

**HAVA JETİNE MARUZ TOZ TABAKASINDA  
GÖRÜNÜRLÜK VE PARTİKÜL HAREKETLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**Erman ÇELİK**



T. C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAVA JETİNE MARUZ TOZ TABAKASINDA GÖRÜNÜRLÜK VE  
PARTİKÜL HAREKETLERİNİN İNCELENMESİ**

**Erman ÇELİK**

Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ  
( Danışman )

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2011  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Erman ÇELİK tarafından hazırlanan " Hava Jetine Maruz Toz Tabakasında Görünürlük ve Partikül Hareketlerinin İncelenmesi " adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

**Başkan** : Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ  
Uludağ Ü. Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Prof. Dr. Habib UMUR  
Uludağ Ü. Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Prof. Dr. Erdoğan DİLAVEROĞLU  
Uludağ Ü. Mühendislik Fakültesi,  
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Kadri ARSLAN**  
**Enstitü Müdürü**  
**24/10/2011**

**U. Ü Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak ve kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum bütün eserleri kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite yada başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**30.09.2011**

**İmza**

**Erman ÇELİK**



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### HAVA JETİNE MARUZ TOZ TABAKASINDA GÖRÜNÜRLÜK VE PARTİKÜL HAREKETLERİNİN İNCELENMESİ

**Erman ÇELİK**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

Uzay araçlarının ve atmosfer ortamında çalışan düşey kalkışlı hava araçlarının iniş ve kalkış operasyonları sırasında etrafa saçılan parçacıklardan kaynaklanan tahribat ve görünürlük düşüşü, uçuş ve çevre güvenliği açısından bu konuda araştırma yapma gerekliliği doğmuştur. Bu çalışmada da hava jeti - partiküllü yüzey etkileşimi konusu Lazer - fotodiyot çifti ile görünürlük açısından ve Particle Image Velocimetry ( PIV ) yöntemiyle partikül hareket karakteri açısından deneysel olarak incelenmiştir. Yüzeydeki partikül tabakası kalınlığı, yüzey üzerindeki nozul yüksekliği, krater oluşumu gibi etmenlerin parçacık hareketine etkisi ayrıca rezervuar basıncı, partikül tabakası kalınlığı, nozul yüksekliği ve ölçüm pozisyonu gibi parametrelerin görünürlük üzerine olan etkileri çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Bu araştırmayı mevcut araştırmalardan ayıran özellik parçacık hareketi tespiti için PIV yönteminin kullanılmış olmasıdır.

**Anahtar Kelimeler:** Hava jeti, PIV, Görünürlük, Erozyon, Ses altı jet

**2011, vii + 114 Sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **VISIBILITY IN A DUST LAYER UNDER INFLUENCE OF AIR JET AND EXAMINATION OF PARTICLE MOTION**

**Erman ÇELİK**

Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

Destruction and visibility recession arising out of striking particles around vertical landing and taking off operations of spacecrafts and aircrafts in atmosphere necessitate doing investigation on this subject. In this study while a subsonic cold air jet is impinging on a particular layer, the interaction between air jet and particular layer has been investigated on visibility aspect by using a laser and photodiode set and particle motion characteristics have been investigated by using Particle Image Velocimetry (PIV) experimentally. Effects of particular layer thickness on impingement surface, height of nozzle above particular layer, crater evolution on particle entrainment characteristics; and some effects like nozzle reservoir pressure, particular layer thickness, nozzle height, measurement position on visibility constitute the fundamentals of the study. Distinctive property differs this study from present ones is determination of particle motion with PIV technic.

**Key words:** Air jet, PIV, Visibility, Erosion, Subsonic jet

**2011, vii + 114 Pages.**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Deneyleeri Von Karman Institute for Fluid Dynamics ( Belçika ) bünyesinde kurumun teknik imkanlarından yararlanılarak yapılan bu yüksek lisans tezinin Uludağ Üniversitesi ve şahsım adına ciddi katkıları olduğunu düşünmekteyim. Konu itibariyle gelişmeye açık olması nedeniyle bilim adamları için özgün bir kaynak olmasını temenni ettiğimiz bu eserin alanında saygın bir yere ulaşması bizi onure edecektir.

Deneysel araştırmaların genel karakteri olarak çalışmalar sırasında şüphesiz ki bir takım aksaklıklarla ve olması muhtemel standart bozucu etkilerle karşılaşmıştır. Fakat özellikle deney düzeneği ve fiziksel şartlar anlamında kurum tarafından sağlanan cömert katkılar sayesinde konu nihayete erdirilebilmiştir. Bölümler içinde çalışma sırasındaki deneyimlere dayanarak sağlanan bazı bilgilerin sonraki çalışmalarda bilim adamlarına vakit kazandıracağını ümit etmekteyiz.

Her ne kadar tek bir kişinin ismi geçse de bu çalışma birçok insanın emeğinin ürünüdür. Öncelikle tez danışmanım Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ hocama verdiği destekler için teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalar sırasında sağladığı teknik destek için Dr. Maria Rosaria Vetrano' ya çok teşekkür ediyorum. Ve aileme her alanda verdikleri destekler için teşekkür ederim

Erman ÇELİK

30.09.2011



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|   |     |
|---|-----|
| ÖZET.....   | i   |
| ABSTRACT.....   | ii  |
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....  | iii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                                 | v   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....  | vi  |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....  | ix  |
| 1. GİRİŞ.....   | 1   |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ.....   | 3   |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....  | 20  |
| 3.1. Görünürlük Deneyleri ve Deney Düzenneği.....                   | 21  |
| 3.2. PIV Deneyleri ve Kullanılan Deney Düzenneği.....               | 23  |
| 3.2.1 PIV ölçme tekniği.....  | 23  |
| 3.2.2 PIV deney düzenneği.....                                      | 26  |
| 3.3. Deneylerde Kullanılan Kum Numunesinin Karakterizasyonu.....    | 28  |
| 4. PIV ANALİZ BULGULARI VE GÖRÜNÜRLÜK DENEY BULGULARI.....          | 32  |
| 4.1. Sabit Nozul Yüksekliği ( $H_N$ ) Değişken Kum Kalınlığı.....   | 32  |
| 4.1 1. P 0,1_ $H_S$ 14,5_ $H_N$ 15 BCF.....                         | 33  |
| 4.1 2. P 0,1_ $H_S$ 6_ $H_N$ 15 BCF.....                            | 40  |
| 4.1 3. P 0,1_ $H_S$ 14,5_ $H_N$ 15 ACF.....                         | 43  |
| 4.1 4. P 0,1_ $H_S$ 6_ $H_N$ 15 ACF.....                            | 46  |
| 4.1 5. Hız alanına kum kalınlığı etkisinin araştırılması.....       | 49  |
| 4.2. Sabit Kum Kalınlığı Değişken Nozul Yüksekliği ( $H_N$ ).....   | 53  |
| 4. 2. 1. P 0,1_ $H_S$ 14,5_ $H_N$ 20 BCF.....                       | 53  |
| 4. 2. 2. P 0,1_ $H_S$ 6_ $H_N$ 10 BCF.....                          | 56  |
| 4. 2. 3. P 0,1_ $H_S$ 6_ $H_N$ 10 ACF.....                          | 59  |
| 4. 2. 4. P 0,1_ $H_S$ 14,5_ $H_N$ 20 ACF.....                       | 62  |
| 4. 2. 5. Nozul yüksekliğinin hız alanına etkisi.....                | 65  |
| 4.3. Partiküllü Yüzeylerde Ses Altı Akışlarda Görünürlük.....       | 69  |
| 4.3.1. Nozul yüksekliğinin görünürlüğe etkisi.....                  | 69  |
| 4.3.2. Rezervuar basınç değişiminin görünürlüğe etkisi.....         | 72  |
| 4.3.3. Partikül yatak kalınlığı değişiminin görünürlüğe etkisi..... | 74  |
| 4.3.4. Farklı ölçüm noktalarına göre görünürlüğün değişimi.....     | 78  |
| 5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....   | 83  |
| KAYNAKLAR.....  | 85  |
| EK 1.....   | 86  |
| EK 2.....   | 87  |
| EK 3.....   | 108 |
| ÖZGEÇMİŞ.....   | 115 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| Simgeler  | Açıklama   |
|-----------|--|
| $\tau$    | Yatak yüzeyindeki kayma gerilmesi                  |
| $\rho$    | Partiküllü yüzey üzerindeki hava yoğunluğu         |
| $\rho_n$  | Nozul çıkışındaki hava yoğunluğu                   |
| $\gamma$  | Özgül ısılar oranı                                 |
| $A_e$     | Nozul çıkış alanı                                  |
| CN        | Fotodiyot merkez pozisyonu                         |
| F         | Partiküllü yüzeye uygulanan kuvvet                 |
| g         | Yer çekimi ivmesi                                  |
| h         | Kum yatak yüzeyinden olan nozul yüksekliği         |
| $H_N$     | Kum yüzeyden olan nozul yüksekliği                 |
| $H_s$     | Kum yatak kalınlığı                                |
| $H_D$     | Kum yatak yüzeyinden olan düşey fotodiyot uzaklığı |
| k         | Mach sayısına bağlılık katsayısı                   |
| LH        | Sol yatay fotodiyot pozisyonu                      |
| $\dot{m}$ | Havanın kütleli debisi                             |
| $M_n$     | Nozul çıkışında Mach sayısı                        |
| P         | Nozul rezervuar basıncı                            |
| $P_e$     | Nozul çıkış basıncı                                |
| $P_s$     | Durgunluk noktası basıncı                          |
| $P_r$     | Şok gelişme bölgesinde basınç                      |
| RH        | Sağ yatay fotodiyot pozisyonu                      |
| $r_n$     | Nozul çıkış yarıçapı                               |
| $u^*$     | Yatak üzerinde hava sürtünme hızı                  |
| $U_c$     | Krater kenarında gaz hızı                          |
| $V_d$     | Krater kenarında partikül hızı                     |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|  |    |
|--|----|
| Şekil 2.1. Alüminyum oksit ve kum parçacıklarının foto mikroskopi fotoğrafları.....                    | 5  |
| Şekil 2.2. Görünürlük yüzdesi grafiği .....  | 6  |
| Şekil 2.3. Parçacık boyutu ve ölçüm doğrultusuna bağlı görünürlük yüzdesi grafiği .....                | 7  |
| Şekil 2.4. Yavaş rejim ve hızlı rejim için parçacık hareket doğrultuları .....                         | 9  |
| Şekil 2.5. Yavaş rejim parçacık sirkülasyonu CFD sonuçları .....                                       | 10 |
| Şekil 2.6. Jet modülasyonu bölgeleri .....   | 11 |
| Şekil 2.7. Soldan sağa büyüyen Reynolds sayıları için aşınma kalıpları .....                           | 12 |
| Şekil 2.8. Parçacık boyutuna bağlı kritik yüzey gerilmeleri grafiği .....                              | 12 |
| Şekil 2.9. Soldan sağa artan iç dağılım yoğunluğunda aşınma kalıpları.....                             | 13 |
| Şekil 2.10. Farklı akış evrelerindeki krater oluşumları .....  | 14 |
| Şekil 2.11. Farklı akış şartları ve malzemeler için nozul altında uzaklığa bağlı erozyon .....         | 15 |
| Şekil 2.12. Farklı akış şartları ve malzemeler için nozul altında uzaklığa bağlı erozyon .....         | 16 |
| Şekil 2.13. Parçacıklı yüzey ve jet etkileşimi mühendislik modeli.....                                 | 17 |
| Şekil 2.14. Krater yarıçapının parçacık hız ve doğrultusuna etkisi.....                                | 18 |
| Şekil 2.15. Nozul yüksekliğinin parçacık hız ve doğrultusuna etkisi .....                              | 19 |
| Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan nozul teknik çizimi .....   | 20 |
| Tablo 3.1. Görünürlük test matrisi .....   | 21 |
| Şekil 3.2. Görünürlük deney düzeneği .....   | 21 |
| Şekil 3.3. Görünürlük ölçüm noktaları.....   | 22 |
| Şekil 3.4. PIV ölçüm düzeneği.....   | 23 |
| Şekil 3.5. PIV ölçümü için kaydedilmiş iki fotoğraf .....  | 24 |
| Şekil 3.6. PIV ölçümü için bölünmüş arama ve eşleştirme ekranları .....                                | 24 |
| Şekil 3.7. Çapraz korelasyonla eşleştirme .....  | 25 |
| Şekil 3.8. Görüntü işleme sonucu elde edilen vektörel hız alanı .....                                  | 25 |
| Şekil 3.8. Çalışma kapsamında kullanılan PIV deney düzeneği .....                                      | 26 |
| Şekil 3.10. Argon İyon lazer .....   | 27 |
| Şekil 3.11. Yüksek hızlı kamera ve ışık taşıyıcı optik düzenek.....                                    | 27 |
| Şekil 3.12. PIV kalibrasyon ekranı .....   | 28 |
| Şekil 3.12. Renk skalası halinde hız alanı ekranı.....   | 28 |
| Şekil 3.13: Kum karakterizasyonunda kullanılan elektronik mikroskop .....                              | 29 |
| Şekil 3.14: Kum örneği fotoğrafı (a) ve fotoğrafın filtrelenmiş hali (b).....                          | 30 |
| Şekil 3. 15: Deneylerde kullanılan kuma ait partikül boyut dağılım histogramı .....                    | 30 |
| Şekil 4. 1. P 0,1_ HS 14,5_ HN 15 BCF için bileşke hız alanı.....                                      | 33 |
| Şekil 4. 2. Hız dağılım histogramı .....   | 34 |
| Şekil 4. 3. Eksenlere göre hız bileşenleri grafiği .....   | 35 |
| Şekil 4. 4. 102 - 103, 103 - 104, 104 - 105, 105 - 106 nolu resim çiftleri ile çıkan hız alanları..... | 37 |
| Şekil 4. 5. P 0,1_ HS 14,5_ HN 15 BCF için bileşke hız alanı.....                                      | 38 |
| Şekil 4. 6. P 0,1_ HS 14,5_ HN 15 BCF hız dağılım histogramı.....                                      | 38 |
| Şekil 4. 7. P 0,1_ HS 14,5_ HN 15 BCF için bileşke hız alanı u hız alanı, v hız alanı.....             | 39 |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 4. 8. P 0,1_ HS 6_ HN 15 BCF için bileşke hız alanı, u hız alanı , v hız alanı ....   | 41 |
| Şekil 4. 9. P 0,1_ HS 6_ HN 15 BCF için bileşke hız alanı, u hız alanı, v hız alanı ....  | 42 |
| Şekil 4. 10. P 0,1_ HS 6_ HN 15 BCF için bileşke hız alanı, u hız alanı, v hız alanı....  | 42 |
| Şekil 4. 11. P 0,1_ HS 14,5_ HN 15 ACF için bileşke hız alanı, u hız alanı, v hız alanı<br>.....  | 44 |
| Şekil 4. 11. P 0,1_ HS 14,5_ HN 15 ACF için bileşke hız alanı, u hız alanı, v hız alanı<br>.....  | 45 |
| Şekil 4. 12. P 0,1_ HS 14,5_ HN 15 ACF için bileşke hız alanı, u hız alanı, v hız alanı<br>.....  | 46 |
| Şekil 4. 13. P 0,1_ HS 6_ HN 15 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız<br>alanı (c).....  | 47 |
| Şekil 4. 14. P 0,1_ HS 6_ HN 15 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız<br>alanı (c).....  | 48 |
| Şekil 4. 15. P 0,1_ HS 6_ HN 15 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız<br>alanı (c).....  | 49 |
| Şekil 4. 16. Krater öncesi Hs 14,5 ve Hs 6 için maksimum bileşke hız (a), u hızı (b), v<br>hızı (c) dağılım grafikleri .....                          | 50 |
| Şekil 4. 17. P 0,1_ HS 14,5_ HN 20 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız<br>alanı (c).....   | 54 |
| Şekil 4. 18. P 0,1_ HS 14,5_ HN 20 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız<br>alanı (c).....   | 55 |
| Şekil 4. 19. P 0,1_ HS 14,5_ HN 20 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız<br>alanı (c).....   | 56 |
| Şekil 4. 20. P 0,1_ HS 6_ HN 10 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız<br>alanı (c).....  | 57 |
| Şekil 4. 21. P 0,1_ HS 6_ HN 10 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız<br>alanı (c).....  | 58 |
| Şekil 4. 22. P 0,1_ HS 6_ HN 10 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız<br>alanı (c).....  | 59 |
| Şekil 4. 23. P 0,1_ HS 6_ HN 10 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız<br>alanı (c).....  | 60 |
| Şekil 4. 24. P 0,1_ HS 6_ HN 10 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız<br>alanı (c).....  | 61 |
| Şekil 4. 25. P 0,1_ HS 6_ HN 10 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız<br>alanı (c).....  | 62 |
| Şekil 4. 26. P 0,1_ HS 14,5_ HN 20 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v<br>hız alanı (c).....   | 63 |
| Şekil 4. 27. P 0,1_ HS 14,5_ HN 20 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v<br>hız alanı (c).....   | 64 |
| Şekil 4. 25. P 0,1_ HS 6_ HN 10 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız<br>alanı (c).....  | 65 |
| Şekil 4. 26. Nozul yüksekliğine bağlı görünürlük değişimi.....  | 70 |
| Şekil 4. 27. Farklı basınç ve fotodiyot yüksekliklerinde görünürlük - nozul yüksekliği ..<br>ilişkisi .....   | 72 |
| Şekil 4. 28. Görünürlük değerinin 14,5 cm yatak kalınlığı için (a) ve 7 cm yatak<br>kalınlığı için (b) basınca bağlı değişim grafiği .....            | 73 |
| Şekil 4. 29. Görünürlük değerinin 0,1 bar rezervuar basıncı için ( a ) ve 0,2 bar<br>rezervuar basıncı için ( b ) kum kalınlığına bağlı değişimi..... | 75 |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 4. 30. 7 cm yatak kalınlığında difüze gaz patlamalarıyla erozyon.....   | 76 |
| Şekil 4. 31. 7 cm yatak kalınlığında partikül saçılımı.....   | 76 |
| Şekil 4. 32. 14,5 cm yatak kalınlığında şematik partikül saçılımı .....   | 77 |
| Şekil 4. 33. 14,5 cm yatak kalınlığında partikül saçılımı.....  | 77 |
| Şekil 4. 33. 0,1 bar basınçta nozul merkezinin sağında ( a ) ve solunda ( b ) yatak kalınlığına bağlı görünürlük değişimi ..... | 78 |
| Şekil 4. 34. 0,2 bar için yan ve merkez pozisyonlarda görünürlük değişimi .....   | 79 |
| Şekil 4. 35. 0,1 bar için yan ve merkez pozisyonlarda görünürlük değişimi .....   | 80 |
| Şekil 4. 36. 0,1 bar için 5 ve 10 cm fotodiyot yüksekliğinde görünürlük değişimi .....  | 81 |
| Şekil 4. 36. 0,2 bar için 5 ve 10 cm fotodiyot yüksekliğinde görünürlük değişimi .....  | 81 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

|   |    |
|---|----|
| Çizelge 4. 1. Krater öncesi Hs 6 ve Hs 14,5 için hız dağılım çizelgeleri.....                             | 49 |
| Çizelge 4.2. Krater sonrası Hs 6 ve Hs 14,5 için hız dağılım çizelgeleri.....                             | 52 |
| Çizelge 4. 3. 20 cm ve 10 cm nozul yükseklikleri için krater oluşumu öncesi hız dağılımı çizelgesi .....  | 66 |
| Çizelge 4. 4. 20 cm ve 10 cm nozul yükseklikleri için krater oluşumu sonrası hız dağılımı çizelgesi ..... | 66 |
| Çizelge 4. 5. 15 cm ve 10 cm nozul yükseklikleri için krater oluşumu öncesi hız dağılımı çizelgesi .....  | 67 |
| Çizelge 4. 6. 15 cm ve 10 cm nozul yükseklikleri için krater oluşumu sonrası hız dağılımı çizelgesi ..... | 68 |

## 1. GİRİŞ

Uzun yıllardan beri nozul ve partiküllü yüzey etkileşiminin genel karakteristiğini anlayabilmek için çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Uzay araçlarının yada hava araçlarının düşey iniş kalkış operasyonları sırasında araç üzerinde ve hareket alanında bazı değişiklikler meydana gelmektedir. Bu olaylardan en önemlileri araç çevresinde görünürlük düşüşü ve nozul etkisiyle çevreye saçılan parçacıkların çevre ve araç üzerinde yol açtığı tahribattır. Görünürlük, çevre ve ekipman tahribatı bilimsel araştırmaların önemi ve çevre güvenliği açısından bilimsel araştırmalar alanında önemli ve öncelikli bir yerde durmaktadır.

