından uzaklık ve lüle-plaka mesafesine göre değişimi, $Re=40.000$ , $\varnothing=90^\circ$ ..... | 103 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                 |                       |  |
|-----------------|-----------------------|--|
| D               | [m]                   | : Lüle çapı  |
| B               | [m]                   | : Dikdörtgen jetlerde lüle genişliği   |
| $L_L$           | [m]                   | : Lüle uzunluğu  |
| L               | [m]                   | : levha kalınlığı  |
| LL              | [m]                   | : levha yüksekliği   |
| H               | [m]                   | : Lüle-levha aralığı   |
| h               | [W/m <sup>2</sup> °K] | : Lokal ısı transfer katsayısı   |
| HH              | [m <sup>-1</sup> ]    | : Lokal ısı transfer katsayısı oranı<br>(h/k <sub>p</sub> )                                |
| $h_d$           | [W/m <sup>2</sup> °K] | : Ortalama doğal taşınım katsayısı   |
| HH <sub>d</sub> | [m <sup>-1</sup> ]    | : Ortalama doğal taşınım katsayısı<br>oranı, (h <sub>d</sub> /k <sub>d</sub> )             |
| X, Y            |                       | : Çarpma levhası yüzeyinde eksen<br>takımı, Şekil 1  |
| $\dot{V}$       | [m <sup>3</sup> /s]   | : Lüleden geçen hacimsel hava debisi   |
| Nu              |                       | : Lokal Nusselt sayısı (h.D/k <sub>a</sub> )   |
| Nu <sub>o</sub> |                       | : Maksimum (durgunluk) noktası)<br>Nusselt sayısı  |
| $\bar{Nu}$      |                       | : Çarpan jet ortalama Nusselt sayısı   |
| $\bar{Nu}_d$    |                       | : Karakteristik uzunluğu jet lüle çapı<br>olan doğal taşınım ortalama Nusselt<br>sayısı    |
| Nu <sub>d</sub> |                       | : Karakteristik uzunluğu levha<br>yüksekliği olan doğal taşınım<br>ortalama Nusselt sayısı |
| Re              |                       | : Jet Reynolds sayısı, Re=4 $\dot{V}$ /v $\pi$ D   |
| $\mu$           | [kg/ms]               | : Havanın dinamik viskozitesi  |
| v               | [m <sup>2</sup> /s]   | : Havanın kinematik viskozitesi  |
| C <sub>p</sub>  | [W/m°K]               | : Çarpma levhasının sabit basınçta<br>özgül ısısı  |
| k <sub>a</sub>  | [W/m°K]               | : Hava iletim katsayısı  |

|            |                      |  |
|------------|----------------------|--|
| $k_p$      | [W/m <sup>0</sup> K] | : Levha iletim katsayısı   |
| $\rho_p$   | [kg/m <sup>3</sup> ] | : levha yoğunluğu  |
| $\alpha$   | [m <sup>2</sup> /s]  | : Termal ısı yayılım katsayısı (k/ $\rho C_p$ )                    |
| N          |                      | : Levha kalınlığında, düğüm noktası sayısı                         |
| x          |                      | : Levha kalınlık yönünde eksen, Şekil 19                           |
| $\Delta x$ | [m]                  | : Kalınlık düğüm noktası adımı, L/N                                |
| t          | [s]                  | : Zaman  |
| TT         | [s]                  | : Rengin herhangi bir konumunda ölçülen zaman                      |
| TI         |                      | : Zaman dilim sayısı   |
| $\Delta T$ | [s]                  | : Zaman adımı, (TT/TI)   |
| P          |                      | : Eğik jetlerde geometrik çarpma noktası                           |
| O          |                      | : Durgunluk noktası  |
| S          | [m]                  | : Geometrik çarpma noktası ile durgunluk noktası arasındaki mesafe |
| $U_o$      | [m/s]                | : Lüle çıkışında ortalama hava hızı                                |
| $u_c$      | [m/s]                | : Jet ekseninde hız  |
| $u_x$      | [m/s]                | : Jet ekseninden radyal yöndeki hız                                |
| Z          | [m]                  | : Lüle çıkış mesafesi  |
| $T_{op}$   | [°C]                 | : Levha arka sıcaklığı   |
| $T_{oA}$   | [°C]                 | : Çevre hava sıcaklığı   |
| $T_J$      | [°C]                 | : Jet hava sıcaklığı   |
| $T_w$      | [°C]                 | : Jet yüzeye çarpmadığı zaman, başlangıçta levha yüzey sıcaklığı   |
| $T_f$      | [°C]                 | : Film sıcaklığı, $(T_w + T_{op})/2$                               |
| $T_{fK}$   | [°K]                 | : Film sıcaklığı, $(T_f + 273)$                                    |
| $\beta_a$  | [°K <sup>-1</sup> ]  | : Hava genleşme katsayısı, $(1/T_{fK})$                            |

#### Alt İndisler:

|     |               |
|-----|---------------|
| a,A | Hava          |
| p   | Levha         |
| J   | Jet           |
| d   | Doğal taşınım |

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Yüksek sıcaklık gaz türbünlerini, kağıt ve cam imalat tesislerini, metallerin ısı işlemlerini, cam levha temperlemesi, tekstil ve kağıt sanayisi, çok sıklıkta elektriksel ve elektronik ekipmanlarını içine alan pek çok endüstriyel sistemlerde, genellikle havanın kullanıldığı çarpan akışkan jeti, yüzeyde kurutma, ısıtma ve soğutma amacıyla kullanılır [1]. Jet çarpması, bir akışkan ile yüzey arasında büyük oranda lokal ısı transfer katsayısı elde etmek amacıyla kullanılan bir tekniktir. Küçük boyutlu elektronik devrelerin soğutulmasında, büyük boyutlu soğutma ekipmanlarının kullanımını (dezavantajını) ortadan kaldırarak optimum boyutların kullanımını mümkün kılmakta ve diğer endüstri dallarında ise daha az hava oranına karşılık, yüksek oranda ısı transferi elde edilerek, enerji tüketimine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Çarpan jet, bir lüle veya lüleden fışkıran havanın düz bir yüzeye çarptırılmasıyla elde edilir. Yüzey üzerinde ısı transferini arttırmak için en çok meydana getirilen akış sistemlerinden biri, türbülanslı jet çarpmasıdır. Serbest bir jet (lüleden çıktığı durumda) kolaylıkla yüksek oranda türbülans şiddeti meydana getirebilir. Maksimum ısı transferi için yüzeyin jet çıkışından hangi mesafede tutulması gerektiği çok önemli bir sorundur.

Lüleler herhangi bir şekilde olabilir, fakat genellikle yaygın olan tek ve çok sıralı uzun, dar yarı (iki boyutlu) veya yuvarlak deliklerdir. Bazı uygulamalarda noktasal soğutma, tek bir jet ile elde edilirken, diğerlerinde (endüstriyel kurutma gibi) basınçlı hava deposundan gelen

yüksek basınçlı hava ve bir dizi lüle ile elde edilebilir[2]. Göz önüne alınması gereken çok sayıdaki değişken nedeniyle çok lüleli donatım oldukça komplikedir. Değişkenler lülenin boyutu, şekli, lülenin yüksekliği, iki lüle arasındaki mesafe, hız ve üflenen hava sıcaklığıdır.

Yuvarlak jetlerde, lüle ağız çapı  $D$  veya iki boyutlu jetlerde ise ağız genişliği  $B$ , çok önemli bir dizayn parametresidir. Kütleli hava debisi ve buna bağlı olarak fan gücü ve işletim masraflarını etkiler. Tasarımcı lülenin boyutu, şekli, yüzeyden uzaklığı, hava hızı ve sıcaklığı gibi değişkenleri optimize, bunun yanısıra yapım ve işletim masraflarını da minimize etmek zorundadır.

Bu çalışmanın amacı, çarpan jet ile küçük elektronik bileşenlerin soğutulmasında, soğutma ekipmanlarını küçültmek, ayrıca büyük hacimli yerlerde ise üflenen havanın fan gücü ile doğru orantılı olması nedeniyle, optimum parametreleri tesbit ederek harcanan enerjiyi azaltmaktır.

Bu çalışmada; türbülanslı gelişmiş yuvarlak hava jeti, dik ve eğik açılarda ısıtılmış düz bir levha üzerine çarptırılarak, yüzeydeki konvektif ısı transfer katsayısı dağılımı incelenmiştir. Maksimum ısı transfer katsayısı çeşitli bağımsız parametrelerin fonksiyonu olarak verilmiştir. Dik çarpan jetlerde maksimum ısı transferi geometrik çarpma noktasında, yani durgunluk noktası ile çakıştığı yerde meydana gelmiştir. Denemelerde her bir durum için maksimum ısı transfer noktası belirlenip, eğimli jetin durgunluk noktası ile karşılaştırıldı. Jet eksenindeki eğrilik nedeni ile, eğik jetlerde bu iki noktanın üst üste gelmediği görülmüştür. Deneysel sonuçlar iki şekilde verilmiştir. Bunlardan birincisi; duvar jet ana eksenine boyunca ki profiller, ikincisi ise; tüm alandaki değerler.



Çarpma yüzeyinde sıcaklık ölçümleri, sıvı kristal maddesi kullanılarak yapılmıştır. Bu madde son yıllarda özellikle Avrupa ve Amerika'da ısı transferi uygulamalarında, sıcaklık ölçümleri için kullanılmaktadır. Sıvı kristal maddesi, kimyasal sıvı bir karışımdır ve yüzeye ince bir film şeklinde püskürtülür. Yüzeyde kuruduktan sonra akım yönünde herhangi bir bozucu ve direnç etkisi meydana getirmeksizin sıcaklık ölçümlerine müsaade eder. Sıcaklık ölçümleri görsel olarak kayıt edilebilir. Sıvı kristal, yüzeyin sıcaklığına göre renk verebilmektedir, böylece elde edilen renklere göre, lokal sıcaklıklar ölçülmüş olur. Bu madde, sıcaklıkta meydana gelen küçük artımlara karşılık, rengini hemen değiştirebilmektedir.

Sıvı kristalle ilgili ayrıntılı bilgi 2. kısımda verilmiştir.

### **1.2. Literatür Araştırması**

Bu konu ile ilgili ilk çalışmalar; dış çevre havasına boşalan jetin (serbest jetin), akış rejim bölgelerinin tesbiti, akım karakteristiklikleri ve çarpan jetlerin levha üzerinde meydana getirdiği statik basınç ölçümleri ile ilgilidir. 1970 yılından beri ölçme teknikleri ve bilgisayarların gelişmesine bağlı olarak çarpan jetin hız alanlarının ve türbülans büyüklüklerinin ölçülmesi ve hesaplanması ile ilgili çalışmalar başlamıştır, aynı zamanda buna paralel olarak, levha üzerindeki ısı transfer karakteristikleri de daha hassas incelenmiştir.

Günümüzde ise yüksek hızlı bilgisayarların yaygınlaşması sonucunda, çarpan eğik ve dik jetlerde ısı transferi ve akım alanının sayısal incelenmesi, detaylı bir şekilde yapılmaktadır. Aynı şekilde; ölçme yöntemlerinin de gelişmesi nedeniyle laboratuvar ölçümleri de duyarlı bir şekilde yapılabilmektedir.

Serbest ve çarpan jetler ile ilgili akım karakteristikleri ve ısı transfer ölçüm çalışmaları, çeşitli kaynaklarda yer almıştır. Donaldson ve Snedeker[3] tarafından sunulan bir çalışmada; serbest jet ile ilgili olarak, jet içinde basınç dağılımları ölçülmüş, serbest jetin yayılımı ve hız profilleri tesbit edilmiştir. Donaldson ve arkadaşları lüleden çıkan jetin, silindir ve düz bir levha üzerine çarptırılması ile yine akım karakteristiklerini deneysel incelemişlerdir. Donaldson ve Snedeker'in [4] yaptığı diğer bir deneysel çalışmada; yuvarlak hava jetin, düz bir levhaya dik açıda çarpması sırasında, lokal ısı transfer karakteristikleri ve sabsonik jetin türbülans karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Verilerin, jet ekseninden radyal yönde ve eksendeki hızın yarısına eşit olduğu uzaklık mesafesine göre boyutsuz şekilde verilmiştir. Bu da verilerin kullanımını hayli zorlaştırmıştır. Durgunluk noktası civarında ısı transferini bulmak için, aynı basınç dağılımına sahip, laminar akış şartlarında belirledikleri türbülans düzeltme katsayısını kullanmışlardır.

Goldstein ve Timmers [5] tarafından yapılan deneysel çalışmada; tek veya çok sıralı jetlerin, düz bir levha üzerine normal (dik) yönde çarpması halinde, lokal ısı transfer katsayılarını bulmak için bir görüntü tekniği kullanılmıştır. Mylar tabaka üzerine sıvı kristal püskürtülerek arka yüzeyde ısı akısı ayarlanıp kararlı durumda lokal ısı transfer katsayıları ve yüzeyde sabit sıcaklık çizgileri kullanılarak, eş ısı transfer katsayı çizgilerine geçilmiştir.

Goldstein arkadaşları ile yaptığı deneysel çalışmalarda; jet/jetlerin çarpma yüzeyinde meydana getirdiği ısı transfer katsayılarını incelemişlerdir. Goldstein, Bahbahani ve Heppelman [6] tarafından yapılan başka bir deneysel çalışmada; bir lüle ile meydana getirilen simetrik çarpan hava jetin, lokal ısı transfer katsayısı ve

tanımlanan recovery faktör katsayısının radyal dağılımı üzerine bir araştırma yapmışlardır. Recovery faktörünün lüle-levha aralığına bağlı olduğu ama Reynolds sayısından bağımsız olduğu bulunmuştur. Durgunluk noktasında maksimum ısı transfer katsayısı, sekiz jet çapı aralığında meydana gelmiştir, ayrıca tüm yüzeyde ortalama ısı transferi için bir de korelasyon yapılmıştır. Goldstein ve Behbahani[7] tarafından yapılan diğer bir çalışmada; levha üzerinde çapraz akım veya akımsız ortam olması halinde, çarpan jetin lokal ısı transfer ölçümleri verilmiştir. Büyük lüle-levha aralıklarında, çapraz akımın ısı transfer katsayısı pikini azalttığı, küçük aralıklarda ise çapraz akım ortamında ısı transfer katsayısının pikini artırdığı belirtilmiştir. levha üzerinde çapraz akım olmadığı zaman, ortalama ısı transfer katsayısı için bir de korelasyon yapmışlardır.

Bouchez ve Goldstein [8] yaptıkları deneysel çalışmada; yuvarlak hava jetin düz bir yüzeye çarpması sırasında, yüzey üzerinde çapraz akım olmasına göre, durgunluk noktası civarında meydana gelen ısı transfer katsayısını tesbit etmişlerdir. Jet hızı ve levha üzerinde akan akımın hız oranına bağlı olarak, optimum lüle-levha aralığını bulmuşlardır. Buna göre hız oranı 12 ve lüle-levha aralığı 6 oranında, durgunluk noktasında ısı transfer katsayısı maksimum olmuştur.

Pamadi ve Belowun [9] yaptığı çalışmada; küçük lüle-levha aralığı ( $H/D=2$  ve  $4$ ) için, ısı akısının yüzeyde radyal yönde iki tane pik yaptığı, bunlardan dıştakinin laminar akıştan türbülansa geçişte, diğerinin ise jette üniform olmayan türbülans dolaylı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca türbülanslı akış için bir de teorik hesaplama vardır.

Shoukri ve Calka [10] tarafından sunulan deneysel çalışmada; düz bir levhanın çevresi yuvarlak olarak kapalı ve üstten açık olmasına göre, çarpan jetin ve ısı transfer karakteristikleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlarda, ısı

transferinin Reynolds sayısıyla arttığı, durgunluk noktasından uzaklıkla ise düştüğü görülmüştür ve verilerden yararlanarak uygun bir korelasyon yapılmıştır. Sonuç olarak çevresi kapalı levha üzerine çarpan jetin, aynı şartlarda çevresi kapalı olmayan serbest jete nazaran, düz bir yüzeyden daha az ısı transferimeydana getirdiği görülmüştür. Bu durum oluşan akım alanı ile açıklanmıştır.

Sparrow ve lowell [11] tarafından yapılan deneysel çalışmada; dairesel bir hava jeti, dik ve eğik açılarda naftalin bir yüzeye çarptırılarak, kütle transferi ölçülmüş ve uygun bir analogi ile ısı transfer oranına geçilmiştir. Jet eğim açısının değişmesi, durgunluk noktasının yerini değiştirmiştir. Maksimum ısı ve kütle transfer oranının, jet eğim açısına büyük oranda duyarlı olmadığı görülmüştür.

Seban ve Back [12] yaptıkları deneysel çalışmada; levha kenarında bir yarıktan elde edilen yan jeti, düşük hızda akan akım ortamına püskürterek, duvar jet içindeki hız ve sıcaklık ölçümlerini yapmışlardır. Sonuçta hesapla bulduklarını, deneysel değerler ile karşılaştırmışlardır.

Popiel ve Boguslawski [13] tarafından yapılan deneysel çalışmada; döner bir disk üzerine, hava jetin çarpması halinde, meydana gelen ısı transfer katsayısı dağılımı bulunmuştur. Bu ölçümlerde bilezik şeklinde bir kalorimetre kullanılmıştır. Bulunan sonuçlar ayrıca duman izleme metoduyla da doğrulanmıştır. Popiel, Meer, ve Hoogendorn [14] tarafından yapılan diğer bir deneysel çalışmada; bir fırın ısıtıcı ile elde ettikleri sıcak hava jetini, isothermal düz bir yüzeye çarptırarak yüzeydeki lokal ısı transfer katsayıları dağılımını bulmuşlardır. Reynolds sayısı 1860 ve 1050, yoğunluk oranı 7.6, lüle-levha aralığı 2 ve 20.D arasında alınmıştır.

Özdemir ve Whitelaw [15] tarafından yapılan deneysel çalışmada; belli bir açı ve Reynolds sayısında, çarpan jetin

oluşturduğu duvar jet bölgesinde, aerodinamik ve termal karakteristikler ölçülmüştür.

Aralov [16] yaptığı çalışmada ; türbülanslı dik çarpan jetin, durgunluk noktası civarında ısı transferini hesaplanmış ve bu değeri, laminar duruma göre yorumlamıştır.

Hoogedoorn [17] tarafından yapılan deneysel çalışmada; küçük lüle-levha aralıklarında ( $H/D < 5$ ), düz levhaya çarpan jetin meydana getirdiği türbülansın, ısı transfer üzerine etkisi araştırılmıştır. Çarpan jetin küçük  $H/D$  oranlarında meydana getirdiği ısı transferi, silindire çarpan jetin ki ile aynı olduğu görülmüştür. Durgunluk noktasında Nusselt sayısının bir minimumu olduğu,  $H/D > 5$  oranında ise bu minimumun kayıp olduğu belirtilmiştir.

Kataoka ,Sahara, Ase ve Harada [18] tarafından yapılan deneysel çalışmada; durgunluk noktasında maksimum ısı transferi sağlayan, optimum lüle-levha aralığı ile büyük girdaplı türbülans enerji içeren akımın jet gelişme boyunun aynı olduğu bulunmuştur. Durgunluk noktasında ısı transfer artımı, büyük girdaplı türbülans şiddeti ve frekansından oluşan tanımlanmış yüzey-yenilenebilir parametresinin bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir.

Can, Muhittin [19] tarafından yapılan deneysel çalışmada; benzer ve değişik lüle şekillerinin ısı transferi üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca suni olarak artırılmış türbülans seviyesi ve akustik tekniği ile ısı transferi artırma metotları uygulanmış ve her iki durumda da ısı transfer katsayısında makul ısı artışı elde edilmiştir.

Feralen Yamankaradeniz ve Can [20] tarafından yapılan diğer bir çalışmada; ince mürekkep filmlerinin kurutulma işlemi ele alınarak, çarpan hava jetlerin kütle transferi (kurutma işlemi) üzerine etkisi incelenmiştir. Hava hızı, hava sıcaklığı ve lüle-levha aralığının ısı ve

kütle transferi üzerine etkisi, bir bilgisayar programı ile incelenmiş ve mürekkep filminin kurutma işleminde gereken toplam kurutma zamanını da hesaplamıştır. Can [21] tarafından yapılan başka bir çalışmada ; birden fazla lüle ile çarpan hava jetlerin optimizasyonu verilmiştir.

Hrycak 'nin [22] yaptığı deneysel çalışmada; iç içe üç halkadan meydana gelen çarpma levhası üzerinde  $14\ 000 \leq Re \leq 67\ 000$  ve lüle çapı  $3.18 \leq D \leq 12.7$  mm. aralığında, durgunluk noktası civarında ısı transfer verileri elde edilmiştir. Durgunluk noktası ısı transferine ve ortalama ısı transfer katsayısına boyutsuz korelasyon yapılmıştır. Sonuçlar diğer araştırmacılarınkı ile karşılaştırılmıştır.

Dakos , Verriopoulos ve Gibson [23] tarafından yapılan deneysel çalışmada; tümsek ve düz yüzeyde türbülanslı duvar jetin akım karakteristikleri ve sıcaklık dağılımı ölçülmüştür. Tümsek tüzeyde sıfır kayma gerilmesi ve akım partikülünün sıfır olduğu ısı akı noktası, maksimum hız noktasından daha uzakta yer almıştır.

Shadlasky [24] tarafından yapılan analitik çalışmada; potansiyel öz bölgesi için ve bunun dışındaki bölge için iki ayrı korelasyon yapılarak, durgunluk noktası civarında lokal ısı transfer oranı hesaplanmıştır.

Chin ve Hsueh [25] yaptıkları çalışmada; çarpan jetin ısı transfer ve sınır tabaka bölgesi için, Chilton Colburn analojisine bağlı bir analiz yapılmıştır. Çalışmada  $2\ 500 < Re < 20\ 000$  ve  $0.15 < H/D < 5$  aralıklarında yüzey üzerinde ortalama kütle transferi ölçülmüş ve teorik çözümle karşılaştırılmıştır.. Sonuçların birbiriyle iyi uyum gösterdikleri belirtilmiştir.

Abrasimov [26] yaptığı analitik çalışmada; yuvarlak hava jetini, kenarlarından kapalı düz bir yüzeye

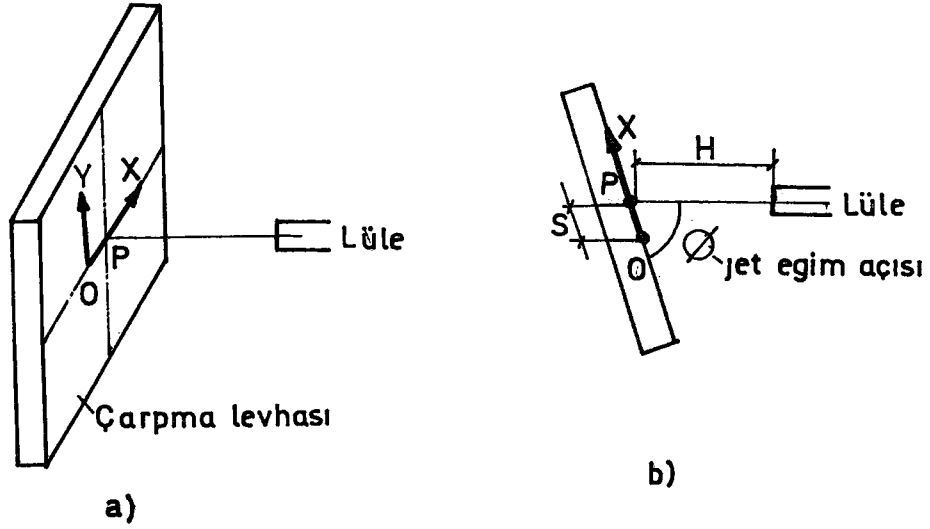
çarpıtılarak, nümerik metotla ısı transfer katsayısını hesaplamıştır.

Hwang ve Liu [27] yaptıkları analitik çalışmada; türbülanslı akımda çarpan hava jetin, üstten sınırlı ve laminar akımda da üstten sınırsız durumuna göre, K- $\epsilon$  modeli kullanılarak çözüm yapılmıştır. Yüzey üzerinde deneysel basınç ve hız ölçümleri de verilmiştir.

Yavuz [28] tarafından yapılan çalışmada; Phoenics paket programı kullanılarak, birbirine paralel iki düzlem plaka arasında, üst plakaya dik yöndeki jet akım ortamında akım ve ısı transfer karakteristikleri nümerik olarak incelenmiştir. Bu incelemede K- $\epsilon$  ve K-L türbülans modelleri kullanılarak sonuçlar mukayese edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, sınırlandırılmış normal jet çarpma probleminin, K- $\epsilon$  türbülans modeli ve Nikuradse karışım uzunluğunu kullanan K-L türbülans modellerinin her ikisiyle de modellenebileceğini göstermiştir.

### 1.3. Çarpan Jet

Çarpan hava jetleri ile yüzeyden akışkana olan ısı transferini (veya tersinin) nasıl olduğunu anlamak için, ilgili akışkanlar dinamiği konularını hatırlamak gerekecektir. Çarpan jetin prensibi yüzeyde sınır tabakayı kaldırmak ve dolayısıyla yüzeyden konveksiyonla ısı transfer oranını artırmak esasına dayanır [19]. Çoğu uygulamalarda yüzeyin şekli veya lüle pozisyonu ile ilgili sınırlamalar nedeniyle jet çarpması normalden ziyade dik olmayan açılarda olabilmektedir. Bundan başka normal çarpmanın amaçlandığı çoğu durumlarda, asıl çarpma yüzeyi eğik açılarda olabilmektedir. Bu durumda ise hava jetinin çarpmadan önce bir miktar sapmasına neden olur.



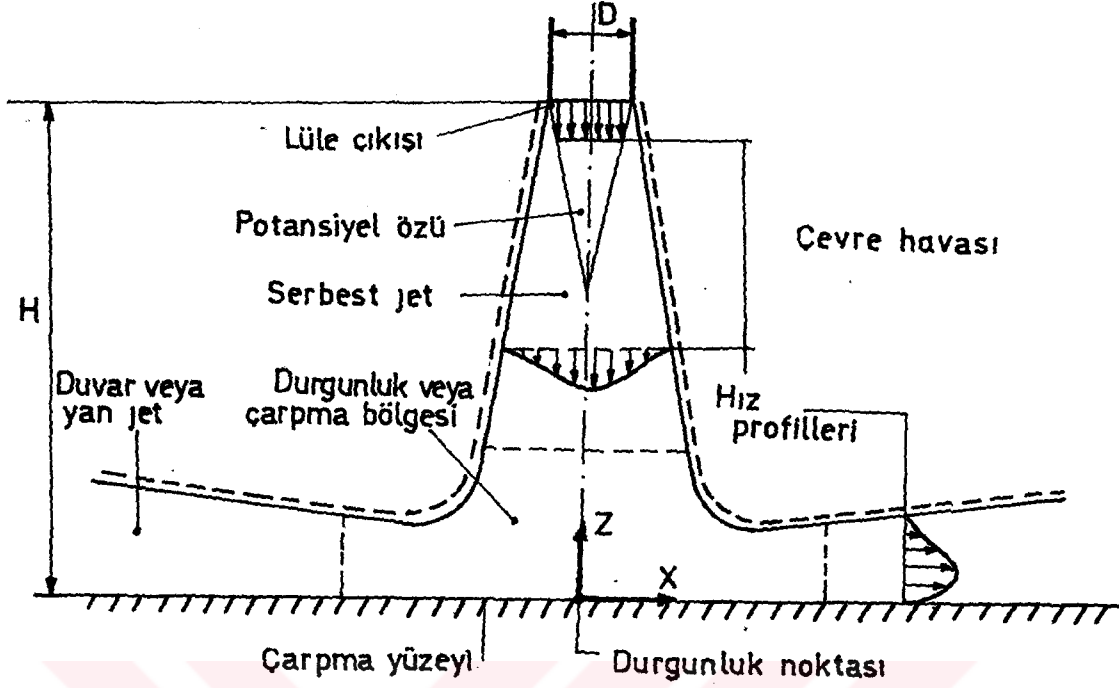
Şekil 1. Çarpma levhası ve koordinatları,  
a) perspektif görünüş, b) üstten görünüş.

Dik (Normal yönde) çarpan jetlerde, jet eksen çizgisinin yüzeyde gösterdiği nokta geometrik çarpma noktasıdır ve maksimum ısı transferi bu noktada meydana gelir, bu nokta aynı zamanda Şekil 1.'de görüldüğü gibi durgunluk noktası ile çakışıktır. Eğik jetlerde ise maksimum ısı transferinin meydana geldiği durgunluk noktası, jet eksen çizgisinin yüzeyde gösterdiği geometrik çarpma noktası değil, jetin eğim açısına bağlı her seferinde çarpmadan önce, eksen çizgisinden bir miktar sapmasından dolayı farklı noktalarda meydana gelebilen Şekil 1'de O ile gösterilen durgunluk noktasıdır.

#### 1.4. Çarpan Jet Akım Bölgeleri

Kompleks olan akış rejim bölgeleri tek jet için 3 alt bölgeye ayrılır. Her bir temel akışı içeren jet, Şekil 2'de gösterilmiştir [29].





Şekil 2. Çarpan jet akım bölgeleri.

#### 1.4.1. Serbest Jet Bölgesi

Serbest jet bölgesi, akışkan yuvarlak lülelerde  $D$  çapı veya yarık (dikdörtgen) lülelerde  $B$  genişliğinden durgun çevre havasına boşaldığında meydana gelir. Bu bölgenin karakteristikleri, çarpma levhasının varlığından herhangi bir şekilde etkilenmez. Jet türbülanslıdır ve lüle çıkışındaki hız profili uniformdur. Böylece jet ile durgun çevre havası arasında meydana gelen momentum, Şekil 2'den görüldüğü gibi lüleden uzaklaştıkça serbest jet sınırını genişletir ve ekseninde potansiyel özü meydana getirir. Aşağıya doğru inildikçe, potansiyel özü içinde hız profili herhangi bir kesitte uniform değildir ve maksimum (eksendeki) hız, lüle çıkışından itibaren artan mesafe ile azalır. Potansiyel özün uzunluğu yaklaşık 6-8 jet çapı kadardır. Çarpma levhası üzerinde maksimum ısı transferini elde edilebilmek için, levhanın, potansiyel öz uzunluğu dışına yerleştirilmesi gerekir [6, 18, 19]. Serbest jet bölgesinde eksenindeki ortalama  $u_c$  ve radyal yöndeki  $u_x$  hız dağılımı [30],

$$u_c = 6.61 \frac{U_0 D}{z} \dots\dots\dots (1)$$

$$u_x = u_c \cdot \exp\left[-\left(\frac{x}{b}\right)\right] \dots\dots\dots (2)$$

$$b \cong 0.107 \cdot z \dots\dots\dots (3)$$

Burada  $U_0$ , Lüle çıkışında ortalama hava hızıdır.

Lüle çıkışında jet eksenini boyunca uzaklık arttıkça, eksenindeki hız da azalır ve  $z = 6.61 \cdot D$ 'de lüle çıkışındaki  $U_0$  hızına eşit olur. Bu nokta türbülanslı jetin lineer artmaya başladığı yerdir ve yine bu nokta potansiyel özün uç noktasıdır[30].

#### 1.4.2. Durgunluk veya Çarpma Bölgesi

Çarpma bölgesinde akış tam bir yöne sahip değildir. Akım çarpma levhasından etkilenir, hız aniden düşer ve sırayla normalde (Z) ile yan (X) yönlerinde tekrar hızlanır ve durgun, sıfır momentumlu çevre havasını çekmeye devam eder. Akışkanın yatay olarak hızlanması belirsiz bir şekilde çok fazla devam edemez, hızlanan akım durgunluk (çarpma) bölgesinden sonra gittikçe genişleyen duvar (yan) jete dönüşür. Çarpma bölgesinin teorik analizi oldukça zordur ve bu kısımda akışkanlar mekaniğinde yeterli bilgi mevcut değildir [19]. Dik çarpan jetlerde, jet merkezinden geçen eksen çizgisinin yüzeyde gösterdiği geometrik çarpma noktasının (Şekil 1'de P ile gösterilmiştir), durgunluk noktasıyla çakıştığı bu noktada akım partikülünün hızı sıfırdır ve dik jetlerde maksimum ısı transferi bu noktada meydana gelir. Eğik jetlerde ise akım partikülünün hızının sıfır olduğu ve ısı transfer oranının maksimum olduğu nokta, her seferinde jetin eğim açısına bağlı değişebilen durgunluk noktasındadır (Şekil 1'de O ile gösterilmiştir).