Bu araştırmanın amacı görünürlük ve parçacıkların hareket karakteri ile ilgili bilgi edinmek ve elde edilen sonuçlardan yola çıkarak söz konusu problemlerin teknik olarak ortadan kaldırılması için gerekli bilgiyi elde etmektir. Araştırmanın sağlayacağı bilgiler sayesinde ortamdaki parçacıklardan zarar görmüş yada geçici fonksiyon kaybı yaşayan ekipmanlar nedeniyle başarısız olmuş keşif operasyonlarının önüne geçmek hedeflenmektedir.

Çalışma kapsamında ilk adım olarak nozul ve partiküllü yüzey etkileşimi sonucu oluşabilecek parçacık hareketini genel olarak karakterize edebilmek için kısa adı PIV (Particle Image Velocimetry) olan görsel ölçme tekniği kullanılmıştır. Lazerle görsel hale getirilmiş ortamdaki yüksek hızlı kamera yardımıyla çekilen fotoğrafların işlenmesiyle parçacık hareketleri incelenmiş ve hız alanları hakkında bilgi edinilmiştir. Çevresel ve uygulama şartlarındaki değişimin parçacık hareketleri üzerine olan etkisi bu yolla tespit edilmeye çalışılmış etkileşim sırasında etkili olan mekanizmalar tespit edilmiştir.

Araştırmanın ikinci basamağı olarak etkileşim sonucu oluşan parçacık hareketlerine bağlı görünürlük kaybının hangi şartlara bağlı olduğu araştırılıp literatürdekiyle benzer olduğu yada literatürden farklı olduğu durumlar incelenmiş; bunların nedenleri açıklanmıştır. Çalışmanın bu kısmı da lazer ve alıcı arasındaki katmanın yansıtıcı özelliğinden yararlanarak bir fotodiyot ve lazer kaynağı ile görünürlük ölçümleri alınmıştır.

Konuyla ilgili yapılan daha önceki çalışmalar daha çok NASA' nın teknik raporlarına dayanmaktadır ve ağırlıklı olarak nozul partiküllü yüzey etkileşimi sonucu oluşan krater formu üzerinde durulmuştur. Bu ölçümler çok kısa süreli video kayıtları ve fotoğraflardan oluşmaktadır. Bu araştırmayı mevcut çalışmalardan ayran yanı nozul - partiküllü yüzey etkileşiminin PIV ( Particle Image Velocimetry ) denen görüntülü ölçme tekniğinden yararlanılarak incelenmiş olmasıdır. Bu ölçme tekniği ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Çalışmada nozul - partiküllü yüzey etkileşimi araştırmaları ses altı akışlar için yapılmıştır. Uygulamada nozullardaki akışkan hızları ses üstü düzeyde olmasına rağmen bu hızlara ulaşıncaya kadar nozul akışı bir ses altı akış evresinden geçmektedir. Dolayısıyla ses altı akış evresi önemli bir inceleme konusu haline gelmiştir.

Atmosfersiz ortamlarda parçacıkların nozula ve araç üzerine direk bir yönelişi net olarak gözlemlenmemiş olmasına rağmen atmosferli ortamlarda parçacıkların araç ve ekipmanları üzerine yönelişi açıkça tespit edilmiştir. Böyle bir durumun varlığı atmosfer şartlarında ses altı akış ve partiküllü yüzey etkileşimi konusunda araştırmalar yapılması gerekliliğini doğurmuştur ve bu çalışmayla konuya katkı sağlanmaya çalışılmıştır.



## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Nozul ve partiküllü yüzey araştırmalarının en eskilerinden biri Leonard Roberts ( 1964 ) tarafından yapılan süpersonik akışkan hızı şartlarında ele alınan çalışmadır. Bu çalışmada roket yakınındaki erozyon ve parçacık hareket karakteristiklerini açıklamak için bir teorik model oluşturulmuş ve teorik modelin mevcut deneysel çalışmalarla karşılaştırarak uygunluğu test edilmiştir. Problemin egzoz gaz dinamiği, yüzey aşınma mekanizmaları ve toz bulutu boyunca görünürlük olayı gibi kısımları özellikli ilgi alanları olmuştur. İlk bulgulara göre nozul itiş karakteristikleri ve partikül özellikleri erozyonun davranışını belirlediği düşünölmektedir. Ayrıca parçacık boyutu ve aracın ( nozulun ) parçacıklı yüzeyden olan uzaklığının görünürlük üzerinde belirgin etkilere sahip olduğu düşünölmektedir.

Nozul egzoz çıkış akışı ve arpma Roberts ( 1964 )' in çalışmasının ilk kısmını oluşturmaktadır. Çalışmada nozul egzozu ve çarpması ile ilgili olarak elde edilen teorik modeller mevcut deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. şartlar süpersonik akış koşullarındadır. Nozul akışının temel karakteri kütle korunum ve momentum ifadeleri kullanılarak oluşturulmuştur. İlk adım olarak yoğunluğun bir jet akışı sırasında nasıl değiştiği hususu ifade edilmiştir. Bunun için ( Cos  $\theta$  )<sup>k</sup> şeklinde bir yoğunluk profili kabulü yapılarak belli uzaklıklardaki yoğunluk dağılımı, nozul çıkış ağzındaki yoğunluğa göre şu şekilde ifade edilmiştir

$$\frac{\rho}{\rho_n} = \frac{k}{2} \left( \frac{h}{r_n} \right)^{-2} (\cos \theta)^k \quad (2.1)$$

$k = \gamma (\gamma - 1) M_n^2$  şeklinde ifade edilen akışın Mach sayısına ve öz ısılar oranına bağlı k katsayısıyla sıkı bir şekilde bağlantılıdır. Buradan roket çıkışındaki gazın yoğunluk değişiminin roketten yüzeye olan uzaklığın karesiyle azaldığı görölmektedir.

İniş yapmakta olan bir uzay aracın altında oluşan basınç dağılımı şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\frac{h}{r_n} \sqrt{\frac{2}{k+2}} \leq 1 \quad \text{iken} \quad \frac{p_s}{p_r} = 1 \quad (2.2)$$

Bu eşitlik nozul çıkışının partiküllü yüzeye çok yakın olduğu durumlarda geçerlidir. Böyle bir durumda basıncın çıkış ağzından itibaren neredeyse hiç değişmediğini göstermektedir.

$$\frac{h}{r_n} \sqrt{\frac{2}{k+2}} \geq 1 \quad \text{iken} \quad \frac{P_s}{P_r} = \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} \gamma M_n^2 \right)^{\frac{-\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.3)$$

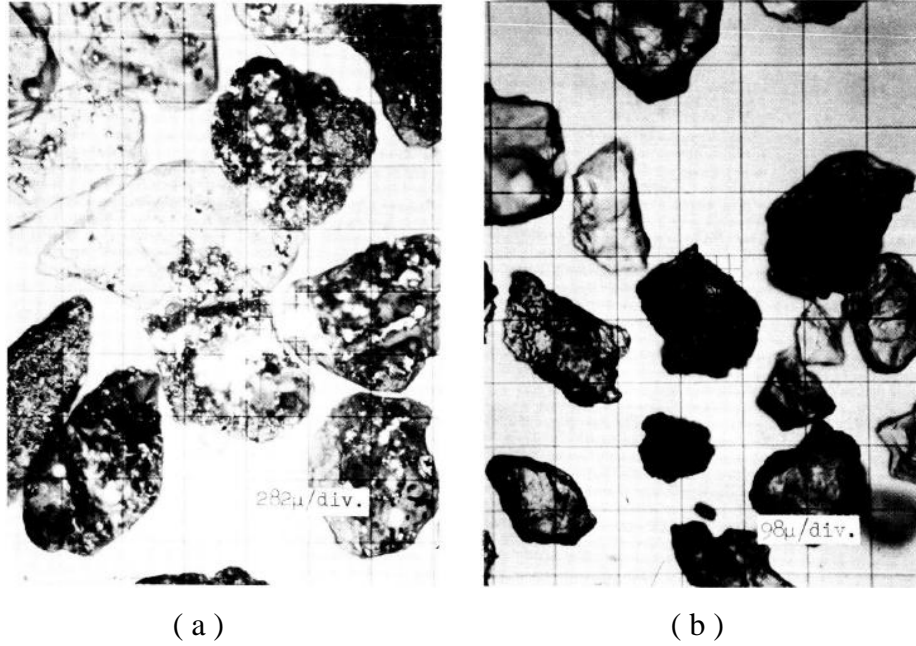
Yukarıda belirtildiği gibi nozulun yerden olan yüksekliğinin nozul çapından fazla olduğu durumlarda yüzeydeki basıncın nozul çıkışındaki basınç cinsinden ifadesi 2.3 numaralı denklemde verilmiştir. Bu denklem 2.3 nolu denklemin sol tarafındaki ifadenin ikiden büyük olduğu durumlarda daha doğru sonuç vermektedir ( Roberts 1964).

Roberts ( 1964 )' in çalışmasına göre artan partikül boyutuyla birlikte parçacık aşınmasının arttığı belirtilmiştir. Bu durumun beklenmeyen bir sonuç olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir. Ve bu olayın meydana gelme sebebi büyük parçacıkların dikkate değer hızlara ulaşamamasından dolayı momentum transferini verimli bir şekilde gerçekleştirememesi olarak belirtilmiştir. Çalışmada kohezyon ve yer çekimi etkilerinin olmadığı kabul edildiğinde artan partikül boyutuyla erozyonun da artacağı belirtilmiştir. Partikül boyutu arttıkça kohezyon etkisi önemini yitirecektir. Fakat partikül ağırlığı uygulanan kayma gerilmesiyle karşılaştırılabilecek düzeyde ise kayma gerilmesi oranı önemli bir parametre haline gelmektedir.

Roberts ( 1964 )' in çalışmasında görünürlük düşüşü, krater kenarından yatağı terk eden parçacıkların oluşturduğu konik perdeden ışığın geçemeyip geri yansması şeklinde açıklanmıştır. Merkez doğrultuda partikül perdesi katmanı sayısı dört iken yan pozisyonlarda ikidir. Katman sayısı ile görünürlüğün değişimi eksponansiyeldir. Çalışmada görünürlük seviyesinin parçacık boyutuyla sıkı bir bağlantısı mevcuttur. Parçacık boyutu küçüldükçe görünürlük seviyesi düşmektedir. Küçük parçacıkların akışkan içindeki fazlalığı ortamın ışık geçirgenliğini ciddi şekilde azaltmaktadır. Büyük parçacıklar için ise görünürlük düşüşü ortam içinde yeterli miktarda parçacık yüzmeye başladığında görünürlüğün düşebileceği belirtilmiştir ( Roberts 1964).

Konuyla ilgili 1965 yılında Norman ve ark. 'ın yaptığı çalışmada vakum altında süpersonik bir nozuldan gevşek partikül yatak üzerine soğuk gaz göndererek yapılan deneylerle ve literatürle yapılan karşılaştırmalarla erozyon karakteristiklerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Erozyonun bağlı olduğu etkenler ve erozyonun görünürlüğe olan etkileri araştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada aşınma sırasında krater ölçümleri alınmıştır.

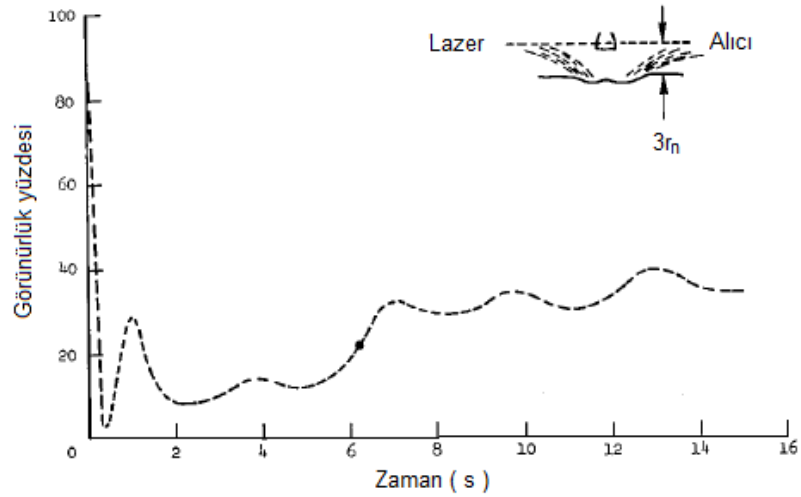
Testlerde 2, 54 cm çapında 3, 36 mach' a ulaşmak için tasarlanmış bir nozul kullanılmıştır. Testlerin büyük bir kısmında ticari bir aşındırıcı olarak kullanılan Alüminyum oksit kullanılmıştır; fakat bunun yanında gözenekli volkanik bir kaya olan ponza taşı partikülleri ve temiz döküm kumu da kullanılmıştır. Partikül boyutları 1 mikron ve 543 mikron arasında değişmektedir. Partikül boyutu tespiti fotomikroskoplarla belirlenmiştir. Test malzemesinden alınan parçacık resimlerinden birkaçı Şekil 2.1' de verilmiştir ( Norman ve ark. 1965 )



**Şekil 2.1.** 543 mikron çapında Alüminyum oksit ( a ) ve 98 mikron çapında kum ( b ) parçacıklarının foto mikroskopi fotoğrafları ( Norman ve ark. 1965 )

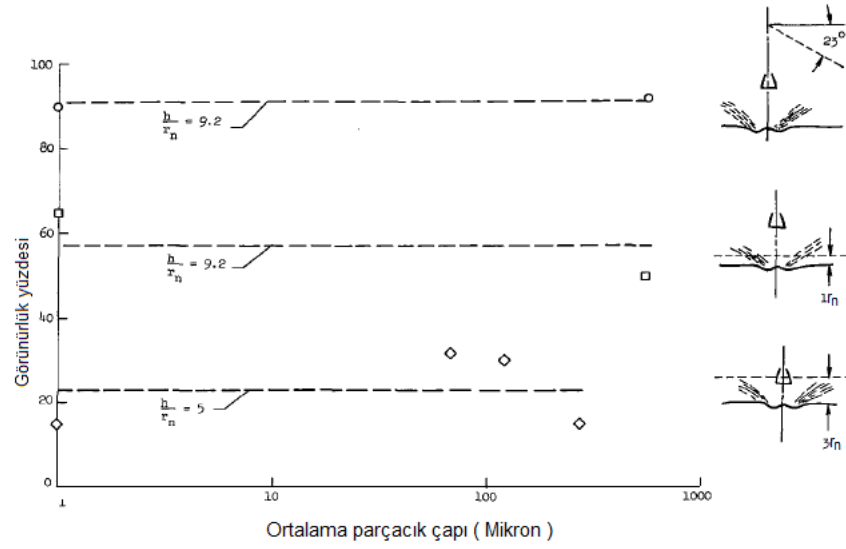
Bu çalışmada testler sırasında farklı kum kalınlıkları kullanılmıştır. partikül boyutunun aşınma üzerine etkilerinin araştırılması için yapılan deneylerde 1 cm kalınlığına yakın yatak kalınlıkları kullanılırken krater oluşumu incelenen testlerde 16 cm kalınlığında

yataklar kullanılmıştır. Görünürlük testlerinde bizim kullandığımız yöntemle benzer şekilde bir lazer kaynağı ve bir fotodiyottan oluşan ölçüm seti kullanılmıştır. Lazerin ölçüm doğrultusu yatak yüzeyine paralel ve onu baştan başa kat edecek şekilde ayarlanmıştır. Şekil 2.2' de görünürlük ölçümlerinden birinin sonucu olarak elde edilen grafiğin yumuşatma filtresinden geçirildikten sonra elde edilmiş şekli verilmiştir.



**Şekil 2.2.** Görünürlük yüzdesi grafiği ( Norman ve ark. 1965 )

Şekil 2.2' deki grafik incelendiğinde nozulun akış modülasyonunu tamamlayıncaya kadar görünürlükte çok kısa sürede çok keskin bir düşüş gösterdiği ve krater karakteri kazanıldıkça belli bir artış gözlenmiştir. Çalışmanın nozul yüksekliği ve ölçüm doğrultusu ile ilgili kısmına ait görünürlük grafiği Şekil 2.3' de verilmiştir.



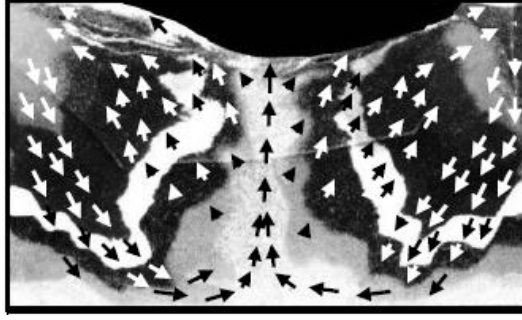
**Şekil 2.3.** Parçacık boyutu ve ölçüm doğrultusuna bağlı görünürlük yüzdesi grafiği ( Norman ve ark. 1965 )

Şekil 2.3' deki grafik incelendiğinde görünürlüğün nozul yüksekliğinin artışıyla arttığı ve lazerin kat ettiği parçacık perdesi sayısının teke düşmesiyle arttığı görülmüştür. Çalışmanın temel sonuçları ise şöyledir. Nozulun erozyonu başlatamayacağı net bir yükseklik seviyesi mevcuttur. Bu seviye yüzey parçacık boyutuna bağlıdır. Görünürlük düşüşünün en kuvvetli yaşandığı zamanlar nozul itişinin arttığı anlardır. Nozul altındaki parçacıklı yüzey kalınlığı düştükçe görünürlük artacaktır. Özellikle küçük parçacıklar için partiküller arasındaki kohezyon kuvveti erozyon üzerinde oldukça etkili bir parametredir ( Norman ve ark. 1965 ).

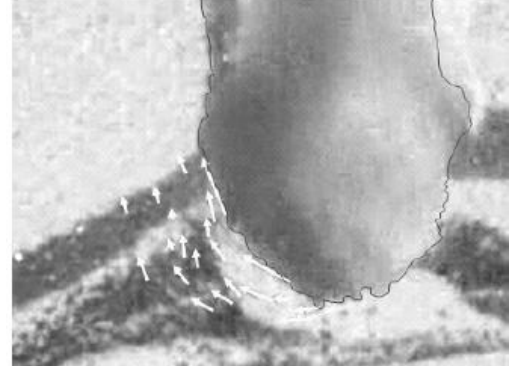
2009 yılında Philip T. Metzger tarafından yapılan deneysel ve nümerik erozyon çalışması jet ve partikülü yüzey etkileşimi konusundaki çok önemli bir çalışmadır. Bu çalışmada difüzyon kaynaklı aşınma konusunu gündeme getirmiş ve etkileşim sırasında büyük kütleler halinde yataktan olan taşınım olayı teoriye dahil edilerek bu olayın baskın etkisi açıklanmıştır. Metzger ve ark. ( 2009 )' in bu makalesinde özel olarak yavaş rejim için denklemler ve korelasyonlar türetilmiş olsa da difüzyon kaynaklı taşınım mekanizmasının düşük ve yüksek hız rejimlerinin ikisinde de gerçekleştiği belirtilmiştir. Apollo ve Viking zamanında yapılan erozyon tanımları ve üretilen aşınma teorileri bu etki dikkate alınmadan geliştirilmediği için tam olarak doğru kabul edilmemektedir ( Metzger ve ark. 2009 ).

Apollo ve Viking uzay keşifleri sırasında üç temel erozyon mekanizması olduğu tespit edilmiştir. Bunlardan ilki viskoz erozyon denen kum yatağın en üst yüzeyindeki partiküllerin havanın kinetik enerjisiyle süpürülmesiyle ortaya çıkan aşınma mekanizmasıdır. İkinci mekanizma yatak dayanma kapasitesi aşımı teorisidir. Bu teorinin temelini ise jetin tam altında akışın durgun kabul edildiği noktadaki basıncın, yatağın dayanma kapasitesini aşarak kum yatağı aşağı doğru itirmesi sonucu tabanda çukur oluşturması esası oluşturur. Fakat bu mekanizma dünyanın partiküller arası sürtünme katsayısı yüksek toprağı ve atmosferik şartların varlığı altında gerçekleşmesi zor bir olaydır. Ay ve Mars toprağında gerçekleşmeye çok müsait bir olaydır. Üçüncü aşınım mekanizması olan difüze gaz patlamalarıyla erozyon, yatak yüzeyine gelen gazın dinamik basınç etkisiyle partiküller arası boşluklara nüfuz ederek başka bir noktadan büyük kütleler halinde kumu da beraberinde kaldırıp patlayarak yatak yüzeyine çıktığı durumdur. Özellikle atmosferik şartlarda önemli bir yerde duran bu mekanizma irdelenmelidir ( Metzger ve ark. 2009 ).

Bu çalışmadaki deneysel yöntemlerde iki farklı yol ele alınmıştır. İlk yöntem bir kenarı keskinleştirilmiş şeffaf kapla simetrik olarak bölünmüş nozul tarafından yatağa gönderilen havanın partiküllü yüzeyle etkileşimini yüksek hızlı kamera kayıtlarıyla incelemek ve krater oluşum mekanizmaları hakkında bilgi toplamak oluşturmaktadır. İkinci yöntem ise daha çok yüksek hızlı akışlarda kullanılmak üzere farklı renkte kum ile oluşturulmuş çok katmanlı bir yatak kompozisyonu üzerinden krater oluşumunu inceleme esasına dayanmaktadır. Parçacıkların krater içindeki hareket doğrultuları hakkında da ayrıntılı bilgi sağlayan bu çalışmada yavaş rejim ve hızlı rejim için deneysel sonuçlar Şekil 2.4' de verilmiştir.