### 1.4.3. Duvar veya Yan Jet Bölgesi

X'in artışı ile yüzeye paralel hız bileşenleri sıfır değerinden yükselmeye başlar ve sonra da zamanla sıfıra gider. Çarpma bölgesini terkeden akışkan, artık yüzeye paralel akar, buna duvar veya yan jet adı verilir. Düz bir levha üzerindeki akımın akış karakterlerini yansıtır. Durgunluk noktasından itibaren yüzeyden uzaklaştıkça, hız sınır tabaka kalınlığı da artar.

### 1.5. Isı Transfer Katsayısı

Çarpan hava jetin meydana getirdiği lokal ısı transfer katsayısı hesaplanırken; ısı akısının tek yönde sadece levha kalınlığında meydana geldiği, yan taraflara (levha kenarlarına) doğru ise, ısı akısının çok küçük olması nedeniyle ısı akısının olmadığı kabulü yapılmıştır. Sınır koşulları levha arkası sabit sıcaklıkta, ön yüzeyde ise; jet havası nedeniyle konveksiyonla ısı kaybı vardır. Bu durum da denklem; tek boyutlu, içinde ısı üretimi olmayan zamana bağlı ısı iletim denklemidir.

İkinci sınır koşulu  $x=L$ 'de sıvı kristal ile ölçülen sıcaklık ve zaman ısı iletim denkleminde yerine yazılarak, iterasyonla denklemin eşitliğini sağlayan ısı transfer katsayısı, jet havasının yüzeyde meydana getirdiği lokal ısı transfer katsayısıdır.

Bu çalışmada kullanılan sayısal yöntem ve detaylı bilgi 2. kısımda verilmiştir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Deneysel Yöntem

#### 2.1.1. Sıvı Kristale Giriş:

1988 yılında avusturyalı botanist Fried Rich Reinitzer bazı organik (Cholesteryl benzoate) bileşimlerin iki farklı ergime noktasına sahip olduklarını göstermiştir. Fried Rich Reinitzer, Cholesteryl benzoate denilen düşük molar kütleli bileşimin, 145°C'de katı halden bulanık bir sıvıya ve 179°C'de de geçirgen açık bir sıvıya dönüştüğünü tesbit etmiştir. Bu durumu kısa bir müddet sonra Alman fizikçi O. Lehmann bulanık görünümlü ara fazın, cholesteryl benzoate kristale benzer molekül sel yapıya sahip alanlar içerdiğini göstermiştir. Bu çalışma sonucunda yukarıda bahsedilen organik maddeye sıvı kristal (Liquid Crystal) adı verilmiştir.

Bu maddenin ara fazına mezomorphic faz veya sadece mezophaze denir. Bu ara faz belli organik bileşikler için karakterize edilir. Bu ara fazda moleküller dizili olmalarına rağmen hareketlidir. Ara fazın üç farklı çeşidi vardır; smectic, nematic ve cholesteric.

Sıvı kristaller ısı özelliklerine göre sınıflandırılmıştır. Yüksek molar kütleli kütle polimerleri ve düşük molar kütle polimerleri şeklinde ikiye ayrılmaktadır. Düşük molar kütleli polimerler de disk ve çubuk yapı olarak tekrar ikiye ayrılmaktadır.

Sıvı kristal karışımları, kimyasal yapılarına göre de iki alt guruba ayrılabilir. 1. Cholesteric 2. Chiral nematic

Sıvı kristal (Cholesteric, Chiral nematic), üzerine gelen ışığa karşılık spektrumdaki renkleri sırayla gösterir. Çoğu karışımlar, sıcaklık arttığı zaman renksizlikten, kırmızı renge dönüşür ve yüksek bir sıcaklıkta tekrar renksizliğe dönmeden evvel spektrumundaki renkleri peşpeşe gösterir (portakal, sarı, yeşil, mavi leylak rengi).

Renk değişikliği tersinirdir (geriye dönebilir) yani soğuma sırasında ısıtmada olduğu gibi sıvı kristal renklerini bu seferde tersten başlayarak aynen gösterebilir. Sıcaklığa göre sadece tek bir renk gösteren karışımlarda yapılabilir. Bileşim -30 ila 100°C aralığı kapladığı belirtilmiştir. Sıvı kristalin ara fazı (mesophaze) ısıtma ve soğutma sırasında, disk veya çubuk kristal yapıya sahip olur. Ara fazda moleküller farklı diziliş gösterir.

|                   |                      |                            |                      |           |
|-------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|-----------|
| Katı              | ısı                  | Bir veya daha              | ısı                  | şekilsiz, |
| kristal           | $\rightleftharpoons$ | çok kristal fazlar         | $\rightleftharpoons$ | izotropik |
| çizgileri soğutma |                      | (smectic, nematik, soğutma |                      | sıvı      |
|                   |                      | cholesteric)               |                      |           |

Sıvı kristalin özellikleri kontrol edilebildiği taktirde avantajlarından yararlanılabilir ve verilen bir zaman periyodunda (deneme, inceleme ve araştırma uygulamalarında) meteryal, daha önceden vermesi beklenen özelliklerini göstererebilir. Sıvı kristal ticari olarak birkaç formda piyasada kullanılmaktadır;

1. İzolasyonsuz (saf) sıvılar olarak,
  - Saf sıvı kristal karışımları veya
  - Çözelti içerisinde
2. Mikrokapsüller içerisinde
  - Sulu çamurlar veya
  - Kaplama türleri

### 3. Etiket plakalar halinde

#### 2.1.1.1 İzolasyonsuz (Saf) Sıvılar:

Meteryaller genellikle yağlardır ve bunlar çalışma sıcaklıklarında karışımlardaki genel durumu, viskoz bir macunki ile kalın bir yağınki (motor yağı) arasında değişir. Çözeltiler, hava tabancası ve sprey ile yaygın bir şekilde yüzeye püskürtülür. Bunları yüzeyde havanın zararlı etkilerinden korumak oldukça zordur.

İzo lasyonsuz (saf) sıvı kristal karışımlarının, ince üniform filmler şeklinde uygulanması gerekir. Bu kalınlıklar chiral nematicler için 5-10 mikrondan, 50 mikrona kadar veya cholestericler için 50 mikrondan 100 mikrona kadar değişir. Tabaka kalınlığına göre meydana gelen yüzey alanı da bozulmaya hassastır. Saf sıvı kristal filmleri özellikle Ultra Viole ışıkları ile atmosferdeki oksijenden bozulmalara ve ayrıca belli kimyasal şeylere de çok hassastır. Özellikle bunlar yağ, gres ve yaygın organik çözücülerdir. Bunların küçük miktarda bile varlığı, karışımda doğru kalibre edilen renk görüntüsünü değiştirebilir. Toz ve fiber partikülleri, viskoz izolasyonsuz (saf) sıvı kristal filmleri tarafından rahatlıkla yakalanır ve film içinde cholesteric/chiral nematic mesophazenin maksimum şekilde yansıtma yapan düz dokusunda, renksizliğe kadar değişiklikler meydana getirebilir. Sözü edilen bu etkilerin sonucunda izolasyonsuz Sıvı kristal filmlerinin ömrü, birkaç saatten (cholestericsler için), birkaç güne kadar (chiral nematicsler için) değişebilir. Sıcaklık ölçümlerinden ziyade kesme (kayma) hassaslığını içeren çalışmalarda, metaryalleri saf sıvılar olarak kullanmak gerekir. Çalışmalarda metaryallerin sınırlı ömürlerini de göz ardı etmemek gerekir.

### 2.1.1.2. Mikroapsüllü Form

İzölasyonsuz sıvı kristalin çok çabuk kirlenmelere karşı ömürlerini uzatmak için mikroapsüllü form geliştirilmiştir. Mikroapsüllü form, günümüze kadar saf sıvı kristal karışımlarının korunma, paketlenme ve kararlılığında, çok yönlü ve geniş çapta uygulanabilmesinde başarılı bir metot olmuştur, aynı zamanda kolayca kullanma formuna dönüştürülebilir. Basit şekliyle bir mikroapsül; etrafı üniform duvarla çevrili bir küredir ve mikroapsül formunda sıvı kristalin küçük damlaları, ayrı mikroapsülleri vermek üzere polimer bir kaplama ile çevrilmiştir. Genellikle mikroapsül çapları, birkaç mikron ile bir kaç milimetre arasındadır.

Mikroapsülleri bünyesinde bulunduran sıvı kristalin sulu çamuru, mikroapsül metodun bir ürünüdür. Bu direk kullanılabilir (yani akım alanı incelemelerinde, sıvılar içinde izleyici partükül olarak yada çok yaygın şekliyle yüzeye uygulanabilir (püskürtme ,yüzeve basma vs.)

Mikroapsüllü sıvı kristal karışımları, saf haldeki özellikleri ve kullanımda iyileştirilmiş kararlılık ve çok yönlülüğünü verirler. Bozulmalara karşı başlangıç korunması mikroapsülle sağlanabilir olduğu halde daha fazla korunma her zaman U.V.(Ultra viole) ışıkları absorb eden meteryallerin (cilaların) kullanımı ile sağlanabilir.

### 2.1.1.3. Etiket Plakalar.

Sıvı kristal kullanan ticari gösterge aletlerin çoğu, siyah absorb edici bir plaka ve üzeri geçirgen bir polimer tabaka arasında sıkıştırılmış ince bir sıvı kristal filmini içerir. Küçük boyutta ve çeşitli sıcaklıklarda renk gösterebilecek şekilde imal edilmiştir. Bu küçük etiket parçalar, uygulamada yüzeye yapıştırılarak yüzey sıcaklığı ölçülür.

### 2.1.2. Sıvı Kristalin Özellikleri

1. İyi bir hassaslık,
2. Hızlı ölçme zamanı, 0.2 sn'den daha iyi,
3. İyi tekrarlanabilme,
4. Tersinir renk gösterebilme,
5. Kullanımda geniş sıcaklık aralığı, -30, 100 °C,
6. Değişebilir renk gösterimi,
7. Uygulama; kolay, esnek ve düzensiz satırlar için çok iyi,
8. Nisbeten ucuz,
9. Renk gösterimi görsel kayıt edilebilir,
10. Saklama ömrü sınırlı,
11. Doğruluğu (hassaslığı) kullanan kişiye bağımlıdır.

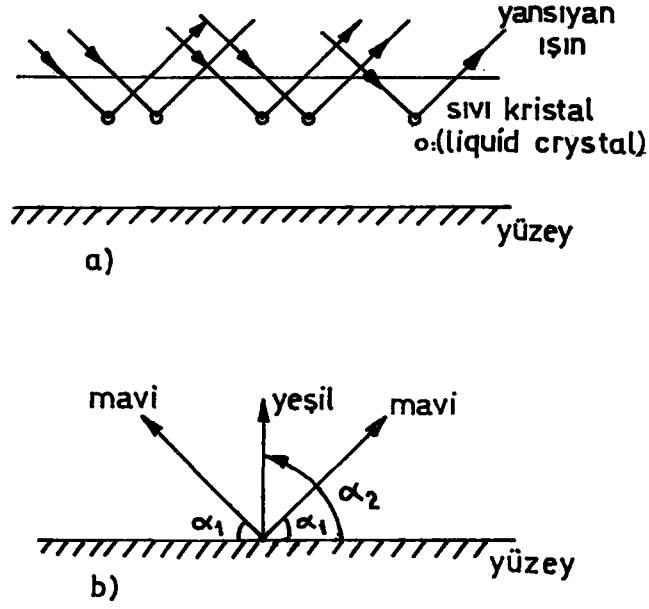
İzolesiz (mikrokapsülsüz) sıvı kristal: çok küçük oranda kirlilik, yağ ve çözücülere karşı aşırı duyarlı, çok ince film şeklinde uygulama, hacme karşı büyük alan, yüksek derecelendirme riski

Mikrokapsüllü sıvı kristal: atmosfere karşı izole edilmiş, uygulaması genellikle sulu çamurun sulandırılması ile yüzeye püskürtme ve basma şeklinde, iyi kararlılık, doğruluk ve güvenirlilik, renkleri biraz daha az parlak ve açısal bağımlılığı azdır.

### 2.1.3. Sıvı kristal ile Sıcaklık Ölçümü

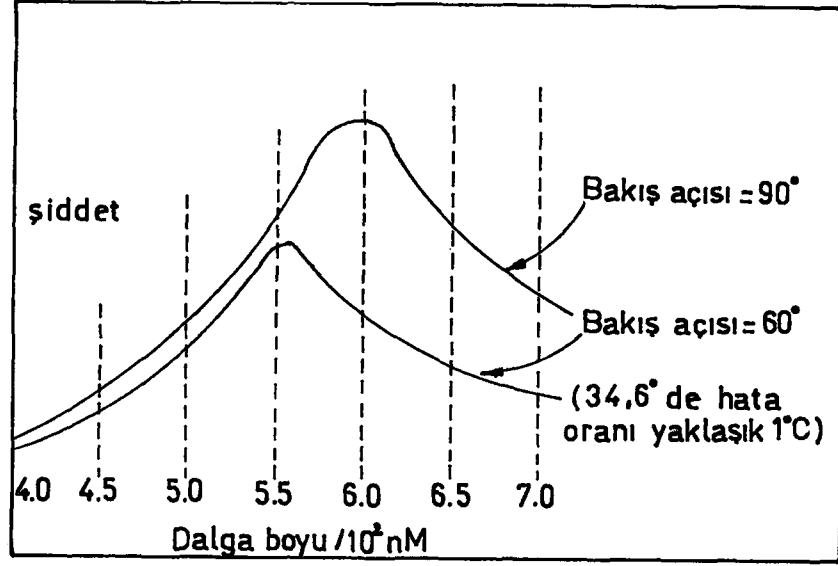
Her ne kadar sıcaklık ölçüleceği yüzeye sıvı kristal püskürtülse de bunun yararlanmasında bazı sınırlamalar vardır. Bunlardan birincisi eğer sıvı kristal çevre havası etkisinden korunmamış ise kirlenmesi sonucunda sıvı kristalin yapısı değişebilir. İkincisi sıvı kristal ara fazı yani mesophaze fazında ise sıvı haldedir ve sıvı olan bu maddeye toz zerrecikleri kolayca yapışabilir, bu da sıvı kristalin bazı özelliklerini etkileyebilir. Bu iki nedenle sıvı kristalin her iki etkiye karşı çok iyi korunması gere-





Şekil 3. Yüzeyde tabaka içinde asıllı sıvı kristal molekülleri.

kir. Bu iki etkiden korunmak için sıvı kristal içinde çözünerek elde edilen yeni karışım kullanılır. Bu karışım içinde sıvı kristalin kristal yapısı ve renk değiştirme özelliği etkilenmez. Böylece sıcaklık ölçülecek yüzeye bu yeni karışım püskürtülür. Püskürtmeden sonra karışım buharlaşır ve Polyclate resim içerisinde sıvı kristal Şekil 3'de görüldüğü gibi asıllı olarak kalır. Sıvı kristal her yönde ışık yansıtır. Yüzeyde Sıvı kristalin renkleri bakış açısına bağlı olarak değişebilmektedir. Bakış açısı etkisi Şekil 4'de görülmektedir. Uygulamada ışık kaynağı sıvı kristal püskürtülmüş yüzeye dik olacak şekilde yerleştirilmeli ve yine yüzeyde renkler dik izlenilmelidir.



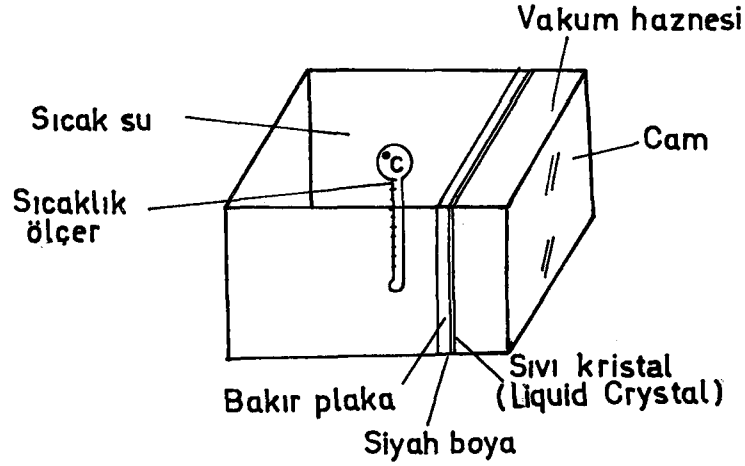
Şekil 4. Sıvı kristal renklerinin bakış açısına bağlılığı.

#### 2.1.4. Sıvı kristalin Kalibrasyonu

Sıvı kristalin kalibre edilmesi için sabit sıcaklıkta, üniform bir yüzeyin elde edilmesi gerekir. Bu bir sıcak su banyosu olabilir. Test düzlemi su banyosunun bir düzlemini oluşturur. Su bir ısıtıcı ile ısıtılarak sıcaklık termostatla kontrol edilir. Su banyosu Polypropylen veya fiberglas plakalardan elde edilebilir. Bunun nedeni bahsedilen malzemeler oldukça iyi izolasyon özelliğine sahip olmasıdır.

Kalibrasyon için gerekli su banyosu düzeneği Şekil 5'de gösterilmiştir. Deney kutusu ön ve arka kısmı kauçuk olup, ön taraftaki yüzeyine cam plaka yerleştirilmiştir. Tankta cam tabakasının arka tarafına bakır plaka yerleştirilmiştir. Burada bakır plaka kullanılmasının nedeni çok iyi bir termal kondüktiviteye sahip olması, böylece yüzeyde üniform bir sıcaklık dağılımı elde edilebilir olmasıdır. Bakır plakada da aynı cam plaka gibi uygun macunla sızdırmazlık sağlanmıştır. Bakır plaka ön kısmına

bir vakum haznesi kaynak edilerek, cam ile bakır plaka arasına hava girmemesini sağlamak ve böylece üzerine Sıvı kristal püskürtülmüş yüzeyden konveksiyonla ısı kaybı önlenmiş olur.



Şekil 5. Sıvı kristalin kalibrasyon su kabı.

Sıvı kristalin gerçek kalibrasyonunda su banyosundaki su, bir elektrik ısıtıcı ile ısıtılır. Su banyosu sıcaklığı bir termostat ile kontrol edilir ve sıcaklığı ise bir termometre ile ölçülür. Banyo sıcaklığı derecesi ile bakır plakanın dış yüzeyine püskürtülmüş olan sıvı kristal renkleri arasında bir ilişki kurulur. Böylece sıcaklık ile sıvı kristal renkleri arasında ilişki kurulmuş olur.

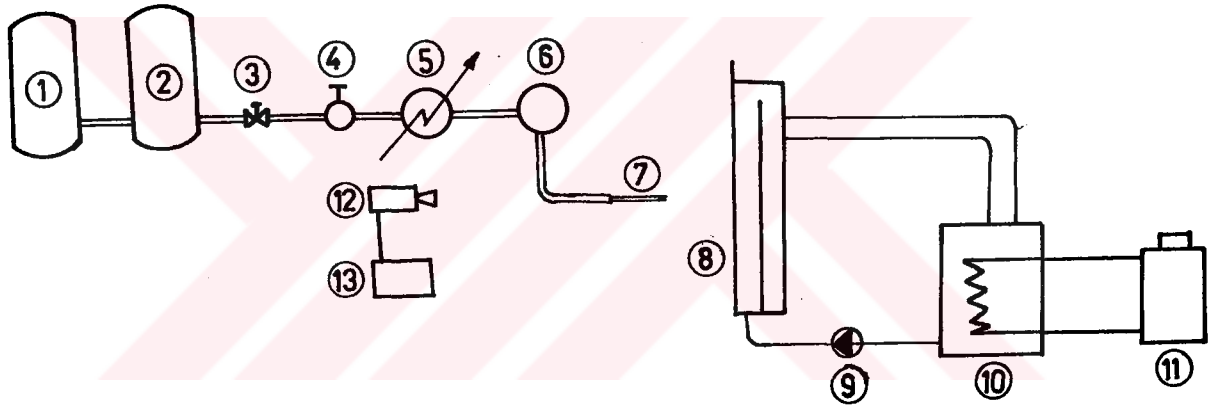
Uygulamada, Sıvı kristalin püskürtüleceği yüzeye iyice yapışması için, içerisine imalatı sırasında uygun reçine veya yapıştırıcı katılmış ise, kalibrasyon işlemi daha da basitce yapılabilir. Bu işlem için bir adet sıcak su banyosu ve banyo içerisine girecek ebatta bakır bir plakadan yararlanılır. Bakır plaka üzeri siyah bir zeminle kaplandıktan sonra üzerine Sıvı kristal püskürtülen plaka, sıcak su banyosu içerisine daldırılarak kalibrasyon işlemine geçilir. Sıvı kristal, içindeki yapışkanı nedeni ile suda çözünmeye karşı dayanıklıdır. En azından kalibrasyon işlemi boyunca suda çözünme olmaz. Banyo su sıcaklığı ile Sıvı kristal renkleri arasında ilişki kurulur, böylece vakum

sağlamaktan da kurtulmuş olunur. Bu durumda yapılan kalibrasyon işlemi daha güvenli ve hassastır. Böylece sonradan herhangi bir düzeltmeye de ihtiyaç duyulmaz. Bu çalışmada kalibrasyon işlemide bu şekilde yapılmıştır.

## 2.2. Deney Düzeneği

### 2.2.1. Giriş

Hava akımı bir kompresörle sağlanır. Kompresörün bastığı hava basınç tankına gelir. Buradan yaklaşık 10 atm. basınçta alınan hava, bir basınç ayar valfindan geçirilerek sabit basınç ve akım debisinde elde edilir.



- |                       |                            |
|-----------------------|----------------------------|
| 1. Hava kompresörü    | 8. Çarpma levhası          |
| 2. Hava tankı         | 9. Pompa                   |
| 3. Açma kapama vanası | 10. Su kabı                |
| 4. Basınç regülatörü  | 11. Sabit sıcaklık banyosu |
| 5. Kondenser          | 12. Video kamera           |
| 6. Debi ölçer         | 13. Televizyon             |
| 7. Lüle               |                            |

Şekil 6. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Basınç ayar valfı ayarlanarak değişik debilerde hava akımı elde etmek mümkündür. Deney düzeneği şeması Şekil 6'da gösterilmiştir. Hava akım debisini ölçmek için ayar valfindan sonra debi ölçer yerleştirilmiştir, böylece elde

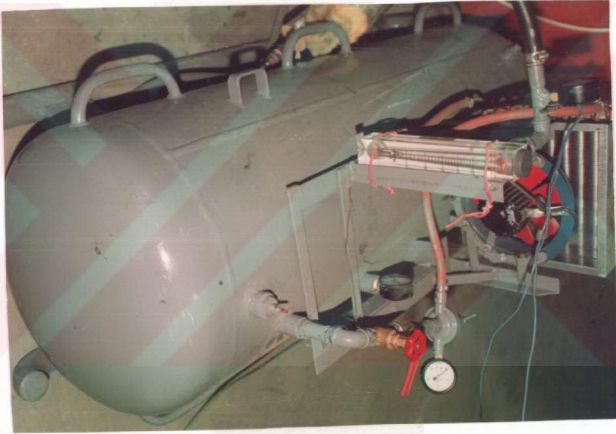
edilen ve debisi ölçülen hava, 2 m. uzunluğunda lastik hortumun ucuna bağlı lüleden (uzun düz bir borudan) geçirilerek plaka üzerine çarptırılmıştır. Jet hava sıcaklığının yaklaşık çevre hava sıcaklığıyla eşit ( $T_j = T_{OA}$ ) olması için basınçlı hava tankı ile basınç ayar vanası arasına bir kondenser yerleştirilmiştir. Lüleden fışkıran hava jeti, üzeri sıvı kristal kaplı arkası sabit su sıcaklığında bulunan cam levhaya çarptırılmıştır. Cam levha arka yüzeyindeki sabit sıcaklık şartı, bir su tankının suyunun, sabit sıcaklık banyosu ile sabit bir değerde ısıtılıp pompa vasıtasıyla cam levhanın arkasına pompalanması ile sağlanmıştır. Deneylerde belli lüle-levha aralığında çarpan hava jetinin yüzeyde meydana getirdiği renk ilerleyişi ve kenarda kronometrenin belirlediği zaman bir video kamera çekilerek, elde edilen değerler daha sonra ısı transfer katsayılarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Deney standının uygulamada ki genel görünüşü Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Deney düzeneğinin genel görünüşü.

### 2.2.2. Basıncılı Hava ve Akım Kontrolü

Çarpan jetin havasını temin etmek için maksimum 15 atm. basıncında hava üreten, istenilen sabit basınca göre motorunu otomatik açıp kapayan, Gürmak marka bir hava kompresörü kullanılmıştır. Deneyle sırasında jetten sarf edilen havanın belli bir müddet sonra tükenmesi dikkate alı-



Şekil 8. Debi ölçer ve basınçlı hava tankı.

arak, hava kompresörü yanına ikinci bir hava tankı daha düşünülmüş, bu amaçla yaklaşık aynı ebatta bir hava tankı daha eklenmiştir. Tanktan istenilen Reynolds sayısında hava akımı elde edebilmek için, tankın çıkışına yerleştirilen bir basınç regülatörü ile istenilen sabit basınç ayarlanmış ve daha sonra 1-25 Scfm. (1-714 lt/dak) aralıklı debi ölçerden geçilerek debisi ölçülmüştür. Değişik debilerin elde

edilmesinde yine, basınç regülatör vanasının açılıp kapanması ile bu durum sağlanmıştır. Debi ölçer; Dwyer marka 1-20 Scfm aralıklı, %2 doğruluğundadır. Hava tankından gelen jet havasının yaklaşık çevre hava sıcaklığı ile aynı olması için basınç regülatörü ile debi ölçer arasına, bakır borulu 2000 W'lık bir kondenser yerleştirilmiştir (Şekil 8). Hava-hava sistemine göre çalışan kondenser, çevre havasını üzerine üfleyen bir fanla, hava tankından gelen jet havasını yaklaşık çevre havasıyla aynı ( $T_J=T_{OA}$ ) olmasını sağlamıştır. Deneylere başlamadan önce çevre havası ile kondenser öncesi ve sonrasında ölçülen sıcaklıklar ile bu durum doğrulanmıştır.

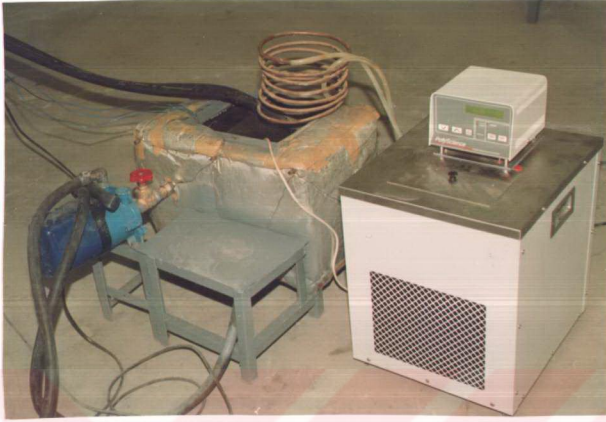
Reynolds sayısı, lüle çapı ve lüleden geçen ortalama hava hızına bağlıdır, şayet ortalama hava hızı  $U_0$  ise, lüleden geçen hacimsel debiye göre aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{V}}{v \cdot \pi \cdot D} \dots \dots \dots (4)$$

### 2.2.3. Sabit Sıcaklık Banyosu

Çarpma levhası arka yüzeyinde sabit sıcaklık sınır koşulu vardır. Bu sınır koşulunun sağlanması için su kabı içerisinde sabit sıcaklıkta bulunan su, bir pompa ile çarpma levhası arka yüzeyine pompalanarak sirkülasyon sonucu sabit sıcaklık sınır koşulu sağlanmıştır. Çarpma levhasını yalayan su, üst tarafta atmosfere açık şekilde arka kısma dökülmekte, buradan iki tahliye hortumu ile yükseklik farkından dolayı su kabına tekrar geri dönerek sirkülasyon sağlanmaktadır.

Su kabında suyun sabit sıcaklığını sağlamak için sabit sıcaklık banyosundan yararlanılır. Deneyler sırasında kapalı devre olarak çalışan sabit sıcaklık banyosu, su kabındaki suyun sıcaklığını sabit bir değerde tutar. Sabit sıcaklık



Şekil 9. Sıcaklık banyosu ve sisteme bağlantısı.

banyosu Polyscience marka, 1000 W. ısıtma ve soğutma kapasiteli, 10 lt. hacminde,  $+0.01^{\circ}\text{C}$  hassaslığında,  $+0.25^{\circ}\text{C}$  doğruluğunda, dijital göstergeli ve hassas platinyum problu bir cihazdır. Sıcaklık banyosu ve sisteme bağlantısı Şekil 9'da gösterilmiştir.

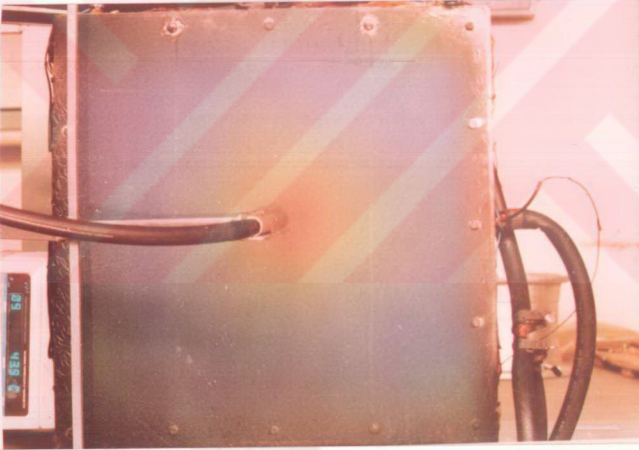
#### 2.2.4. Jet Çarpma Levhası

Denemelerde jetin çarptığı çarpma levhası kalitesinin (malzemesinin) seçimi çok önemlidir, çünkü renk yüzeyde renklerin birbirine geçiş yaptığı çizgiler, gayet net izlenebilmelidir, aksi taktirde denemelerde renk yerinin, zamana göre tesbitinde yanılmalar meydana gelebilir, bu da sonuçlarda belli oranda hatalara sebebiyet verir. Ayrıca çarpma levhası yüzeyinin de de akımı etkilemeyecek şekilde pürüzsüz ve düzgün olması gerekir.

Çarpma levhası olarak ilk önce bakır bir levha seçilmiş daha sonra deneyler sırasında yukarıda bahsedilen durumla karşılaşılmıştır. Renklerin konumları (renklerin birbirine



geçiş yaptığı çizgiler) net olarak izlenememiştir. Bunun sebebi; bakır çok iyi bir iletim katsayısına sahip olması nedeniyle, yüzeyde sıcaklık gradyanı çok az olmaktadır. Bu durumda renklerin birbirine geçiş yaptığı ara çizgiler Şekil 10'da de görüldüğü gibi net bir şekilde izlenememiştir. Çarpma levhasında bu istenmeyen durumu gidermek için, düşük ısı iletim katsayısına sahip bir malzeme seçimine gidildi. Bu amaçla saydam bir fiberglas plaka seçildi. Bu plaka üzerinde renklerin geçiş çizgileri gayet net olarak izlendi, fakat başka bir istenmeyen durumla karşılaşıldı. Levha arka sıcaklığı, suyun sıcaklığına göre yüksek bir değere çıkarıldığı zaman, çarpma levhası sıcaklıkta ileri doğru (Çarpan jete doğru) şişme yapmıştır, bu da yüzeyde akımın yönünü etkilemiştir.