( a )

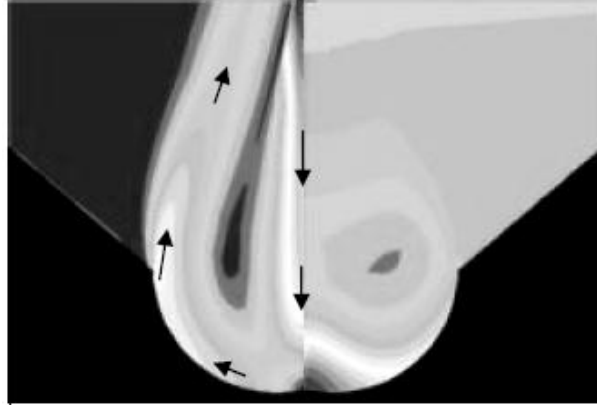


( b )

**Şekil 2.4.** Yavaş rejim ( a ) ve hızlı rejim için ( b ) parçacık hareket doğrultuları ( Metzger ve ark. 2009 ).

Çalışmanın sonucu olarak yavaş rejimde nozul durağanlık noktasındaki kısımda daha alt katmanlardaki malzemenin düşey olarak üst katmanlara ilerlediği görülmüştür. Henüz krater denemeyecek kadar belirsiz çukurluğun gaza temas eden üst yüzeyindeki partiküller eğriliğe teğet olacak şekilde kenarlara itilirken yanlardaki basınç alttaki katmanların durağanlık noktasından yukarı doğru itilmesine neden olmuştur. Hızlı rejimde ise durum biraz daha farklılaşmıştır. Çukur tabanında oluşan yüksek basınç durağanlık noktasından üst yüzeye düşey malzeme çıkışını engellerken parçacıklar krater formunun eğriliğine teğet olacak şekilde sıfır kayma şartına uymadıkları için gazdan biraz daha düşük hızlarla yatağı terk ederler ( Metzger ve ark. 2009 ).

Çalışmada tespit edilen diğer bir husus ise birim zamanda yataktan tahliye edilen partikül akısının zaman içinde neredeyse sabit kalırken; krater genişleme hızının ise belirgin bir şekilde azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni ise yapılan CFD analizleriyle şu şekilde açıklanmıştır. Krater çapı büyüdükçe krater kenarlarından kayarak merkeze gelen parçacıklar tekrar geri gönderilerek sirkülasyona girmektedirler. Bunun yanında küçük krater konisinden ayrılan bazı parçacıklar nozul ağzından çıkmakta olan aşağı yöndeki hava akımına kapılarak tekrar krater tabanına itilmektedir. Şekil 2.52 de bu olayın CFD sonucu verilmiştir. Açık renkteki bölgeler daha yüksek gaz hızlarını belirtmektedir ( Metzger ve ark. 2009 ).

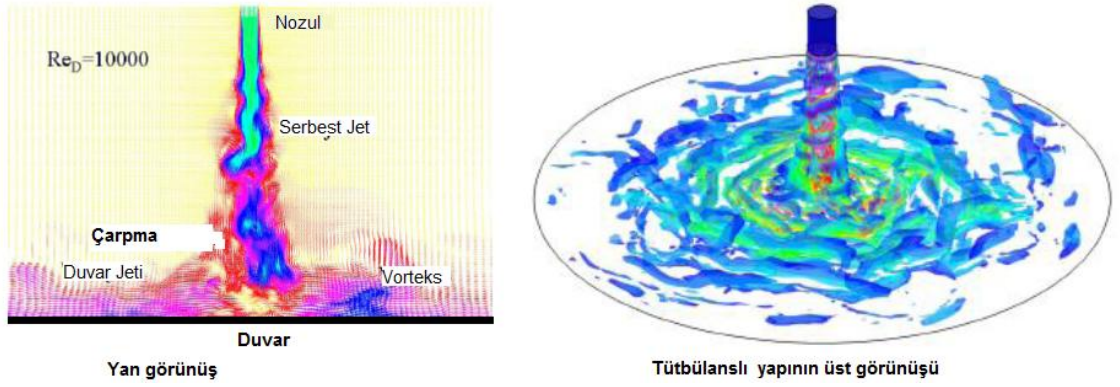


**Şekil 2.5.** Yavaş rejim parçacık sirkülasyonu CFD sonuçları ( Metzger ve ark. 2009 )

Von Karman Enstitüsü'nde 2010 yılında Khalid ve ark. tarafından yapılan deneysel araştırmada jet ve partiküllü yüzey etkileşimine hazırlık olması açısından yapılan süpersonik seviyedeki jet - düzlem yüzey etkileşimi testleri jet modülasyonu ve akış referans şartları tespiti açısından iyi bir ön faz araştırması olmuştur.

Çalışmada jet modülasyonunun kısımları Şekil 2.6' da belirtilerek kısımları ile ilgili bilgi verilmiştir. Temel olarak hava jeti üç ana kısımdan oluşmuştur. Bunlar serbest jet bölgesi, çarpma bölgesi ve duvar jeti bölgesidir. Serbest jet bölgesi duvar etkisinden rahatsız olmayan akışın blok halinde ilerlediği bölgedir ve nozul çıkış ağzından çarpma bölgesine kadar devam eder. Çarpma bölgesi ise artık duvarın hissedildiği ve akışta rahatsızlıklarla beraber bozulmalarında başladığı bölgedir. Duvar jeti bölgesi ise akışın duvara çarptığı bölge olup düşeyden yataya geçerek yön değiştirdiği bölgedir. Bu bölgede bir sınır tabaka oluşmakla beraber vorteks ve dalgalanmalar hat safhadadır. Duvar jeti bölgesindeki vorteks ve dalgalanmaların aşınma üzerine ciddi etkileri vardır ( Khalid ve Ark. 2010 ).



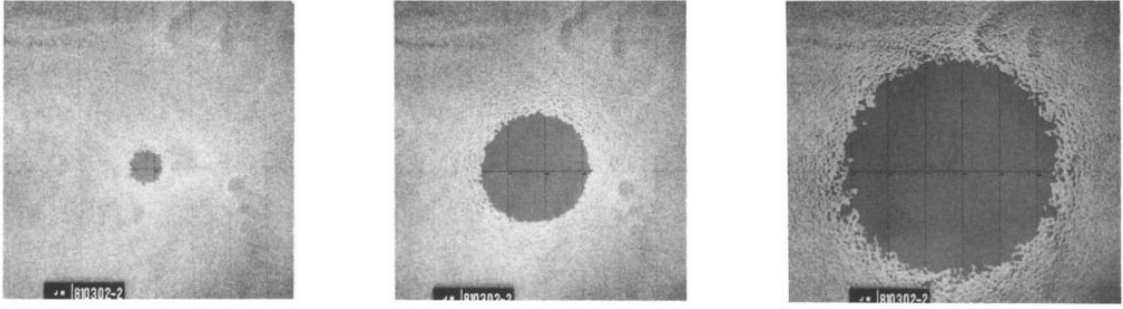


**Şekil 2.6.** Jet modülasyonu bölgeleri ( Khalid ve Ark. 2010 )

Çalışma jet akışı ve durağanlık bölgeleri hakkında fikir vermekle beraber modülasyonun jet ve yüzey arasındaki mesafe ile değişimi hakkında da faydalı bilgiler sağlamıştır. Bu konu iniş yapmakta olan bir araç nozulunun aşındırma karakteristikleri hakkında faydalı bir referans bilgi sağlamaktadır.

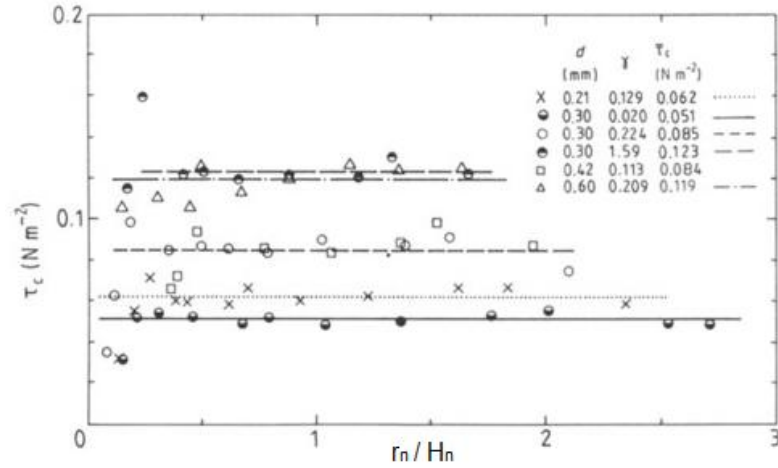
1985 yılında Viegas ve ark. tarafından yapılan çalışmada düzlem yüzey üzerinde jet kaynaklı kayma gerilmelerinin ölçümü için yeni bir teori kurma amaçlanmıştır. Teorinin temeli düzlem bir yüzey üzerine yayılmış düzgün dağılımlı küçük kum parçalarının aşınma kalıpları üzerinden oluşturulan korelasyonlara dayandırılmaya çalışılmıştır ( Viegas ve ark. 1985 ).

Öncelikle akış karakteri belirlenip yüzey gerilmeleri preston tüpüyle ölçülmüş, yüzeydeki hızlar basınç ve deney setinin ölçüsel parametrelerden yola çıkarak elde edilen hız değerleri ve sıcak tel anemometresi ölçümleriyle elde edilen değerlerin iyi bir uyum içinde olduğunu test ettikten sonra nozul parametrelerinden bağımsız olarak elde edilen kum tabakası aşınma kalıpları oluşturulmuştur. Bu kalıplar Şekil 2.7' de farklı Reynolds sayıları için belirtilmiştir ( Viegas ve ark. 1985 ).

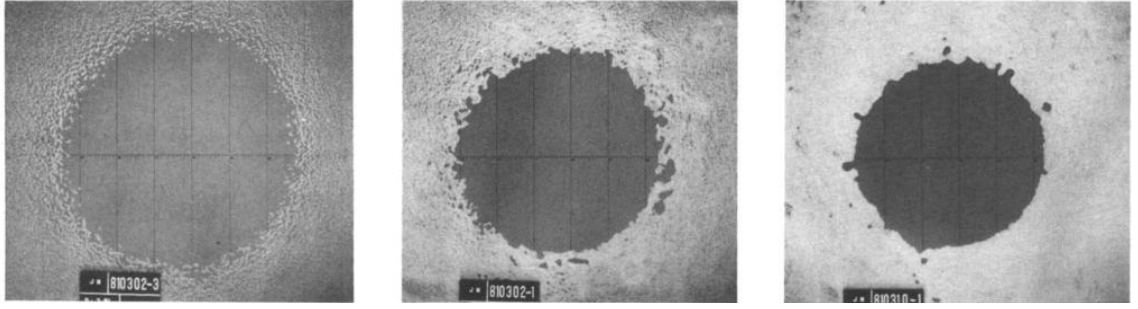


**Şekil 2.7.** Soldan sağa büyüyen Reynolds sayıları için aşınma kalıpları ( Viegas ve ark. 1985 )

Farklı kum parçacıkları için kritik kayma gerilmesi değerlerini içeren grafik Şekil 2.8' de verilmiştir. Buna göre kritik yüzey gerilmesinin nozul parametrelerinden çok parçacık boyutuna bağlı olduğu görülmektedir. Yine Şekil 2.9 incelendiğinde farklı iç dağılım yoğunluğundaki parçacıklar kullanılarak elde edilen aşınma kalıpları görülmektedir.



**Şekil 2.8.** Parçacık boyutuna bağlı kritik yüzey gerilmeleri grafiği ( Viegas ve ark. 1985 )

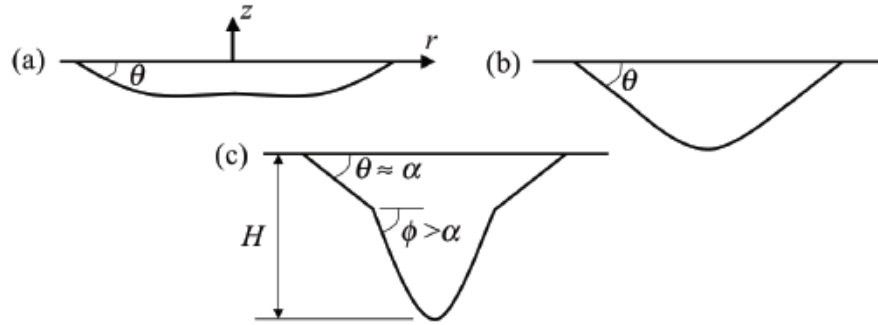


**Şekil 2.9.** Soldan sağa artan iç dağılım yoğunluğunda aşınma kalıpları ( Viegas ve ark. 1985 )

Haehnel ve ark. tarafından 2008 yılında yapılan araştırma laboratuvar şartlarında ses altı bir jet altındaki partiküllü yüzeyin bir nozul tarafından aşındırılması ve simetrik gözlem penceresinden krater oluşumunun incelenmesi şeklinde yapılmıştır. Çalışmalar sırasında  $134 \mu$  ve 6 mm çapları arasında çeşitli partiküller kullanılmıştır. Krater oluşumları başlangıçtan krater genişlemesinin sonuna kadar video kamera ile takip edilerek kayıtların Matlab Image Processing aracıyla işlenmesiyle gerekli sonuçlar elde edilmiştir. Bunun yanında parçacık geçirgenliği de ölçülmüştür. Çalışma sonucunda krater yanak eğimlerinin ve derinliğinin jet şiddetine bağlı ifade eden ampirik kestirimi yapılmıştır. Krater derinliğinin parçacık geçirgenliğinden az miktarda etkilendiği varılan sonuçlardan biridir ( Haehnel ve ark. 2008 ).

Çalışmanın temel amaçlarından biri de parçacıkların menzil ve mobilitesini krater geometrisine bağlı olarak ifade edilmesidir. Elde edilen bulgulara göre krater derinliğinin yatak malzemesi mobilitesi konusunda fikir verirken yanak eğim açılarının ise yataktan ayrılan parçacık menzili hakkında bilgi verdiği tespit edilmiştir. Şekil 2.10' da farklı durumlar için oluşan krater formları verilmiştir. Şekil 2.10 ( a )' daki krater formu yavaş rejimde gelişmekte olan krater formudur. Bu durum çok erken safhalarda görülen bir oluşumdur. Krater kenar açısı parçacıkların yeniden pozisyonlanma açısından küçüktür. Aynı şeklin ( b ) maddesinde verilen krater formu zayıf bir jet çarpışı altında neredeyse hava akışıyla dengede olan ve krater kenar açılarının yeniden pozisyonlanma açısından az farkla büyük olduğu şartlar sembolize edilmektedir. Son olarak ( c ) maddesinde verilen durum ise kuvvetli jet akışı altında görülen çift konili standart bir krater yapısıdır. Dış krater yanak açıları neredeyse yeniden pozisyonlanma

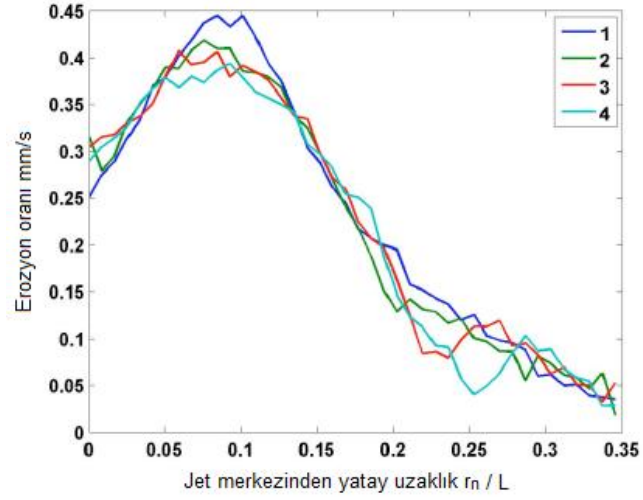
açısına eşitken iç krater paraboliktir ve yanak açıları gönderilen akışkanın hızına bağlı olarak yeniden pazisyonlanma açısından büyüktür ( Haehnel ve ark. 2008 ).



**Şekil 2.10.** Farklı akış evrelerindeki krater oluşumları ( Haehnel ve ark. 2008 )

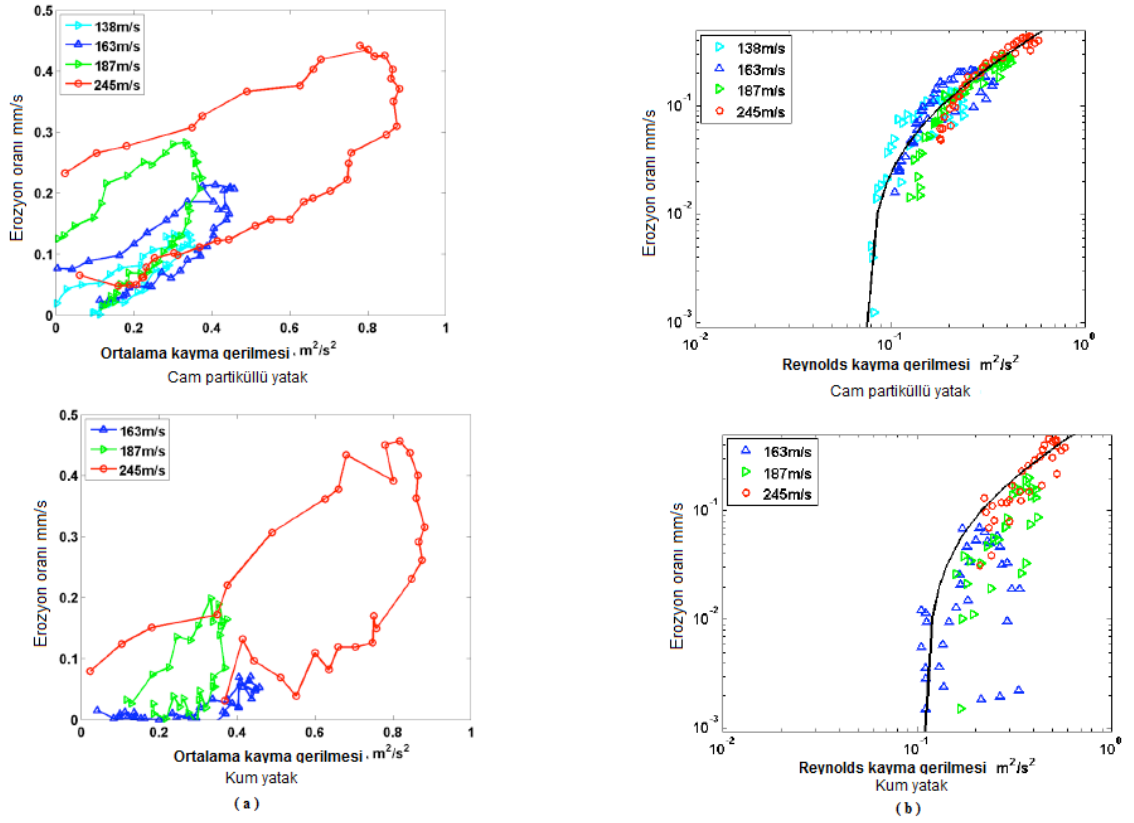
2008 yılında Robert Haehnel tarafından Amerikan ordusu için yapılan araştırma çarpan jet altında yüzeyden partikül taşıma konusunda önemli bir çalışmadır. Bu araştırmaya göre yatak aşınması yüzeydeki türbülans kinetik enerjisiyle ölçülen türbülanslı yüzey kayma gerilmesine bağlıdır. Bu çalışma yüzeye paralel üniform akış ile aşınmadan farklılaşmaktadır ( Haehnel 2008 ).

Normal şartlar altında partiküllü yüzeyler üzerinde yapılan deneylerde en problemlilik nokta akışın çarptığı yüzeyin sabit değil; akışın etkisiyle sürekli şekil değiştirmesidir. Bu problemi gidermek için deneylerde kullanılacak iki malzeme rüzgar tüneline konarak böyle malzemelerden oluşmuş hareket eden partiküllü yatakların yüzey pürüzlülük oranı tespit edildikten sonra aynı yüzey pürüzlülüğünde hazırlanmış statik yataklar hazırlanarak bu referanslar üzerinden deneyler yapılarak veriler toplanmıştır. Ve bu çalışmanın gerçek erozyon yüzeyleriyle iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre nozul altında kalan yatak yüzeyindeki erozyon oranı nozul merkezinden olan uzaklığa göre değişmektedir. Farklı malzeme ve farklı hızlarda yapılan deneyler sonucu erozyon oranının nozuldaki radyal uzaklığa bağlı değişim grafiği Şekil 2.11' de verilmiştir ( Haehnel 2008 ).



**Şekil 2.11.** Farklı akış şartları ve malzemeler için nozul altında uzaklığa bağlı erozyon oranı değişimi ( Haehnel 2008 ).

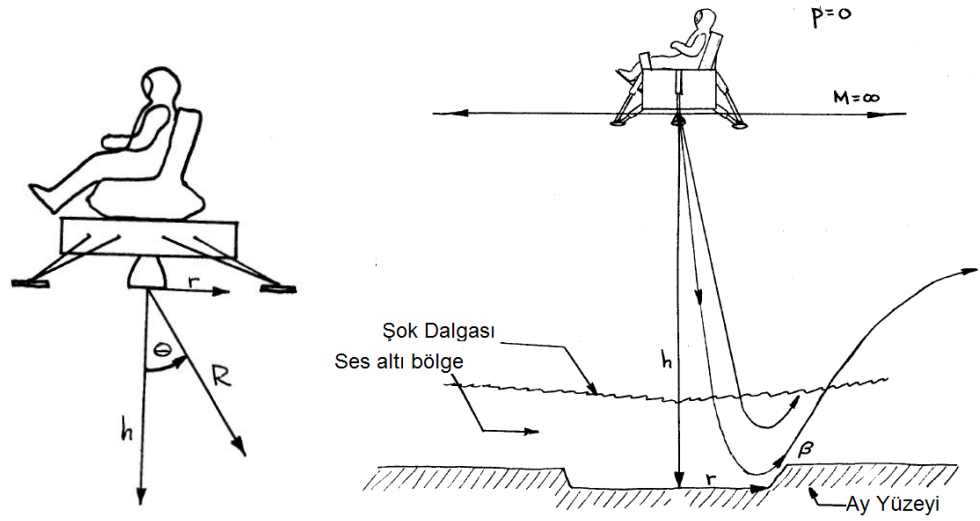
Erozyon oranının nozuldan olan uzaklığa bağlı değişimi grafiği incelendiğinde her dört durumda da erozyon oranının tam nozul altında ortalama bir değerden başlayıp merkezden uzaklaştıkça bir süre arttığı görülmektedir. Bu artış nozul çapının yaklaşık on katına kadar devam etmektedir. En yüksek erozyon oranı yakalandıktan sonra düşüş başlamaktadır. Artık uzaklıkta nozul çapının otuz katına gelindiğinde erozyon oranında ciddi bir azalma olduğu görülmüştür. Erozyon oranının reynolds kayma gerilmesine ve ortalama kayma gerilmeye bağlı değişim grafikleri Şekil 2.12' de verilmiştir.



**Şekil 2.12.** Farklı akış şartları ve malzemeler için nozul altında uzaklığa bağlı erozyon ( Haehnel 2008 )

Ortalama kayma gerilmesine bağlı erozyon değişimi uygun bir korelasyon sağlayamamış olsa da Reynolds kayma gerilmesine bağlı erozyonun iyi bir korelasyon içinde olduğu çalışmanın önemli bulguları arasındadır. Bu bulgular ışığında çalışmada yatak yüzeyine paralel üniform hava akışıyla meydana gelen partikül aşınması için türetilen denklemler daha karmaşık ve komplike erozyon şartları için de kullanılır. Çalışmadan çıkarılan sonuçlardan biri de CFD programlarının benzer olayları doğru çözdüğüdür.

Stark ve ark.' in 1965 yılında NASA için hazırladığı teknik raporda iniş ve kalkış operasyonları sırasında çevreye olan parçacık saçılımı ve parçacık hareket karakteristikleri ile ilgili yapılan çalışma kapsamında ses üstü hızlardaki hava jeti ve parçacıklı yüzey etkileşimini açıklamak için bir mühendislik model kurulmuş ve mevcut çalışmalar ışığında teori doğrulanmaya çalışılmıştır. Kurulan mühendislik model Şekil 2.13' de verilmiştir (Stark ve ark. 1965).



**Şekil 2.13.** Parçacıklı yüzey ve jet etkileşimi mühendislik modeli (Stark ve ark. 1965)

Çalışma sonucunda jet altında simetrik bir genişleme davranışında olan krater oluşumu ve kraterden ayrılan parçacıkların tekrar yere dönmesi nedeniyle çevrede bir toz bulutu oluştuğu tespit edilmektedir. Bu durumu matematikse bir temele oturtturarak olaya nicel bir netlik kazandırılmak için yapılan araştırmada deneysel çalışmalarla geliştirilen teori arasında çok sıkı bir korelasyon geliştirilememiştir. Böyle bir sonucun sebebi matematik modeli çözerken çok fazla basitleştirme ve kabul yapılmış olması ve deneyler sırasında etkili olan bozucu etmenleri fazlalığıdır. Fakat yine de yataktan ayrılan parçacık menzil ve doğrultuları hakkında genel bir kanıya varmak için gerekli bilgi elde edilmiştir (Stark ve ark. 1965).

Çalışma bulgularından biri kraterden ayrılmakta olan parçacıkların maksimum hıza krater yanağından tam ayrılmakta olduğu sırada eriştiğidir. Stark ve ark. çalışmalarında tam krater kenarında parçacık hızının akışkan hızına eşit yada daha küçük olduğunu belirtmiştir.

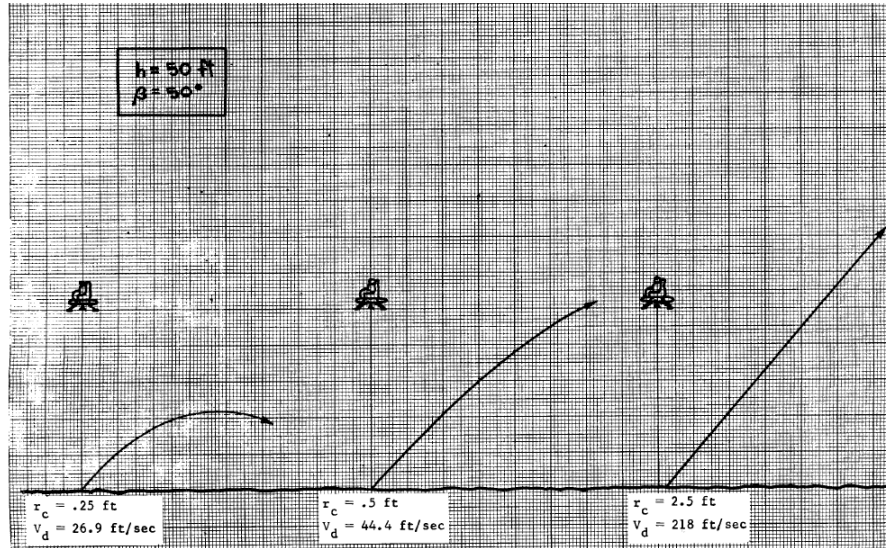
$$V_d \leq U_c \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.4' deki  $v_d$  krater kenarındaki parçacık hızı iken  $U_c$  ise akışkan o bölgedeki akışkan hızını belirtmektedir. Parçacıkların yatay hız bileşeni  $V_x$  denklem 2.5' de ve düşey hız bileşeni  $V_y$  ise denklem 2.6' da ifade edilmiştir (Stark ve ark. 1965).

$$V_x = V_d \cos \beta \quad (2.5)$$

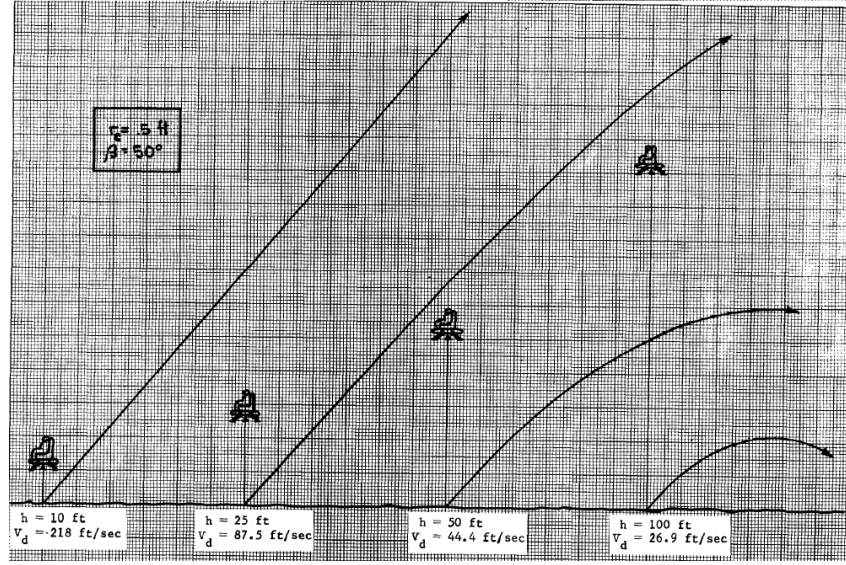
$$V_y = V_d \sin \beta \quad (2.6)$$

Denklemlerdeki  $g_m$  ay için yerçekimi ivmesi  $t$  zaman terimleridir. Denklemlerden de anlaşılacağı gibi krater yanak açısı parçacığın hız bileşenleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Sonuç olarak ay yüzeyindeki iniş ve kalkışlar sırasında da görünürlük düşü olacaktır fakat bu geçici bir süre gerçekleşmekle beraber atmosferli bir ortamdaki kadar sıkıntı yaratıcı olmayacaktır. Ama yine de çökelmeye başlayan parçacıklar çevrede var olan diğer donanımlar üzerinde bir toz tabakası oluşumuna yol açacaktır. Ayrıca Şekil 2.14' de krater yarıçapı  $r_c$  'ye bağlı parçacık hız ve doğrultuları ile ilgili bulgular verilirken Şekil 2.15' de nozulun yatak yüzeyinden olan uzaklığının ( $h = H_N$ ) parçacık hız ve doğrultusuna olan etkisi verilmiştir.



Şekil 2.14. Krater yarıçapının parçacık hız ve doğrultusuna etkisi (Stark ve ark. 1965)



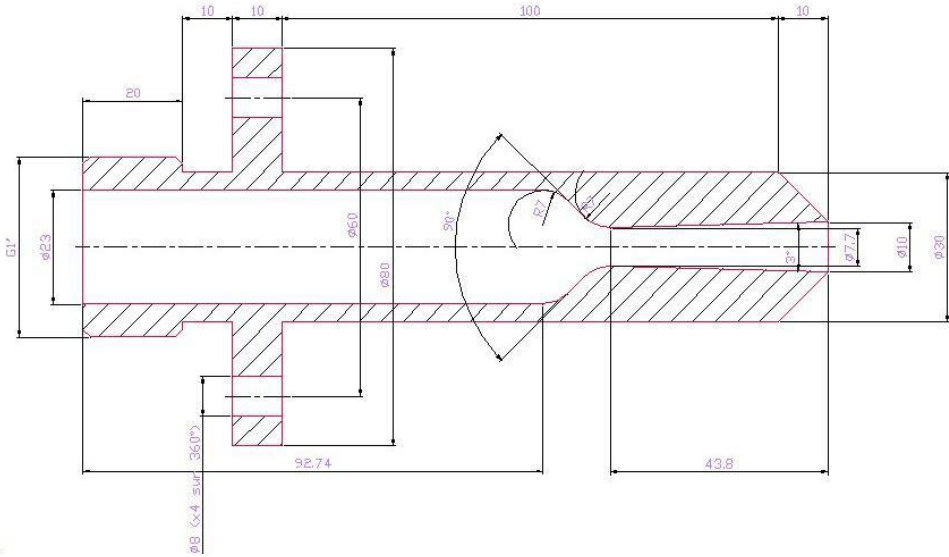


**Şekil 2.15.** Nozul yüksekliğinin parçacık hız ve doğrultusuna etkisi (Stark ve ark. 1965)

Şekil 2.13 incelendiğinde artan gaz hızıyla krater yarıçapı büyümekte ve parçacıkların yataktan daha yüksek hızlarla ayrılıp daha uzak menzillere ulaştığı görülmektedir. Şekil 2.14 incelendiğinde ise artan nozul yüksekliği ile parçacık ayrılma hızları düştüğü ve menzillerinin kısaldığı görülür.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma iki farklı kısımdan oluşmakta olup her iki kısım da deneyseldir. Araştırmanın ilk kısmını jet - partiküllü yüzey etkileşiminin görünürlük üzerine olan etkilerini incelemek için yapılan deneyler oluştururken ikinci kısmını parçacık hareketlerini incelemek üzere PIV yöntemiyle yapılan deneyler oluşturmaktadır. Deneyler pleksiglas bir kap içerisinde sıkıştırılmadan hazırlanmış farklı kalınlıktaki kum yatak yüzeyi uygun aparatlarla düzleştirildikten sonra Şekil 3.1' de geometrisi verilen nozul kullanılarak yatak üzerine soğuk gaz püskürtmek şeklinde yapılmıştır. Yatak haznesi olarak şeffaf pleksiglasdan imal edilmiş kutu kullanılmasının sebebi yapılacak ölçümlerin optik ölçme teknikleri ile gerçekleştirilecek olması ve bu durumdan kaynaklanan ışık geçirgenliği ihtiyacıdır.



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan nozul teknik çizimi

Nozulun yatak üzerinde doğru pozisyona getirilmesi nozulu taşıyan ve çok hassas bilgisayar kontrollü servo motorlarla hareket ettirilen bir taşıyıcı konstrüksiyon sayesinde yapılmıştır.

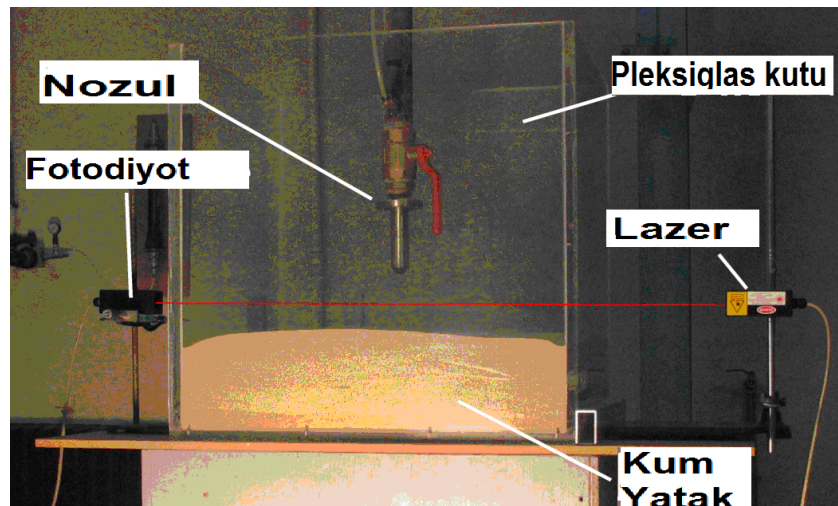
### 3.1. Görünürlük Deneyleri ve Deney Düzenegi

Görünürlük testleri planlanırken çok sayıda etmenin görünürlük üzerine etkisi araştırılmak istendiğinden oldukça geniş bir test matrisi ortaya çıkmıştır. Görünürlüğün iki farklı nozul rezervuar basıncı, iki nozul yüksekliği, iki kum yatak kalınlığı, üç yatay ölçüm pozisyonu iki düşey ölçüm pozisyonu ele alındığında Çizelge 3.1' deki kırk sekiz elemanlı test matrisi oluşmaktadır.

Çizelge 3.1. Görünürlük test matrisi

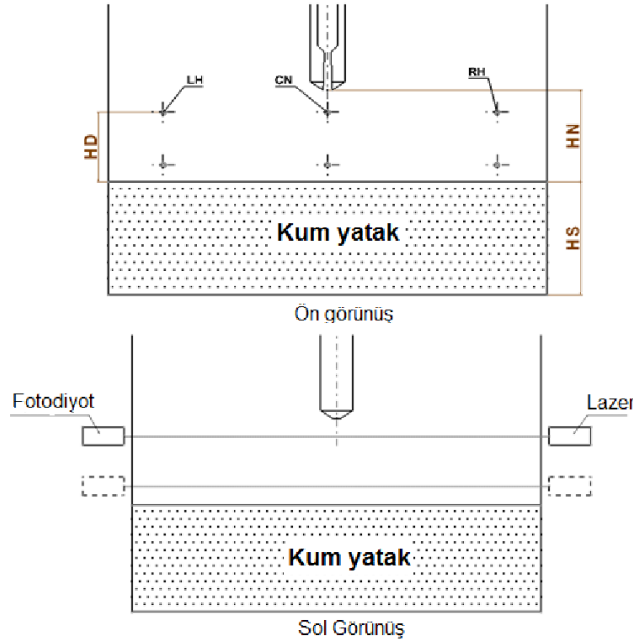
|                       | Basınç = 0,1 Bar       |                        |                        |                        | Basınç = 0,2 Bar       |                        |                        |                        |    |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----|
|                       | H <sub>D</sub> = 5 cm  |                        | H <sub>D</sub> = 10 cm |                        | H <sub>D</sub> = 5 cm  |                        | H <sub>D</sub> = 10 cm |                        |    |
|                       | H <sub>N</sub> = 15 cm | H <sub>N</sub> = 10 cm | H <sub>N</sub> = 15 cm | H <sub>N</sub> = 10 cm | H <sub>N</sub> = 15 cm | H <sub>N</sub> = 10 cm | H <sub>N</sub> = 15 cm | H <sub>N</sub> = 10 cm |    |
| H <sub>S</sub> = 14,5 | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | RH |
| H <sub>S</sub> = 7    | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      |    |
| H <sub>S</sub> = 14,5 | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | CN |
| H <sub>S</sub> = 7    | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      |    |
| H <sub>S</sub> = 14,5 | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | LH |
| H <sub>S</sub> = 7    | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      | x                      |    |

Görünürlük ölçümünün temelinde bir lazer ve onun karşısında lazerden aldığı ışık yoğunluğuna göre tepki veren foto diyottan bir veri toplama aygıtı yardımıyla okunan elektrik gerilimi değerlerinin yüzde görünürlük oranına dönüştürülmesi yatmaktadır. Görünürlük deney düzenegi ve ekipmanları Şekil 3.2' de verilmiştir.



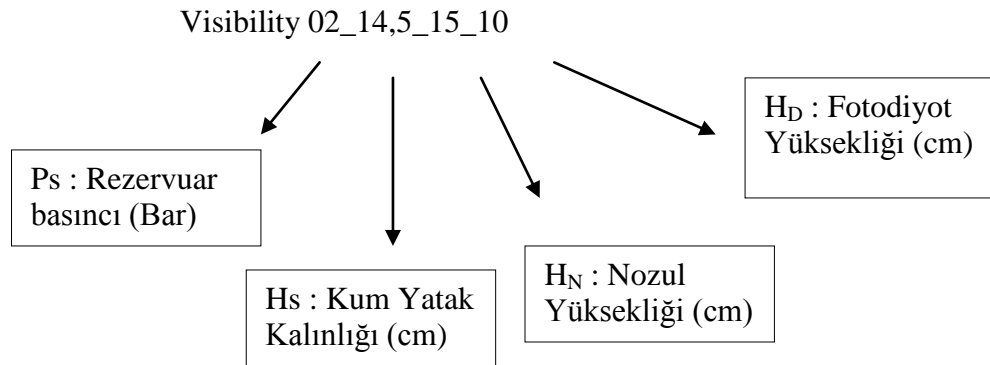
Şekil 3.2. Görünürlük deney düzenegi

Yatay görünürlük ölçüm doğrultuları ve noktaları ise Şekil 3.3' de şematik olarak gösterilmiştir. Şekildeki resim incelendiğinde lazerli ölçümlerin nozul eksenine dik, merkez doğrultuda ve merkeze simetrik olarak 12.5 cm uzaklıkta iki yan bölgede yapıldığı görülmüştür. Bunun nedeni görünürlük düşüşü ve oluşan toz bulutunun simetrik olup olmadığını anlamaktır. Diğer ölçüm seçeneği de lazerin kum yatak yüzeyinden 5 cm ve 10 cm olmak üzere iki farklı yükseklikte ölçülmesidir.



**Şekil 3.3.** Görünürlük ölçüm noktaları

Deneyle sırasında elde edilen ölçümlerin sonuçları belli notasyonlarla elde edilen adlandırmalarla aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.