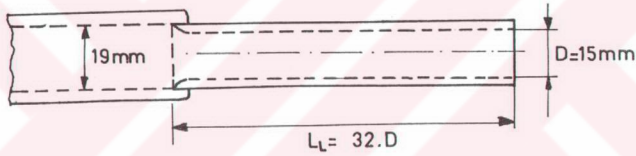
Şekil 10. Bakır levha üzerinde sıvı kristal renklerinin net olmayan renk geçiş çizgileri.

En son çarpma levhası olarak yine düşük ısı iletim katsayısına sahip ve yüksek sıcaklıkta şişme yapmayacak özelliğe sahip olarak cam bir levha seçilmiştir. Ayrıca cam levha yüzeyi akımı etkilemeyecek şekilde çok düzgün ve

pürüzsüzdür. Denemelerde kullanılan cam levha üzerinde renklerin birbirine geçiş çizgileri gayet net bir şekilde izlenmiştir. Kullanılan cam tabaka 45x45 cm. boyutunda ve 6 mm. kalınlığında, normal pencere camıdır.

### 2.2.5 Lüle Dizaynı

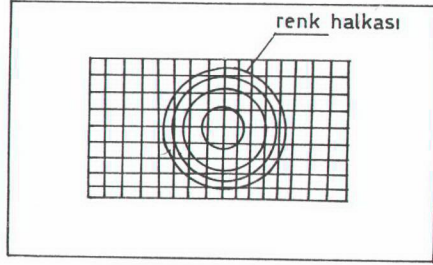
Lüle uzun dar bir borudan yapılmıştır. Lüle dizaynı akım şekli türbülanslı ve tam gelişmiş olacak şekilde dizayn edilmiştir. Lüle Uzunluğu  $32.D$  alınmıştır [31, 32]. Lüle malzemesi parlak düzgün yüzeyli, alüminyum alaşımli düz bir borudur. Lüle çapı 15 mm'dir. Lülenin basınç tankına bağlantısı, 2m. uzunluğunda lastik bir hortumla yapılmıştır. Lüle ve bağlantı boyutları Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Lüle şekli ve boyutları.

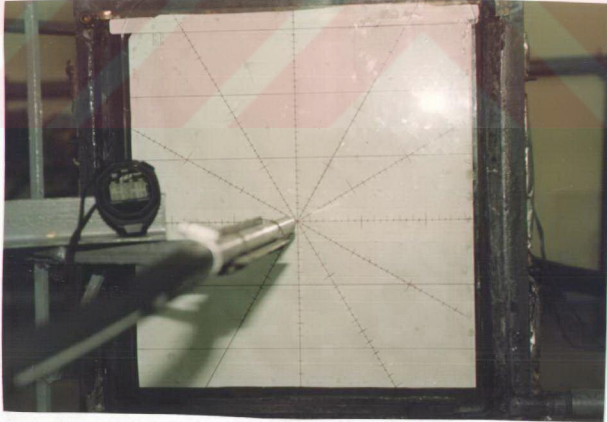
### 2.2.6. Test Plakası Üzerinde Renk Halkası Yarıçapı ve Zamanın Ölçümü

Plaka üzerinde, ısı transferi sonucunda teşekkül eden sıvı kristal renk genişliği ve bu renk halkası yarıçapının ölçülebilmesi için belli aralıklı ölçeklere ihtiyaç vardır. Bunun için aşağıda Şekil 12'de gösterildiği gibi belirli aralıklarla çizilmiş saydam plaka (Prospex, fiberglas, cam vs.) kullanılır.



Şekil 12. Renk halkası yarıçapı ölçümünde kullanılan saydam ölçekli levha.

Böylece uzaklık olarak renk bandının genişliği, halka yarıçapı ve ölçülen zaman, çarpma levhası üzerinde ısı transfer katsayıları hesaplamasında daha sonra kullanılacaktır.



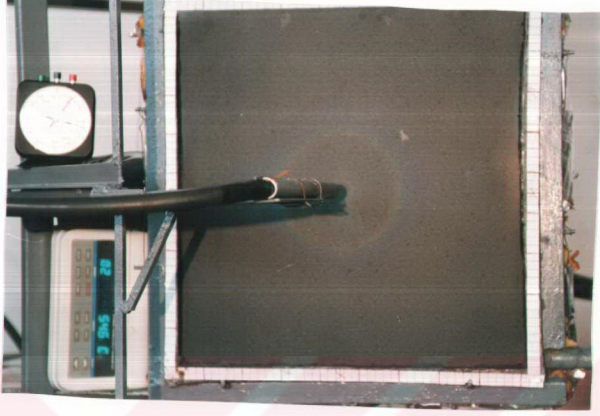
Şekil 13. Çalışmada renk halkası yarıçapı ölçümünde kullanılan ölçek.

Deneylerde hava jeti yüzeye çaptığı zaman bu saydam plakanın kullanılmasında bazı sorunlarla karşılaşıldı. Ölçeklerin üzerinde bulunduğu saydam plaka, çarpma levhası önüne yerleştirilince akımın yüzeye çarpmasını engelleyeceği açıktır. Bu sebeple saydam plaka, lümenin bir delikle orta



Şekil 14. Renklerin görsel kaydedilişi.

asından geçirilmesi ile yüzeyden uzakta ve yüzeye paralel olacak şekilde yerleştirildi. Bu durumda belli aralıklı ölçekler yüzeyde gerçek boyutundan daha fazla büyük şekilde görünmüş oldu. Bu durumdan kurtulmak için Şekil 13'de görüldüğü gibi hava jeti yokken saydam plaka, çarpma levhası önüne birleştirilerek, belli aralıklı, ölçekler levha çarpma yüzeyi üzerine birleştirilerek bu aralıklar Panasonic marka bir video kameraya çekildi, bundan yararlanarak ölçekler Şekil 14'de görüldüğü gibi televizyon ekranına işaretlenip



Şekil 15. Yüzeğe ince uygulanmış sıvı kristalin renkleri.



Şekil 16. Tabaka kalınlığı artırılmış sıvı kristalin parlak renkleri.

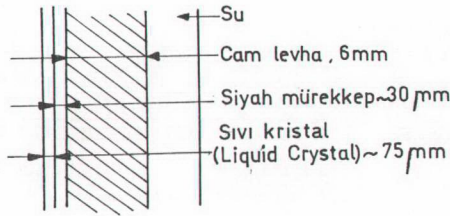
saydam levha kaldırıldı ve sonra jet yüzeye çarptırılarak renk halkası yarıçapı geometrik çarpma noktasından uzaklığı televizyon ekranındaki çizgiler vasıtasıyla tesbit edilmiş oldu.

Renk halkası konumunun yanısıra, geçen zamanında belirlenmesi için lüenin üzerine renk halkasının görünümünü engellemeyecek şekilde bir dijital kronometre yerleştirilmiştir. (Kronometre, Cole-Parmer marka, 10 hafızalı, saat/dak/san/salise göstergeli 1/100 hassasiyetinde digital göstergeli bir alettir.)

### 2.2.7. Yüzeyin Sıvı kristal ile Kaplanması

Sıvı kristal tabakası yüzeye, akım yönünde bozucu bir etki yapmayacak şekilde ince bir tabaka halinde uygulanmalıdır. Bu amaçla mikrokapsüllü sıvı kristal yüzeye püskürtülmeden önce su ile inceltildi ve daha sonra hava tabancası ile ince bir film şeklinde uygulandı.

Sıvı kristal renklerinin canlı olarak izlenebilmesi için yüzeyde tabaka kalınlığının 50-100 mikron arasında olması gerekir. Eğer bu kalınlık yeterince sağlanamazsa renkler solgun ve cansızdır. Bu durumda renklerin kalınlığını veya renklerin ara geçiş çizgilerini tesbit etmek hayli zordur.



Şekil 17. Çarpma levhası yüzeyinde sıvı kristal film kalınlığı.

Deneylerde ince uygulanmış sıvı kristalin solgun renkleri Şekil 15'de görülmektedir. Bu durumdan kurtulmak için yüzeye biraz daha, sıvı kristal püskürterek tabaka kalınlığını artırmak yeterlidir. Kalınlığı artırılan Sıvı kristalin renkleri, Şekil 16'da da görüldüğü gibi daha canlı ve renklerin ara geçiş çizgileri, gayet net olarak izlenmiştir.

Bu çalışmada, yüzeyde renklerin canlı izlenebilmesi için, uygulanan tabaka kalınlıkları Şekil 17'de verilmiştir.

### 2.2.8. Sıvı Kristalin Renk ve Sıcaklık İlişkisi

Lokal ısı transfer katsayılarını hesaplayabilmek için önce sıvı kristalin kalibre edilmesi gerekti. Kalibrasyon işlemi sıcak su banyosunda yapıldı. Test numunesi için su banyosuna girecek ebatta ince bir bakır plaka seçildi. Bakır plaka seçilmesinin nedeni çok iyi bir termal ilettime sahip olması ve kısa sürede kararlı duruma erişmesidir. Böylece tüm yüzeyde üniform bir sıcaklık dağılımı elde edilmiş oldu. Kalibrasyon işleminde, sıvı kristal renklerinin iyi izlenebilmesi için bakır test numunesi üzeri siyah bir zeminle kaplandı. Siyah zemin üzerine sıvı kristal püskürtülmüş numune kuruduktan sonra kalibrasyona işlemine geçildi. Sıcak su banyosuna daldırılan numune (plaka), suyun ısınmasına göre kendi renklerini ard arda göstermeye başladı ve su sıcaklığı banyonun dijital göstergesinden okundu. Renkler bitince sıvı kristal zeminin rengi siyahı gösterdi. Su sıcaklığıyla sıvı kristal renkleri arasında kurulan ilişki Toblo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. incelendiğinde; yeşil ve kırmızı rengi, renkler içerisinde en dar renk aralığına sahip iki renktir. Renk aralığı; rengin görünmeye başladığı ve kaybolduğu sıcaklıkların farkıdır. Ortalama renk sıcaklığı ise; bu iki sıcaklığın aritmetik ortalamasıdır. Ölçümlerde, en canlı renk yeşil izlendiğinden, deneyler için yeşil renk aralığı

Tablo 1. Sıvı kristalin renk ve sıcaklıkları.

| Renk    | Sıcaklık (°C) | Renk aralığı (°C) | Ortalama renk sıcaklığı (°C) |
|---------|---------------|-------------------|------------------------------|
| Mavi    | 44.6 - 42.6   | 3                 | 44.1                         |
| Yeşil   | 42.6 - 42.0   | 0.6               | 42.3                         |
| Kırmızı | 42.0 - 41.5   | 0.5               | 41.75                        |

tercih edilmiştir. Yeşil renk aralığı 0.6 °C ,ortalama renk sıcaklığı ise 42.3 °C'dir. Bu durum Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. Sıvı kristalin renk aralığı ve ortalama renk sıcaklıkları.



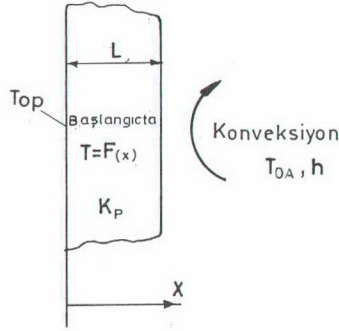
## 2.3. Isı Transfer Katsayısında Kullanılan Denklemler

### 2.3.1. Zamana Bağlı Isı İletim Denklemi ve Sınır Koşulları

Jet yüzeye çarptığı zaman, lokal ısı transfer katsayılarını hesaplayabilmek için sınır koşulları ve başlangıç koşuluna ihtiyaç vardır. Levha üzerinde ısı akısının tek yönde, yani sadece çarpma levhası kalınlığında olduğu, levha kenarlarına doğru ise, ısı akısının olmadığı kabul edilmiştir. Sınır koşulları; cam levha arka yüzü sabit sıcak su sıcaklığında, ön yüzeyde ise jetin çapması ile konveksiyonla ısı kaybı vardır.

Çarpma yüzeyinde konveksiyonla kaybedilen ısının yanısıra radyasyonla da ısı kaybı vardır. Radyasyonla kaybedilen ısının, konveksiyonla kaybedilen ısıya nazaran çok küçük olduğu hesaplamalarda görülmüştür. Bu sebeple radyasyonla ısı kaybı ihmal edilmiştir. literatürde yapılan çalışmalarda da radyasyonla ısı kaybının dikkate alınmadığı görülmüştür [6,8,19]. Radyasyonla kaybedilen ısı dikkate alındığı zaman, zamana bağlı çözülecek ısı denklemi, daha da kompleks hale geleceği açıktır. Ayrıca jet yüzeye çarptığı zaman çarpan havanın kinetik enerjisinin yüzeyde ısı enerjisine dönüşmeside ihmal edilmiştir ve levha içerisinde de ısı üretimi yoktur.

Bu durumda kartezyen koordinatlarda bir boyutlu zamana bağlı ve içinde ısı üretimi olmayan ısı iletim denklemi ve sınır koşulları yazılırsa,



Şekil 19. Levha kalınlığında sınır koşulları.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad 0 \leq x \leq L, \quad t > 0 \dots \dots \dots (5.a)$$

$$x = 0, \quad t > 0, \quad T = T_{OP} \dots \dots \dots (5.b)$$

$$x = L, \quad t > 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} + HH (T - T_{OA}) = 0 \dots \dots \dots (5.c)$$

$$t = 0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad T = F(x) \dots \dots \dots (5.d)$$

Burada jet hava sıcaklığı yaklaşık çevre hava sıcaklığına eşit alınmıştır ( $T_J \cong T_{OA}$ ).

### 2.3.2. Başlangıç Koşulu $F(x)$ 'in Hesaplanması

Başlangıç koşulu  $t=0$  anında yani jet levha üzerine çarpmadığı zaman, levha kalınlığında sıcaklık dağılımı, zamandan bağımsız kalınlığın yani sadece  $x$  'in fonksiyonudur. Sınır koşulları; levha arka sıcaklığı banyo su sıcaklığında, ön yüzeyde ise levhanın dik pozisyonuna göre yüzeyde doğal taşınım koşulu vardır. Başlangıç koşulunda ısı iletim denklemi ve sınır koşulları yazılırsa,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad t = 0 \dots \dots \dots (6.a)$$

$$T = F(x) = Ax + B, \quad 0 \leq x \leq L, \quad t = 0 \dots \dots \dots (6.b)$$

$$x = 0, \quad t > 0, \quad T = T_{OP} \dots \dots \dots (6.c)$$

$$x = L, \quad t > 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} + HH_d(T - T_{OA}) = 0 \dots \dots \dots (6.d)$$

Burada  $HH_d$ , dik levha pozisyonuna göre, yüzeyde doğal taşınım katsayısı oranıdır,

$$HH_d = h_d / k_p \dots \dots \dots (7)$$

ve A, B ise; sınır koşullarını sağlayan sabitlerdir.

$$A = \frac{(T_{OA} - T_{OP} \cdot HH_d)}{(1 + HH_d \cdot L)} \dots \dots \dots (8)$$

$$B = T_{OP} \dots \dots \dots (9)$$

Böylece sıcaklık dağılımı;

$$F(x) = (T_{OA} - T_{OP} \cdot HH_d) \frac{x}{1 + HH_d \cdot L} + T_{OP} \dots \dots \dots (10)$$

olur.

### 2.3.2.3. Başlangıç Koşulunda Yüzeyde Taşınım Katsayısının Bulunması

Başlangıç koşulunda, levha kalınlığında sıcaklık dağılımının bulunabilmesi için levha yüzeyinde hava jeti yokken, levhanın dik pozisyonuna göre yüzeyde doğal taşınım katsayısının bulunması gerekir. Dik yüzeylerde üniform duvar sıcaklığı için ortalama Nuselt sayısı [33],

$$Nu_d = 0.68 + 0.67 \frac{Ra_L^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}}, \quad 10^{-1} < Ra_L < 10^9$$

..... (11)

Burada;

$$Ra = Gr_L Pr \dots\dots\dots (12)$$

ve

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_W - T_{OA}) \cdot LL^3}{\nu^2} \dots\dots\dots (13)$$

dir ve ortalama ısı transfer katsayısı,

$$h_d = \frac{Nu_d \cdot k_a}{LL} \dots\dots\dots (14)$$

Denklemler 11 ve 14 yardımıyla doğal taşınım katsayısının bulunabilmesi için önce  $T_W$  sıcaklığının bilinmesi gerekir. Bu sıcaklığı bulmak için jet yüzeye çarpmadığı zaman, başlangıç koşulunda yani  $t=0$  iken kararlı halde, dik levha yüzeyinde taşınım ile kaybedilen ısı, levha kalınlığında iletilen ısıya eşit olmalıdır. Bu eşitlik yazılırsa,

$$-k_P \frac{(T_W - T_{OP})}{\Delta x} = h_d (T_W - T_{OA}) \dots\dots\dots (15.a)$$

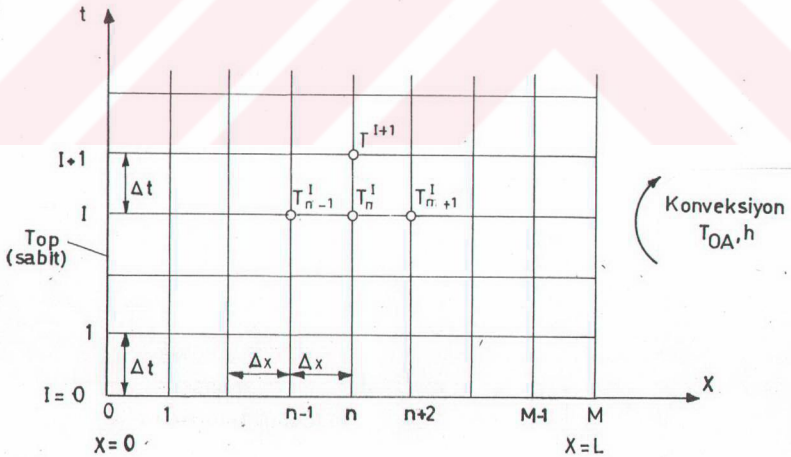
veya buradan  $T_W$  sıcaklığı yazılırsa,

$$T_W = \frac{T_{OA} + T_{OP} \frac{k_P}{h_d L}}{\left(1 + \frac{k_P}{h_d L}\right)} \dots\dots\dots (15.b)$$

Önce levha dış yüzey sıcaklığı  $T_W$  kabulü yapılır. Bu sıcaklığa göre doğal taşınım katsayısı denklem 11 ve 14 yardımıyla hesaplanır. Sonuçta denklem (15.b) ile bulunan  $T_W$  sıcaklığı başlangıçta kabul edilen sıcaklık değeri ile aynı ise  $T_W$  sıcaklığı doğrudur, aksi taktirde başlangıçta kabul edilen  $T_W$  değeri değiştirilerek, bu değer eşit oluncaya kadar iteresyona devam edilir. Sonuçta iki sıcaklığın eşit çıkması halinde, hesapta kullanılan  $h_d$  değeri, dik yüzeyde arandılan ortalama doğal taşınım katsayısıdır.

### 2.3.3. Sonlu Farklar ile Denklemin İfadesi

Zamana bağlı ısı iletim denkleminin sonlu farklarla çözümünde, çoğu metotta düğüm noktaları aralığı ile zaman dilimi arasında bir kriterin göz önünde tutulması gerekir, aksi taktirde bulunan sıcaklıklarda iraksama ve kararsızlıklar oluşur ve bazen de çözüme ulaşılamayabilir. Bu durum dikkate alınarak, mevcut çalışmada ısı iletim

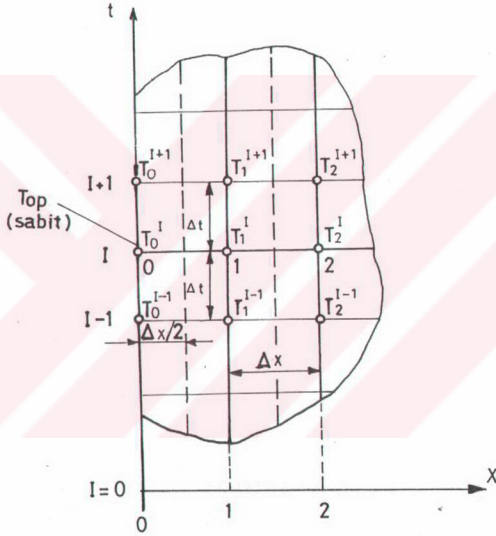


Şekil 20. Sonlu farklar çözümü için, Levha kalınlığının  $M$  parçaya bölünüşü.

denkleminin sonlu farklarla çözümünde, her hangi bir sınırlayıcı kriter şartı istemeyen Crank-Nicolson implicit metodu seçilmiştir.

Her bir düğüm noktasında ısı transferinin sayısal analizi, Crank-Nicolson metodu kullanılarak aşağıdaki gibi analiz edilir.

$n=1$  düğüm noktası için enerji dengesi eşitliği;



Şekil 21. Sabit sıcaklık sınır koşulu.

$$\rho_P C_P (\Delta x \cdot 1.1) \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{k_P}{2} \left[ \frac{T_O^{I+1} - T_1^{I+1}}{\Delta x} + \frac{T_O^I - T_1^I}{\Delta x} \right] (1.1) \quad \dots (16.a)$$

$$+ \frac{k_P}{2} \left[ \frac{T_2^{I+1} - T_1^{I+1}}{\Delta x} + \frac{T_2^I - T_1^I}{\Delta x} \right] (1.1)$$

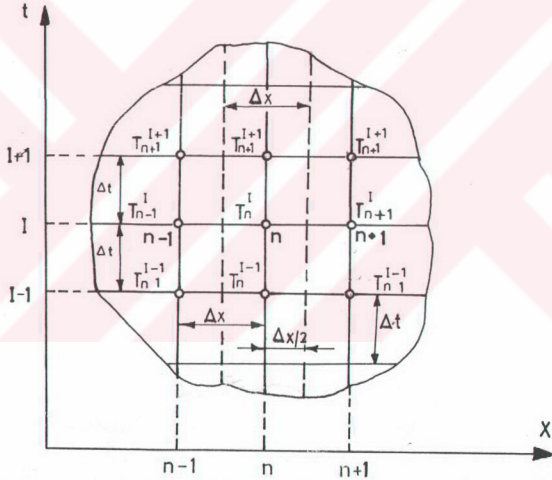
böylece,

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\alpha_P}{2 \Delta x^2} \left[ -2T_1^{I+1} + T_2^{I+1} - 2T_1^I + T_2^I + 2F_1 \right] \dots \dots \dots (16.b)$$

elde edilir. Burada;

$$F_1 = T_O^{I+1} = T_O^I = T_{OP} \dots \dots \dots (17)$$

$n=2$  ve  $M-1$  düğüm noktaları aralığı için enerji dengesi eşitliği;



Şekil 22. Orta noktada sonlu farklar kafesi.

$$\rho_P C_P (\Delta x \cdot 1 \cdot 1) \frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{k_P}{2} \left[ \frac{T_{n-1}^{I+1} - T_n^{I+1}}{\Delta x} + \frac{T_{n-1}^I - T_n^I}{\Delta x} \right] (1.1) \dots (18.a)$$

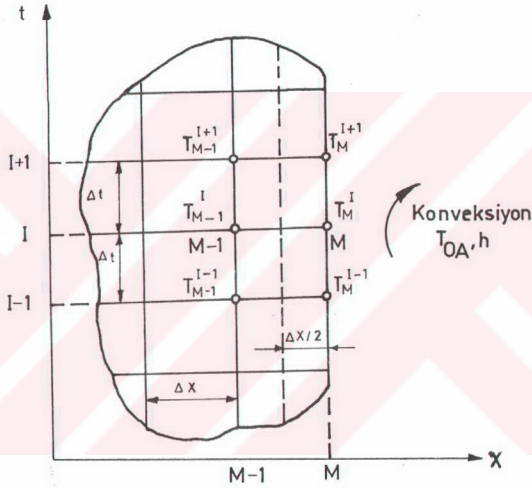
$$+ \frac{k_P}{2} \left[ \frac{T_{n+1}^{I+1} - T_n^{I+1}}{\Delta x} + \frac{T_{n+1}^I - T_n^I}{\Delta x} \right] (1.1)$$

böylece;

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{\alpha_P}{2 \Delta x^2} (T_{n-1}^{I+1} - 2T_n^{I+1} + T_{n+1}^{I+1} + T_{n-1}^I - 2T_n^I + T_{n+1}^I) \dots \dots (18.b)$$

elde edilir.

$n=M$  düğüm noktası için enerji dengesi eşitliği;



Şekil 23. Konveksiyon sınır koşulu.

$$\rho_P C_P \left( \frac{\Delta x}{2} \cdot 1.1 \right) \frac{\partial T_M}{\partial t} = \frac{k_P}{2} \left[ \frac{T_{M-1}^{I+1} - T_M^{I+1}}{\Delta x} + \frac{T_{M-1}^I - T_M^I}{\Delta x} \right] (1.1) \dots (19.a)$$

$$- \frac{1}{2} h (1.1) (T_M^{I+1} - T_{OA}) - \frac{1}{2} h (1.1) (T_M^I - T_{OA})$$



böylece,

$$\frac{\partial T_M}{\partial t} = \frac{\alpha_P}{\Delta x^2} \left[ T_{M-1}^{I+1} + \beta \cdot T_M^{I+1} + T_{M-1}^I + T_M^I + 2 \cdot \Delta x \cdot F_2 \right] \dots (19.b)$$

elde edilir. Burada;

$$HH = \frac{h}{k_P}; \quad \beta = (1 + HH \Delta x) \quad \text{ve} \quad F_2 = HH T_{OA} \dots (20)$$

Buradan düşüm noktalarındaki sıcaklıklar yazılırsa,

n=1. düşüm noktası için;

$$(2 + 2r)T_1^{I+1} - rT_2^{I+1} = (2 - 2r)T_1^I + rT_2^I + 2rF_1 \dots (21)$$

n=2 ve M-1. düşüm noktaları aralığı için,

$$-rT_{n-1}^{I+1} + (2 + 2r)T_n^{I+1} - rT_{n+1}^{I+1} = rT_{n-1}^I + (2 - 2r)T_n^I + rT_{n+1}^I \dots (22)$$

n=M. düşüm noktası için;

$$-2rT_{M-1}^{I+1} + (2 + 2r\beta)T_M^{I+1} = 2rT_{M-1}^I + (2 - 2r)T_M^I + 4r\Delta x F_2 \dots (23)$$

Burada;

$$r = \frac{\alpha_P \Delta t}{\Delta x^2} \dots (24)$$

Matris 5 elemanlı halde ifade edilirse;

$$\begin{bmatrix} (2+2r) & -r & & & \\ -r & (2+2r) & -r & & \\ & -r & (2+2r) & -r & \\ & & -r & (2+2r) & -r \\ & & & -r & (2+2r) & -r \\ & & & & -2r & (2+2\beta.r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^{I+1} \\ T_2^{I+1} \\ T_3^{I+1} \\ T_4^{I+1} \\ T_5^{I+1} \end{bmatrix} =$$

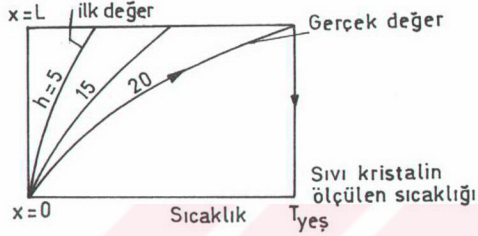
$$\begin{bmatrix} (2-2r) & r & & & \\ r & (2-2r) & r & & \\ & r & (2-2r) & r & \\ & & r & (2-2r) & r \\ & & & r & (2-2r) & r \\ & & & & 2r & (2-2.r.\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^I \\ T_2^I \\ T_3^I \\ T_4^I \\ T_5^I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2.r.F_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 4.r.\Delta x.F_2 \end{bmatrix}$$

Burada eşitliğin sağ tarafı; düğüm noktaları için başlangıç zaman adımında bilinen sıcaklıkları, sol tarafı ise; bir sonraki zaman adımında bilinmeyen sıcaklıkları içerir.

#### 2.3.4. Elemanda Isı Transfer Katsayısının Hesaplanış Metodu

Bilinen yüzey sıcaklığı ve zaman ifadesi yardımıyla düğüm noktalarındaki sıcaklıklar ve ısı transfer katsayısı nümerik olarak yukarıdaki matrisin çözümünden elde

edilebilir. Önceden deney esnasında sıvı kristalin ortalama  $T_{Yeş}$  sıcaklığının yer ve zamanı bir video kamera ile belirlenmişti. Ölçülen bu değerler ve yaklaşık bir ısı transfer katsayısı kabul edilerek, yüzey sıcaklığı nümerik olarak hesaplanabilir.



Şekil 24. Sayısal çözümde ısı transfer katsayısının bulunuşu.

Hesapla bulunan yüzey sıcaklığı ile sıvı kristalin ölçülmüş ortalama yeşil renk sıcaklığı  $T_{Yeş}$  aynı ise, kabul edilen ısı transfer katsayısı doğrudur, aksi takdirde eşitlik sağlanıncaya kadar iterasyona devam edilir. Bu hesaplamadaki yöntem Şekil 24'de gösterilmiştir.  $x=L$  noktasındaki sıvı kristalin ortalama yeşil renk sıcaklığı  $T_{Yeş}$ , her bir ısı transfer katsayısına göre bulunmaya çalışılmıştır. İterasyonda  $T_{Yeş}$  değerini veren  $h$ , o noktadaki ısı transfer katsayısıdır.

Nusselt sayısı ise;

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k_a} \dots \dots \dots (25)$$

Burada  $k_a$  : Havanın iletim katsayısıdır ve Film sıcaklığında değerlendirilmiştir,  $T_f = (T_{Yeş} + T_{OA}) / 2$

#### 2.4. Bilgisayar Programına Verilerin Giriş Değerleri

Yukarıda bahsedildiği gibi, deneyde düzlemsel elemanın dış yüzeyine sıvı kristal püskürtüldükten sonra ,hava jeti yüzeye yaklaşık çevre havası sıcaklığında çarptırılmıştır. oluşan ısı transferi zorlanmış konveksiyon şeklindedir. Isı transferi sırasında sıvı kristal, zamanla yüzeyin sıcaklığına göre renk vermektedir. Bilgisayarda ısı transfer katsayısını bulmak için, aşağıdaki değerlerin bilgisayara girilmesi gerekir.

Bilgisayara giriş değerleri:

- 1) Çevre hava sıcaklığı,  $T_{OA}$
- 2) Sıcak banyo sıcaklığı,  $T_{OP}$
- 3) Sıvı kristalin ortalama yeşil renk sıcaklığı,  $T_{Yeş}=42.3^{\circ}C$
- 4) Jet lüle çapı,  $D=15$  mm
- 5) Cam levha kalınlığı,  $LL=6$  mm.
- 6) Cam levhaya ait ısı yayılım katsayısı  
 $k_p=0.8184$ ,  $W/m^{\circ}K$   
 $\rho_p=2500$ ,  $Kg/m^3$   
 $C_p= 840$ ,  $J/kg^{\circ}K$   
 $\alpha_p= 1.1905.10^{-3}$ ,  $m^2/s$
- 7) Cam levha yüksekliği,  $LL=45$  cm.
- 8) İterasyon için başlangıç jet ısı transfer katsayısı  
 $h$
- 9) Sıvı kristalin her hangi bir konumda saniye cinsinden ölçülmüş zamanı,  $TT$
- 10) Zaman adım sayısı,  $TI$
- 11) Kalınlıkta düşüm noktası sayısı,  $N$
- 12) Yer çekim ivmesi,  $g=9.81$   $m/s^2$

#### 2.5. Bilgisayar Programı ve Sonuçları

Program; kartezyen koordinatlarda, tek boyutlu bir elemandaki yüzey sıcaklığının bilinmesi, ısı iletim

denkleminin sonlu farklar yöntemiyle çözülmesi ve iterasyonla ısı transfer katsayısının bulunmasından ibarettir. Düz elemanı M parçaya bölerek her noktadaki sıcaklığı ve ısı transferi sonucunda oluşan ısı taşınım katsayısını, bununla birlikte havanın fiziksel özelliklerini ve buna bağlı olarak Nusselt sayısını bulan bir programdır. Bilgisayar programı ekler kısmında Ek Tablo 1'de verilmiştir.