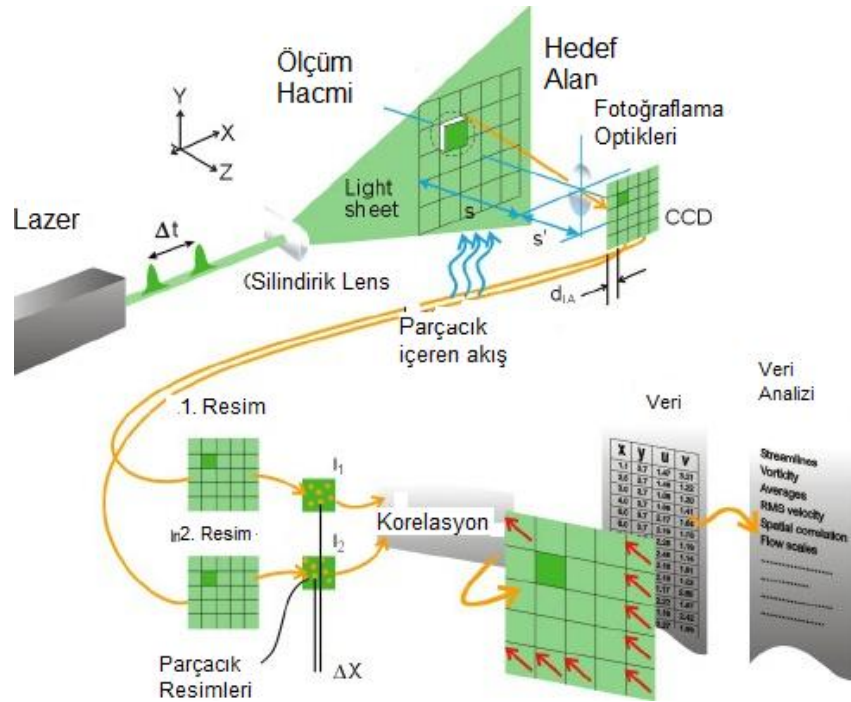
### 3.2. PIV Deneyleri ve Kullanılan Deney Düzeneği

Parçacık hareketleri bu çalışmanın diğer bir önemli kısmıdır. Etkileşim sırasında harekete geçen partiküllerin Particle Image Velocimetry denen ve kısa adıyla PIV olarak bilinen bir görüntülü ölçme tekniği kullanılarak hızları elde edilmiştir.

#### 3.2.1 PIV ölçme tekniği

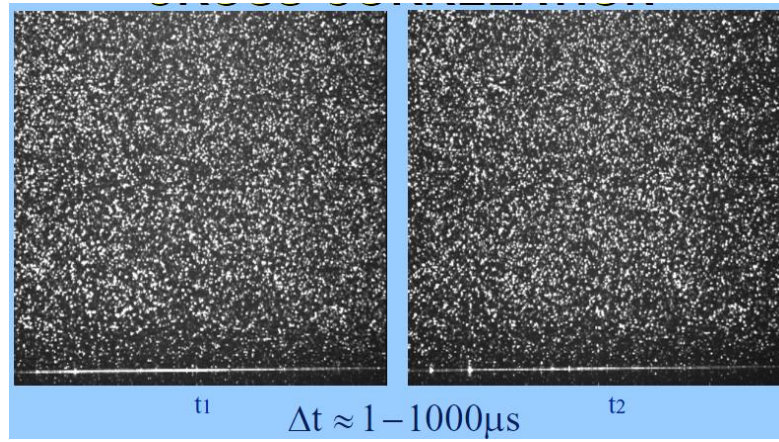
PIV ölçme tekniği tarihi gelişimi sırasında birçok değişime uğramış ve kullanılan ekipmanlar da teknolojik gelişime bağlı olarak farklılaşmalar göstermiştir. Temel teorisi akış içerisindeki parçacıkların ışığı yansıtma özelliğinden yararlanarak akışkanın hareketini tayin etmeye dayanmaktadır. Şekil 3.4' de verilen PIV düzeneği de dikkate alınarak standart bir PIV operasyonunun adımları şu şekilde özetlenebilir.

1. Kontrol hacminin uygun bir bölgesinin şartlara uygun bir lazer kullanarak ışık perdesi ile kontrol alanı olacak şekilde hacimden ayrıştırılması.
2. Akışkan içindeki partikül hareketlerinin çok küçük zaman adımları halinde bir süre kaydedilmesi
3. Kayıt altına alınan fotoğrafların analizleri ve parçacık hareketlerinin analizi
4. Hız alanının çıkarılması

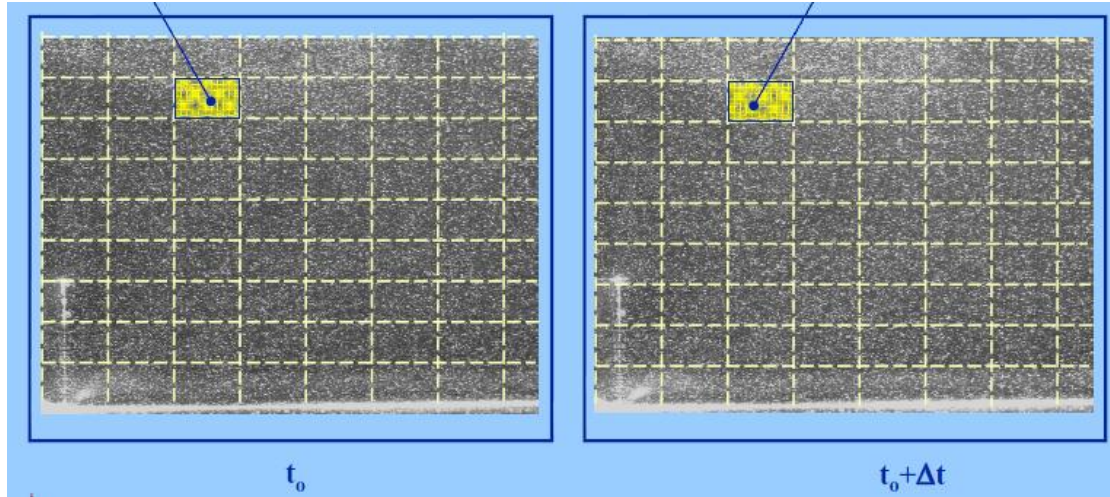


Şekil 3.4. PIV ölçüm düzeneği

Temel PIV ölçüm adımları yukarıdaki gibi belirtilmiş olsa da yapılan ölçümün özelliğine bağlı olarak ara adımlar eklemek mümkündür. Şekil 3.5' deki gibi neredeyse birbirinin aynı iki fotoğraf mümkün olan en küçük zaman aralığında kaydedilmiştir. Kayıt işlemi için genelde CCD kameralar kullanılmaktadır. Fakat son yıllarda yüksek hızlı kameralar PIV operasyonlarını oldukça kolaylaştırmıştır. Daha sonra kaydedilen bu fotoğraflar mümkün olan en küçük kutucuklara bölünerek  $t_0$  anında kaydedilen kare sorgu penceresi,  $t_1$  anında kaydedilen ise eşleştirme penceresi olacak şekilde iki kare karşılaştırılır (Şekil 3.6).

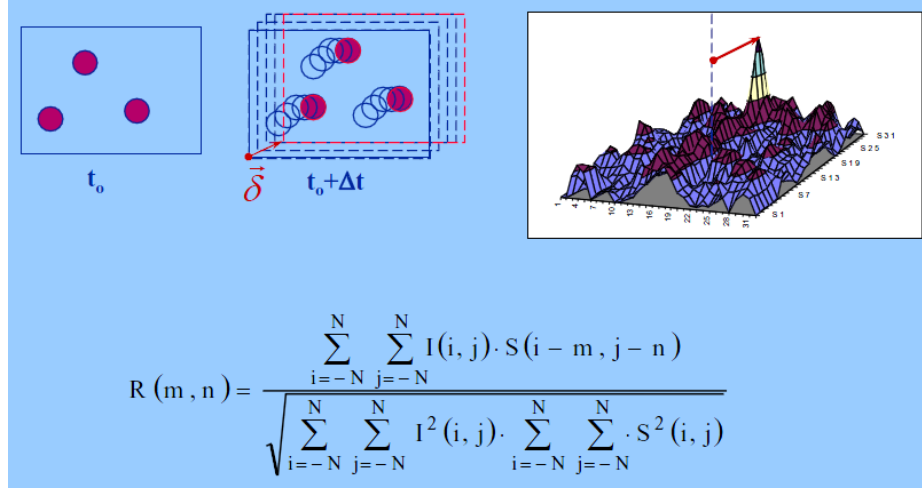


Şekil 3.5. PIV ölçümü için kaydedilmiş iki fotoğraf ( M. L. Riethmuller, VKI)

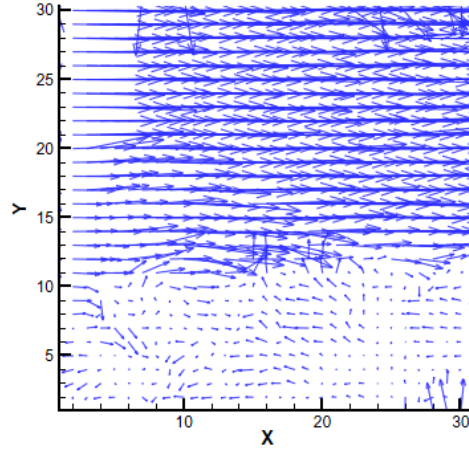


Şekil 3.6. PIV ölçümü için bölünmüş arama ve eşleştirme ekranları ( M. L. Riethmuller, VKI)

İki pencere arasındaki yer değiştirmeler Şekil 3.7' deki gibi çapraz korelasyonlar ile belirlenerek Şekil 3.8' deki vektörel hız alanı elde edilmiştir.



Şekil 3.7. Çapraz korelasyonla eşleştirme ( M. L. Riethmuller, VKI)

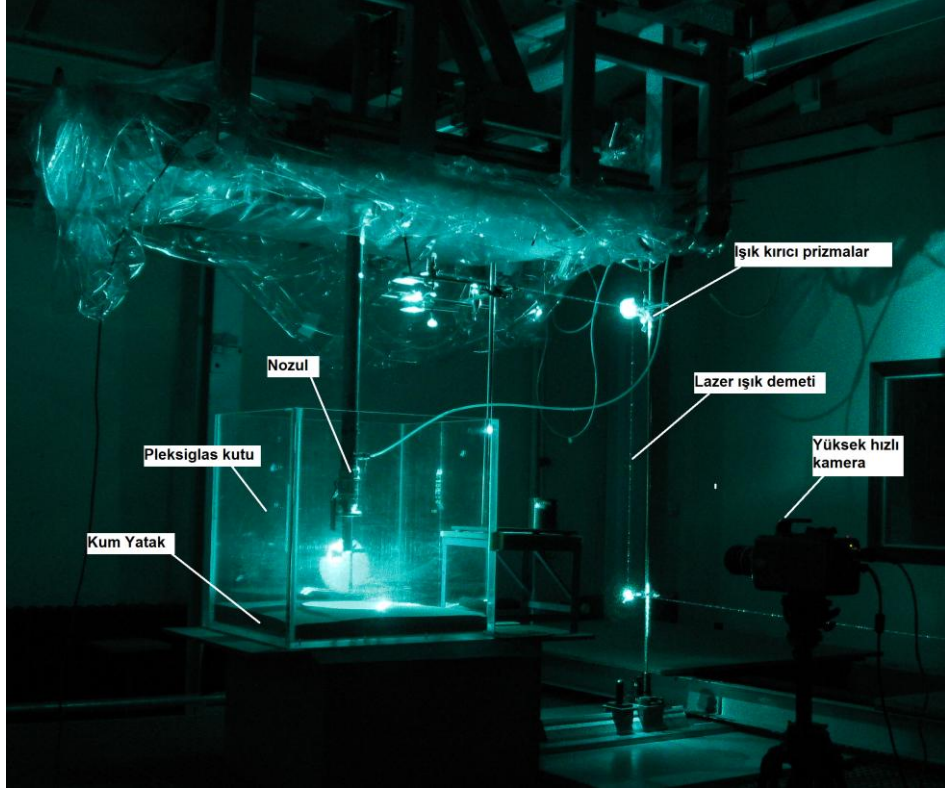


Şekil 3.8. Görüntü işleme sonucu elde edilen vektörel hız alanı ( M. L. Riethmuller, VKI)

Bu bölümde her ne kadar PIV metodu anlatılmış olsa da bu yüksek lisans tezi kapsamında yapılanlar PTV olarak kısaltılan Partivle Tracking Velocimetry yani Parçacık İzleme Velosimetresine daha yakın durmaktadır. Bu operasyon PIV ye çok benzemekle beraber aralarındaki temel fark PIV' de akış içindeki partiküller daha küçük ve çok sayıda iken PTV yönteminde ise daha az sayıda ve büyük partiküller söz konusudur. Fotoğraflar bölünürken bölüntü pencerelerinin küçük tutulması analiz hassasiyetini önemli ölçüde yükseltmektedir.

### 3.2.2 PIV deney düzeneği

Bu çalışmada kullanılan nozul, pleksiglas kutu ve kum gibi bileşenler görünürlük testlerindeki ile aynı kalırken sisteme ek olarak PIV tekniği için kullanılan ekipmanlar eklenmiştir. PIV düzeneğinin genel görünüşü Şekil 3.9' daki gibidir.



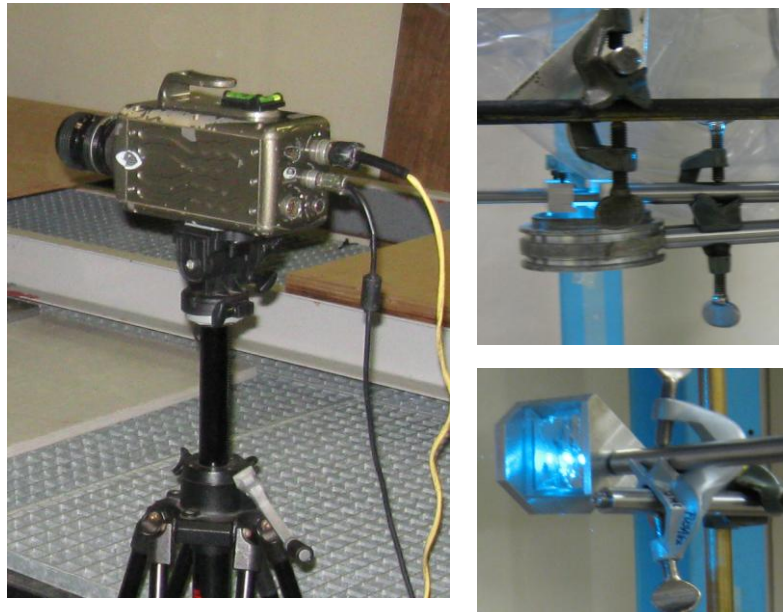
Şekil 3.8. Çalışma kapsamında kullanılan PIV deney düzeneği

Alan ayrıklaştırması için kullanılan lazer tipi Şekil 3.10' daki su soğutmalı argon iyon bir lazerdir. Bu lazer tipi düşük hızlarda yapılan PIV operasyonları için kullanılır. Lazerden çıkan ışık demeti bir dizi ayna prizma ve mercekten oluşan Şekil 3.11' deki optik bir düzenek yardımıyla ölüm bölgesine kadar taşınmıştır. Deneyler için kullanılan kamera ise saniyede 2500 kare fotoğraf kaydedebilen Phantom XX model bir yüksek hızlı kameradır.





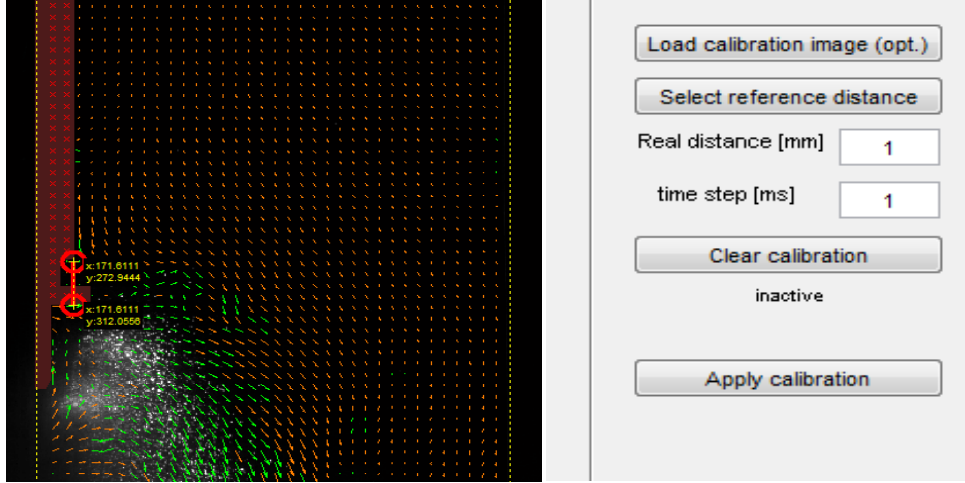
Şekil 3.10. Argon İyon lazer



Şekil 3.11. Yüksek hızlı kamera ve ışık taşıyıcı optik düzenek

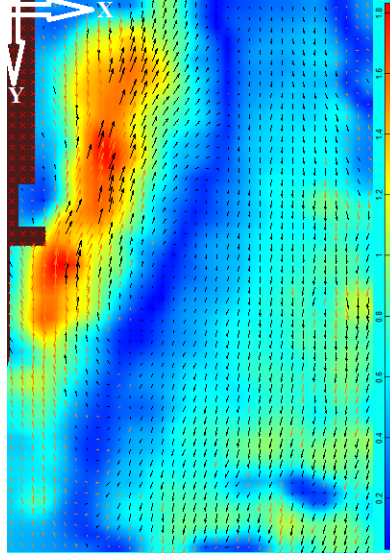
Kaydedilen fotoğrafların analizi için Matlab tabanlı Piv Lab 1.13 programı kullanılmıştır. Ekran bölmelendirme ölçüleri 20 x 20 piksel olarak ayarlanmıştır. kutucuk kaydırma adımı ise 10 piksel olarak seçilmiştir.

PIV analizi yapıldıktan sonra hız değerlerinin elde edilebilmesi için çekilen fotoğraflar üzerinden bir referans ölçü ve her bir kare fotoğraf arasındaki zaman farkı bilinmelidir. Kamera bir saniyede bin adet fotoğraf çekecek şekilde ayarlandığı için zaman adımı  $\Delta t = 0.001$  sn yani 1 ms olarak ayarlanmıştır. Referans ölçü olarak ise konturları net olarak belli olan nozul üzerinden bilinen bir mesafe Şekil 3. 12' deki gibi programa tanımlanarak analizler yapılmıştır. Aynı zamanda elde edilen vektör alanı bu şekilde görülebilir.



Şekil 3.12. PIV kalibrasyon ekranı

Kalibrasyondan sonra hız alanı vektörel doğrultularıyla beraber Şekil 3.13' deki gibi renk skalası olarak verilmiştir.



Şekil 3.12. Renk skalası halinde hız alanı ekranı

### 3.3. Deneylerde Kullanılan Kum Numunesinin Karakterizasyonu

Yapılan deneysel çalışma, karakteri itibariyle gaz - katı karışımı bir atmosfer oluşturmaktadır. Oluşan ortamın karakteri ve karışım içerisindeki partiküllerle ilgili bazı tespitler, çalışmanın ilerleyen safhaları için sınırlayıcı öğeleri belirleyecektir. Bu noktada partikül ve ortam karakterizasyonu faydalı olacaktır.

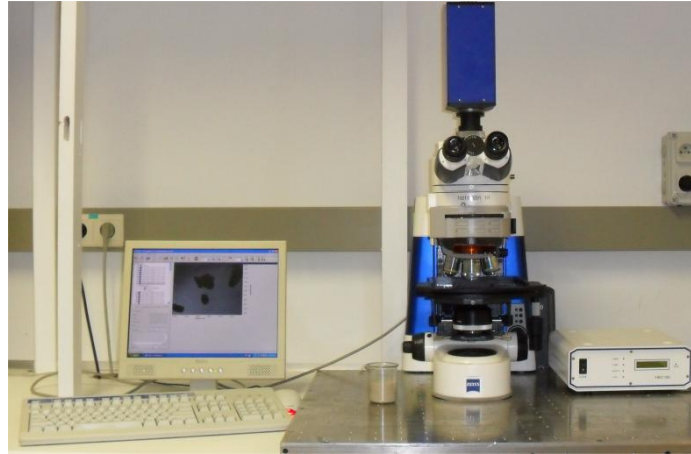
Katı-gaz karışımları, içerdikleri katı partiküllerin şekilsel ve kimyasal özellikleri nedeniyle farklı sınıflandırmalara tabi tutulmak durumundadır. Bu sınıflandırma genel olarak Tekil Dağılımlı, Çoğul Dağılımlı ve Homojen Dağılımlı olmak üzere üç başlık altında yapılmaktadır.

**Tekil Dağılımlı Aerosoller:** Karışım içindeki bütün partiküllerin tamamen aynı boyutta olduğu durumdur. Fakat doğada böyle durumların varlığı oldukça nadirdir.

**Çoğul Dağılımlı Aerosoller:** Karışım içindeki partiküllerin farklı boyutlarda olduğu karışım durumudur. Doğadaki karışımların çoğu bu gruba girmektedir.

**Homojen Karışımlar:** Homojenlik kimyasal benzerlik olarak da değerlendirilmektedir. Bir karışımı oluşturan katı tanecikler benzer kimyasal özelliklere sahipse karışım homojen olarak adlandırılmaktadır.