Bilgisayar analiziyle hesaplanan ısı transferi olayını karakterize eden deney aşağıdaki gibi yapılmıştır.

1) Kompresör çalıştırılır, basınçlı hava deposuna hava basılır, bu yaklaşık 10 atm dir.

2) Jet çarpması sırasında, depodan gelen hava sıcaklığının, yaklaşık çevre hava sıcaklığı ile aynı olmasını sağlayan, hava-hava sistemli bakır kondenserin vantilatörü çalıştırılır.

3) Video kamera ve aydınlatma cihazı yerleştirilir.

4) Video çalıştırılarak, jet havası açılır.

5) Sıvı kristal dönüşümünün ilerlemesi tam 90 derecelik bir bakış açısında video kamera ile gözlenir.

7) Sıvı kristal renginin zamana bağlı ilerleyişi durunca jet havası kesilir.

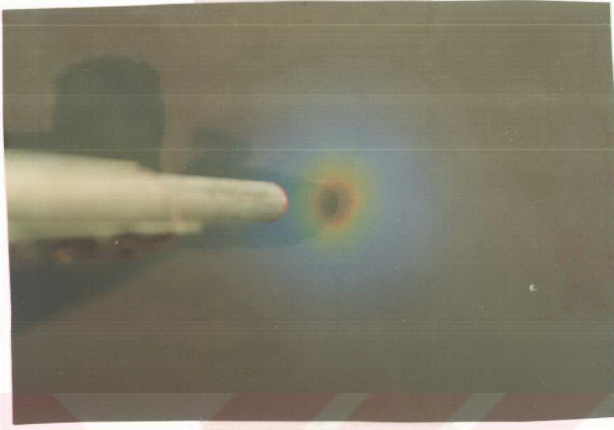
### 3. BULGULAR

#### 3.1. Giriş

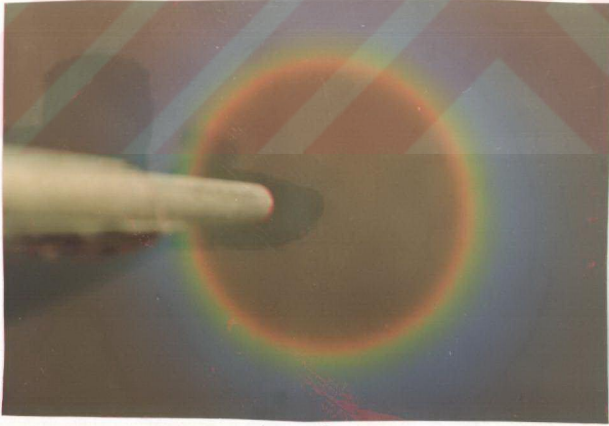
Sonuçların gösterimi ilk olarak lokal miktarlar üzerinde odaklaşacaktır. Lokal miktarlar arasında sonuçlar; geometrik çarpma noktası ile maksimum ısı transfer noktası arasındaki sapma açısına göre ve çarpma yüzeyinde lokal  $Nu/h$  ısı transfer katsayı dağılımları için verilecektir.

Sonuçlar, dik jetler için Reynolds sayısı 40 000, 30 000, 20 000, 10 000 için lüle-plaka uzaklığı H/D oranı 6,7,8,10,12,14 ve durgunluk noktasından duvar jet ana eksenini boyuncaki uzaklık  $X/D=0-10$ 'a kadar 0.5 aralıklı mesafede ölçümler alınmıştır. Eğik jetlerde ise deneyler, sabit Reynolds sayısı 30 000, jet eğim açısı 90,75,60,45 derecelik açılarda ve H/D oranı 7,10 ve 14'de yapılmıştır.

Deneyler esnasında sabit Reynolds sayısı ve sabit H/D oranında, durgunluk noktasından 10.D mesafesi aralığında ısı transfer katsayılarının hesaplanmasında tek bir deney yapılması gerekirken 3 ayrı deneyle bu aralık taranmıştır. Bunun nedeni, jet yüzeye çarptığı zaman, çarpma levhası arka sıcaklığına göre ön yüzeyde renk halkası, zamanla daire şeklinde açılmakta ve bir müddet sonra ilerlemesi durmaktadır. Eğer levha sabit arka sıcaklığı daha düşük bir değerde ise renk halkası, daha büyük bir daire meydana getirerek durmaktadır. Daha büyük daire meydana getirdiğinde, ilk renklerin ortaya çıktığı durgunluk noktasında, renk aralığı daha büyük olmakta ve bu bölgeyi daha hızlı terk ettiğinden, burada ortalama renk genişliği daha büyük olmakta (bu durum Şekil 25'de gösterilmiştir) ve zamana göre yerinin tesbitinde yanlışlıklar olabilmektedir,



a)



b)

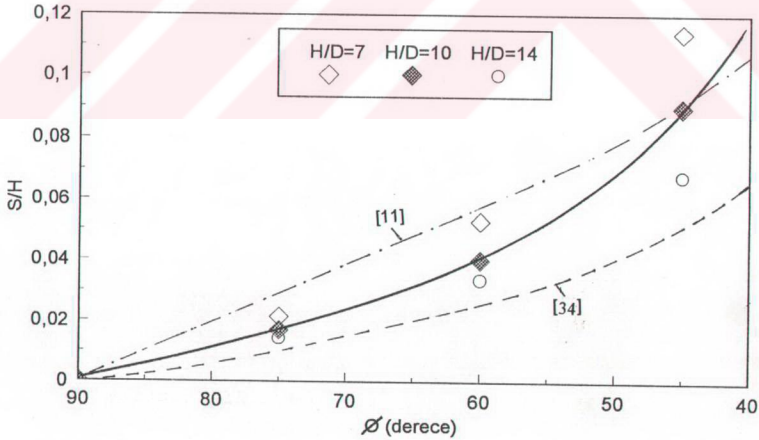
Şekil 25. Renk aralıkları a) İlk görüldüğünde,  
b) Son kısımlarda.

fakat belli bir mesafeden sonra, renk ilerleyişi normal bir hızda ve renk aralığı daralarak devam ettiğiinden, burada alınan sonuçlar gayet normaldir. Ölçümlerde hata oranının minimum olabilmesi için, renk aralığı geniş olmayan ve zamana göre normal hızda ilerleyen yerlerde ölçümlerin alınması gereklidir. Bundan dolayı, durgunluk noktasından itibaren 10.D mesafesi, tek bir deneyle değil 3 ayrı deneyle taranmıştır.

Çalışmada verilen Reynolds sayısı, lüle-levha aralığı oranı ve jet eğim açıları için, ısı transfer katsayılarının hesaplamasında yaklaşık 100 ayrı deney yapılmış ve yaklaşık 800 deneysel veri alınmıştır.

### 3.2. Maksimum Isı Transfer Noktası

Eğik jetin 90°'den küçük tüm açıları için, maksimum ısı transfer noktası, Şekil 1'de negatif X eksenı yönünde, solda yoğunlaşmıştır. Burada eğik jetler için durgunluk (maksimum



Şekil 26. Maksimum ısı transfer noktası ile geometrik çarpma noktası arasındaki uzaklığın, jet eğim açısına göre değişimi,  $Re=30\ 000$ .



ısı transfer) noktasının, geometrik çarpma noktasına olan yer değiştirme mesafesi,  $S$  ile gösterilmiştir. Ölçülen yer değiştirmeler, lüle-plaka uzaklığı  $H$  ile normalize edilerek Şekil 26'da jet eğim açısının fonksiyonu olarak çizilmiştir.

Çizgilerin üst üste çakışma durumundaki karışıklığı önlemek için, sadece  $Re=30\ 000$  için değerler alınmıştır.

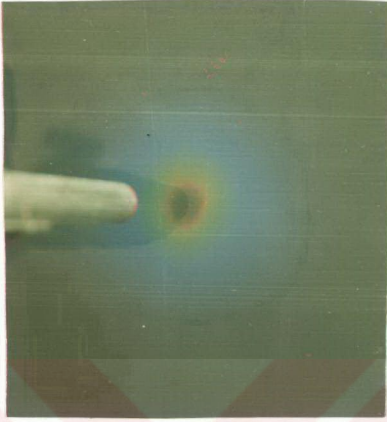
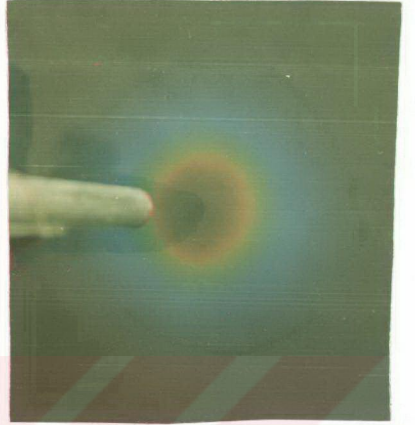
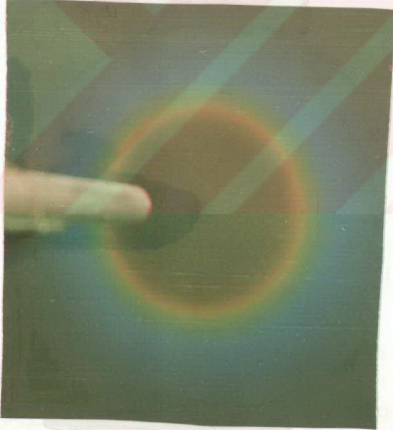
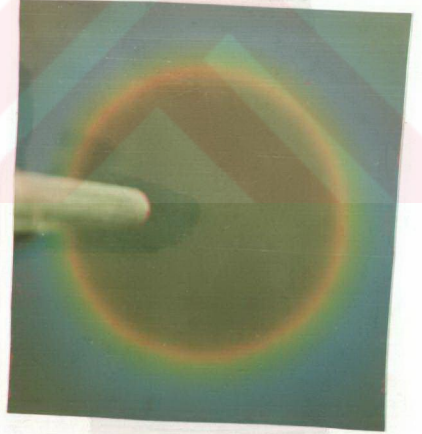
### 3.3. Lokal Isı Transfer Katsayılar Dağılımı

Ölçülen lokal ısı transfer katsayıları veya Nusselt sayısı iki şekilde gösterilecektir. Birincide katsayılar, duvar jet ana eksenini boyunca ki mesafeye göre, ikincide ise, daha sonra açıklanacağı gibi çarpma levhası yüzeyinde eş ısı transfer katsayısı noktalarından geçen çizgiler şeklinde gösterilecektir.

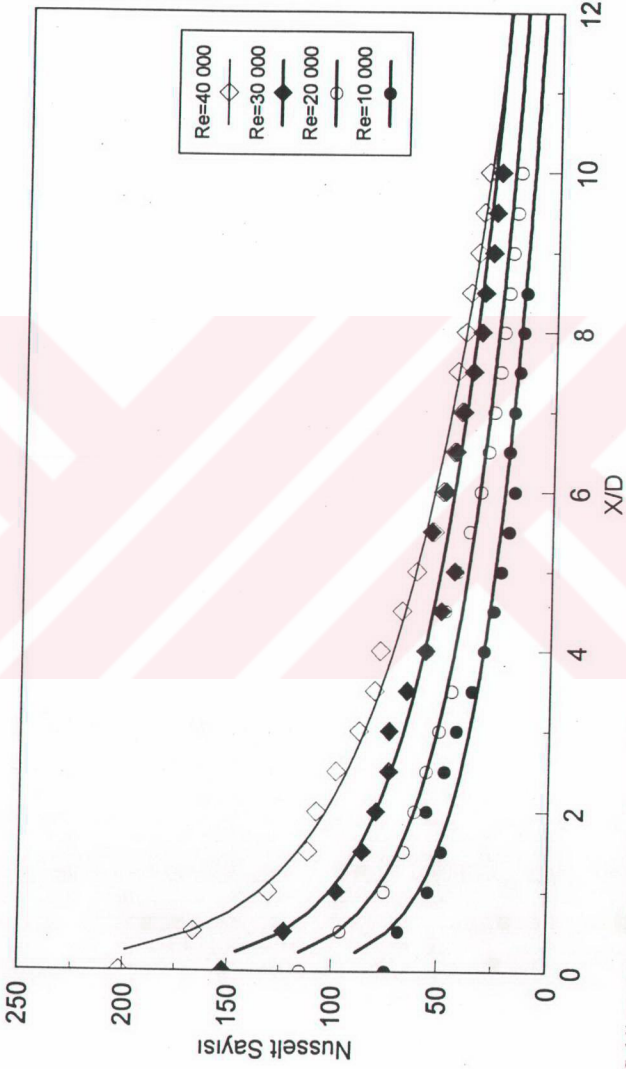
Isı transfer katsayı hesaplamalarında, deneysel veri olarak bilgi sayar programına girilen ve deneyler esnasında video kameraya kayıt edilen sıvı kristal renginin yer ve zaman ilişkisi Şekil 27'de fotoğraflarla verilmiştir.

Duvar jet ana eksenleri, Şekil 1'de gösterilen  $X$  ve  $Y$  eksenleridir. Bütün jet eğim açıları için maksimum ısı transfer katsayısı noktası yeri "0" ile gösterilmiştir. Akım alanı ve ısı transfer katsayıları, yuvarlak dik jetler için  $X, Y$  eksenlerine göre simetriktir, dolayısıyla sonuçları hem pozitif, hem de negatif  $Y$  eksenini için göstermeye gerek yoktur. Diğer yönden eğik jetler için,  $X$  eksenine göre böyle bir simetri yoktur. Grafiklerde ısı transfer katsayıları  $X$  eksenini üzerinde hem pozitif hem de negatif yönde ve ayrıca  $Y$  ekseninde ise sadece pozitif yönde gösterilmiştir.

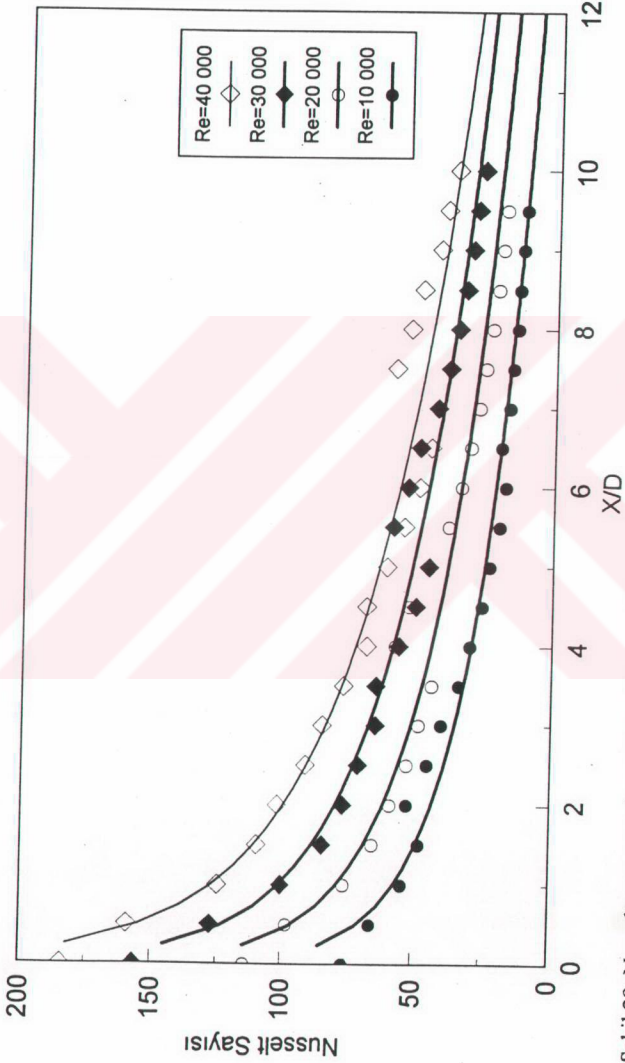
Normal (dik) çarpan jetlerde simetri nedeniyle, Nusselt sayısı değerinin sadece pozitif  $X$  yönündeki dağılımı, Reynolds sayısı 10 000, 20 000, 30 000, 40 000 ve  $H/D$  oranı 6,7,8,10,12,14 için Şekil 28-33'da gösterilmiştir.

a)  $t=8.5$  sn,  $X/D=1.2$ .b)  $t=12$  sn,  $X/D=2.2$ .c)  $t=23$  sn,  $X/D=4.5$ .d)  $t=35$  sn,  $X/D=5.8$ .

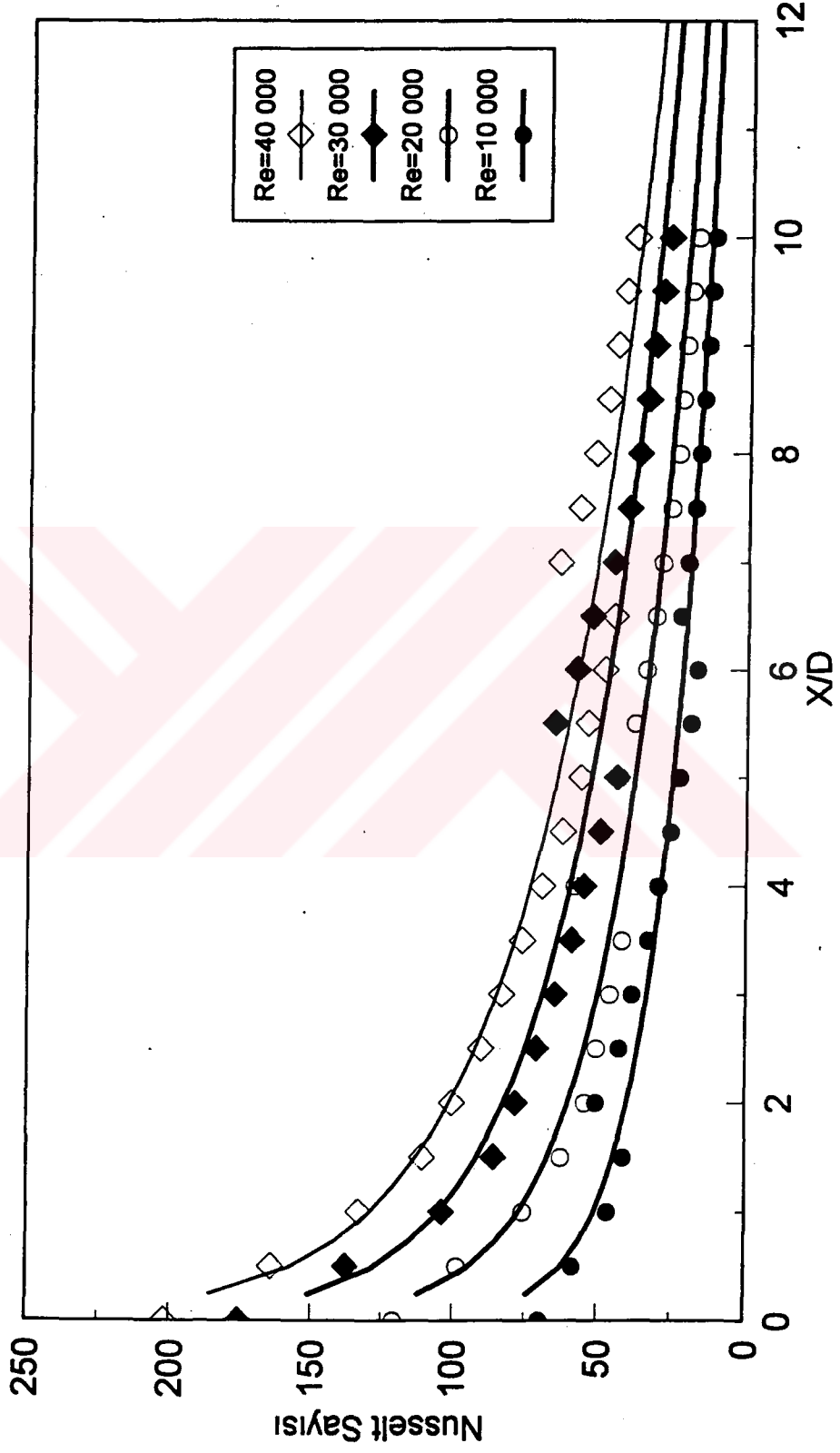
Şekil 27. Isıtılan levhaya dik çarpan jet durumunda sıvı kristalin renk konum ve zaman ilişkisi,  $Re=40\ 000$ ,  $H/D=7$ ,  $TOP=53.7^{\circ}C$ ,  $TOA=22^{\circ}C$



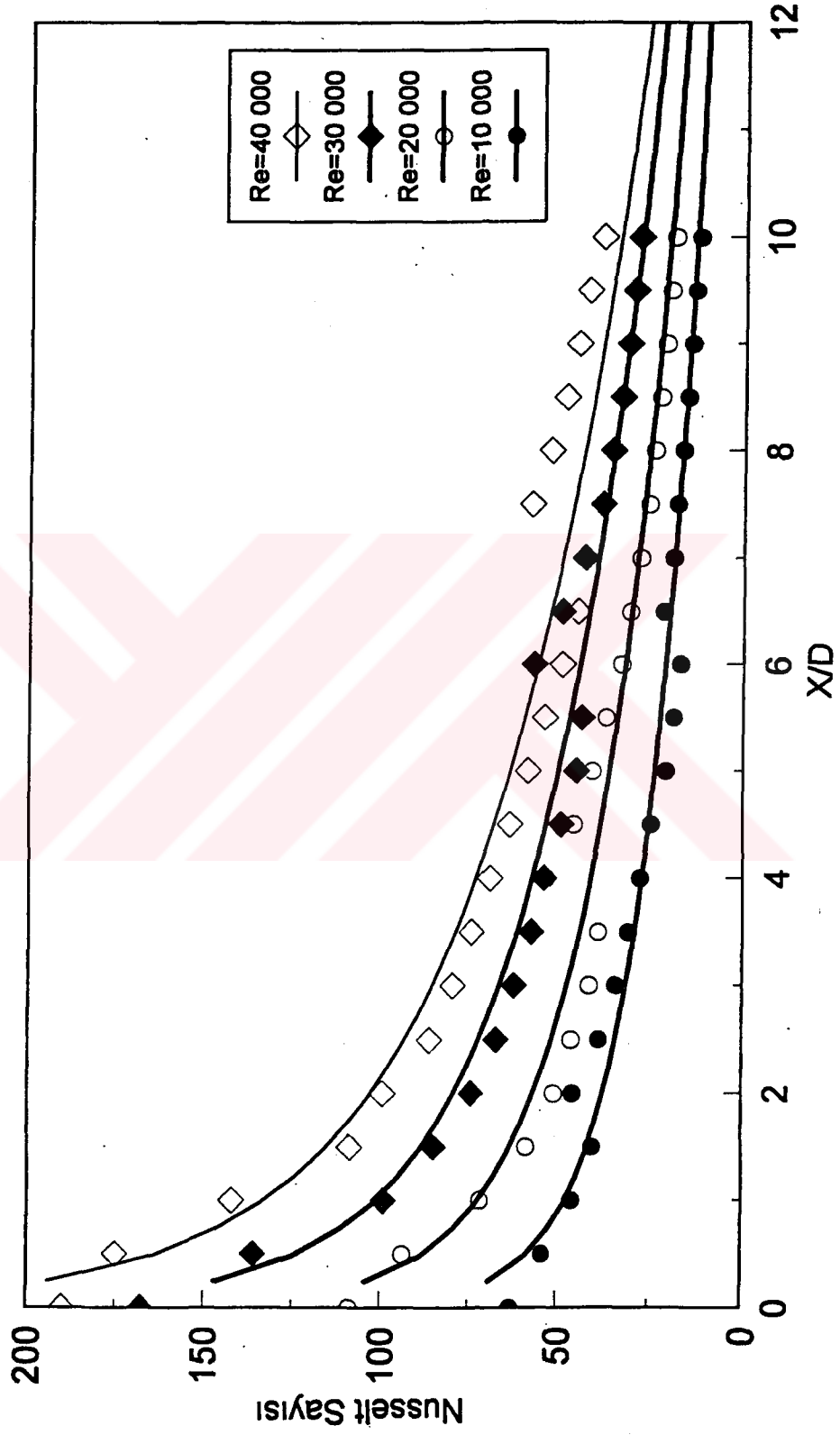
Şekil 28. Nusselt sayısının, durgunluk noktası uzaklığına göre değişimi,  $H/D=6$



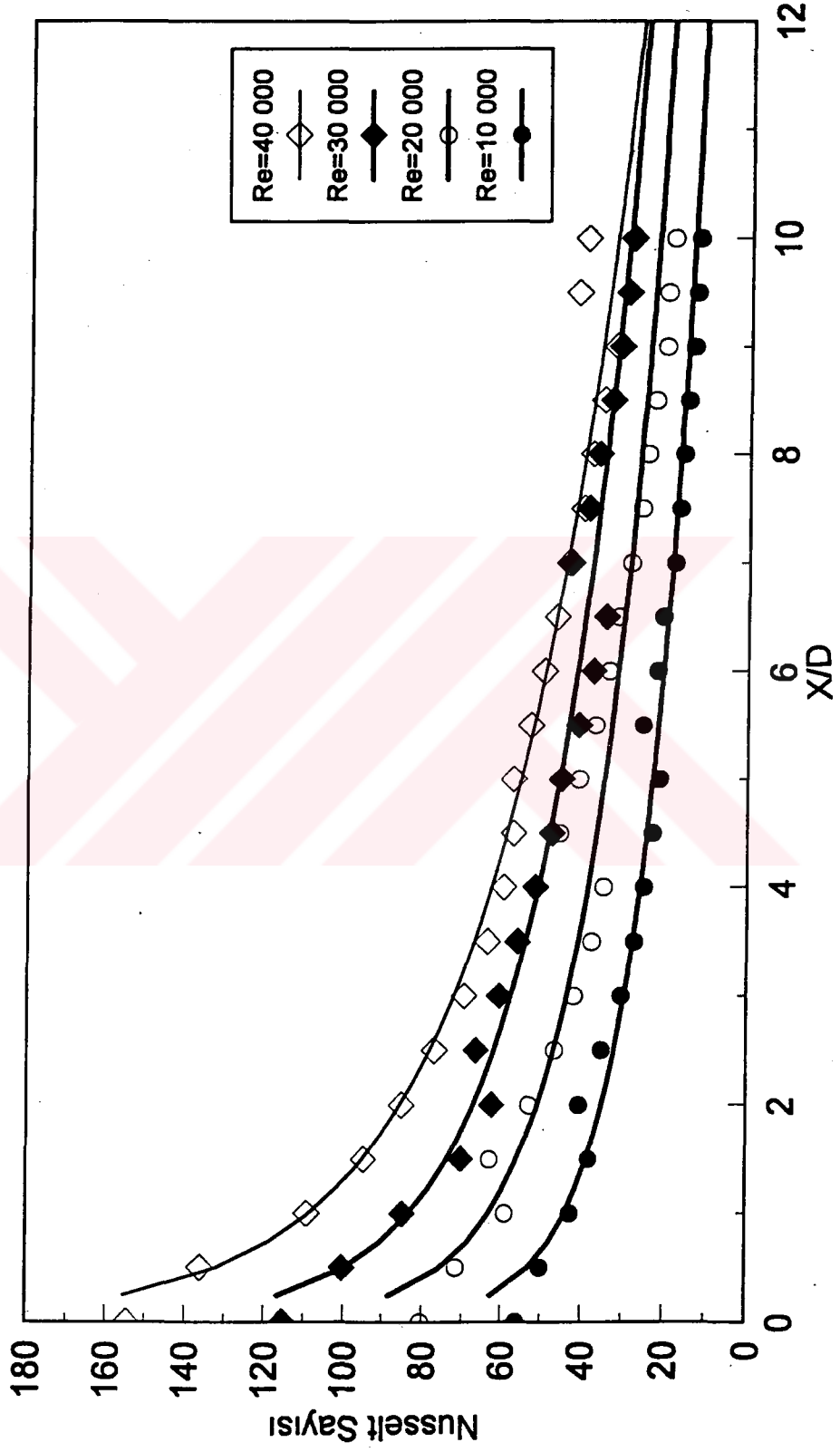
Şekil 29. Nusselt sayısının durgunluk noktası uzaklığına göre değişimi  $H/D=7$ .



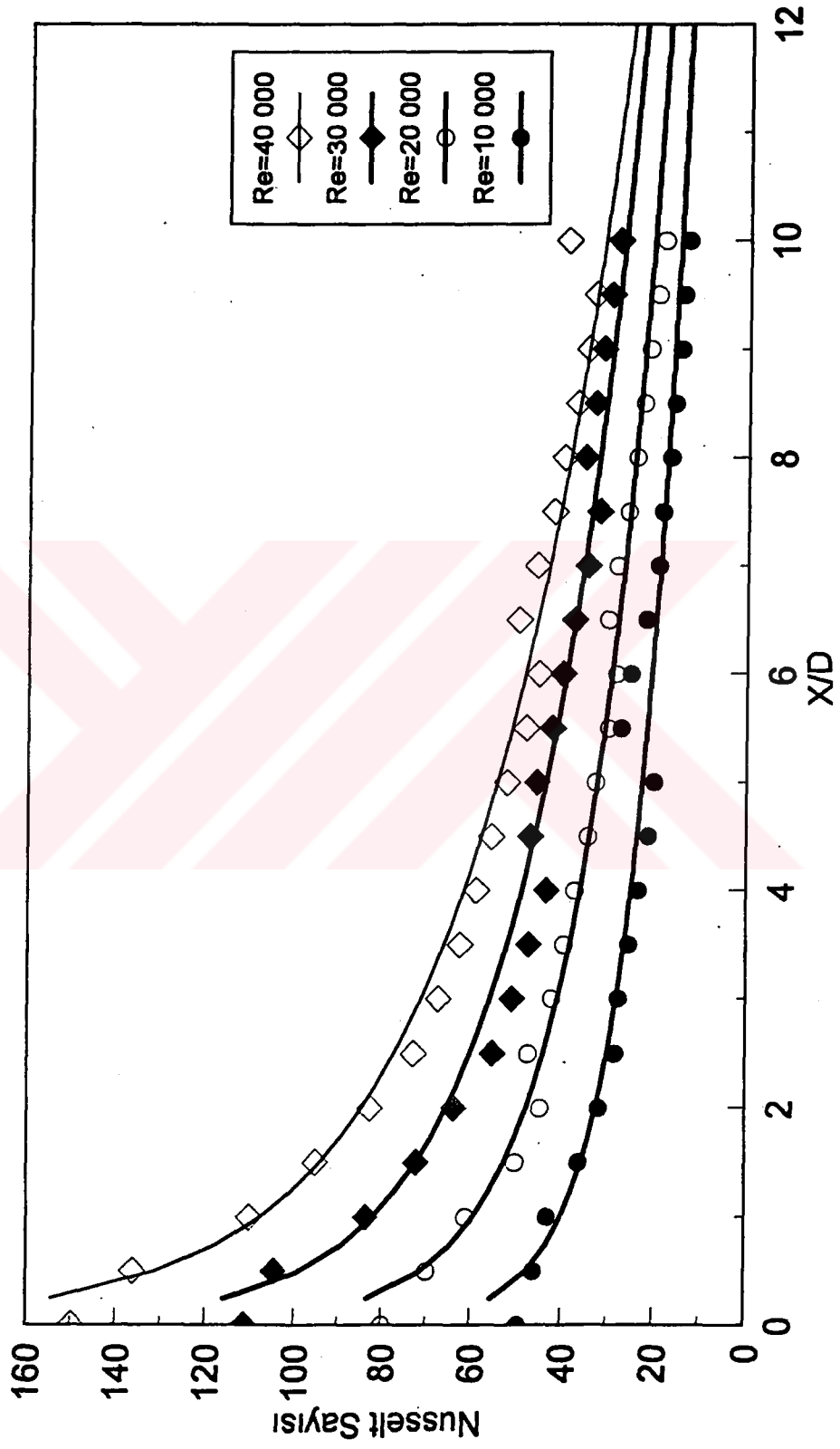
Şekil 30. Nusselt sayısının, durgunluk noktası uzaklığına ile değişimi,  $H/D=8$ .