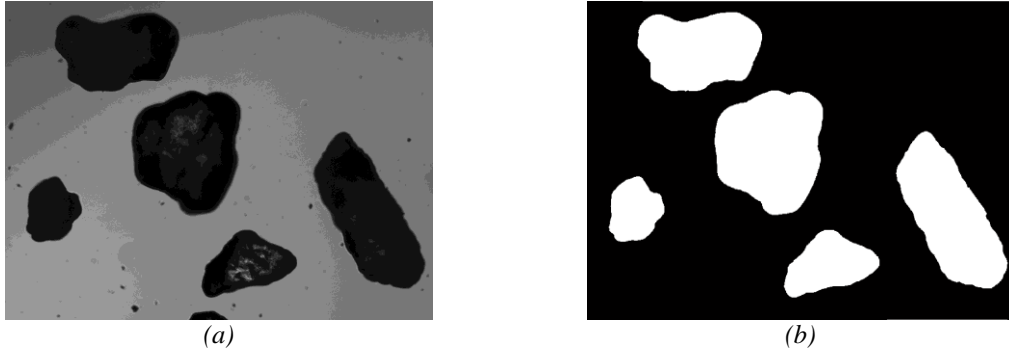
Kum karakterizasyonu kum partiküllerinin görüntülerini yakalayan CCD kameraya bağlı bir elektronik mikroskop vasıtasıyla yapılmıştır. Bir cıva buharlı lamba, partiküllerin alt taraftan rahatlıkla ayırt edilerek yüksek zıtlıkta fotoğraflar elde edilmesine imkan sağlayacak şekilde aydınlatmada kullanılmıştır (Şekil 3.13).



**Şekil 3.13:** Kum karakterizasyonunda kullanılan elektronik mikroskop

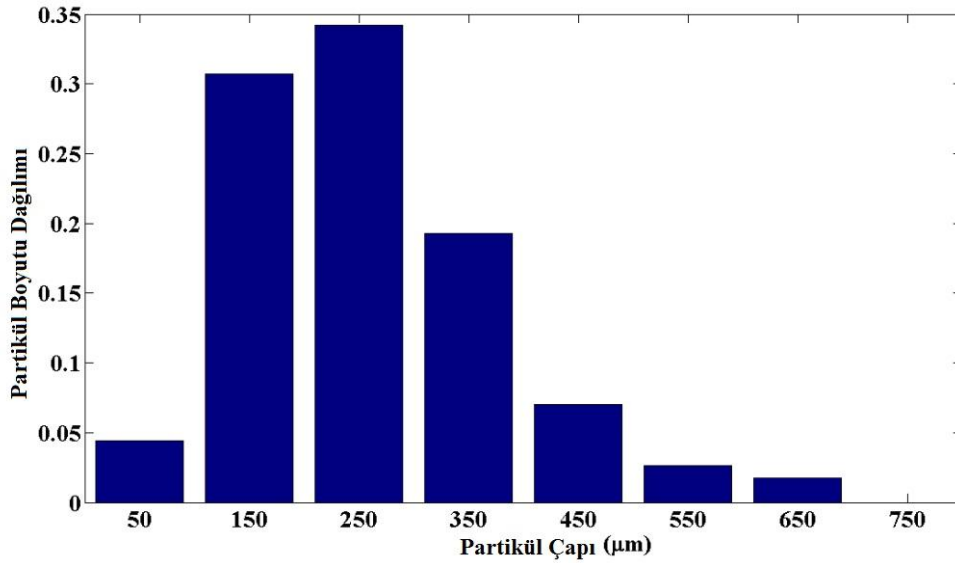
Örnek bir kum numunesi fotoğrafı Şekil 3.14 a' da verilmiştir. Bu resimler daha sonra onları filtreleyen, ikilik sistemdeki bir resim formatına getiren, kum partiküllerinin alanlarını hesaplayan ve son olarak da yaklaşık aynı boyutlarda olan küresel partikül

çaplarını hesaplaya resim işleme araçlarıyla incelenmiştir. (Şekil 3.14 b). Resim işlemede kullanılan uygun programlardan biri de "Matlab İmage Processing Tool" aracıdır.



**Şekil 3.14:** Kum örneği fotoğrafı (a) ve fotoğrafın filtrelenmiş hali (b)

Toplamda 1000 partikül mikroskop altında incelenmiş ve sonuç partikül boyut dağılım histogramı Şekil 3.15 ' teki gibi verilmiştir.



**Şekil 3. 15:** Deneyle kullanılan kuma ait partikül boyut dağılım histogramı

Sauter ortalama çapı (**SMD**,  $d_{32}$  yada  $D[3,2]$ ), akışkanlar mekaniğinde ortalama bir partikül boyutu ölçütüdür. Bu ölçü sistemi alman bilim adamı J. Sauter tarafından 1920 lerin sonunda geliştirilmiştir. Bu yöntem, ilgilenilen partikül grubu içinde yaklaşık aynı hacim / yüzey alanı oranına sahip partiküllerin çapı olarak belirlenmiştir. SMD 'yi iyi bir şekilde tahmin edebilmek için birçok yöntem bulunmuştur.

SMD 'nin yüzey çapına göre belirlenmesi,  $d_s$  :

$$d_s = \sqrt{\frac{A_p}{\pi}}$$

SMD 'nin hacim çapına göre belirlenmesi,  $d_v$  :

$$d_v = \left( \frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3}$$

$A_p$  partikül yüzey alanı,  $V_p$  partikül hacmidir. Genellikle  $d_s$  ve  $d_v$  değerleri  $A_p$  ve  $V_p$  bilinmeksizin diğer metotlarla ölçülür. Verilen bir partikülün Sauter çapı

$$SD = 1,2 \bar{d}_{32} = \frac{d_v^3}{d_s^2}$$

Eğer gerçek partikül yüzey alanı ve hacimi biliniyorsa eşitlik daha da sadeleşir:

$$\frac{V_p}{A_p} = \frac{\frac{4}{3}\pi \left( \frac{d_{32}}{2} \right)^3}{4\pi \left( \frac{d_{32}}{2} \right)^2} = \frac{\left( \frac{d_{32}}{2} \right)^3}{3 \left( \frac{d_{32}}{2} \right)^2} = \frac{d_{32}}{6}$$

$$d_{32} = 6 \frac{V_p}{A_p}$$

Bunun için genellikle birçok ölçüm sonucundan elde edilen değerlerin ortalamaları kullanılır. SMD akış problemlerinde kullanılan asıl çapı sağlar.

#### 4. PIV ANALİZ BULGULARI VE GÖRÜNÜRLÜK DENEY BULGULARI

Yapılan deneysel çalışmanın ilk kısmını oluşturan akış içindeki partikül hareketinin PIV yöntemiyle tayini işlemi için yüksek hızlı kamerayla kaydedilen görüntüler, Matlab tabanlı Piv Lab 1.13 programıyla resim resim işlenip hız alanları elde edilmiştir.

PIV sonuçlarını temel olarak iki ana başlık altında incelemek mümkündür. Birincisi, nozul altındaki kum yatak kalınlığının partikül hareketine etkisini incelemek amacıyla, kum yüzeyinden nozula olan yükseklik sabit iken iki farklı kum kalınlığı için alınan ölçümlerin sonuçlarıdır. PIV araştırmasının ikinci kısmını ise sabit kum kalınlıklarına karşın farklı nozul yükseklikleri uygulanarak alınan ölçümlerin neticeleri oluşturur. Elde edilen veriler de yine kendi içinde krater oluşumundan önce ve krater oluşumundan sonra olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Böyle bir yol izlenmesinin amacı, hava jetinin düz bir partiküler yüzeye çarpması ile eğrisel bir yüzeye çarpması arasında oluşan farkı gözlemleyebilmektir.

##### 4.1. Sabit Nozul Yüksekliği ( $H_N$ ) Değişken Kum Kalınlığı

İncelemeler sırasında kullanılacak başlıklar konuda bir bütünlük sağlamak ve incelemeye pratiklik kazandırmak adına başta da anlatıldığı gibi ilgilenilen şartı ifade eden kısaltmalardan oluşmaktadır. Örneğin  $P_{0,1} - H_S_{14,5} - H_N_{15}$  BCF/ACF şeklindeki başlıktaki notasyon şu şekildedir:

**$P_{0,1}$**  : 0,1 bar Nozul rezervuar basıncı.

**$H_S_{14,5}$** : 14,5 cm kum yatak kalınlığı.

**$H_N_{15}$**  : Kum yatak yüzeyinden nozul çıkışına kadar olan 15 cm' lik yükseklik.

**BCF** : Krater oluşumundan önce anlamına gelen "Before Crater Formation" sözcüğünün kısaltması.

**ACF** : Krater oluşumundan sonra anlamına gelen "After Crater Formation" sözcüğünün kısaltması.

Sabit nozul yüksekliği değişken kum kalınlığı testleri,

4.1 1.  $P_{0,1} - H_S_{14,5} - H_N_{15}$  BCF

4.1 2.  $P_{0,1} - H_S_{6} - H_N_{15}$  BCF

4.1 3. P 0,1\_ H<sub>S</sub> 14,5\_ H<sub>N</sub> 15 ACF

4.1 4. P 0,1\_ H<sub>S</sub> 6\_ H<sub>N</sub> 15 ACF

şeklinde dört alt başlıkta incelenecektir.

#### 4.1 1. P 0,1\_ H<sub>S</sub> 14,5\_ H<sub>N</sub> 15 BCF

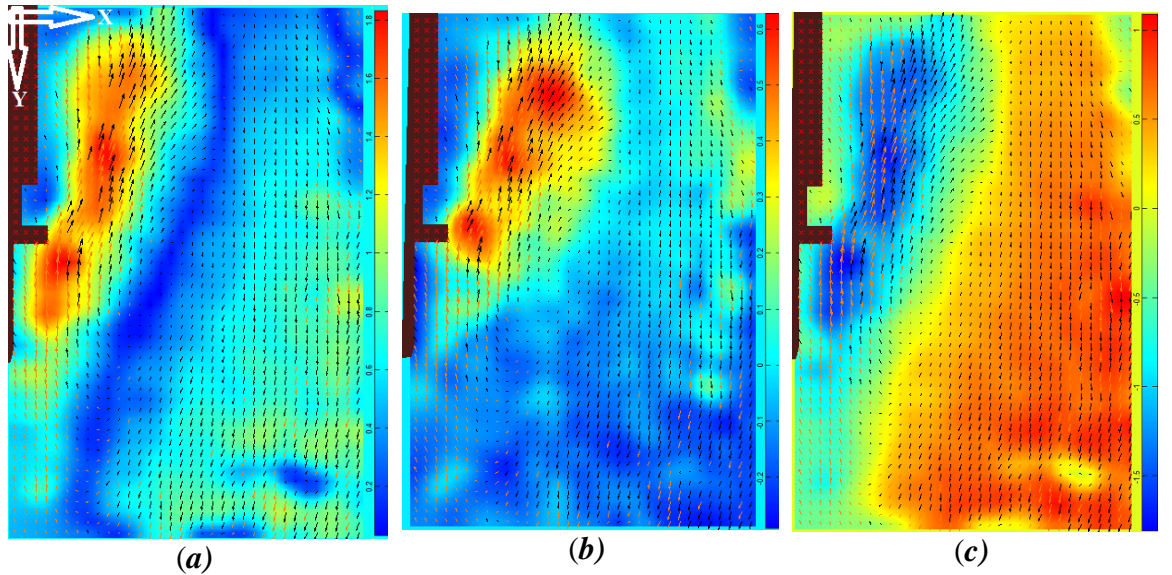
Deneyle sırasında yüksek hızlı kamera yardımıyla alınan PIV ölçümleri sonucunda her bir durum için 1450 kare fotoğraf yakalanmıştır. Sonuçlar ise fotoğrafların altışarlı gruplar şeklinde üç periyot olarak incelenmesiyle elde edilmiştir.

Deneyle Şartları:

|                                      |                            |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Rezervuar Basıncı                    | (P <sub>0</sub> ): 0.1 Bar |
| Kum Yatak üzerinden nozul yüksekliği | (H <sub>N</sub> ): 15 cm   |
| Kum Yatak Kalınlığı                  | (H <sub>S</sub> ): 14,5 cm |

- **Fotoğraf Aralığı 100 - 105**

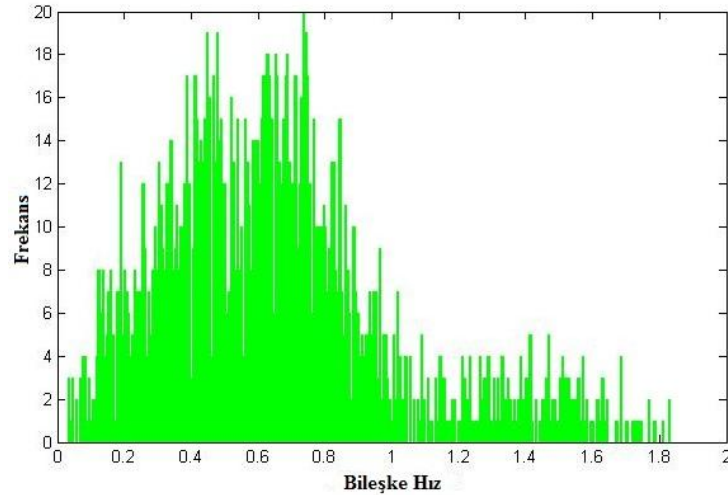
Yukarıda şartları belirtilen 100 - 105 aralığındaki fotoğraflar kullanılarak yapılan analiz sonucu çıkan hız alanı Şekil 4.1' deki gibi özetlenmiştir.



Şekil 4. 1. P 0,1\_ HS 14,5\_ HN 15 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

Kum partiküllerinin ortalama bileşke hızı 1,8 m/s, X doğrultusundaki ortalama hız 0,6 m/s iken Y doğrultusundaki ortalama hız 1 m/s' dir. Ortalama hızlar çok düşük seviyelerde seyrederken hız skalasında maksimum hız 1,8 m/s seviyelerinde görülmektedir. Ortalama ve maksimum hızlar arasındaki farkın sebebi, kum partiküllerinin sadece belli kısımlarda yüksek hızlara çıkması ve kontrol hacminin geri kalan kısımlarında gaz akışının etkisinden uzak kalarak sadece serbest düşme hareketi yapmasıdır. Ayrıca Şekil 4.1' de de görüleceği gibi bazı kısımlar koyu mavi renktedir. Bunun nedeni o kısımlarda partikül hareketinin sıfıra yakın hızlarda olması ya da hiç partikül içermemesidir.

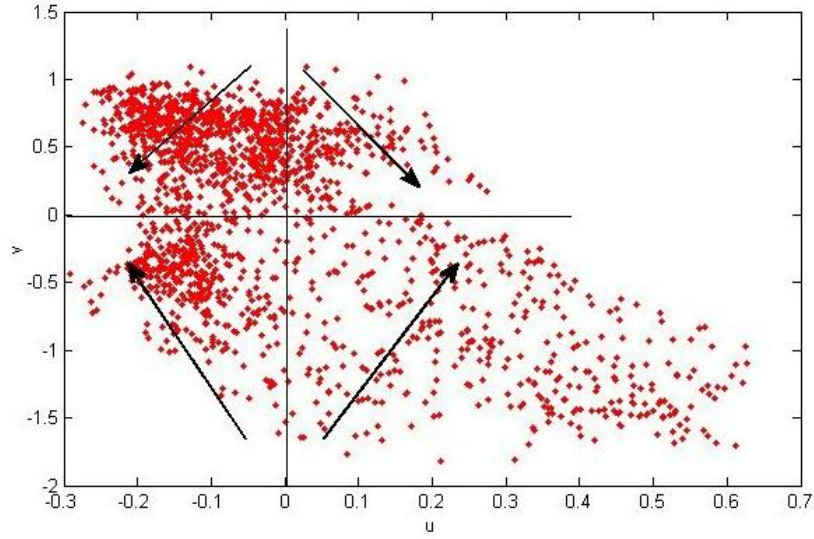
Parçacık hız dağılımı, hızlara göre görülme sıklığı histogramı şekil 4.2' deki gibidir.



**Şekil 4. 2.** Hız dağılım histogramı

Şekil 4.2' deki histogramda da görüleceği gibi bileşke hız ağırlıklı olarak 0,6 m/s çevresinde yığılmıştır. Az sayıda da olsa hız bazı yerlerde 1,8 m/s' nin üzerine çıkmıştır. Bu bölgeler Şekil 4.1' deki resim ve renk skalasındaki gibi kırmızı renkte görülen küçük bölgelerdir. Parçacık hız dağılımı daha ayrıntılı olarak incelenecek olursa Şekil 4.3' deki gibi X ve Y doğrultusundaki hız bileşenlerinin aynı nokta grafikte verildiği gösterim şekli faydalı olacaktır. Şekil 4.3' deki grafikte yatay eksen X doğrultusundaki hız bileşenlerinin, düşey eksen ise Y eksenini doğrultusundaki hız bileşenlerinin şiddetini ve hız vektörlerinin ortalama yönelimini göstermektedir.





**Şekil 4. 3.** Eksenlere göre hız bileşenleri grafiği

Resimlerin işlenmesinde kullanılan program, yönleri partikül akışının yoğun olduğu yönü pozitif tersi olan yönü de negatif olarak seçmek şeklinde tayin etmiştir. Örneğin partiküllerin Y eksenine doğrultusundaki hız bileşenlerinin yönü nozul yakınlarında ağırlıklı olarak aşağıdan yukarı doğru olsa da kontrol hacminin geri kalan daha büyük kısmında yukarıdan aşağı doğrudur. Bu nedenle pozitif yön Y doğrultusu için yukarıdan aşağı doğrudur. X eksenine doğrultusundaki hareket yönü de benzer şekilde nozul merkezinden çeperlere doğru olan yön pozitif olarak kabul edilmiştir.

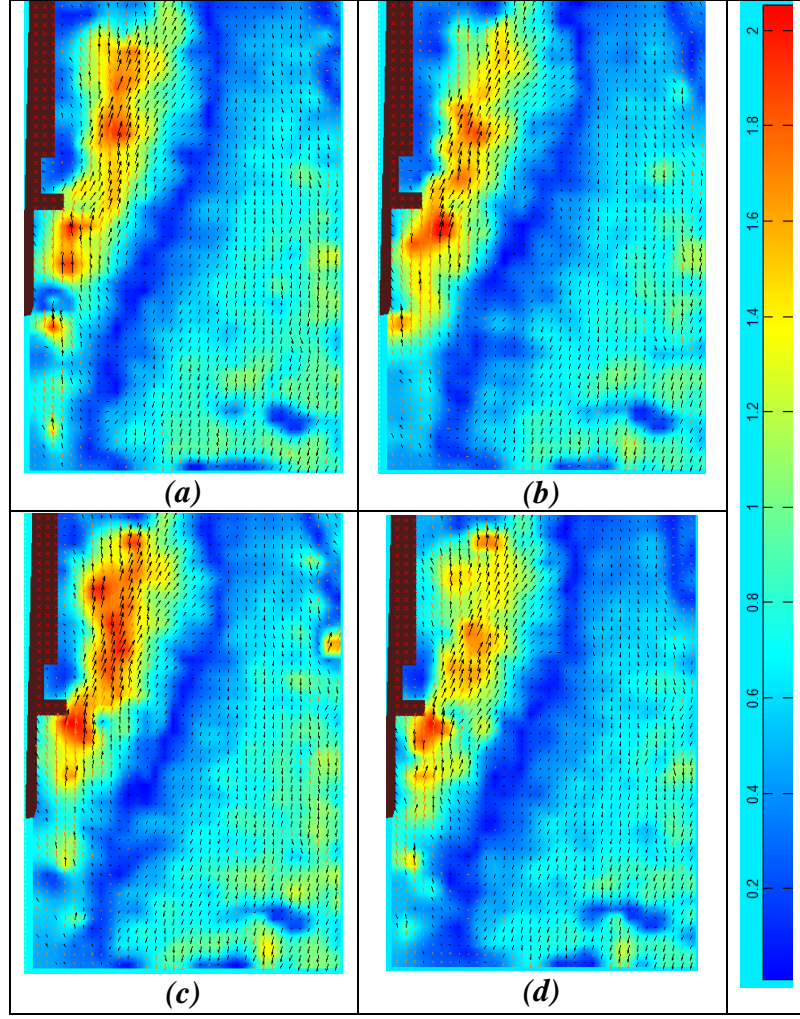
Partiküllerin akış içindeki davranışları incelendiğinde, nozul merkezinden geçtiği varsayılan eksen çevresinde kum yatak yüzeyine yakın katmanlarda partiküllerin düşük hızlarda ve daha çok düşey doğrultuda hareket ettiği gözlemlenmektedir. Yalnızca yatak yüzeyine çok yakın mesafelerde krateri sifıra yakın açılarda ve düşük hızlarda terk eden az sayıda partikül tespit edilmiştir. Bu karakterdeki bir hareketin nedeni, partiküllerin büyük kısmının yatağı daha büyük eğimdeki iç krater formunu takip ederek terk etmesi olarak açıklanabilir. Krater içine krater kenarı boyunca kayarak geri dönen partiküllerin bir kısmı daha az eğimli olan dış krater konisini takip ederek küçük açılarda yataktan uzaklaşmaktadır.