Şekil 31. Nusselt sayısının, durgunluk noktası uzaklığına göre değişimi,  $H/D=10$ .



Şekil 32. Nusselt sayısının, durgunluk noktası uzaklığına ile değişimi,  $H/D=12$ .



Şekil 33. Nusselt sayısının, durgunluk noktası uzaklığına göre değişimi,  $H/D=14$ .



Eğik jetlerde Reynolds sayısı 30 000 için dağıllım eğrileri, H/D oranı 7,10 ve 14 için sırasıyla Şekil 34-36, 37-39, 40-42'de gösterilmiştir. Her bir Şekil gurubunda değişik eğim aılları ( $90^\circ, 75^\circ, 60^\circ$  ve  $45^\circ$ ) için sonuçlar tek tek grafiklerde gösterilmiştir. Her bir eğim açısı için kesiksiz çizgiler X eksenini boyuncaki dağıllımı gösterirken, kesikli çizgiler Y eksenini boyuncaki dağıllımı (yanlıŐ H/D=10 için) gösterirler. Tüm ordinatlar Nusselt sayısını gösterirken, apsiste X ve Y eksenlerindeki uzaklıklar, jet lüle apı (D) cinsinden verilmiştir. Reynolds sayısının, dağıllım eğrileri üzerine etkisi Tablo 2'de verilmiştir.

### 3.4. EŞ (sabit) Isı Transfer Katsayı çizgileri

Çarpma yüzeyinde, pozitif X eksenini yönünde  $X/D=1, 2.5, 5, 8, 9, 10$  mesafelerinde, eş (sabit) ısı transfer katsayı çizgileri,  $H/D = 10$  mesafesi,  $Re = 30\ 000$  ve jet eğim aılları  $90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ$  için hazırlanmıŐtır.

EŞ ısı transfer katsayısı çizgileri diyagramında apsis; simetri (X) eksenini, ordinatta; simetri olmayan (Y) eksenini gösterecek Şekilde izilmiŐtir. Her bir Şekilde eş nokta çizgileri, yukarıda verilen  $X/D$  noktalarından geçen eğriler Şeklinde Şekil 43-47'de çizilmiştir. Eğik jetlerde özel bir durum, geometrik çarpma noktasını göstermek üzere, apsiste bir ok iŐaretlenmiŐtir.

### 3.5 Maksimum Isı Transfer Katsayısı

Maksimum ısı transfer katsayılarının değeri pratik öneme sahiptir, çünkü bunlar, çarpan jetin ısıtma ve soğutma kapasitelerinin göstergesidirler.

Dik jetlerde durgunluk noktasında (geometrik çarpma noktasında) llen maksimum Nusselt ( $Nu_0$ ) sayısının değeri, lüle-levha aralığı ve Reynolds sayısına göre değişimi Şekil 47'de gösterilmiştir.

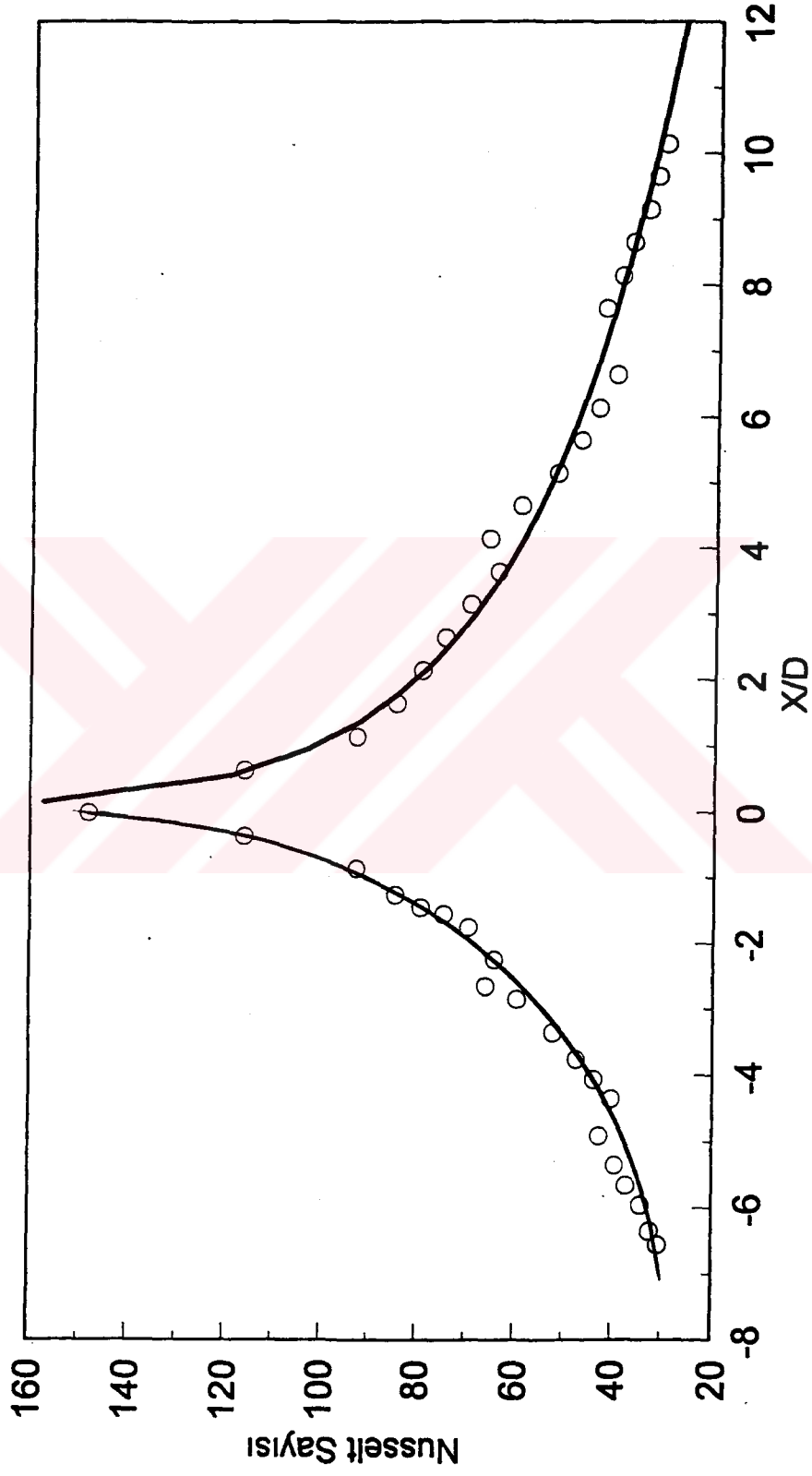
Tablo 2. Maksimum Nusselt sayısının, jet eğim açısı ve lüle-levha aralığına göre değişimi,  $Re=30\ 000$ .

| $\emptyset$ (der) | $Nu_o$    |       |       |
|-------------------|-----------|-------|-------|
|                   | $H/D = 7$ | 10    | 14    |
| 90                | 156.7     | 150.5 | 111.2 |
| 75                | 153.1     | 140.0 | 101.1 |
| 60                | 150.6     | 134.0 | 92.2  |
| 45                | 147.3     | 123.4 | 86.9  |

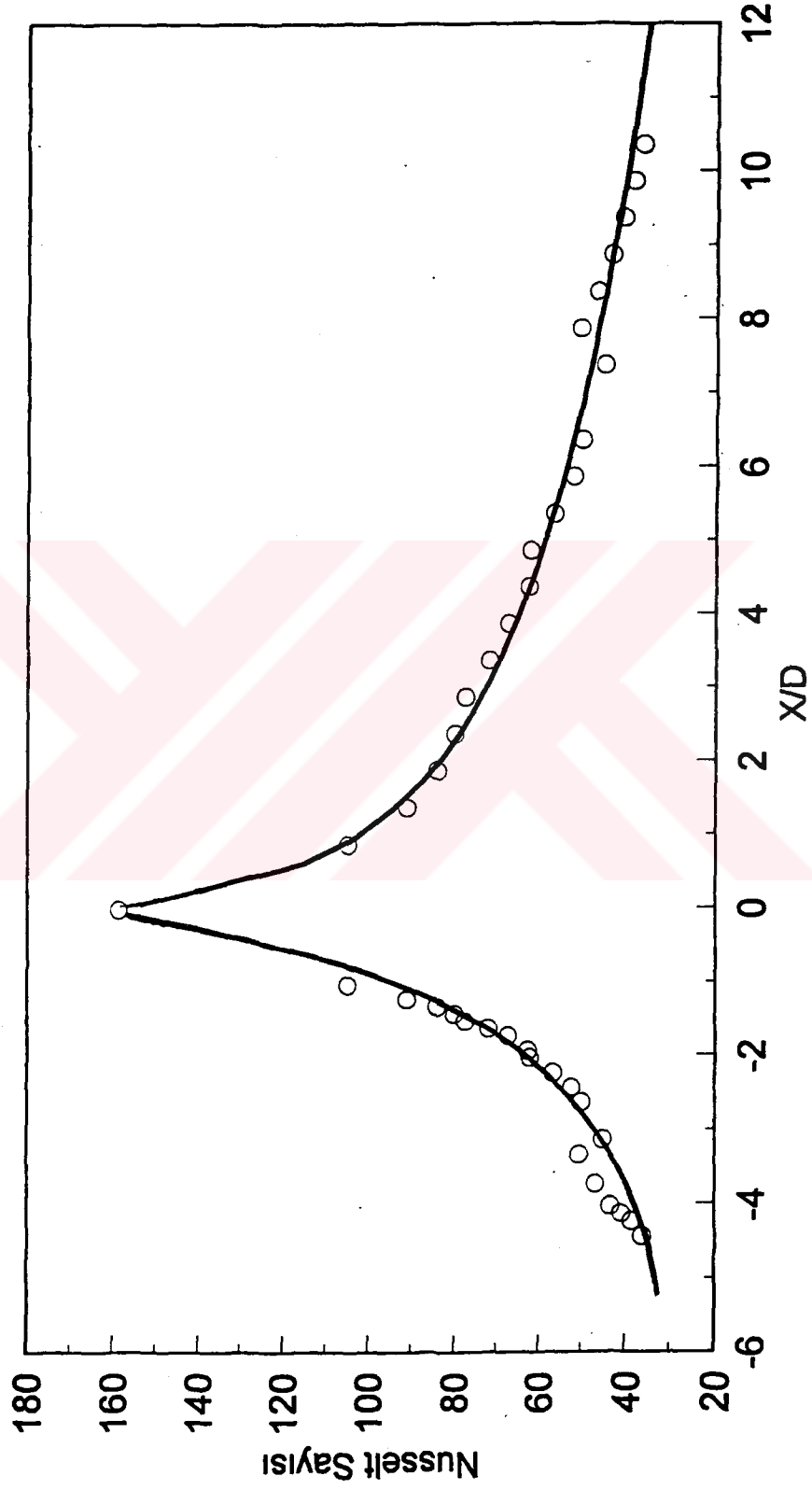
Deneylerde elde edilen maksimum ısı transfer katsayıları Tablo 2 ve 3'de birimsiz ( $Nu_o$ ) şeklinde verilmiştir. Bu tabloların ilkinde, değişik lüle-levha mesafeleri ve sabit bir Reynolds sayısında ( $Re=30\ 000$ ), jet eğim açısının etkisi görülmektedir. İkinci tabloda ise Reynolds sayısı değişiminin etkisi görülmektedir.

Tablo 3. Maksimum Nusselt sayısının, Reynolds sayısı ve jet eğim açısına göre değişimi,  $H/D=10$ .

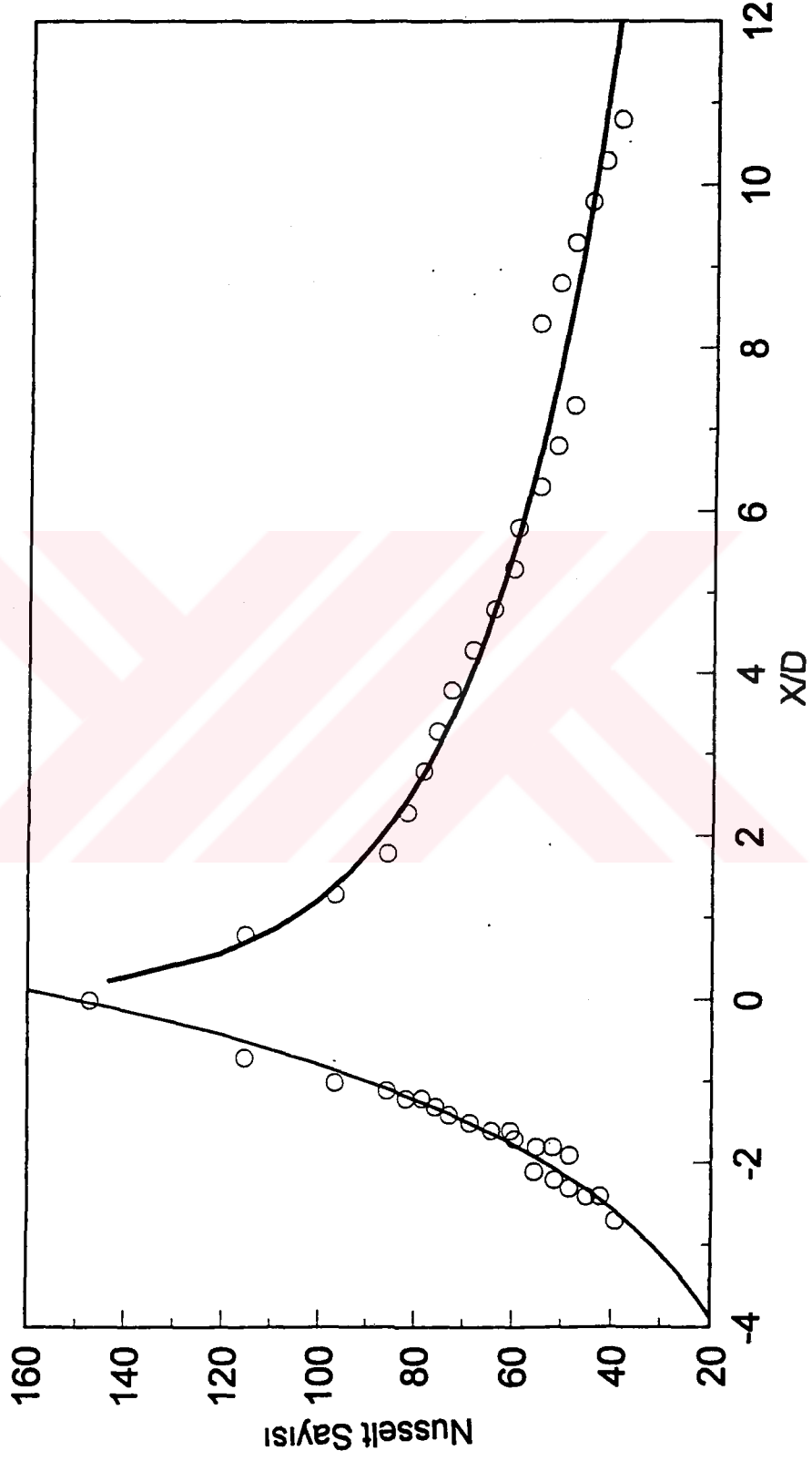
| Re     | $\emptyset$ (der)= | $Nu_o$ |       |       |       |
|--------|--------------------|--------|-------|-------|-------|
|        |                    | 90     | 75    | 60    | 45    |
| 40 000 |                    | 190.3  | 175.3 | 161.7 | 149.1 |
| 30 000 |                    | 167.5  | 140.0 | 134.0 | 123.4 |
| 20 000 |                    | 114.9  | 99.6  | 93.0  | 62.8  |
| 10 000 |                    | 74.0   | 60.8  | 57.4  | 54.0  |



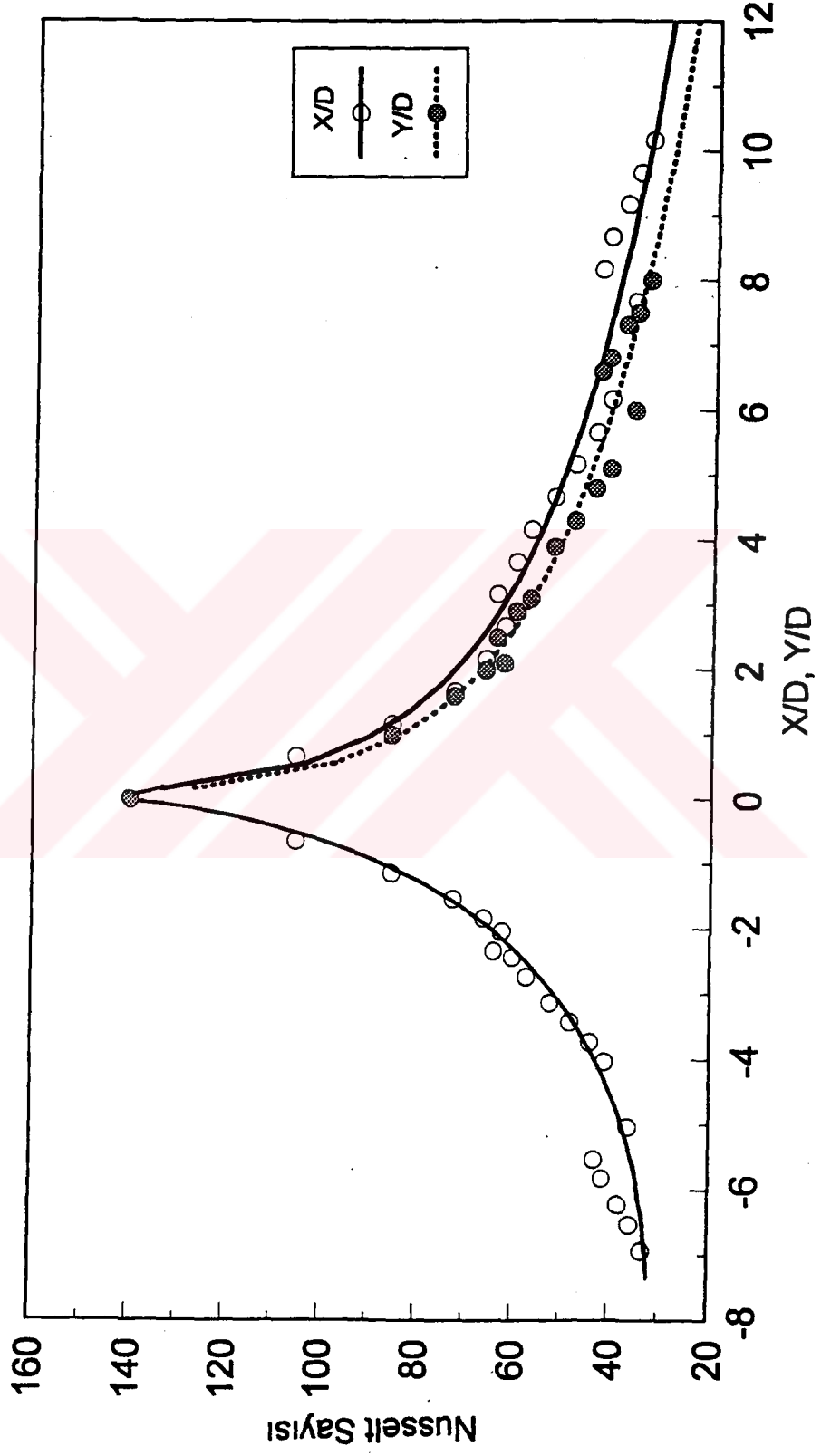
Şekil 34. Levha üzerinde X ekseninde X boyunda, Nusselt sayıları dağılımı,  $\phi=750$ ,  $H/D=7$ ,  $Re=30\,000$ .



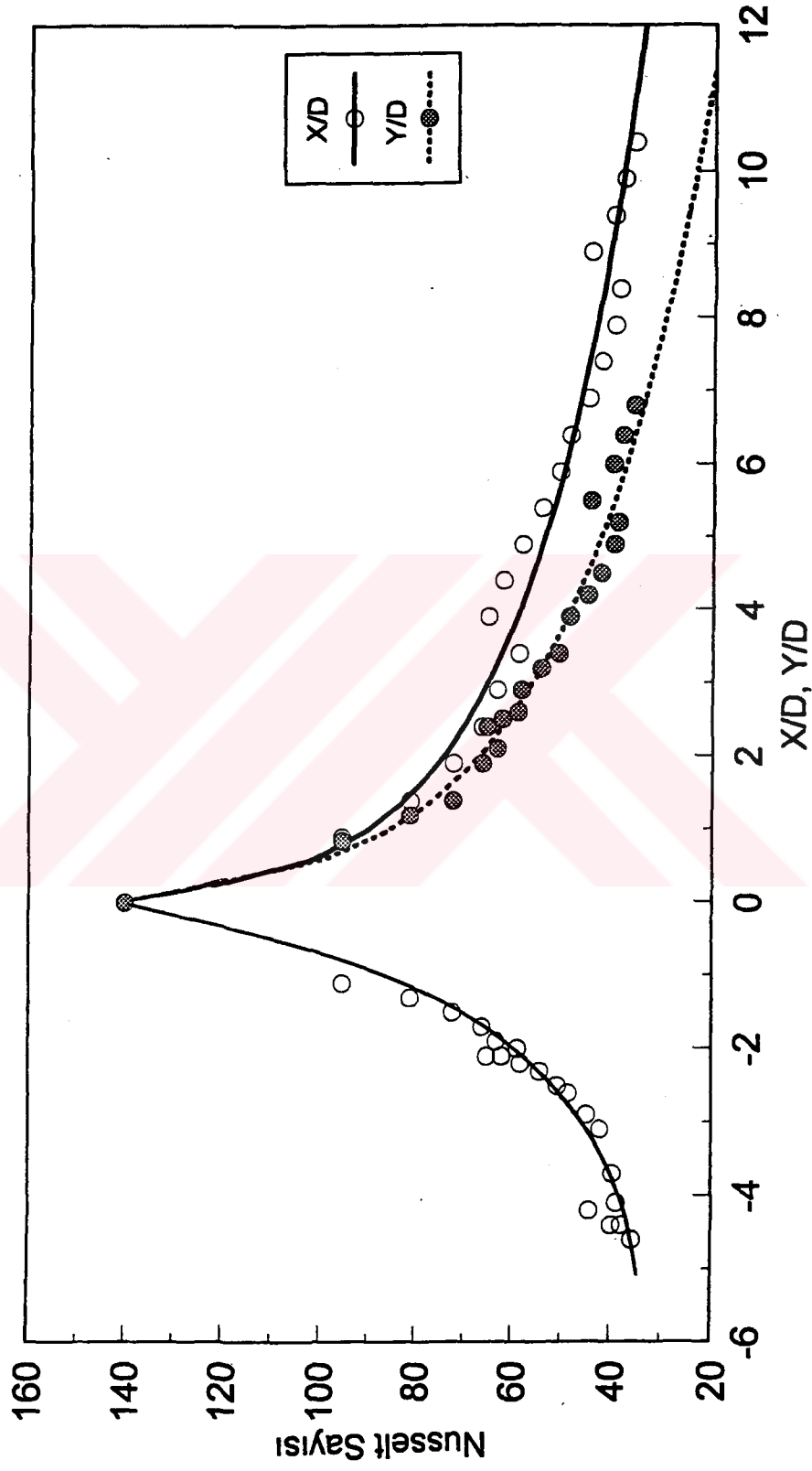
Şekil 35. Levha üzerinde X ekseninde boyunca, Nusselt sayıları dağılımı,  $\phi=60^\circ$ ,  $H/D=7$ ,  $Re=30\ 000$ .



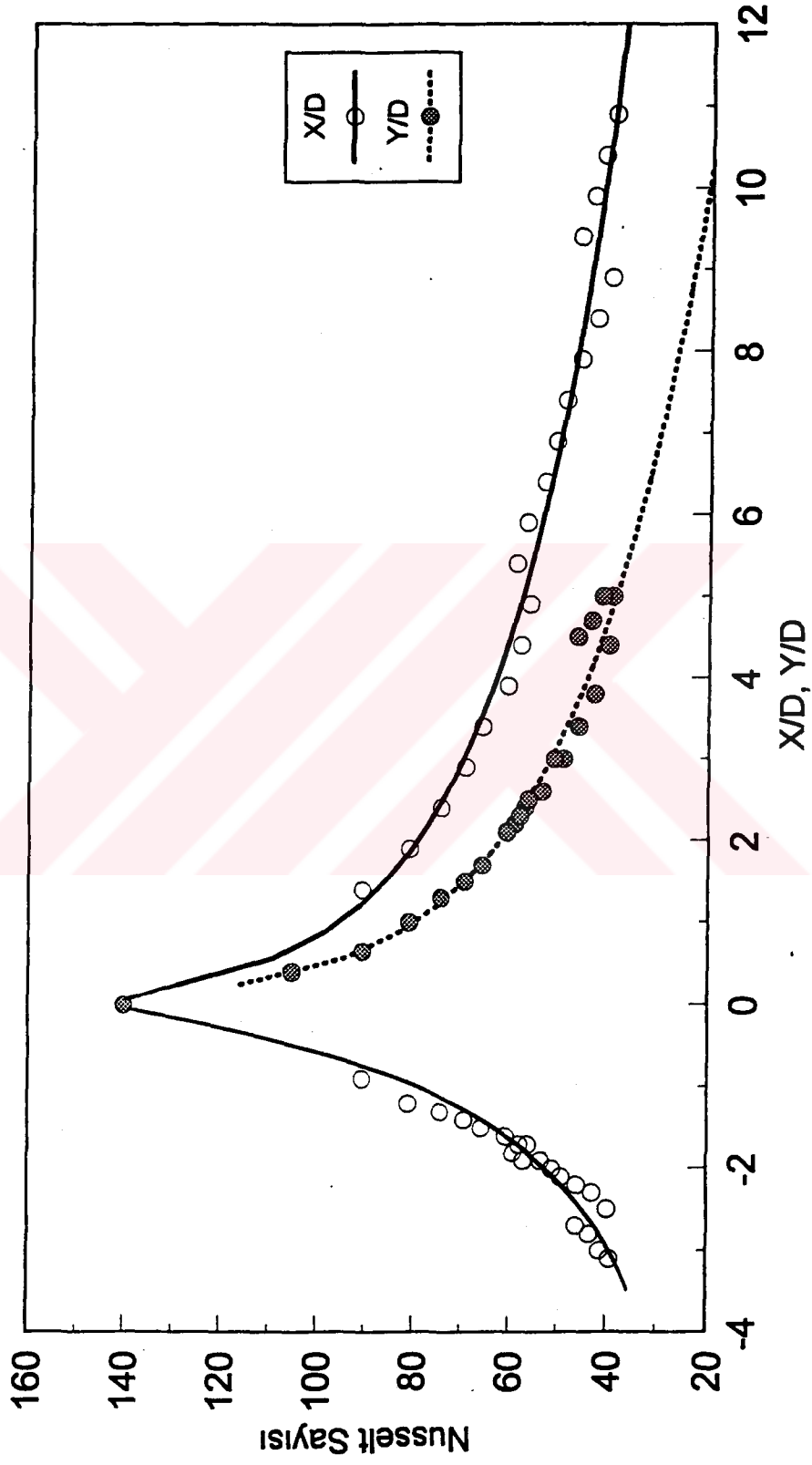
Şekil 36. Levha üzerinde X ekseninde boyunca, Nusselt sayıları dağılımı,  $\theta=45^\circ$ ,  $H/D=7$ ,  $Re=30\ 000$ .



Şekil 37. Levha üzerinde X ve Y eksenleri boyunca, Nusselt sayıları dağılımı,  $\phi=750$ ,  $H/D=10$ ,  $Re=30\ 000$ .

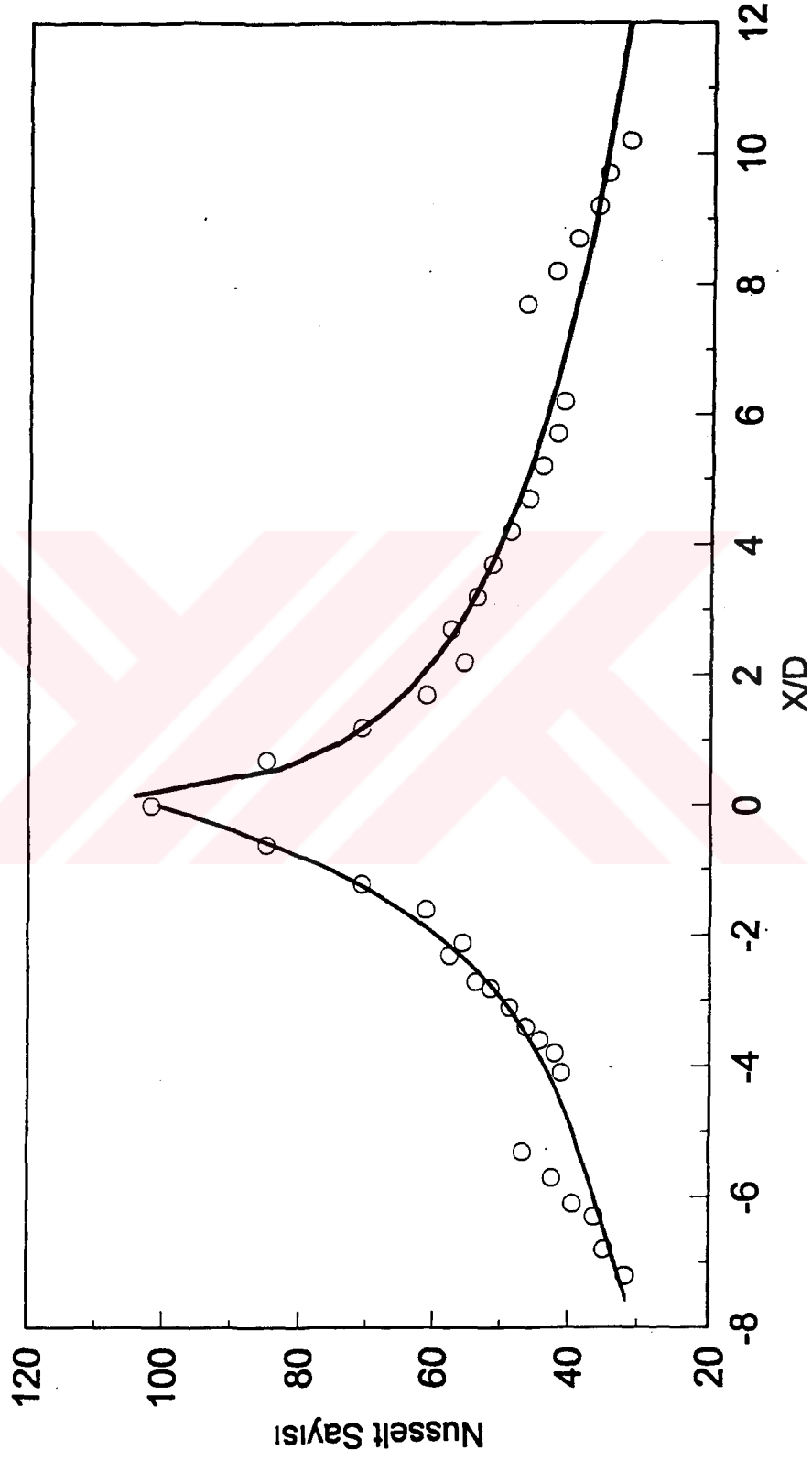


Şekil 38. Levha üzerinde X ve Y eksenleri boyunca, Nusselt sayıları dağılımı,  $\phi=60^{\circ}\text{C}$ ,  $H/D=10$ ,  $Re=30\ 000$

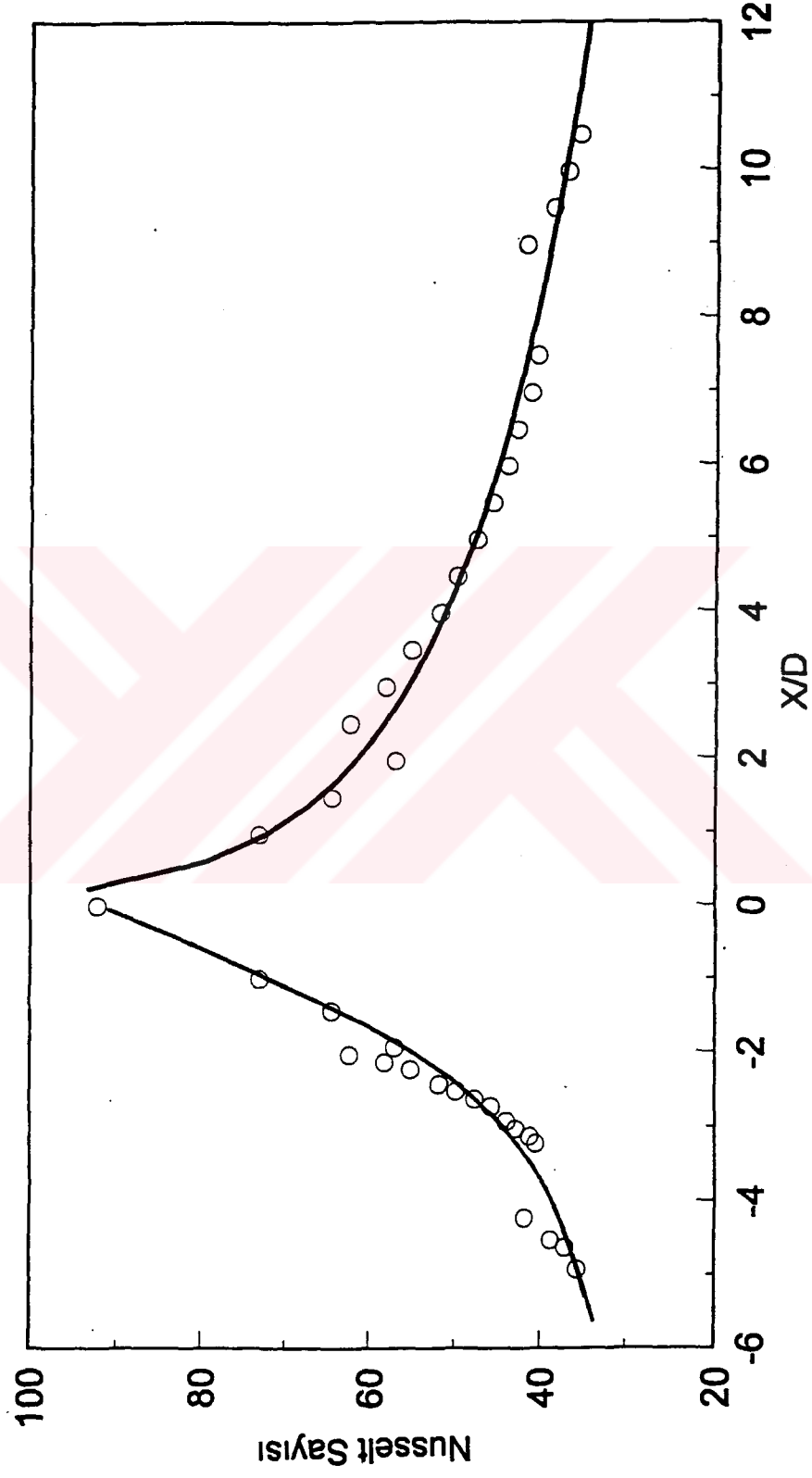


Şekil 39. Levha üzerinde X ve Y eksenleri boyunca, Nusselt sayıları dağılımı,  $\theta=45^\circ$ ,  $H/D=10$ ,  $Re=30\ 000$ .