Nozul çıkış ağzı ve yatak üst yüzeyi arasında kalan bölgede kum hareketi, yataktan büyük yığınlar halinde kopan kütle akışı şeklinde gerçekleşmektedir. Nozul çıkış hızları ve basınçları yeterince büyük olmadığı için; atmosfer basıncı ve parçacık ağırlıklarından kaynaklanan kuvvet bileşenleri yenilinceye kadar nozuldan çıkan gaz kum parçacıkları

arasına dolmaktadır. Partiküller arası boşlukta artan basınç ters kuvvetleri yendiğinde büyük miktardaki kütleler yataktan patlamaya benzer şekilde ayrılmaktadır. Bir miktar yükselen kütlelerin bir kısmı yatağa geri dönmekte ve kalan partiküller nozul çıkış ağzına yakın yüksekliklerde hızlanarak düşey doğrultudaki hareketine devam etmektedir.

Nozul merkezinden geçen eksen çevresinden uzaklaştıkça düşey doğrultuda hareket eden parçacıkların yatay bileşenlerinde negatif yönde ,( nozula doğru hareketinde) artış olduğu ve parçacıkların nozula çarptığı görülmektedir. Ayrıca nozula doğru ilerleyen partiküllerin bir kısmı tekrar hava akımına kapılarak krater tabanına doğru itilmektedir. PIV analizi yapılan resimlerin geri kalanları da incelendiğinde sonuçlar şekil 4. 4' deki gibi olacaktır.

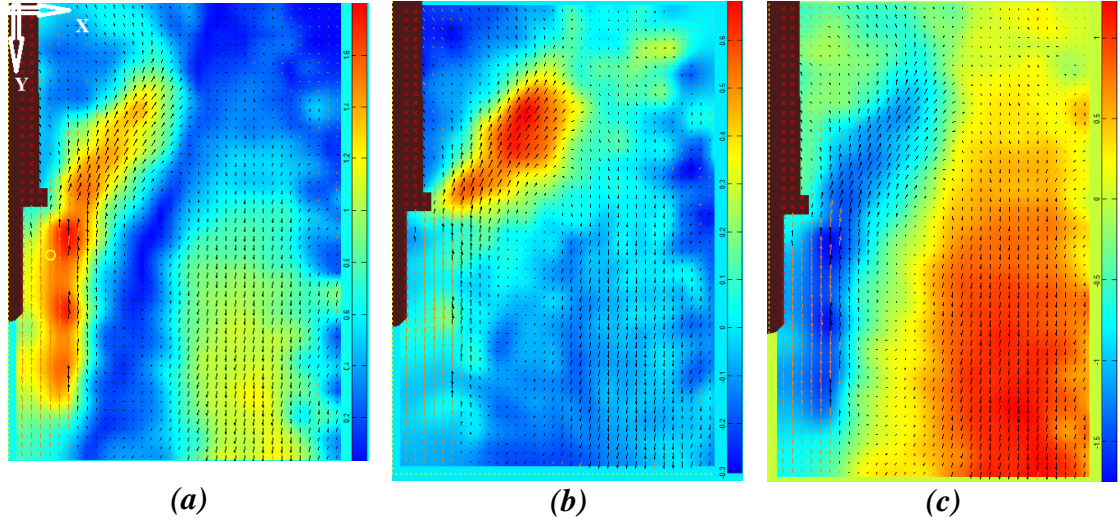
Şekil 4.4' deki gösterim bir defaya mahsus örnek olarak verilmiştir. Partikül bileşke hız dağılımı ve bileşenlere göre hız dağılımı Ek 2' de hız dağılım histogramları ile birlikte verilmiştir.



**Şekil 4. 4.** (a) 102 - 103, (b) 103 - 104, (c) 104 - 105, (d) 105 - 106 nolu resim çiftleri ile çıkan hız alanları

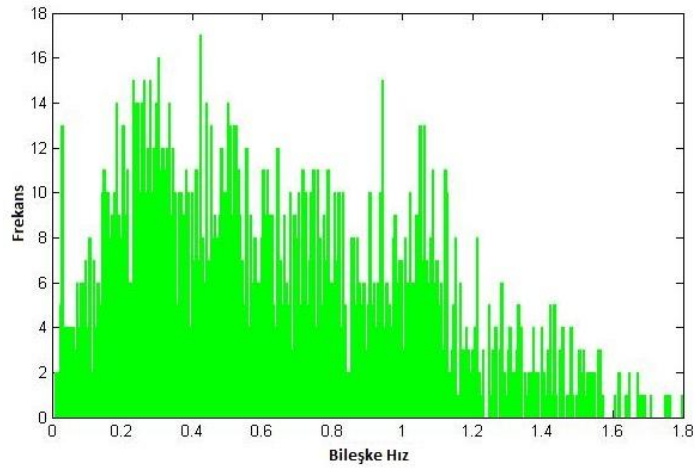
- **Fotoğraf Aralığı 723 - 728**

Yapılan analiz sonucu çıkan hız alanının ortalaması olan durum Şekil 4.5' deki gibi özetlenmiştir. Beş kare resmin ortalamasından çıkarılan hız alanı analizinde maksimum bileşke hız 1,6 m/s, maksimum u hızı 0,6 m/s, maksimum v hızı 1,5 m/s olarak belirlenmiştir.



**Şekil 4. 5.** P 0,1\_ HS 14,5\_ HN 15 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

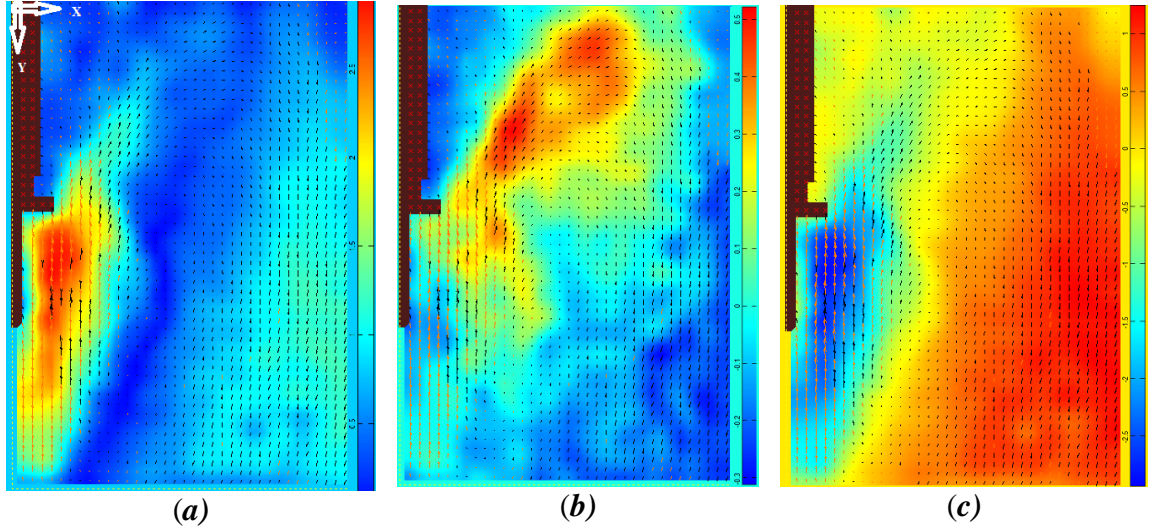
Bu setteki fotoğrafların analizi sonucunda da ilk durumdaki ile benzer bir durum söz konusudur. maksimum hız yine nozul yakınında ve nozula neredeyse paralel olacak şekilde, 1,8 m/s olarak gözlenmiştir. Ortalama durumun hız dağılım histogramı incelendiğinde Şekil 4.6, nozula yakın küçük bir bölgede 1,2 m/s ve 1,8 m/s arasında gözlenen bileşke hız ağırlıklı olarak 0,3 m/s çevresinde yığılmış olarak gözlenmektedir. Nozulun üst tarafında geometrinin genişlediği yerde akış da şekle göre yön değiştirerek yatay hız bileşeni artmıştır.



**Şekil 4. 6.** P 0,1\_ HS 14,5\_ HN 15 BCF hız dağılım histogramı

- **Fotoğraf Aralığı 1445 - 1450**

Yukarıda şartları belirtilen durumun 1445 - 1450 aralığındaki fotoğraflar kullanılarak yapılan analiz sonucu çıkan hız alanının ortalaması olan durum Şekil 4.7' deki gibi özetlenmiştir.



**Şekil 4. 7.** P 0,1\_ HS 14,5\_ HN 15 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

Bu sette elde edilen sonuçlar incelendiğinde maksimum hızın 3 m/s' ye çıktığı ve maksimum hızın kum yatak yüzeyine daha yakın seviyelerde gözlemlendiğidir. Hatırlanacağı gibi ilk iki sette maksimum hızlar kum yatak yüzeyinden daha üst seviyelerde gözlenmişti. Söz konusu durum, oluşmakta olan kraterin rejime girerek, iç koni ve dış koniden oluşan tam bir krater karakteri kazanmaya başlamasıyla açıklanabilir. Böyle bir durumda nozuldan çıkan gazın partiküller arasındaki difüzyonu azalmış olup; kum taşınımı, patlamalar şeklinde değil daha küçük kütleler halinde yatağa kayarak dönen partiküller ve krater yüzeyinden süpürülen az miktarda partiküller şeklinde oluşmaktadır. Böylece hava akışı az miktardaki partikülü daha düşük seviyelerde daha yüksek hızlara çıkarabilmektedir.

#### 4.1 2. P 0,1\_ H<sub>S</sub> 6\_ H<sub>N</sub> 15 BCF

Yapılan deneylerin diğeri bir adımı 6 cm kalınlığındaki kum yatak üzerinde yapılan testlerdir. Deneylerde farklı bir kum kalınlığı denenmesinin amacı, gerçek şartlarda iniş yapılan yüzeylerde eşit kalınlıkta partiküllü yüzey bulunmamasındandır.

Deney Şartları:

|                                      |                            |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Rezervuar Basıncı                    | (P <sub>0</sub> ): 0.1 Bar |
| Kum Yatak üzerinden nozul yüksekliği | (H <sub>N</sub> ): 15 cm   |
| Kum Yatak Kalınlığı                  | (H <sub>S</sub> ): 6 cm    |

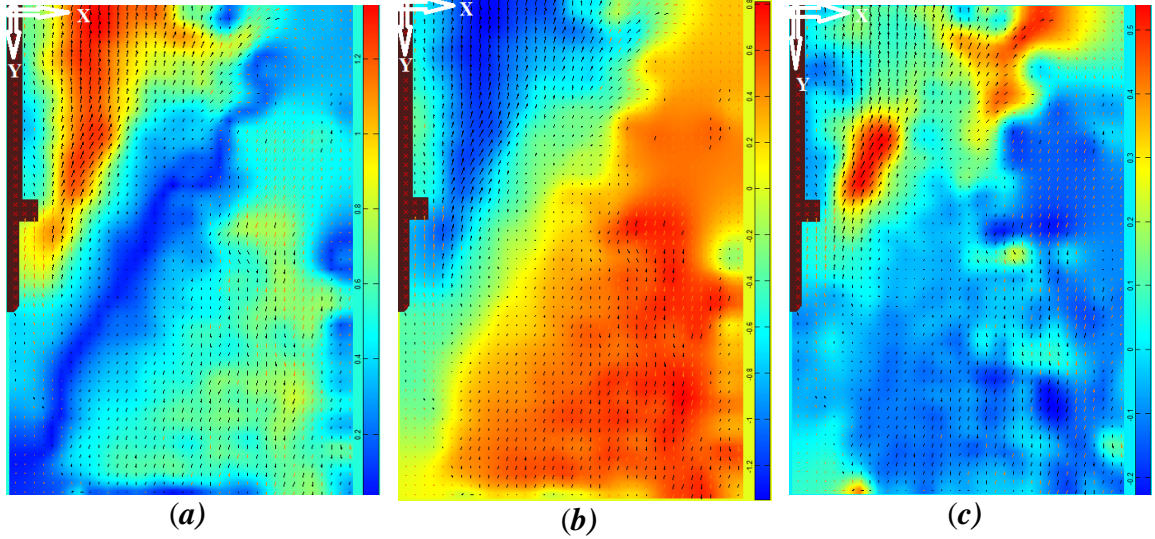
Analizler önceki durumda olduğu gibi 1450 kare fotoğrafın 100 - 105, 723 - 728 ve 1445 - 1450 aralığında incelenmesi şeklinde yapılmıştır.

- **Fotoğraf Aralığı 100 - 105**

100 - 105' inci fotoğrafların analizi sonucu elde edilen bileşke hız dağılımı, yatay hız dağılımı ve düşey hız dağılımı sonuçları Şekil 4.8' deki gibidir. Bileşke hız dağılımı incelendiğinde maksimum bileşke hıza kum yatak yüzeyinden yaklaşık olarak 35 cm yüksekte 1,6 m/s olarak ulaşıldığı görülmektedir. Yataktan ayrılan kum partiküllerinin yatağı terk etme açıları ve yönleri yatak yüzeyi ve nozul eksenine yakın bölgelerde net olarak gözlenemese de enterpolasyonlarla bir kestirim yapıldığında yaklaşık bir partikül doğrultusu çıkmaktadır. Yine önceki durumda olduğu gibi nozul çıkış ağzının altındaki bölgelerde yataktan ayrılıp tekrar sirkülasyona dönen partiküller gözlenmektedir. Söz konusu bölgenin net olarak görüntülenememesi önceki durumda olduğu gibi, nozul altı bölgede yataktan çok kısa sürede çok miktarda partikül kopmasıdır. Yüksek miktardaki kum kütlesi lazer perdesinin önünü kapattığından net görüntü alınamamıştır. Fakat enterpolasyonlar kullanılarak yapılan PIV analizleri için gerekli asgari görüntü netliğini sağlamıştır.

Nozul altı bölgede partiküller, ağırlıklı olarak düşey doğrultuda ve nozul merkezine doğru hareket ediyor iken nozulu başka bir deney düzeneğine bağlamak için kullanılan flanş bölgesine geldiğinde nozul merkezinden dışarıya doğru keskin bir doğrultu

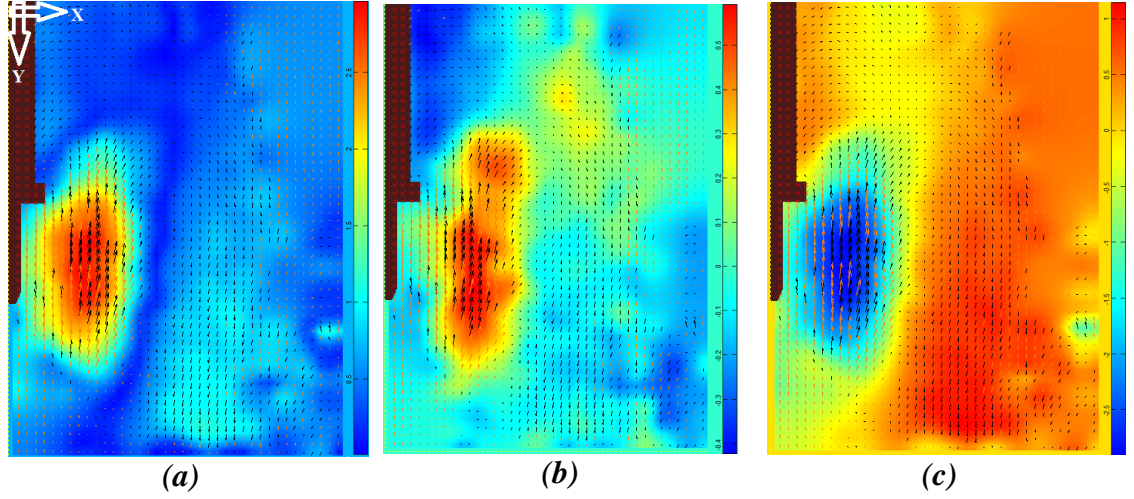
değişimine uğramıştır. Asıl partikül akış karakterini tayin ederken bu durum da dikkate alınmalıdır.



**Şekil 4. 8.** P 0,1\_ HS 6\_ HN 15 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

- **Fotoğraf Aralığı 723 - 728**

723 - 728' inci fotoğrafların analizi sonucu elde edilen bileşke hız dağılımı, yatay hız dağılımı ve düşey hız dağılımı sonuçları Şekil 4.9' daki gibidir. Aynı durumun ikinci setinde maksimum hızlar ilk setin aksine, kum yatak yüzeyine daha yakın bölgelerde gözlenmektedir. Maksimum bileşke hız 3 m/s olarak tespit edilmiştir.

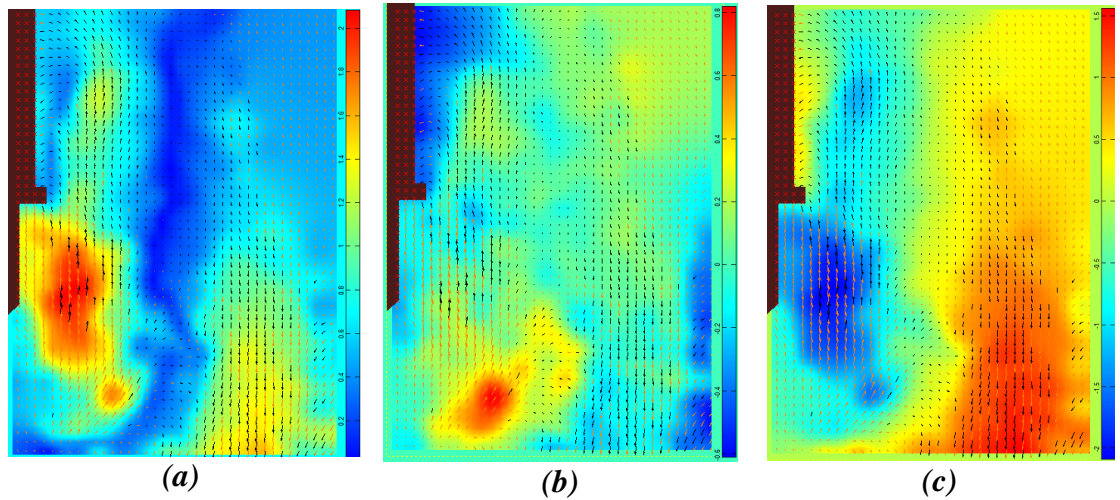


**Şekil 4. 9.** P 0,1\_ HS 6\_ HN 15 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

Partiküllerin yatağı terk etme açıları ilk sete göre daha küçüktür. Buradan u hız bileşeninin v hız bileşenine olan oranının daha büyük olduğu sonucu çıkarılabilir.

- **Fotoğraf Aralığı 1445 - 1450**

1445 - 1450' inci fotoğrafların analizi sonucu elde edilen bileşke hız dağılımı, yatay hız dağılımı ve düşey hız dağılımı sonuçları Şekil 4.10' daki gibidir.



**Şekil 4. 10.** P 0,1\_ HS 6\_ HN 15 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)



Maksimum bileşke hız 2 m/s, maksimum u hızı 0,8 m/s maksimum v hızı 2 m/s olarak gözlenmiştir. maksimum hızlar bir önceki sette olduğu gibi kum yüzeyine yakın bölgelerde gözlenmiştir. Önceki setten farklı olarak yatay hız bileşeninin şiddeti yatağa yakın bölgelerde artmaktadır. Yatağı küçük açılarla terk eden parçacıkların fazlalığı çok ince olan kum yatağın tam nozul altındaki bölgesindeki partiküllerin bu sette temizlenmiş olması ve duvar jeti etkisinin baskın hale gelmeye başlamasına bağlanabilir.