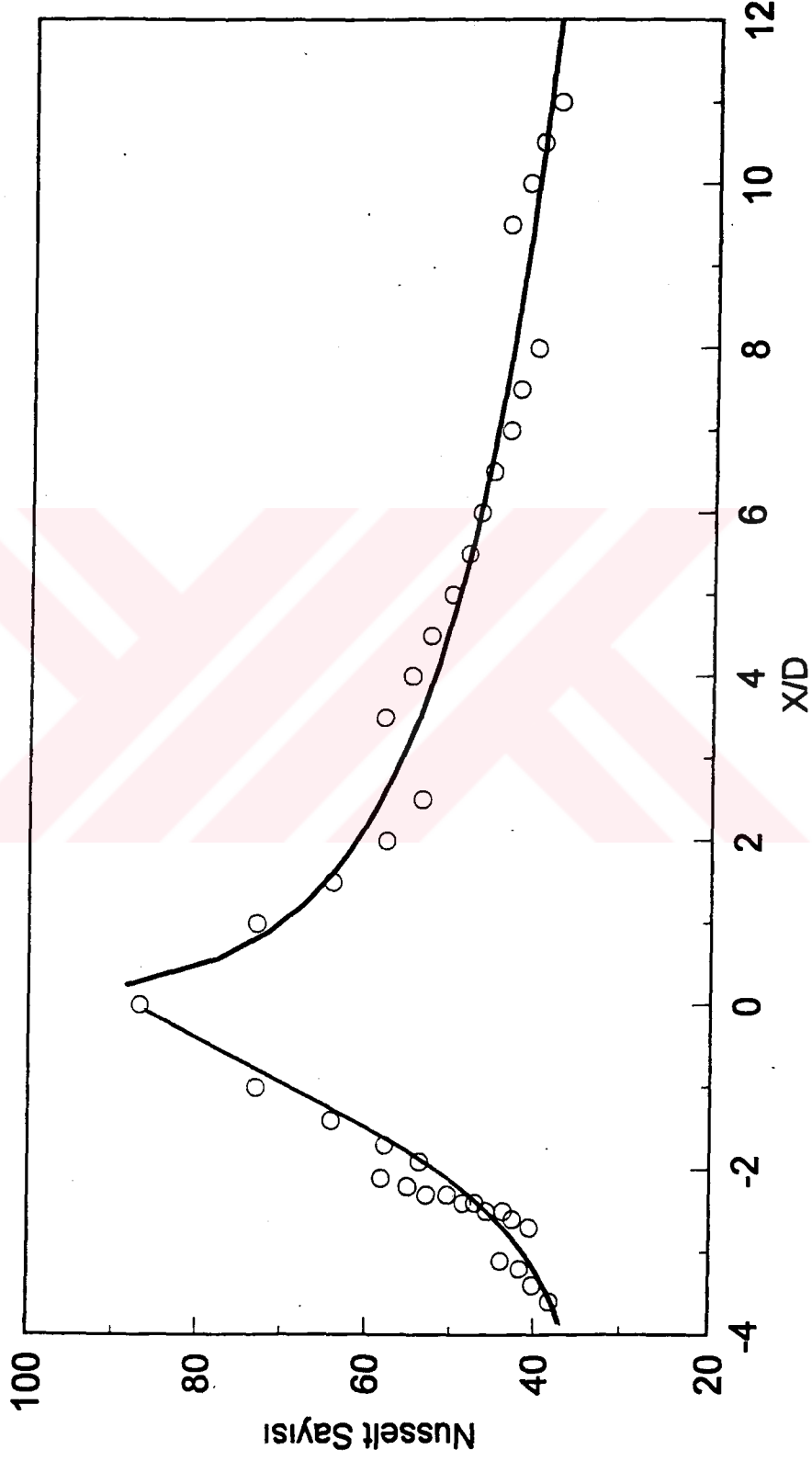




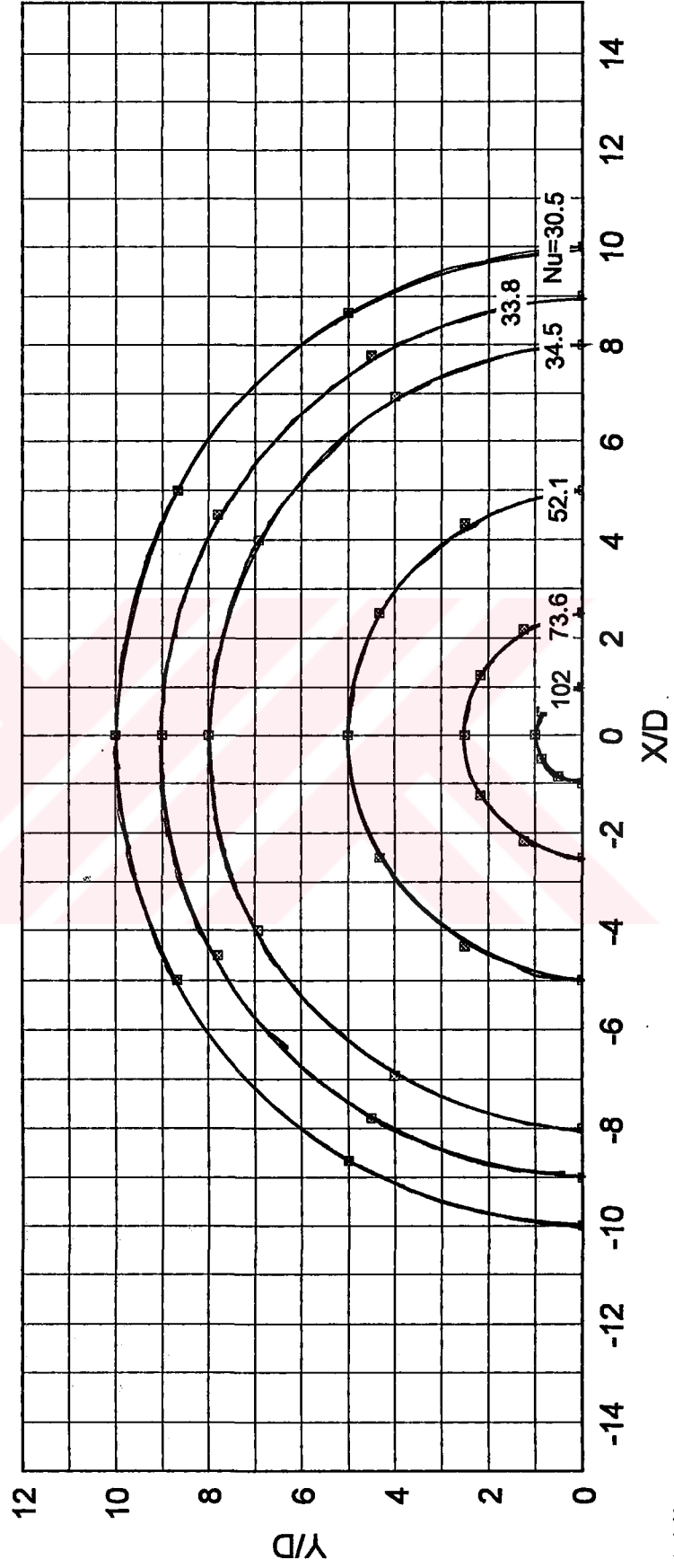
Şekil 40. Levha üzerinde X ekseninde boyunca, lokal Nusselt sayıları dağılımı,  $\theta=75^\circ$ ,  $H/D=14$ ,  $Re=30.000$ .



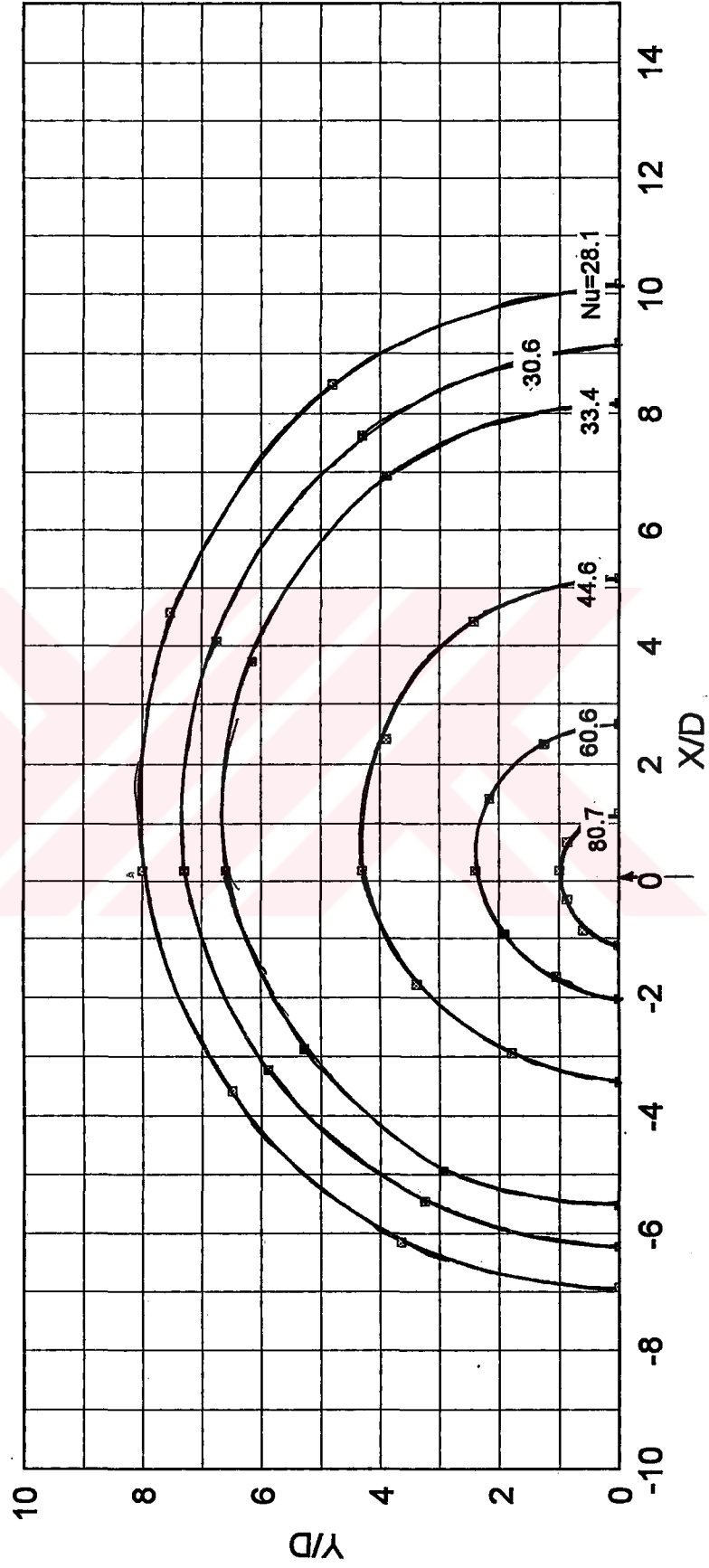
Şekil 41. Levha üzerinde X ekseninde X boyunda, lokal Nusselt sayıları dağılımı,  $\theta=60^\circ$ ,  $H/D=14$ ,  $Re=30\,000$ .



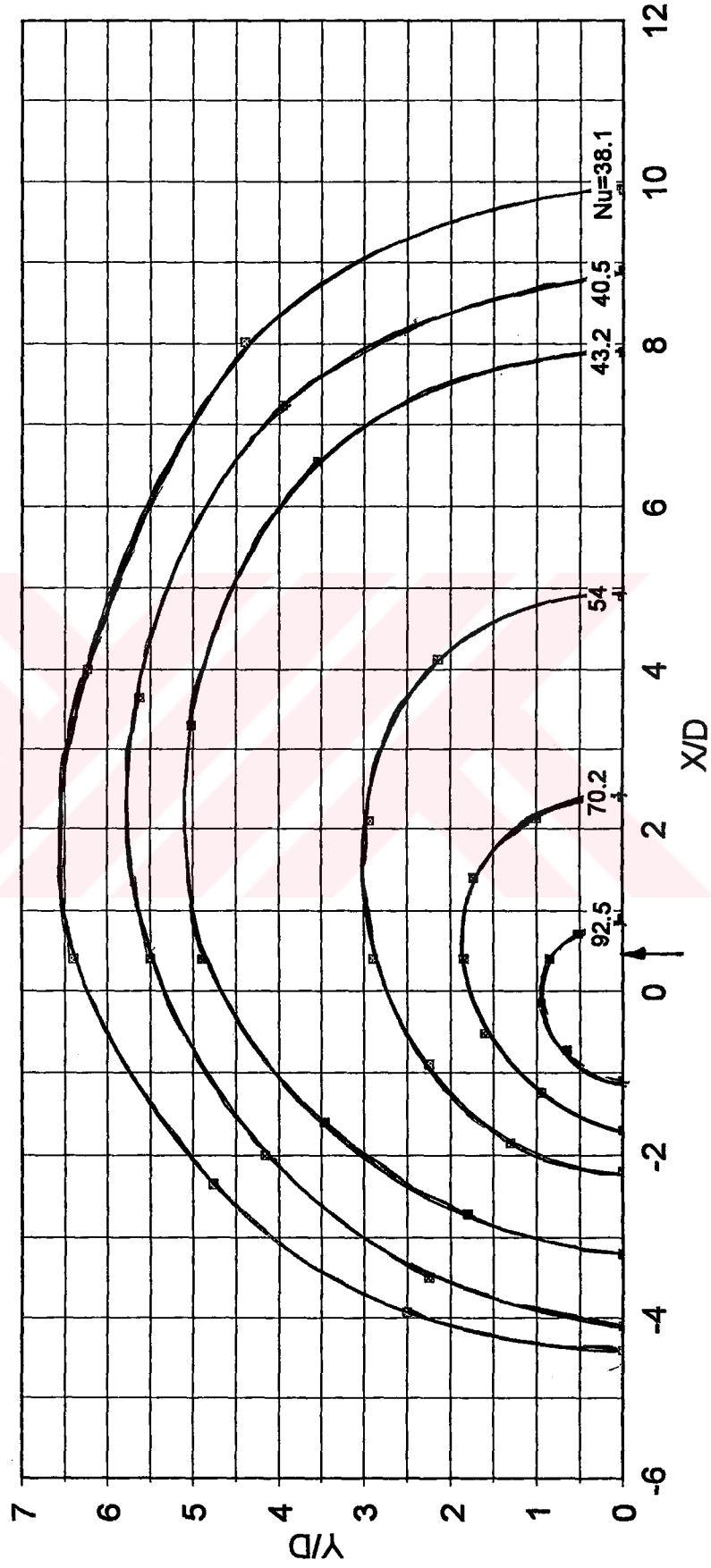
Şekil 42. Levha üzerinde X ekseninde X eksenine boyunca, lokal Nusselt sayıları dağılımı,  $\phi=45^\circ$ ,  $H/D=14$ ,  $Re=30\ 000$ .



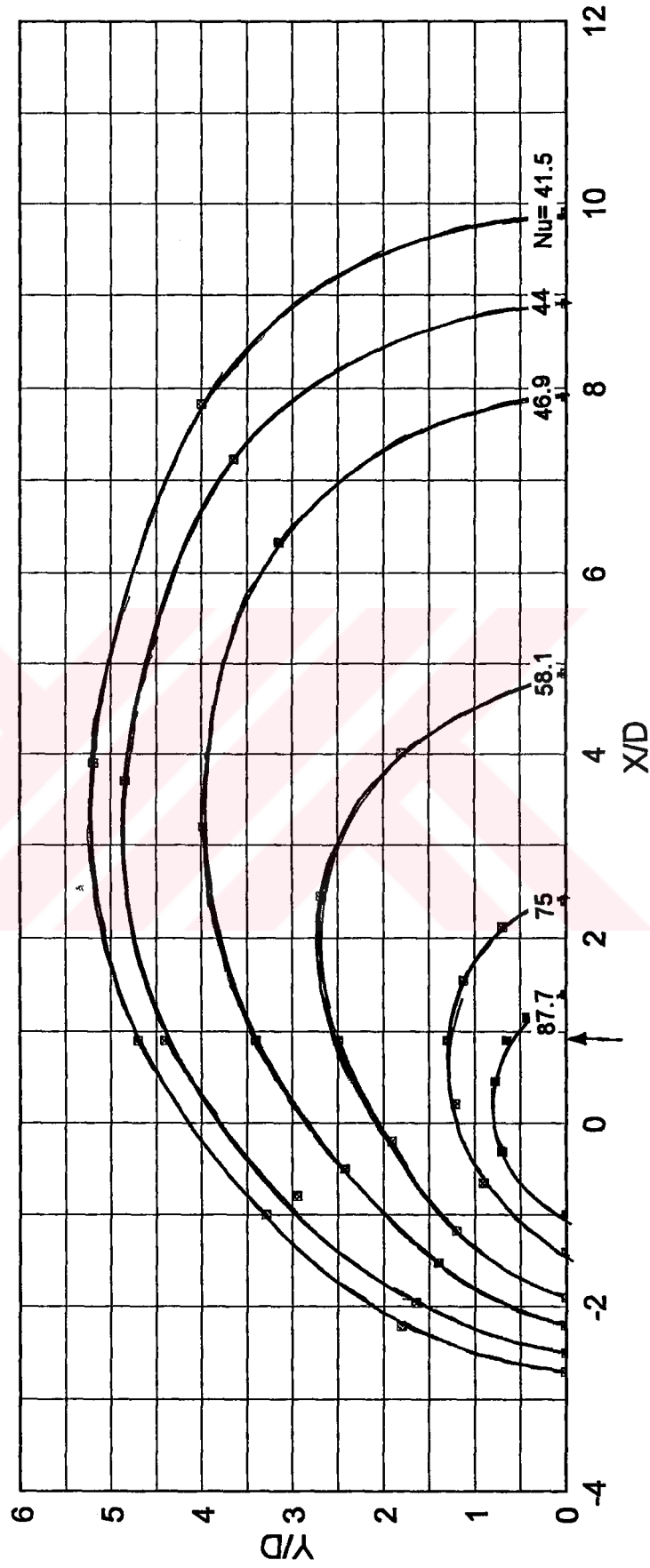
Şekil 43. Çarpma levhası üzerinde, eş Nusselt sayısı çizgileri,  $\phi=90^\circ$ ,  $H/D=10$ ,  $Re=30\ 000$ .



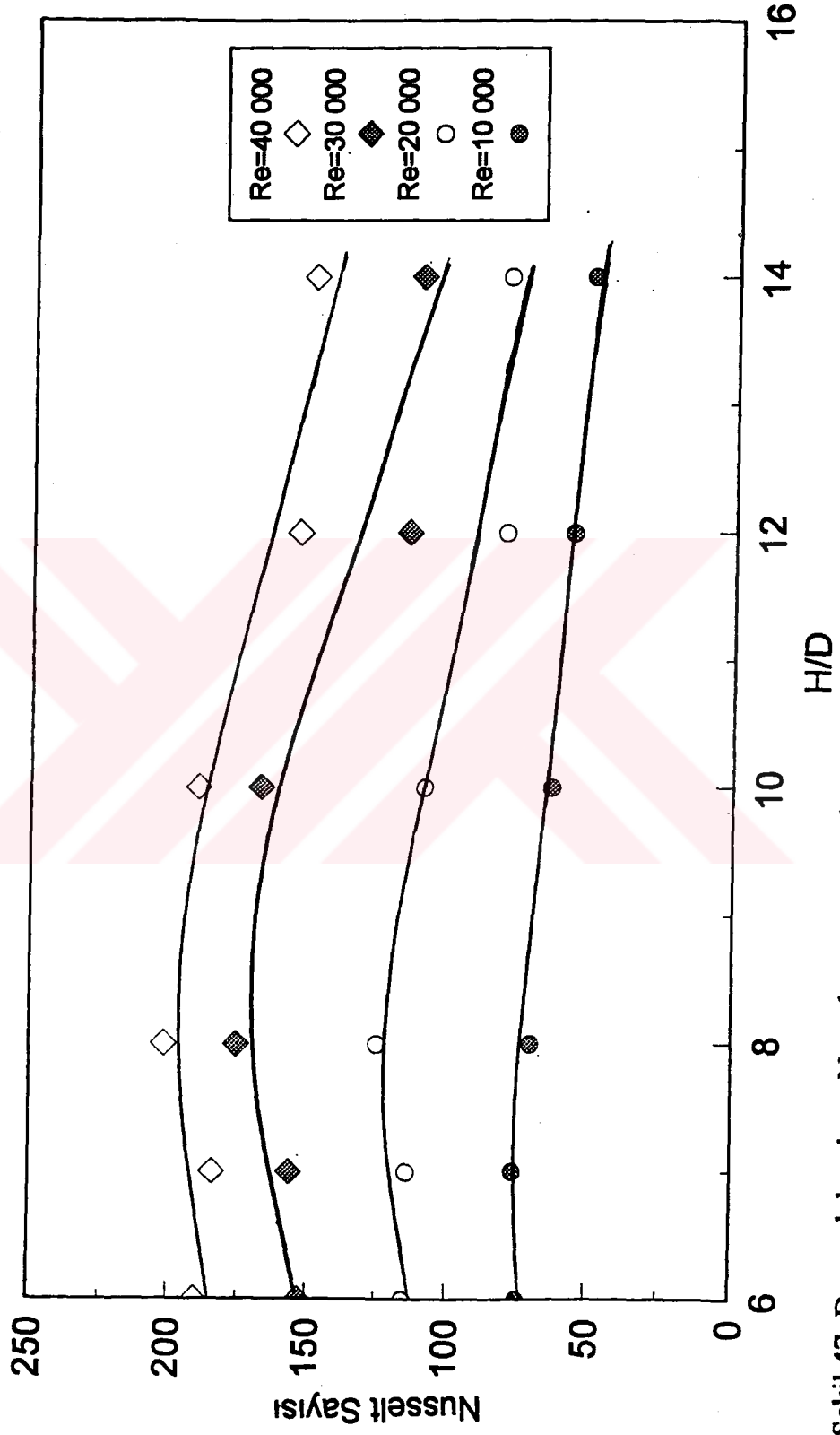
Şekil 44. Çarpma levhası üzerinde, eş Nusselt sayısı çizgileri,  $\phi=75^\circ$ ,  $H/D=10$ ,  $Re=30\ 000$



Şekil 45. Çarpma levhası üzerinde, eş Nusselt sayısı çizgileri,  $\phi=60^\circ$ ,  $H/D=10$ ,  $Re=30\ 000$ .

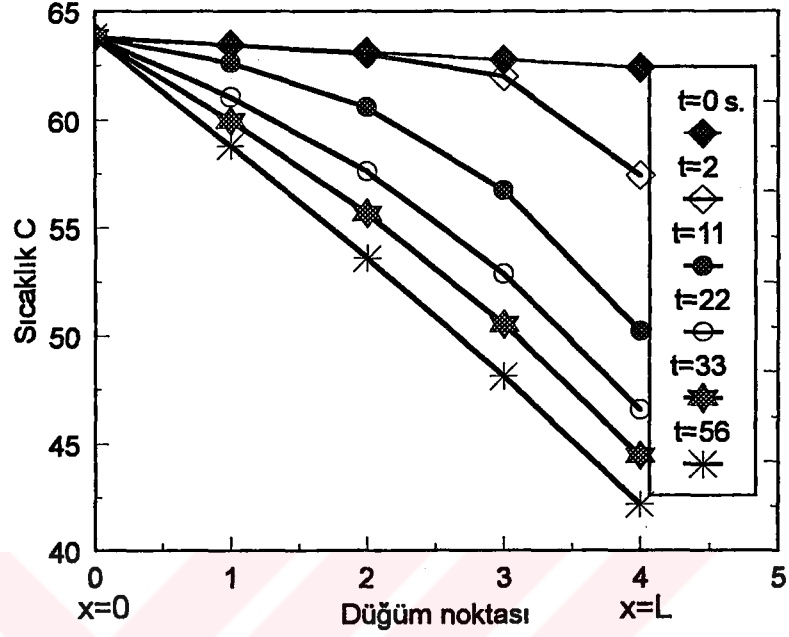


Şekil 46. Çarpma levhası üzerinde, eş Nusselt sayısı çizgileri,  $\phi=45^\circ$ ,  $H/D=10$ ,  $Re=30\ 000$ .

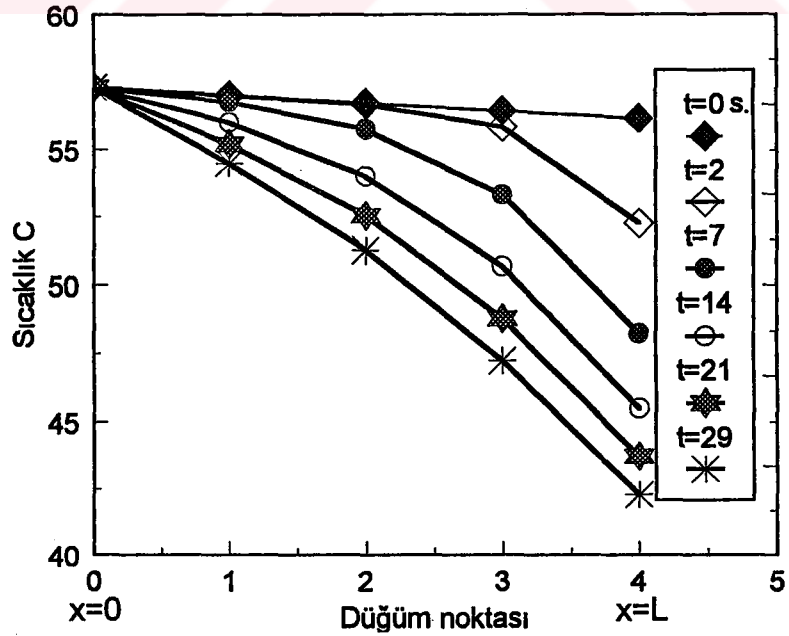


Şekil 47. Durgunluk noktası Nusselt sayısının, Lüle-levha aralığına göre değişimi.

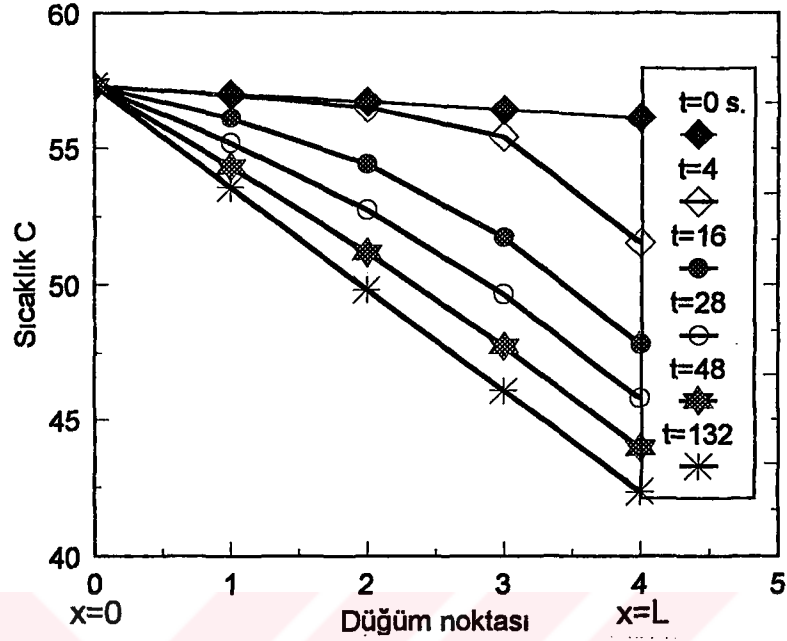




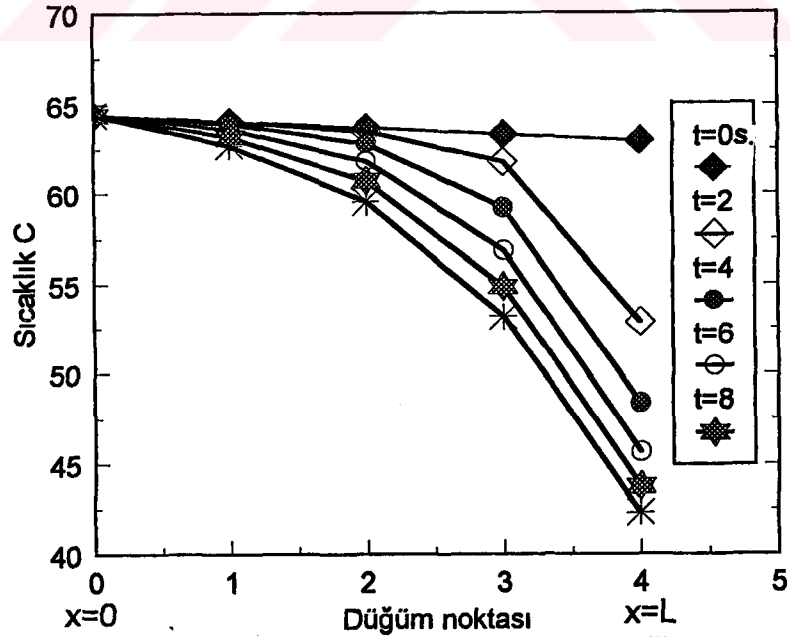
Şekil 48. Levha Kalınlığında sıcaklığın zamana göre değişimi,  
 $Re= 10\ 000$ ,  $H/D=7$ ,  $T_{OP}=63.8^{\circ}C$ ,  $T_{OA}=15.9^{\circ}C$



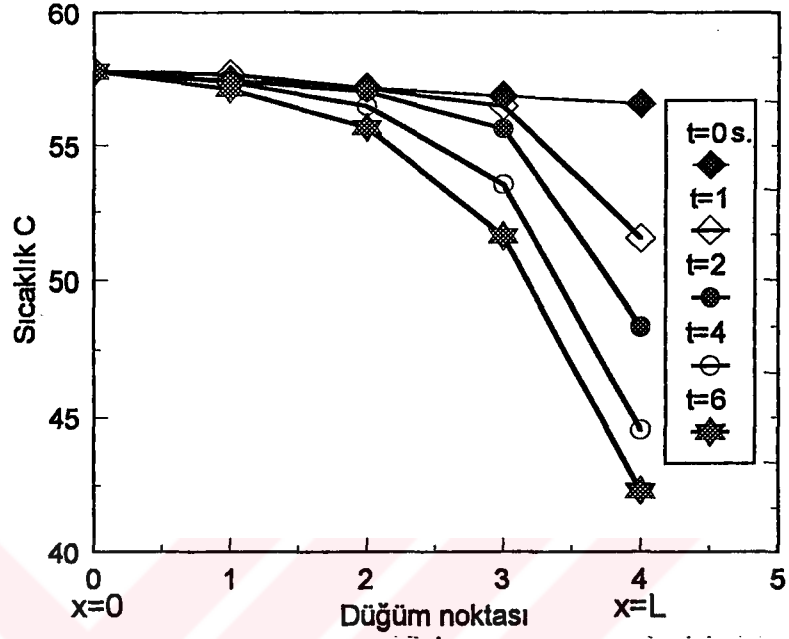
Şekil 49. Levha Kalınlığında sıcaklığın zamana göre değişimi,  
 $Re= 10\ 000$ ,  $H/D=10$ ,  $T_{OP}=57.3^{\circ}C$ ,  $T_{OA}=15.8^{\circ}C$



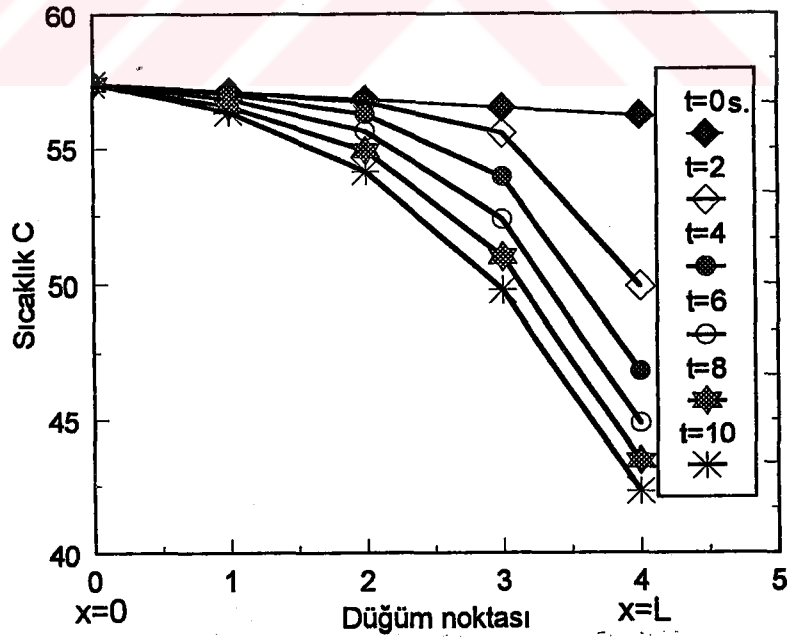
Şekil 50. Levha Kalınlığında sıcaklığın zamana göre değişimi,  
 $Re= 10\ 000$ ,  $H/D=14$ ,  $T_{OP}=57.3^{\circ}C$ ,  $T_{OA}=15.2^{\circ}C$



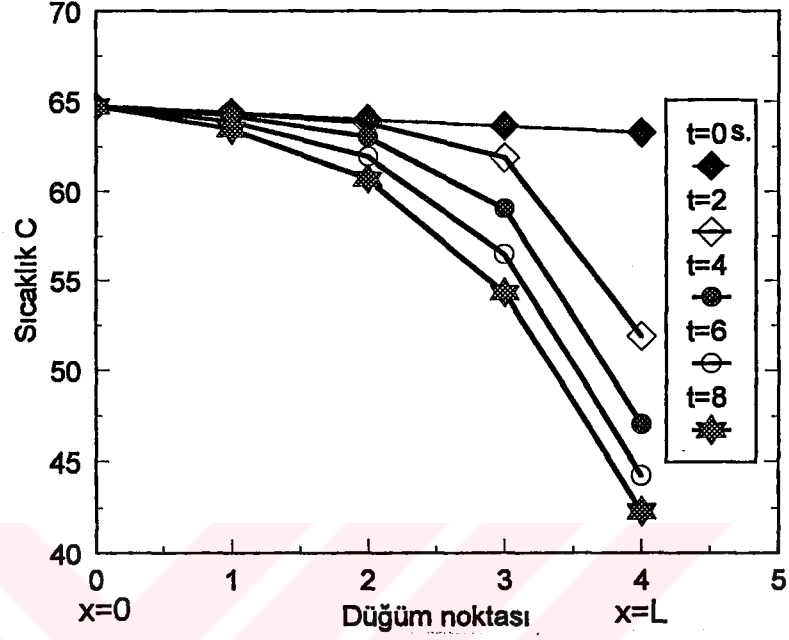
Şekil 51. Levha Kalınlığında sıcaklığın zamana göre değişimi,  
 $Re= 30\ 000$ ,  $H/D=7$ ,  $T_{OP}=64.4^{\circ}C$ ,  $T_{OA}=15.8^{\circ}C$



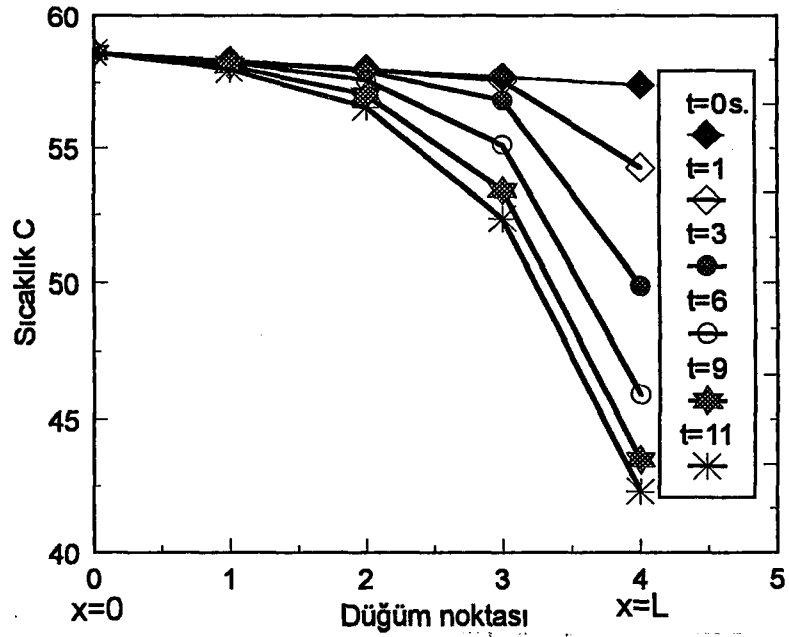
Şekil 52. Levha Kalınlığında sıcaklığın zamana göre değişimi,  
 $Re=30\,000$ ,  $H/D=10$ ,  $T_{Op}=57.8^{\circ}C$ ,  $T_{OA}=16^{\circ}C$



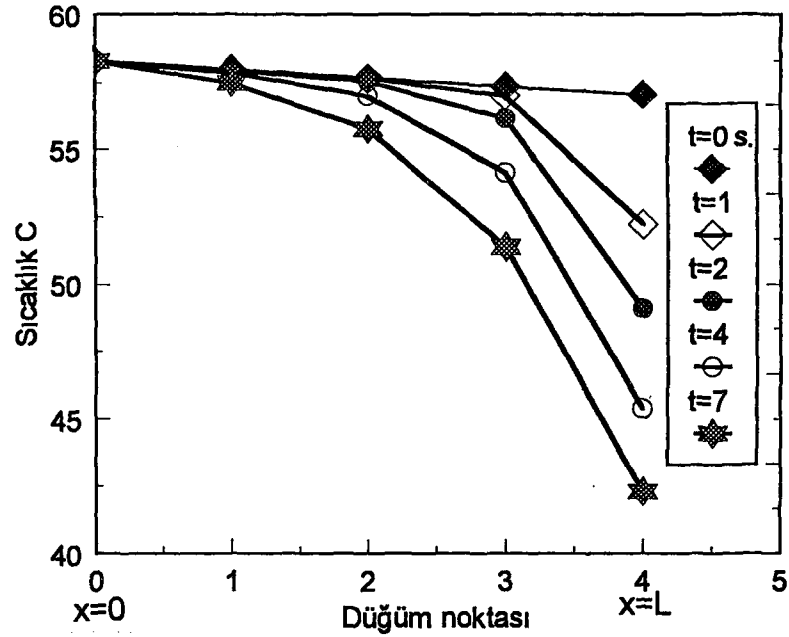
Şekil 53. Levha Kalınlığında sıcaklığın zamana göre değişimi,  
 $Re=30\,000$ ,  $H/D=14$ ,  $T_{Op}=57.4^{\circ}C$ ,  $T_{OA}=15.1^{\circ}C$



Şekil 54. Levha Kalınlığında sıcaklığın zamana göre değişimi,  
 $Re=40\,000$ ,  $H/D=7$ ,  $T_{OP}=64.7^{\circ}C$ ,  $T_{OA}=15.9^{\circ}C$



Şekil 55. Levha Kalınlığında sıcaklığın zamana göre değişimi,  
 $Re=40\,000$ ,  $H/D=10$ ,  $T_{OP}=58.6^{\circ}C$ ,  $T_{OA}=16^{\circ}C$



Şekil 56. Levha Kalınlığında sıcaklığın zamana göre değişimi,  
 $Re= 40\ 000$ ,  $H/D=14$ ,  $T_{OP}=58.3^{\circ}C$ ,  $T_{OA}=15.2^{\circ}C$

### 3.6. Durgunluk Noktasında Levha Kalınlık Yönünde Sıcaklık Dağılımı

Dik jetlerde maksimum ısı transferi geometrik çarpma noktası veya durgunluk noktasında meydana geldiği daha önce bahsedilmiştir. Bu noktada ısı transfer katsayısı hesapla bulunduğu zaman yüzeyde bu noktada jet yüzeye çarptığı zaman  $t=0$  anından itibaren durgunluk noktasında, levha kalınlık yönünde sıcaklık dağılımı nasıl olmaktadır bu dağılımlar Reynolds sayısı 40 000, 30 0000, 10 000 ve lüle-levha aralığı  $H/D$  7,10,14 için Şekil 48-56 aralığında verilmiştir.

### 3.7. Deney Sonuçlarından Elde Edilen Ampirik Bağlantılar

Aşağıda verilen tüm eğri denklemleri,  $0 \leq X/D \leq 10$  için geçerlidir

#### 3.7.1. Dik Çarpan Jetlerde Nusselt Sayısı Dağılımı

a) lüle-levha aralığı  $H/D=6$  için;

$$Nu=a(Re)+b(Re) \cdot \ln(X/D) \dots \dots \dots (26.a)$$

$$a=47.9369+ 8.06223.10^{-4}.Re+3.40812.10^{-8}.Re^2 \dots \dots (26.b)$$

$$b=-9.3676-0.001676.Re+6.704.10^{-8}Re^2 \\ -1.18698.10^{-12}.Re^3 \dots \dots \dots (26.c)$$

b) lüle-levha aralığı H/D=7 için;

$$Nu=a(Re)+b(Re).Ln(X/D) \dots \dots \dots (27.a)$$

$$a=38.1348+0.000182211.Re+9.92024.10^{-9}.Re^2 \dots \dots \dots (27.b)$$

$$b=-16.9031-0.0006251585.Re-7.5805.10^{-9}.Re^2 \dots \dots \dots (27.c)$$

c) lüle-levha aralığı H/D=8 için;

$$Nu=a(Re)+b(Re).Ln(X/D) \dots \dots \dots (28.a)$$

$$a=22.8314+ 0.0028607.Re+-4.70574.10^{-9}.Re^2 \dots \dots \dots (28.b)$$

$$b=-7.827-0.000883824.Re+1.855.10^{-9}.Re^2 \dots \dots \dots (28.c)$$

d) lüle-levha aralığı H/D=10 için;

$$Nu=a(Re)+b(Re).Ln(X/D) \dots \dots \dots (29.a)$$

$$a=24.3854+ 0.00223011.Re+1.21398.10^{-8}.Re^2 \dots \dots \dots (29.b)$$

$$b=-8.84668-0.000564891.Re-6.78075.10^{-9}.Re^2 \dots \dots \dots (29.c)$$

e) lüle-levha aralığı, H/D=12 için;

$$Nu=a(Re)+b(Re).Ln(X/D) \dots \dots \dots (30.a)$$

$$a=28.7279+ 0.00139.Re+1.51397.10^{-8}.Re^2 \dots \dots \dots (30.b)$$

$$b=-11.7198-3.61591.10^{-5}.Re-1.24005.10^{-8}.Re^2 \dots \dots \dots (30.c)$$

f) lüle-levha aralığı H/D=14 için;

$$Nu=a(Re)+b(Re).Ln(X/D) \dots \dots \dots (31.a)$$

$$a=23.6293+ 0.0014803.Re+1.5556.10^{-8}.Re^2 \dots \dots \dots (31.b)$$

$$b = -6.81082 - 0.000334319 \cdot Re - 8.05725 \cdot 10^{-9} \cdot Re^2 \dots \dots \dots (31.c)$$

### 3.7.2. Eğik Çarpan Jetlerde Nusselt Sayısı dağılımı

Şekiller üzerindeki pozitif X ve Y eksenlerdeki eğrilerin denklemi, lüle levha aralığı  $H/D=7, 10, 14$  ve jet eğim açısı  $\emptyset=75, 60, 45$  derece için,

$$Nu = a + b \cdot \ln(X/D) \dots \dots \dots (32.a)$$

$$Nu = a + b \cdot \ln(Y/D) \dots \dots \dots (32.b)$$

formundadır ve katsayılar, üsteki aralıklar için aşağıda Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Eğik jetlerde Nusselt sayısı için elde edilen eğrilerin (denklem) katsayıları.

|                 |   | H/D=7 |        | H/D=10 |        | H/D=14 |        |
|-----------------|---|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 |   | a     | b      | a      | b      | a      | b      |
| $\emptyset=75,$ | X | 102.1 | -30.34 | 84.48  | -24.29 | 73.6   | 16.83  |
|                 | Y |       |        | 83.71  | -23.92 |        |        |
| $\emptyset=60,$ | X | 104.4 | -27.18 | 90.08  | -22.68 | 72.0   | -15.07 |
|                 | Y |       |        | 85.75  | -27.08 |        |        |
| $\emptyset=45,$ | X | 105.8 | -26.65 | 95.66  | -23.61 | 70.31  | -12.92 |
|                 | Y |       |        | 79.90  | -25.75 |        |        |

## 4. İRDELEME VE DEĞERLENDİRME

### 4.1 Giriş

Deneyler sırasında alınan ölçümlerde, üç ayrı deneyle taranan 10.D mesafesinde, ilk yapılan deney hariç, sonra yapılan iki deney sonucunda bulunan ısı transfer katsayıları, bir önce yapılan deneyde, bulunan ısı transfer katsayılarını izlemesi gerekir, eğer izlemiyorsa, iki deney arasında yeterli süre beklenilmediğini gösterir, başka bir deyişle deney koşulları başlangıç koşullarına erişmemiş demektir. Deneylerde, bu bölümde verilen şekillerde, ikinci ve üçüncü deneyin katsayıları birbirini izlerken, başlangıçta bir miktar üstten başlamıştır, sonra eğri düzleşmiştir. Bu durum iki deney arasında beklenen 20 dakikalık sürenin yeterli olmadığını, bu sürenin biraz daha arttırılması gerektiğini göstermiştir. Deney başlangıç koşullarının veriler üzerindeki etkisi, renklerin ilk ortaya çıktığı veya rengin hızla ilerlediği yerlerde çok fazla olmakta, rengin ilerleyişinin yavaş ve daralarak ilerlediği yerlerde ise, başlangıç koşullarının etkisi kaybolmaktadır. Deneylerde renk aralığı dar ve normal hızda ilerleyen yerlerde ölçümler alınmaya çalışılmıştır.

### 4.2. Maksimum Isı Transfer Noktası

Şekil 26'dan görüldüğü gibi, jetin eğimi  $90^{\circ}$ 'den  $45^{\circ}$ 'ye doğru azaldıkça yer değiştirme de lineer olarak artar. Değerlerin ortalamasından geçen çizgi, jet eğimi için önce lineer, daha sonra küçük jet eğim açıları için ise, eğri çok daha dik olacak şekilde yükselir. Deneysel verilerin dağılımında S'in H ile normalizasyonu, lüle-plaka mesafesinin etkisini iyi bir şekilde açıklamaktadır.



Geometrik çarpma noktasından sapmada, lüle-levha aralığı  $H$  ile değerlerin kıyaslanmasında bazı görüşler kazanılabilir. En küçük jet eğim açısı ( $45^\circ$ ) ile çalışıldığında,  $H/D$  mesafesi 7, 10 ve 14 için yer değiştirme mesafeleri sırasıyla  $0.8.D$ ,  $0.9.D$  ve  $0.95.D$  kadar olmuştur.

Yuvarlak eğik jetler için maksimum ısı transferinin yer değiştirme mesafeleri, literatürde pek ölçülmüş gözükmemektedir, dolayısıyla Şekil 26'nın literatür ile mukayesesi direk mümkün değildir. Bu çalışmalardan birinde Sparrow [11], kütle transfer oranını ölçmüş ve daha sonra uygun bir analogi ile ısı transfer katsayılarına geçiş yapmıştır. Sparrow'un çalışmasında maksimum kütle transferinin olduğu nokta, maksimum ısı transfer noktası olarak tanımlanmıştır. Çalışmada Reynolds sayısı farklıdır ( $Re=5\ 000$ ), ayrıca çarpan jette, basınçlı hava elde edilmemiş, emme moduna göre jet havası elde edilmiştir. Lüle yerine ise, keskin kenarlı bir orifis kullanmıştır. Bu durum, hem jet çıkış hız profilini, hem de akımın türbülans seviyesini etkilemiştir.

Başka bir çalışmada Beltaus [34], bir çarpma levhası yüzeyindeki statik basınçları ölçmüş ve maksimum basınç noktasını, durgunluk noktası olarak tayin etmiştir. Bu çalışmada hem Reynolds sayısı, hem de lüle- plaka mesafeleri mevcut çalışmadan farklı alınmıştır ( $35\ 000 < Re < 100\ 000$  ve  $15 < H/D < 47$ ). Ayrıca lüle yerine yuvarlak daralan nozul ile üflenen hava jeti kullanmıştır. Şekil 26'da Beltaus'un eğrisi, geometrik çarpma noktası ile (bu noktayı durgunluk noktası olarak tanımlamıştır) maksimum basıncın yer değiştirme mesafesini göstermektedir.

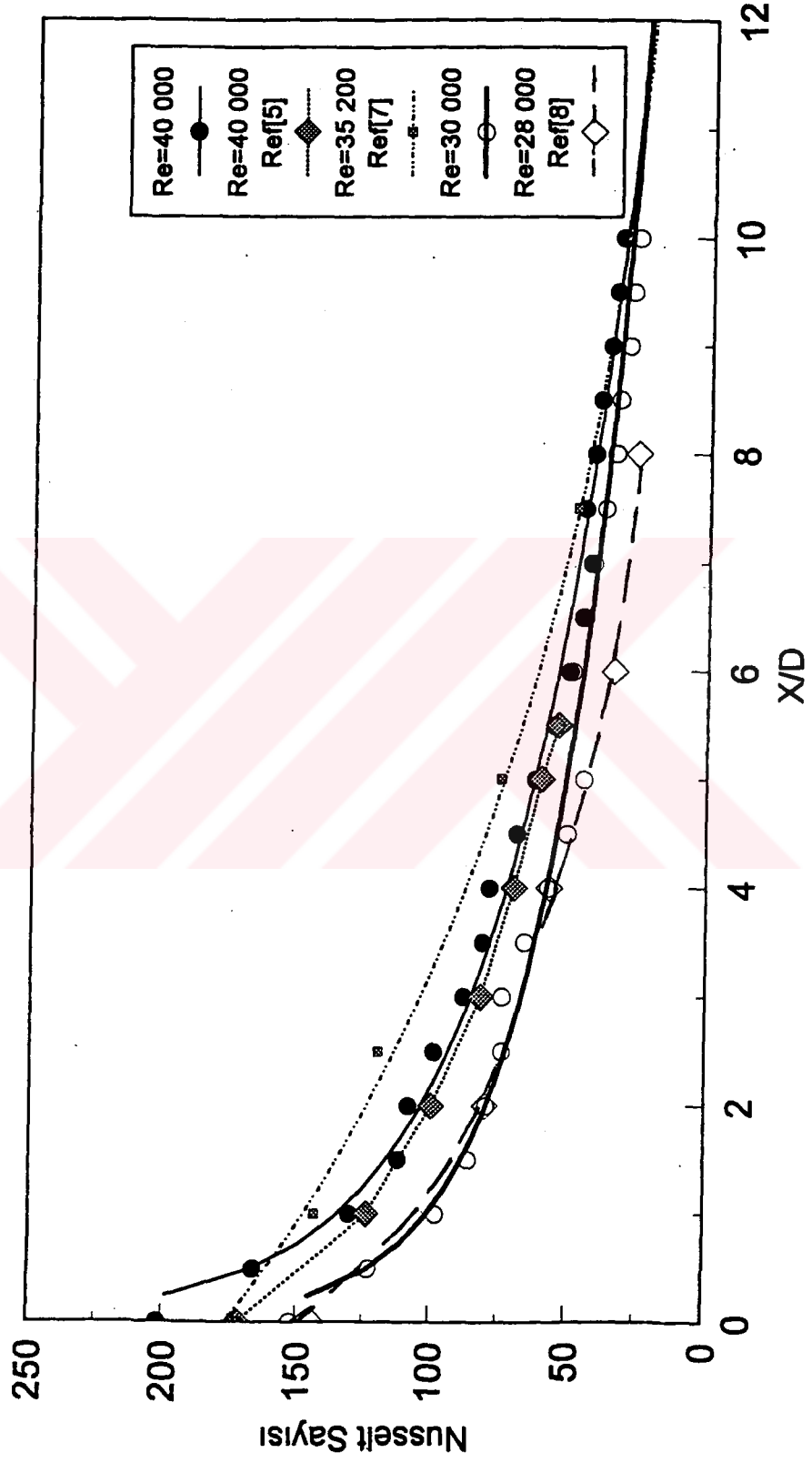
Şekilden de görüldüğü gibi Sparrow tarafından ölçülen yer değiştirmeler bu çalışmadakiler ile biraz uyum içindedir. Beltaous tarafından ölçülen değerler ise burada ölçülenlerden biraz daha küçüktür. Bu sapmalar deney düzenekleri ve yukarıda belirtilen çalışma aralıklarındaki

farklılıktan dolayı açıklanabilir. Buna rağmen başka faktörlerde olabilir. Eğik hız bölgesi, türbülanslı akımlarda gösterilmiştir ki; lokal maksimum noktaların civarında, simetrik olmayan transportla ilgili büyüklükler, maksimum ve minimumların yer değiştirmelerine sebep olabilir, dolayısıyla mesela, bir türbülanslı duvar jette maksimum hız noktası, sıfır kesme hızına karşılık gelmez [35]. Mevcut örnekte sola yer değiştirme de akışın eğrilmesine bir yükselme verir; bundan dolayı maksimum basınç noktası, durgunluk noktası ile çakışmayabilir.

#### 4.3 Lokal Isı Transfer Katsayılar Dağılımı

Şekil 28-33 aralığında görüldüğü gibi, tüm lüle-levha aralıkları için dik jetlerde maksimum Nusselt sayısı, durgunluk noktasında, yani geometrik çarpma noktasında meydana gelmiştir. Durgunluk noktasından, levha kenarlarına doğru X değeri arttıkça, Nusselt sayısında da logaritmik bir azalış görülmüştür. Tüm lüle-levha aralıklarının yanısıra, tüm Reynolds sayıları için de maksimum Nusselt sayısı, geometrik çarpma noktasında meydana gelmiş ve X/D oranı arttıkça, Reynolds sayısına bağlı Nusselt sayısında da yine logaritmik bir azalış görülmüştür. Dik çarpan jetlerde Ek Tablo 2,3,4,5'de sırasıyla Reynolds sayısı 10 000, 20 000, 30 000 ve 40 000 için, durgunluk noktasından uzaklık (X/D) ile lüle-levha aralıkları (H/D) 6,7,8,10,12,14 için, deneysel Nusselt sayısının lokal dağılımları verilmiştir. Şekil 28-33 aralığında görüldüğü gibi, tüm yüzeyde Nusselt sayısı, artan Reynolds sayısı ile artmaktadır.

Dağılım eğrileri genellikle, jet çarpmasının karakteristik şekli çan eğrisini gösterirler, fakat jet eğim açısı düştükçe artan bir asimetriklik belirir. Özellikle maksimum noktanın negatif X eksenindeki katsayılar, hızla düşme eğilimindedir, çünkü çarpan eğik jetin havası, yüzeyde sol tarafa doğru dönecek momentuma sahip değildir. Diğer taraftan çarpan jetin ilk momentumu,



Şekil 57. Nusselt sayısının, literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırılması,  $H/D=6$ .

pozitif Y yönündeki katsayılar da yükseltme yaparken, X ekseninin sol tarafında ise katsayılar da düşmeyi gerektirir. Böylece normal çarpma kıyasla, eğimli bir jet maksimum noktanın negatif X yönünde düşük ısı transfer katsayıları, pozitif X eksenini yönünde ise, daha yüksek ısı transfer katsayıları meydana getirebilir. Y eksenini boyunca ısı transfer katsayıları dağılımı, Şekil 37-39 aralığında kesik çizgi ile gösterilmiştir. Burada görüldüğü gibi Y eksenindeki katsayılar, her bir durum için negatif ve pozitif X eksenindeki katsayı dağılımlarının arasına düşer.

Şekil 28-33'ün kıyaslamasında, çarpma mesafesi H/D oranı arttıkça, dağılım eğrilerinde çok yavaş bir azalma eğilimi görülür. Bundan başka eğimli jet durumunda Şekil 34-42 aralığında görüldüğü gibi asimetri açısı, çarpma mesafesinin artmasıyla düşme eğilimindedir.

Reynolds sayısının, dağılım eğrileri üzerine etkisi Tablo 3'de verilmiştir. Bu tabloya bakarak dağılımların, Reynolds sayısına bağımlı olduğu görülür. Reynolds sayısı arttıkça eğriler de düzelir.

Şekil 57'de, H/D=6 için yüzeyde Nusselt sayısının, literatürde yapılan bazı çalışmalar ile karşılaştırılması verilmiştir. Şeklin iyi incelenmesinde; sonuçların gayet iyi uyum içinde olduğu görülmektedir.

#### 4.4 Eş (sabit) Isı Transfer Katsayı Çizgileri

Şekil 43'de, normal (dik) çarpan jetlerde eş nokta çizgilerinin, iç içe daireler olduğu görülebilir. Jet eğim açısı azaldıkça Şekil 44-46'da görüldüğü gibi çizgiler maksimum noktanın solunda yani, negatif X eksenini yönünde birbirine daha yakın, pozitif X eksenini yönünde ise; eğriler birbirinden uzakta daha aralıklı olmuştur. Böylece yüksek ısı transfer katsayı çizgileri; pozitif X bölgesinde

aralıklı, negatif bölgede ise; çizgiler birbirine daha yakın olmuştur.

#### 4.5. Maksimum Isı Transfer Katsayısı

Şekil 47'de durgunluk noktası Nusselt sayısının ( $Nu_0$ ), verilen Reynolds sayısı aralığında ve lüle-levha aralığında değişimi incelenecek olursa; maksimum Nusselt sayısı, yaklaşık 8 jet çapında meydana gelmiştir.  $Nu_0$  değeri, artan lüle-levha aralığı ile düzgün bir şekilde azalmıştır.

Deneylerde elde edilen maksimum ısı transfer katsayıları, Tablo 2 ve 3'de birimsiz ( $Nu_0$ ) şeklinde verilmiştir. Bu tabloların ilkinde, değişik lüle-levha mesafeleri ve sabit bir Reynolds sayısında ( $Re=30\ 000$ ), jet eğim açısının etkisi görülmektedir. İkinci tabloda ise Reynolds sayısı değişiminin etkisi görülmektedir.

Tablo 2'den, görülebilir ki , jet eğim açısının azalmasıyla ( $90^\circ$  den  $45^\circ$  'ye doğru), maksimum ısı transfer katsayısı düşmeye eğilim gösterir.  $90^\circ$ 'den  $45^\circ$  açı aralığı üzerinde  $H/D=7,10,14$  için,  $Nu_0$  daki azalış sırasıyla %6,%18, %22 oranında olmuştur. Bu aralığın uzanımı (bazı pratik önemden dolayı) özellikle eğim açısının çok büyük aralığında kötüdür. Jet eğim açısının küçük bir aralığında, mesela  $15^\circ$ 'lik eğim açısı farkında,  $H/D=7,10,14$  için durgunluk noktası Nusselt ( $Nu_0$ ) sayısındaki düşme, ortalama %2, %6,%8 civarındadır. En küçük çarpma mesafesinde ( $H/D=7$ ),  $Nu_0$ 'ın jet eğim açısı ile azalımı oldukça düzgündür (üniformdur), fakat  $H/D=10$  ve  $14$  için azalım büyük açılar için nisbeten fazla olmaktadır.

Tablo 2'nin daha fazla incelenmesinde, lüle-levha mesafesi arttığı zaman,  $Nu_0$ 'da da önemli bir azalmanın meydana geldiği görülmektedir.  $H/D=10$  ve  $14$  için  $Nu_0$  değerleri,  $H/D=7$  için  $Nu_0$  değerinin sırasıyla %96 ve %71'idir. Tablo 3'den görülebilirki  $Nu_0$ , Reynolds sayısına

oldukça hassastır. Datalara en küçük kareler metoduna göre eğri uydurulması ile dik çarpan jetlerde Reynolds sayısına bağımlılık  $Nu_0 = Re^{0.78}$  şeklinde olmuştur.

Durgunluk noktası (maksimum) Nusselt sayısı ( $Nu_0$ ), lüle levha aralığı ve Reynolt sayısına bağlı olarak, deneysel verilere uygun korelasyon sonucu,

$$Nu_0 = 0.305 \cdot Re^{0.78} \cdot Pr^{0.42} \cdot (H/D)^{0.75} \dots \dots \dots (35)$$

şeklinde bulunmuştur. Burada Prandtl sayısı  $Pr=0.7$  sabit alınmıştır.

#### 4.6. Ortalama Nusselt Sayısı

Nusselt sayısının lokal değerlerinden, ortalama Nusselt sayısına geçilirse[36],

$$\bar{Nu} = \frac{2}{R^2} \int_0^R R \cdot Nu(R) \cdot dR \dots \dots \dots (36)$$

burada,

$$R = X/D \dots \dots \dots (37)$$

dir.

Ortalama Nusselt sayıları, yarıçapı 10 jet çapı ( $x=10 \cdot D$  veya  $R=10$ ) olan bir daire üzerinde lokal değerler integre edilmiştir.

Çarpan jetin meydana getirdiği ısı transfer büyüklüklerini görmek açısından, çarpan jetin ortalama Nusselt sayıları ( $\bar{Nu}$ ) ile aynı şartlarda levha üzerinde jet çarpması yokken doğal taşınımda ortalama Nusselt sayıları ( $\bar{Nu}_d$ ) aşağıda Tablo 5'de karşılaştırmak üzere beraber verilmiştir.

Çarpan jetin Nusselt sayısının tanımında denklem 25'te karakteristik uzunluk olarak jet lüle çapı (D) dikkate alınmıştır. Doğal taşınımında ise Nusselt sayısının tanımında, karakteristik uzunluk olarak dik levha yüksekliği (LL) dikkate alınmıştır. Bunlar arasında karşılaştırma yapabilmek için doğal taşınımında ortalama Nusselt sayısını, karakteristik uzunluk jet çapı cinsinden ifade etmemiz gerekir, bu şekilde ifade edilirse,

$$\bar{Nu}_d = \frac{h_d D}{k_a} \dots \dots \dots (38)$$

Burada  $h_d$ 'nin denklem 12'deki ifadesi, yukarıda denklem 38'de yerine yazılmasıyla,

$$\bar{Nu}_d = Nu_d \frac{D}{k_a} \dots \dots \dots (39)$$

ifadesi elde edilir. Burada,

$\bar{Nu}_d$ : Karakteristik uzunluğu jet lüle çapı olan doğal taşınım Nusselt sayısı.

$Nu_d$ : Karakteristik uzunluğu levha yüksekliği olan doğal taşınım Nusselt sayısı.

Böylece doğal taşınımında, karakteristik uzunluğu dik levha boyu olan ortalama Nusselt sayısından karakteristik boyu, jet lüle çapı olan ortalama Nusselt sayısı elde edilmiş oldu. Tablo 5'de verilen ortalama doğal taşınım Nusselt sayıları denklem 11 ve 12 yardımıyla elde edilmiş denklem 38'e göredir.

Tablo 5. Ortalama jet ve doğal taşınım Nusselt sayıları  
R=10.

| Re     | H/D =        | 7     | 10    | 14    |
|--------|--------------|-------|-------|-------|
| 40 000 | $\bar{Nu}$   | 56.73 | 57.07 | 48.3  |
|        | $\bar{Nu}_d$ | 2.57  | 2.51  | 2.53  |
| 30 000 | $\bar{Nu}$   | 45.7  | 45.16 | 39.12 |
|        | $\bar{Nu}_d$ | 2.57  | 2.51  | 2.52  |
| 20 000 | $\bar{Nu}$   | 33.67 | 32.65 | 29.18 |
|        | $\bar{Nu}_d$ | 2.57  | 2.51  | 2.52  |
| 10 000 | $\bar{Nu}$   | 21.16 | 20.73 | 20.44 |
|        | $\bar{Nu}_d$ | 2.56  | 2.51  | 2.52  |



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1. Yüzeyde sıvı kristal ile ölçülmüş sıcaklıkların kullanılmasıyla, zamana bağlı ısı iletim denkleminin, sınır koşulları ile birlikte sayısal çözümünden, ısı transfer katsayıları hesaplanabilir.

2. Sıvı kristalin zamana bağlı sıcaklık ölçümlerinde, levha malzemenin cinsi önemlidir. Düşük ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin kullanılmasında sıvı kristal renklerinin birbirine geçiş yaptığı çizgiler gayet net olarak izlenmiştir ve renk aralıkları da normal genişlikte olmuştur.

3. Ard arda yapılan deneylerde, çarpma levhasının başlangıç koşullarına tekrar erişmesi için iki deney arasında yeterli süre beklenilmesi gerekir, aksi takdirde ölçümlerin ilk zamanlarında alınan sıcaklık ve zaman ilişkisi bir miktar hatalı olabilir. Bunun sonucu olarakta, başlangıçta hesaplanan ısı transfer katsayıları, bir miktar fazla çıkabilmektedir. Zaman büyüdükçe yani kararlı duruma doğru gidildikçe, bu fazlalıkta kaybolur.

4. Jet eğimi 90 dereceden 45 dereceye doğru azaldıkça, jetin yüzeyde yer değiştirme mesafesi ( $S/H$ ), deneysel verilerin ortalamasından geçen çizgi, jet eğimi için lineer ve daha küçük jet eğim açılarında ise; eğri çok daha dik bir şekilde yükselir. Lüle-levha aralığı  $H/D= 7, 10$  ve  $14$  için geometrik çarpma noktasından itibaren yüzeyde yer değiştirme masafeleri de sırasıyla  $Re=30.000$  sabit,  $0.8D, 0.9D$  ve  $0.95D$  kadar olmuştur.

5. Dik çarpan jetlerde, yüzey akım alanı ve ısı transfer katsayıları için X ve Y eksenlerine göre simetriktir. Maksimum ısı transfer noktasından (durgunluk noktasından), levha kenarlarına doğru, X değeri arttıkça, Nusselt sayısında da logaritmik bir azalış görülmüştür. Tüm lüle-levha aralıkları ve tüm Reynolds sayıları için maksimum Nusselt sayısı ( $Nu_0$ ), geometrik çarpma noktasında meydana gelmiştir. Ayrıca durgunluk noktasından uzaklık (X/D) oranı arttıkça, Reynolds sayısına bağlı Nusselt sayısı da yine logaritmik bir azalış göstermiştir. Dik çarpan jetlerde deneysel verilere bağlı olarak Nusselt sayısı, Reynolds sayısına bağlı olarak  $Re^{0.78}$  şeklinde değişmiştir. Dik çarpan jetlerde dağılım eğrileri genellikle jet çarpmasının karakteristik şekli çan eğrisini gösterirler.

6. Eğik çarpan jetlerde, yüzeyde bir ekseninde (X ekseninde) simetriklik durumu vardır, diğerinde (Y ekseninde) ise simetriklik yoktur. Jetin eğimi 90 dereceden 45 dereceye doğru küçüldükçe, artan bir asimetriclik belirir. Özellikle maksimum noktanın negatif X eksenindeki katsayılar hızla düşme eğilimi gösterir. Çünkü çarpan jet havası, yüzeyde soğuk tarafa (negatif X eksenine) doğru dönmeye kadar momentuma sahip değildir. Çarpan jetin momentumu, pozitif Y yönündeki ilk katsayıları daha da yükseltirken, X eksenine doğru da katsayılarında bir düşüşü gerektirir. Y eksenini boyunca meydana gelen ısı transfer katsayıları, negatif ve pozitif X eksenindeki katsayı dağılımlarının ortasına düşer. Sonuç olarak maksimum noktanın iki tarafında soğutma ve ısıtma kapasitelerinde açık bir farklılık görülür.

7. Dik jetlerde olduğu gibi, eğik jetlerde de durgunluk (maksimum ısı transfer) noktasında ve tüm yüzey üzerinde Nusselt sayısı, artan Reynolds sayısı ile birlikte artmıştır ve ayrıca artan lüle-levha aralığı ile de düşme göstermiştir. Durgunluk noktasında en küçük jet eğim açısında (45 derecede), H/D=7,10,14 için elde edilen

maksimum ısı transfer katsayısı, dik çarpan (90 derece) jete oranla sırasıyla %6, %18, %22 oranında azalma meydana getirmiştir. Sonuçta ısı transfer katsayılarının, jet eğim açısına çok büyük oranda duyarlı olmadığı görülmüştür. Deneysel çalışılan tüm aralıklar için maksimum ısı transfer katsayısı, yaklaşık lüle-levha aralığı sekiz jet çapı mesafesinde meydana gelmiştir.

8. Eş (sabit) ısı transfer katsayı çizgileri, dik çarpan jetlerde iç içe daireler meydana getirmiş, eğik jetlerde ise; eğim açısının artması ile çizgiler, maksimum noktanın solunda yani negatif X ekseninde birbirine daha yakın , pozitif X ekseninde ise; eğriler, birbirinden daha uzaklaşmış ve ayrıca Y ekseninde ise; negatif ve pozitif X eksenine katsayılarının ara değerlerine sahip noktalardan geçen, bozunmuş daireler meydana getirmiştir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Mujumdar, A.S., Obot, N.T. ve Douglas, W.J.M, Design Correlations for Heat and Mass Transfer Under Various Turbulent Impinging Jet Configurations, Drying 80, 1 (1980) 388-402.
2. Hardisty, H., Int. Conf. on Market Trends and Technical Dev. in Gravure, Gravure 80, (1980) 1-18.
3. Donaldson, C.D. ve Snedeker, R.S., A Study of Free Jet Impingement. Part 1 Mean Properties of Free and Impinging Jets, J. Fluid Mechanics, 45 (1971) 281-319.
4. Donaldson, C.D., Snedeker, R.S. ve Margols, D.P., A Study of Free Jet Impingement. Part 2 Free Jet Turbulent Structure and Impingement Heat Transfer, J. Fluid Mechanics, 45 (1971) 477-512.
5. Goldstein, R.J. ve Timmers, J.F., Visulation of Heat Transfer from Arrays of Impinging Jets, Int. J. Heat Mass Transfer, 25, 2 (1982) 1857-1868.
6. Goldstein, R.J., Behbahani, A.I. ve Heppelmann, K.K., Streamwise Distribution of The Recovery Factor and The Local Heat Transfer to An Impinging Circular Air Jet, Int. J. Heat Mass Transfer, 29, 8 (1986) 1227-1235.
7. Goldstein, R.J. ve Behbahani, A.I., Impingement of A Circular Jet With and Without Cross Flow, Int. Heat Mass Transfer, 25, 9 (1982) 1377-1382.
8. Bouchez, J.P. ve Goldstein, R.J., Impingement Cooling from A circular Jet In A Cross Flow, Int. J. Heat Mass Transfer, 18 (1975) 719-730.
9. Pamadi, B.N. ve Below, I.A., A Note on The Heat Transfer Charecteristics of Circular Impinging Jet, Int. J. Heat Mass Transfer, 23 (1979) 783-787.
10. Shoukri, M. ve Calka, A., On the Heat Transfer Charecteristics of A Constrained Air Jets Impinging on A

Flat Surface, Int. J. Heat Mass Transfer, 30, 1 (1987) 203-205.

11. Sparrow, E.M. ve Lowell, B.J., Heat Transfer Charecteristics of An Obliquely Impinging Circular Jet, Journal of Heat Transfer, 102 (1980) 202-209.

12. Seban, R.A. ve Back, L.H., Velocity and Temperature Profiles in A Wall Jet, Int. J. Heat Mass Transfer, 3; 3 (1961) 255-265.

13. Popiel, C.O ve Boguslawski, L., Local Heat Transfer from A Rotating Disc in An Impinging Round Jet, Journal of Heat Transfer, 108 (1986) 357-364.

14. Popiel, C.O, Meer, T.H.V.D. ve Hoogendoorn, C.J., Convective Heat Transfer on A Plate in An Impinging Round Hot Gas Jet of Low Reynolds Number, Int. J. Heat Mass Transfer, 23 (1979) 1055-1068.

15. Özdemir, İ.B. ve Whitelaw, J.H., Impingement of An Axisymmetric Jet on Unheated and Heated Flat Plates, J. Fluid Mechanics, 240 (1992) 503-532.

16. Aralow, A.D., Heat Transfer Coefficients in The Accelerating Flow Zone of An Axisymmetric Impinging Jet, Heat Transfer-Soviet Research, 19, 4 (1987) 102-109.

17. Hoogendoorn, C.J., The Effect of Turbulence on Heat Transfer at A Stagnation Point, Int. J. Heat Mass Transfer, 20 (1977) 1333-1338.

18. Kataoka, K., Sahara, R., Ase, H. ve Harada, T., Role of Large-Scala Chorent Structures in Impinging Jet Heat Transfer, Journal of Chemical Engineering of Japan, 20, 1 (1987) 71-76.

19. Can, M, Çarpan Hava Jetleri ile Isı Transferinin Artırılması, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 11, 1 (1988) 25-32.

20. Feralan, A.E., Yamankaradeniz, R. ve Can, M., Çarpan Hava Jetleri ile İnce Mürepkep Filmlerinin Kurutulması, Journal of The Faculties of Engineering of Uludağ University, 3, 1 (1989) 59-71

21. Can, M., Optimization of The Arrays of Impinging Air Jets, Journal of The faculties of Engineering of Uludağ University, 3, 1 (1989) 73-81.

22. Hrycak, P., Heat Transfer from Round Impinging Jets to A Flat Plate, Int. J. Heat Mass Transfer, 26, 12 (1983) 857-865.
23. Dakos, T., Verriopoulus, C.A. ve Gibson, M.M, Turbulent Flow With Heat Transfer in Plane and Curved Wall Jets, J. Fluid Mechanics, 45 (1984) 339-360.
24. Shadlesky, P.S., Stagnation Point Heat Transfer for Jet Impingement to A Plane Surface, 21, 8 (1982) 1214-1215.
25. Chin, D.T. ve Hsueh, K.L., An Analysis Using The Chilton Calburn Analogy for Mass Transfer to A Flat Surface from An Unsubmerged Impinging Jet, Electrochemics Acta, 31, 5 (1986) 561-564.
26. Abrosimov, A.I., Internal Peak of Heat-Transfer Coefficient for A Plate Washed by A Normal Jet, High. Temp., 22, 3 (1984) 417-421.
27. Hwang, C.J. ve Liu, J.L, Numerical Study of Two-Dimensional Impinging Jet Flowfields, AIAA Journal, 27, 7 (1989) 28-30.
28. Yavuz, T., Effect of Turbulence Modellings on Prediction of Flow and Heat Transfer Charecterictics for Confined Jet Impingement, Doğa-Tr. J. of Engineering and Enviromental Sciences, 16 (1992) 177-192.
29. Incropera, F.P. ve Witt, D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3 rd. Edition, John Wiley and Sons, New York, (1990).
30. Bejan, A., Heat Transfer, John Wiley and Sons, New York, (1993).
31. Loth, E. ve Faeth, G.M., Structure of Underexpanded Round Air Jets Summerged in Water, Int. J. Multiphase Flow, 15, 4 (1989) 589-603.
32. Martinuzzi, R. ve Pollard, A., Comparative Study of Turbulence Models in Predicting Turbulent pipe Flow, Part I: Algebraic stress and K- $\epsilon$  models, AIAA J., 27 (1989) 29-36.
33. Özışık, M.N., Heat Transfer a Basic Approach, 4 th. Printing, McGraw-Hill Book Co., New York, (1989).

34. Beltaus, S., Oblique Impingement of Circular Turbulent Jets, Journal of Hydraulic Research, 14 (1976) 17-36.
35. Bradshaw, P. ve Gee, M.T., Turbulent Wall Jets With and Without An External Stream, Aeronautical Research Council of London, R and M 3252, (1960) 45-48.
36. Huang, L.ve El-Genk, M.S., Heat Transfer of An Impinging Jet on A Flat Surface, Int. J Heat Mass Transfer, 37, 13 (1994) 1915-1923

## 7. EKLER

Ek Tablo 1. Bilgisayar Programı

```

DIM CC(10), AA(20), BB(20), D(20), T(20, 216)
DEF FNX (X) = A * X + B
10 DEF FNROA (TFAK) = 8.2038 - .0721523# * TFAK +.000303637#
* TFAK ^ 2 - 6.15067E-07 * TFAK ^ 3 + 4.81333E-10 * TFAK ^ 4
DEF FNCPA (TFAK) = 1021.13 - .105833 * TFAK + 8.66659E-05
* TFAK ^ 2 + 3.33333E-07 * TFAK ^ 3
DEF FNMA (TFAK) = (62.961 - .879689 * TFAK
+ .0045677# * TFAK ^ 2- 1.02318E-05 * TFAK ^ 3
+ 8.406E-09 * TFAK ^ 4) * .00001
DEF FNKA (TFAK) = (-42.9143 + 10.0046 * TFAK - .00371429#
* TFAK ^ 2) * .00001
CLS
TOP = 61.7
TOA = 18.2
H = 130
TT = 40
TI = 1 * TT: N = 2
TYES = 42.3: TW = TOP
LL = .45: l = .006: DD = .015: g = 9.81: KP = .8184
30 TOAK = TOA + 273: TWK = TW + 273
TFA = (TW + TOA) / 2: TFAK = TFA + 273
ROA = FNROA(TFAK): CPA = FNCPA(TFAK): MA = FNMA(TFAK)
KA = FNKA(TFAK): NUA = MA / ROA: ALFA = KA / (ROA * CPA)
PRA = NUA / ALFA
REM Bilinen levha arka sıcaklığına göre yüzey taşınım
REM katsayısı ve levha yüzey sıcaklığının bulunuşu.
BA = 1 / TFAK
GRL = g * BA * (TW - TOA) * LL ^ 3 / NUA ^ 2
RAL = GRL * PRA: NUD = .68 + .67 * RAL ^ (1 / 4)
/ (1 + (.492 / PRA) ^ (9 / 16)) ^ (4 / 9)
HD = NUD * KA / LL: TW1 = (TOA + TOP * KP / (HD * L))
/ (1 + KP / (HD * L))
EB1 = ABS(TW1 - TW)
PRINT TW; TW1; EB1; HD
IF EB1 < .05 THEN : GOTO 200
TW = TW - .05: GOTO 30
200 HD = HD / KP
READ CPP, ROP
DATA 840,2500
REM HH = HHH
DX = 1 / N: DT = TT / TI

```



```

ALFP = KP / (ROP * CPP)
250 HH = H / KP: R = ALFP * DT / DX ^ 2
    B1 = 1 + DX * HH: f1 = TOP: f2 = HH * TOA
    A = (TW - TOP) / l: B = TOP
REM Baslangıç şartı ı=0 da T(M,0)=F(X)
    FOR M = 0 TO N
        T(M, 0) = FNX(M * DX)
REM PRINT T(M, 0);
    NEXT M
    PRINT
REM Sınır Koşulu x=0 da
    FOR I = 0 TO TI
        T(0, I + 1) = TOP
    NEXT I
REM Bant matrisinin elamanlarını atama
REM Genel çözümde sağ taraf vektörünü bulmak için tridiogonal
REM bant matrisi ile T(M,I) sıcaklık vektörünün çarpımı,
    FOR I = 0 TO TI
        FOR M = 2 TO N - 1
            CC(M) = R: AA(M) = 2 - 2 * R: BB(M) = R
            D(M) = CC(M) * T(M - 1, I) + AA(M) * T(M, I)
            + BB(M) * T(M + 1, I)
        NEXT M: CC(1) = 0: AA(1) = 2 - 2 * R: BB(1) = R
        D(1) = AA(1) * T(1, I) + BB(1) * T(2, I) + 2 * R * f1
        CC(N) = 2 * R: AA(N) = 2 - 2 * R * B1: BB(N) = 0
        D(N) = CC(N) * T(N - 1, I) + AA(N) * T(N, I)
            + 4 * R * DX * f2
REM Genel çözümde sağ taraf vektörünü bulmak için Tridiogonal
REM bant matrisiyle T(N,I) Sıcaklık vektörünün çarpımı
    FOR M = 1 TO N - 1
        CC(M) = -R: AA(M) = 2 + 2 * R: BB(M) = -R
    NEXT M: CC(1) = 0: CC(N) = -2 * R: AA(N) = 2 + 2 * R * B
        BB(N) = 0
REM Trididiogonal matrisin çözümünden T(N,I+1) sıcaklığının
REM bulunuşu,
    Q(1) = D(1) / AA(1): S(1) = BB(1) / AA(1)
    FOR M = 2 TO N: LL = AA(M) - CC(M) * S(M - 1)
        S(M) = BB(M) / LL: Q(M) = (D(M) - Q(M - 1) * CC(M)) / LL
    NEXT M: T(N, I + 1) = Q(N)
    FOR M = N - 1 TO 1 STEP -1
        T(M, I + 1) = Q(M) - S(M) * T(M + 1, I + 1)
    NEXT M
    NEXT I
    EB2 = ABS(T(N, TI) - TYES)
    KA = FNKA((TYES+TOA)/2+273)
    NU = H * DD / KA
    PRINT HH; T(N, TI); TYES; EB2; NU
    IF EB2 > .03 THEN H = H + .5: GOTO 250
    PRINT H; NU; TW; HD
    FOR I = 0 TO TI

```

```
PRINT I; I * DT;  
FOR M = 0 TO N  
PRINT T(M, I);  
NEXT M  
PRINT  
NEXT I  
PRINT H; NU  
END
```



Ek Tablo 2. Nusselt sayısının, durgunluk noktasından uzaklık ve lüle-plaka mesafesine göre değişimi,  $Re=10.000$ ,  $\theta=90^\circ$ .

| H/D<br>x/D | 6    | 7    | 8    | 10   | 12   | 14   |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| 0,0        | 74,0 | 76,1 | 69,8 | 62,9 | 56,0 | 49,4 |
| 0,5        | 68,1 | 65,8 | 58,5 | 54,0 | 50,0 | 46,0 |
| 1,0        | 54,4 | 54,2 | 46,6 | 46,0 | 42,6 | 43,0 |
| 1,5        | 48,5 | 47,9 | 41,2 | 40,4 | 38,0 | 36,2 |
| 2,0        | 55,6 | 52,5 | 50,5 | 45,7 | 40,6 | 31,7 |
| 2,5        | 47,6 | 45,1 | 42,6 | 38,6 | 35,0 | 28,2 |
| 3,0        | 42,3 | 40,1 | 38,4 | 34,1 | 30,2 | 27,6 |
| 3,5        | 35,5 | 33,9 | 32,7 | 30,7 | 27,1 | 25,4 |
| 4,0        | 30,2 | 29,9 | 29,3 | 27,4 | 24,8 | 23,4 |
| 4,5        | 26,2 | 25,7 | 25,4 | 24,5 | 22,8 | 21,2 |
| 5,0        | 23,2 | 23,1 | 22,8 | 20,6 | 21,2 | 20,0 |
| 5,5        | 20,0 | 19,8 | 18,9 | 18,6 | 25,2 | 27,2 |
| 6,0        | 17,8 | 17,8 | 16,9 | 16,9 | 21,8 | 25,2 |
| 6,5        | 20,3 | 19,5 | 22,6 | 21,2 | 20,4 | 21,8 |
| 7,0        | 18,4 | 16,9 | 20,1 | 18,7 | 17,8 | 19,2 |
| 7,5        | 16,4 | 15,8 | 17,8 | 17,8 | 16,7 | 18,4 |
| 8,0        | 15,0 | 14,4 | 16,4 | 16,4 | 15,8 | 16,7 |
| 8,5        | 14,1 | 13,9 | 15,3 | 15,3 | 15,0 | 15,9 |
| 9,0        |      | 13,0 | 13,9 | 14,2 | 13,6 | 14,7 |
| 9,5        |      | 12,0 | 13,0 | 13,3 | 13,0 | 14,2 |
| 10,0       |      |      | 12,2 | 12,3 | 12,5 | 13,3 |

Ek Tablo 3. Nusselt sayısının, durgunluk noktasından uzaklık ve lüle-plaka mesafesine göre değişimi,  $Re=20.000$ ,  $\theta=90^\circ$ .

| H/D<br>x/D | 6     | 7     | 8     | 10    | 12   | 14   |
|------------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 0,0        | 114,9 | 114,2 | 120,5 | 108,8 | 80,3 | 79,7 |
| 0,5        | 95,9  | 97,9  | 98,6  | 93,8  | 71,4 | 69,7 |
| 1,0        | 75,2  | 76,1  | 75,9  | 71,8  | 59,0 | 61,1 |
| 1,5        | 66,2  | 65,3  | 62,6  | 58,7  | 62,9 | 50,1 |
| 2,0        | 61,4  | 58,9  | 54,3  | 50,9  | 53,1 | 44,6 |
| 2,5        | 56,1  | 52,7  | 50,5  | 46,2  | 46,7 | 47,4 |
| 3,0        | 50,5  | 48,5  | 46,0  | 41,3  | 41,9 | 42,3 |
| 3,5        | 44,9  | 43,8  | 41,8  | 39,0  | 37,7 | 39,6 |
| 4,0        | 56,4  | 57,8  | 58,4  | 53,3  | 34,7 | 37,3 |
| 4,5        | 48,5  | 52,5  | 49,0  | 45,7  | 45,7 | 34,5 |
| 5,0        | 43,1  | 45,1  | 42,9  | 40,6  | 40,9 | 32,8 |
| 5,5        | 37,8  | 38,4  | 37,8  | 36,9  | 36,9 | 30,0 |
| 6,0        | 33,0  | 33,9  | 34,1  | 32,7  | 33,6 | 28,3 |
| 6,5        | 29,9  | 30,8  | 31,0  | 30,4  | 31,3 | 30,2 |
| 7,0        | 27,6  | 27,8  | 28,8  | 27,6  | 28,5 | 28,2 |
| 7,5        | 25,1  | 25,7  | 26,0  | 25,4  | 25,9 | 26,0 |
| 8,0        | 23,7  | 23,4  | 23,7  | 24,0  | 24,5 | 24,2 |
| 8,5        | 22,0  | 21,7  | 22,6  | 22,6  | 22,8 | 22,6 |
| 9,0        | 20,6  | 20,3  | 21,2  | 21,1  | 20,3 | 21,4 |
| 9,5        | 18,9  | 19,2  | 19,7  | 20,0  | 20,0 | 19,7 |
| 10,0       | 17,8  |       | 17,8  | 18,9  | 18,6 | 18,3 |

Ek Tablo 4. Nusselt sayısının, durgunluk noktasından uzaklık ve lüle-plaka mesafesine göre değişimi,  $Re=30.000$ ,  $\theta=90^\circ$ .

| H/D<br>x/D | 6     | 7     | 8     | 10    | 12    | 14    |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,0        | 152,2 | 156,4 | 175,6 | 167,5 | 115,2 | 111,2 |
| 0,5        | 122,8 | 127,4 | 137,9 | 136,0 | 100,2 | 104,5 |
| 1,0        | 98,0  | 100,4 | 104,1 | 99,3  | 85,0  | 83,6  |
| 1,5        | 85,9  | 84,7  | 86,1  | 85,1  | 70,3  | 72,2  |
| 2,0        | 79,6  | 76,9  | 78,6  | 74,3  | 62,6  | 63,8  |
| 2,5        | 73,8  | 71,2  | 71,5  | 67,3  | 66,6  | 55,2  |
| 3,0        | 73,9  | 64,8  | 65,1  | 62,3  | 60,7  | 51,0  |
| 3,5        | 65,8  | 64,7  | 59,3  | 57,6  | 56,2  | 47,4  |
| 4,0        | 57,4  | 56,3  | 55,2  | 54,0  | 51,7  | 43,5  |
| 4,5        | 50,5  | 50,2  | 49,6  | 49,2  | 47,6  | 47,1  |
| 5,0        | 44,6  | 45,2  | 44,1  | 45,1  | 45,3  | 45,7  |
| 5,5        | 55,5  | 58,9  | 65,4  | 43,7  | 41,1  | 42,3  |
| 6,0        | 49,3  | 53,6  | 58,1  | 57,0  | 37,5  | 40,1  |
| 6,5        | 44,8  | 49,4  | 53,0  | 49,1  | 34,4  | 37,6  |
| 7,0        | 41,8  | 43,2  | 45,4  | 42,9  | 43,2  | 34,8  |
| 7,5        | 37,7  | 38,9  | 40,3  | 38,1  | 38,9  | 32,3  |
| 8,0        | 34,1  | 35,8  | 36,9  | 35,5  | 36,4  | 35,5  |
| 8,5        | 33,0  | 33,3  | 34,1  | 33,0  | 33,3  | 33,3  |
| 9,0        | 29,6  | 31,3  | 31,9  | 31,0  | 31,3  | 31,6  |
| 9,5        | 28,4  | 29,6  | 29,3  | 29,6  | 29,6  | 29,9  |
| 10,0       | 26,5  | 27,4  | 27,1  | 28,2  | 28,5  | 28,2  |

Ek Tablo 5. Nusselt sayısının, durgunluk noktasından uzaklık ve lüle-plaka mesafesine göre değişimi,  $Re=40.000$ ,  $\theta=90^\circ$ .

| H/D<br>x/D | 6      | 7     | 8     | 10    | 12    | 14    |
|------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,0        | 201,10 | 184,1 | 201,7 | 190,0 | 154,6 | 149,7 |
| 0,5        | 166,40 | 159,0 | 164,4 | 175,0 | 136,1 | 136,1 |
| 1,0        | 130,70 | 124,8 | 133,4 | 142,3 | 109,2 | 110,2 |
| 1,5        | 112,20 | 110,0 | 111,0 | 109,0 | 94,9  | 95,2  |
| 2,0        | 108,40 | 102,2 | 100,5 | 99,5  | 85,4  | 82,7  |
| 2,5        | 99,00  | 91,5  | 90,5  | 86,4  | 77,2  | 72,9  |
| 3,0        | 88,30  | 85,2  | 83,6  | 79,8  | 69,7  | 67,4  |
| 3,5        | 81,20  | 77,2  | 76,4  | 74,5  | 63,9  | 62,6  |
| 4,0        | 78,90  | 68,6  | 69,7  | 69,2  | 59,8  | 59,0  |
| 4,5        | 68,87  | 68,8  | 62,8  | 63,6  | 57,3  | 55,7  |
| 5,0        | 62,20  | 61,3  | 56,5  | 58,6  | 57,4  | 52,3  |
| 5,5        | 54,40  | 54,9  | 54,1  | 53,9  | 53,1  | 48,2  |
| 6,0        | 50,50  | 49,4  | 48,5  | 49,2  | 49,8  | 45,4  |
| 6,5        | 45,70  | 45,5  | 45,4  | 44,9  | 46,7  | 49,9  |
| 7,0        | 42,70  | 43,2  | 64,3  | 64,9  | 43,9  | 46,0  |
| 7,5        | 45,00  | 59,0  | 57,3  | 57,8  | 40,3  | 42,3  |
| 8,0        | 41,60  | 55,6  | 52,2  | 52,5  | 38,1  | 40,1  |
| 8,5        | 39,60  | 49,4  | 47,9  | 48,5  | 35,5  | 37,3  |
| 9,0        | 36,30  | 43,2  | 44,8  | 45,1  | 32,5  | 35,0  |
| 9,5        | 34,30  | 40,9  | 42,0  | 42,3  | 42,0  | 33,4  |
| 10,0       | 32,30  | 37,2  | 38,8  | 38,4  | 39,8  | 39,6  |

## 8. ÖZGEÇMİŞ

Kadir Bilen; 1960 yılında Bayburt'ta doğdu. İlk ve orta okulu Gümüşhane'de, lise tahsilini Bayburt'ta tamamladı. 1981 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nü kazandı, 1986 yılında aynı bölümden mezun oldu ve aynı yıl Erzurum'da Atatürk Üniversitesi'nde Arş. görevlisi olarak işe başladı. 1986 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi'nde yüksek lisans programına başladı, 1989 yılında aynı bölümde yüksek lisansını tamamladı. 1989 yılında Trabzonda Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde doktora programına başladı, 1994 yılında askerlik görevini yerine getirdi. Halen Atatürk Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DENEYİM MERKEZİ