#### **4.1 3. P 0,1\_ H<sub>S</sub> 14,5\_ H<sub>N</sub> 15 ACF**

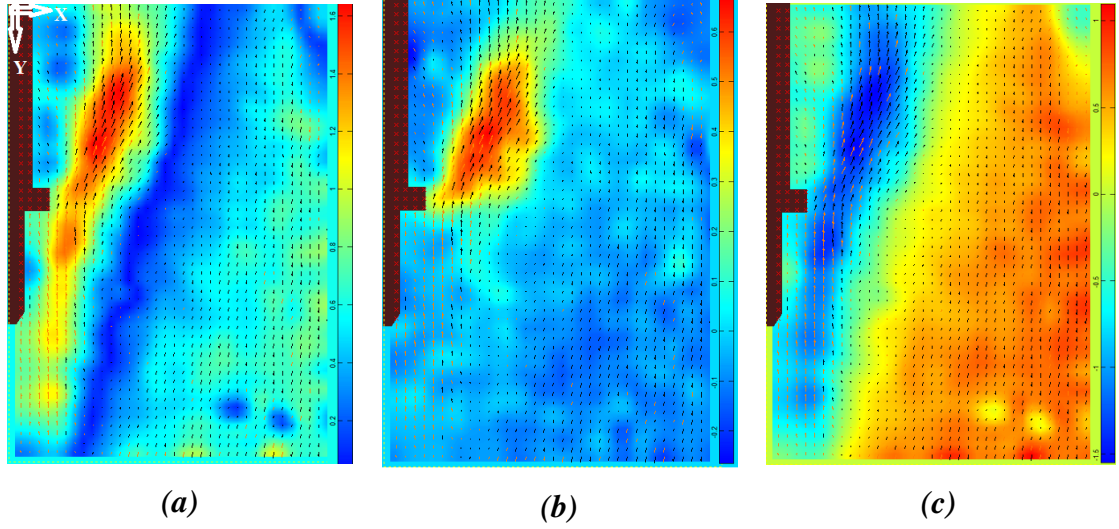
Düz kum yüzeyi üzerinde yapılan deneylerin ölçümleri alındıktan sonra oluşan krater üzerine tekrar jet çarptırmak suretiyle alınan ölçümlerle yüzey şeklinin etkisi gözlemlenmiştir. Analizler önceki durumda olduğu gibi 1450 kare fotoğrafın 100 - 105, 723 - 728 ve 1445 - 1450 aralığında incelenmesi şeklinde yapılmıştır.

Deney Şartları:

|                                      |                            |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Rezervuar Basıncı                    | (P <sub>0</sub> ): 0.1 Bar |
| Kum Yatak üzerinden nozul yüksekliği | (H <sub>N</sub> ): 15 cm   |
| Kum Yatak Kalınlığı                  | (H <sub>S</sub> ): 14,5 cm |

- **Fotoğraf Aralığı 100 - 105**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 100-105'inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil4.11' deki gibidir. Maksimum bileşke hız 1,6 m/s maksimum u hızı 0,6 m/s, maksimum v hızı 1 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum hızla kum yatak yüzeyinden yaklaşık 30 cm yukarda gözlenmiştir.



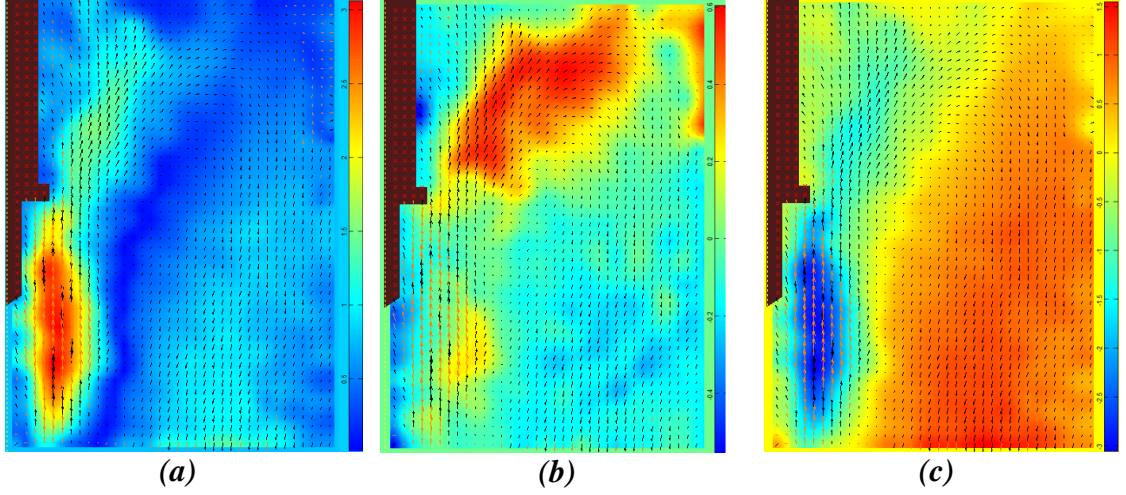
**Şekil 4. 11.** P 0,1\_ HS 14,5\_ HN 15 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

Nozul altındaki bölgede yatay hız bileşeninin düşey hız bileşenine oranı küçük çıkmıştır. Bu durum, hız alanındaki vektörlerin doğrultularından da anlaşılacağı gibi yatayla yaklaşık  $90^\circ$  lik bir açıyla hareket etmektedir. Ayrıca tekrar sirkülasyona katılan partiküller olduğuna işaret eden sağdan sola doğru yönelmiş vektörler de bulunmaktadır. u hız bileşeninin güçlendiği bölge nozul flanş bağlantısının olduğu kısımdır. Fakat bu etki geometriye bağlı bir oluşumdur.

Nozul çıkış ağzı civarında ve kum yüzeyine yakın pozisyonlardaki hız alanları enterpolasyonlar yardımıyla çıkarılmıştır. Söz konusu bölgede yoğun bir kum kütlesi akışı olduğundan çok ince olan lazer tabakasının önü yer yer kapanmıştır.

- **Fotoğraf Aralığı 723 - 728**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 723-728' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.11' deki gibidir. Maksimum bileşke hız 3 m/s maksimum u hızı 0,6 m/s, maksimum v hızı 3 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum bileşke hız ve düşey hız kum yatak yüzeyine yakın bir bölgede gözlenmiştir.



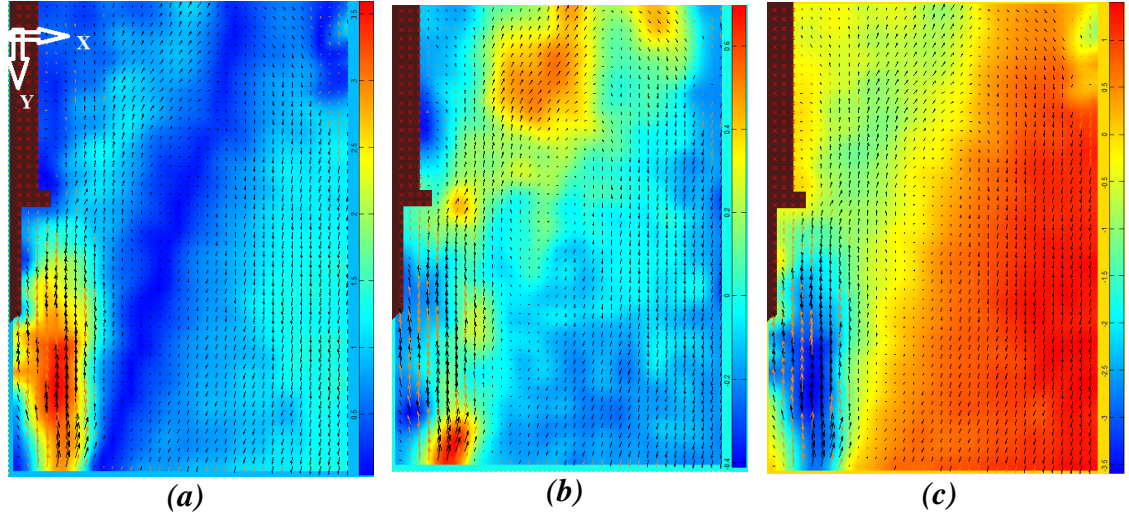
**Şekil 4. 11.** P 0,1\_ HS 14,5\_ HN 15 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

Nozul altındaki bölgede düşey hız bileşeni baskın olup yatay hız bileşeni nozul flanşı civarında geometriye bağlı bir güçlenme mevcuttur. Tekrar sirkülasyona katılan partiküller bu sette de gözlenmiştir.

- **Fotoğraf Aralığı 1445 - 1450**

1445-1450 fotoğraf aralığının analiz sonuçları Şekil 4.12' deki gibidir. Maksimum bileşke hız 3,5 m/s maksimum u hızı 0,6 m/s, maksimum v hızı 3,5 m/s civarında tayin edilmiştir.

Maksimum yatay hız bileşeni tam olarak partiküllerin krater kenarından ayrıldığı sırada görülmektedir. Partiküllerin dış krater dudağını takip ederek krateri terk ettiği krater oluşumundan sonra alınan bu ölçümün son setinde daha net olarak gözlemlenmiştir. İlk iki sette bu durumun gözlemlenememesinin nedeni net krater karakteri oluşumunun tam olarak son safhada tamamlanmış olmasındandır. Düzene giren krater formuyla beraber düzene giren kum akışı kum yatak yüzeyine yakın bölgelerde yüksek hız ve yatak yüzeyinden uzaklaştıkça da düşük hız gözlenmesine neden olmaktadır.



**Şekil 4. 12.** P 0,1\_ HS 14,5\_ HN 15 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

#### 4.1 4. P 0,1\_ H<sub>S</sub> 6\_ H<sub>N</sub> 15 ACF

Bu sette farklılık arz eden kısım düz kum yüzeyine jet akışı çarptırılarak alınan ölçümlerin ardından yüksek kum kalınlıklı yataklarda tabanda hala partiküllü bir yüzey mevcut iken bu durumda tabanda bir kum kalınlığı söz konusu değildir. Dolayısıyla jetin ilk çarptığı yerde parçacıklar arası gaz difüzyonu söz konusu olmayacağından duvar jeti etkisi artacaktır.

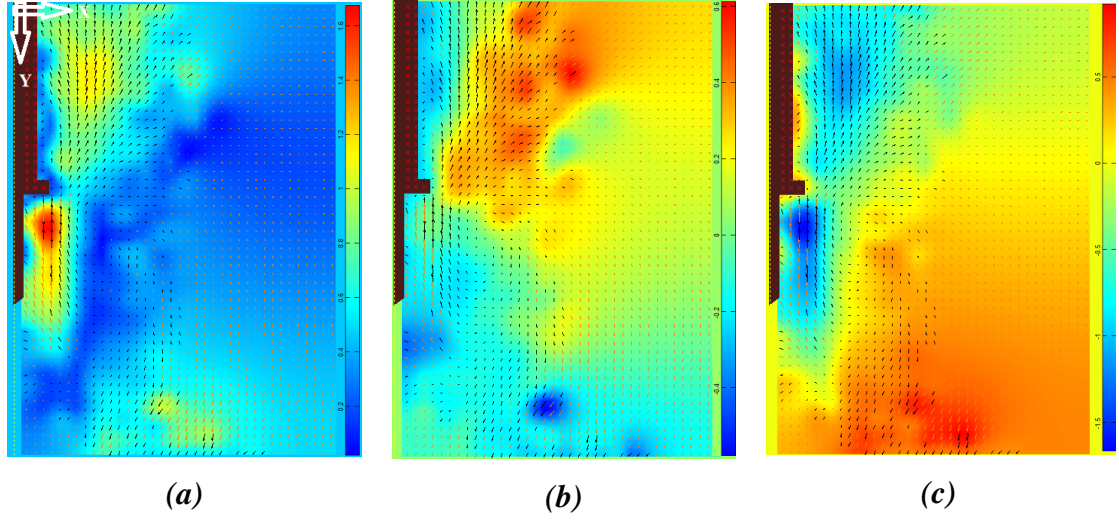
ikinci durumda da Analizler önceki durumda olduğu gibi 1450 kare fotoğrafın 100 - 105, 723 - 728 ve 1445 - 1450 aralığında incelenmesi şeklinde yapılmıştır.

Deney Şartları:

|                                      |                            |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Rezervuar Basıncı                    | (P <sub>0</sub> ): 0.1 Bar |
| Kum Yatak üzerinden nozul yüksekliği | (H <sub>N</sub> ): 15 cm   |
| Kum Yatak Kalınlığı                  | (H <sub>S</sub> ): 6 cm    |

- **Fotoğraf Aralığı 100 - 105**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 100-105'inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.13' deki gibidir.



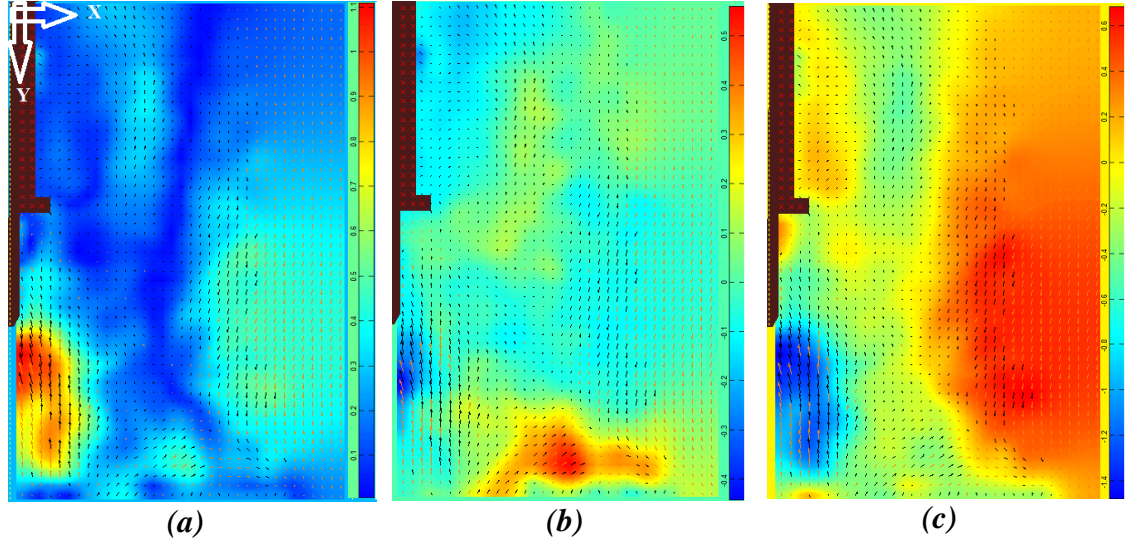
**Şekil 4. 13.** P 0,1\_ HS 6\_ HN 15 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

Maksimum bileşke hız 1,6 m/s maksimum u hızı 0,6 m/s, maksimum v hızı 1,5 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum bileşke hıza yatak yüzeyinden yaklaşık 20 cm yukarıda ulaşılmıştır. Yeniden sirkülasyona giren partiküller bu sette daha net olarak gözlemlenebilmektedir.

- **Fotoğraf Aralığı 723 - 728**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 723-728'inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.14' deki gibidir.

Maksimum bileşke hız 1,1 m/s maksimum u hızı 0,5 m/s, maksimum v hızı 1,4 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum bileşke hıza yatak üst yüzeyine çok yakın bir bölgede ulaşılmıştır. Yeniden sirkülasyona giren partiküller bu sette de net olarak gözlemlenebilmektedir.

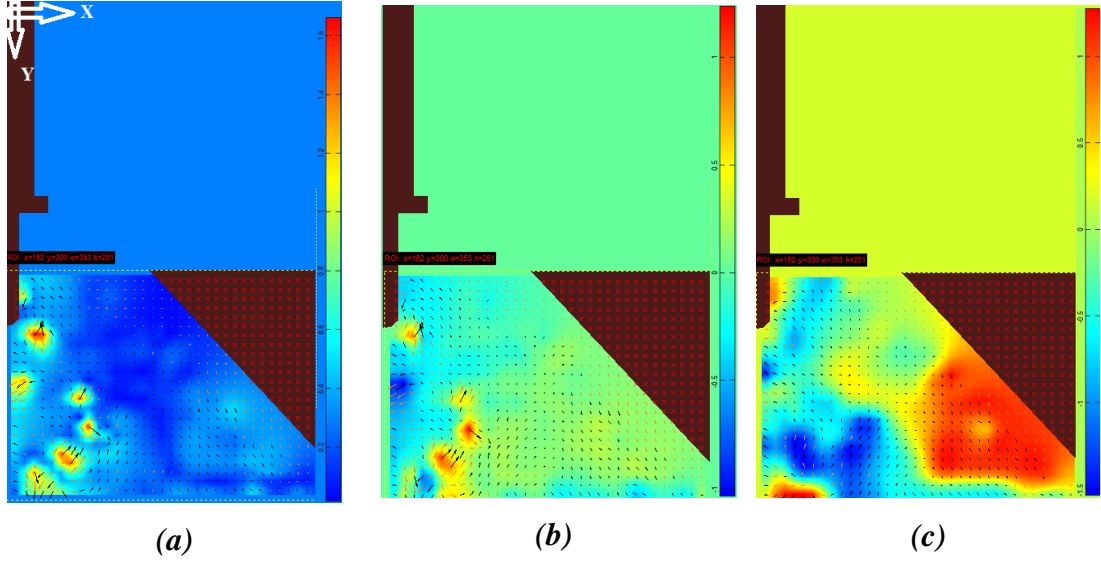


**Şekil 4. 14.** P 0,1\_ HS 6\_ HN 15 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

Yeniden sirkülasyona giren partiküller bu sette de net olarak gözlemlenebilmektedir. Ayrıca genişlemiş olan krater kenarı boyunca yataktan yüksek yatay hızlarla ayrılan partiküller parçacıklar dikkat çekmektedir. Önceki setten farklı olarak en yüksek u hızları kraterden yukarıdaki bölgelerde değil, tam kraterden ayrılma bölgesinde tespit edilmiştir.

- **Fotoğraf Aralığı 1445 - 1450**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 1445-1450' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.15' deki gibidir. Maksimum bileşke hız 1,6 m/s maksimum u hızı 1 m/s, maksimum v hızı 1,5 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum bileşke hıza yatak üst yüzeyine çok yakın bir bölgede ulaşılmıştır. Bu sette bileşke hız dalgalanmaktadır. Nozulun en etkili olduğu bölgede fazla miktarda partikül kalmadığı için duvar jeti etkisi artmakta ve az miktarda kum parçacıkları arasına giren gaz, kumu çok kısa zamanda çok yüksek hızlara çıkarmıştır. Oluşan duvar jetinin ve kraterin geometrisi nedeniyle ciddi miktarda partikül sirkülasyona katılmaktadır.



**Şekil 4. 15.** P 0,1\_ HS 6\_ HN 15 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

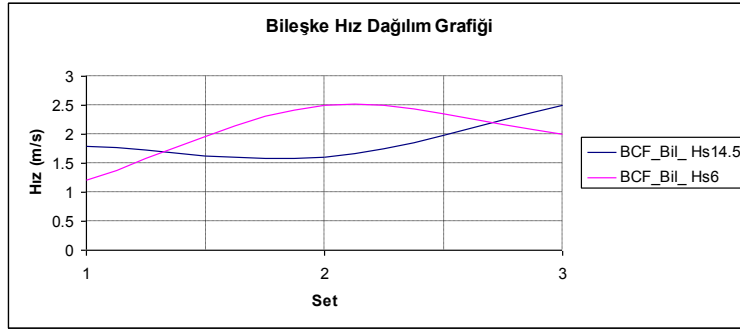
#### 4.1 5. Hız alanına kum kalınlığı etkisinin araştırılması

Gezegen yüzeyleri belli kalınlıktaki partikül altında uzanan sert tabakadan oluşmaktadır. Bu nedenle farklı kum kalınlıklarında deneyler yapmaya ihtiyaç duyulmuştur. 14,5 cm kum kalınlığında yapılan deneyler sonucunda elde edilen ortalama durumlardaki maksimum ve minimum hız dağılımları Çizelge 4.1' de verilmiştir.

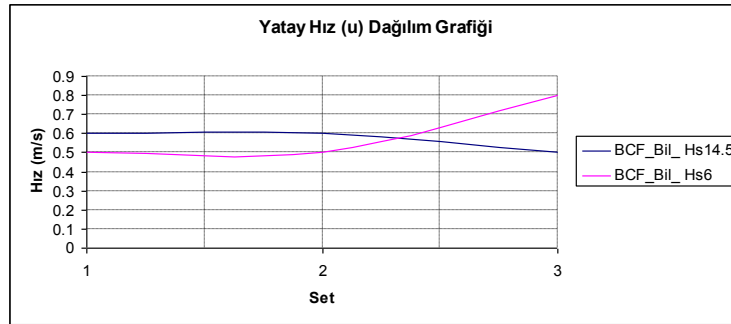
**Çizelge 4. 1.** Krater öncesi Hs 6 ve Hs 14,5 için hız dağılım tabloları

|           | P 0,1_ HS 14,5_ HN 15 BCF |     |     |       |     |       |           | P 0,1_ HS 6_ HN 15 BCF |     |     |       |     |       |
|-----------|---------------------------|-----|-----|-------|-----|-------|-----------|------------------------|-----|-----|-------|-----|-------|
|           | Bileşke                   |     | u   |       | v   |       |           | Mag                    |     | u   |       | v   |       |
|           | Max                       | Min | Max | - Max | Max | - Max |           | Max                    | Min | Max | - Max | Max | - Max |
| 100-105   | 1.8                       | 0   | 0.6 | 0.2   | 1.5 | 1     | 100-105   | 1.2                    | 0   | 0.5 | 0.2   | 1.2 | 0.8   |
| 723-728   | 1.6                       | 0   | 0.6 | 0.3   | 1.5 | 1     | 723-728   | 2.5                    | 0   | 0.5 | 0.4   | 2.5 | 1     |
| 1445-1450 | 2.5                       | 0   | 0.5 | 0.3   | 2.5 | 1     | 1445-1450 | 2                      | 0   | 0.8 | 0.6   | 2   | 1.5   |

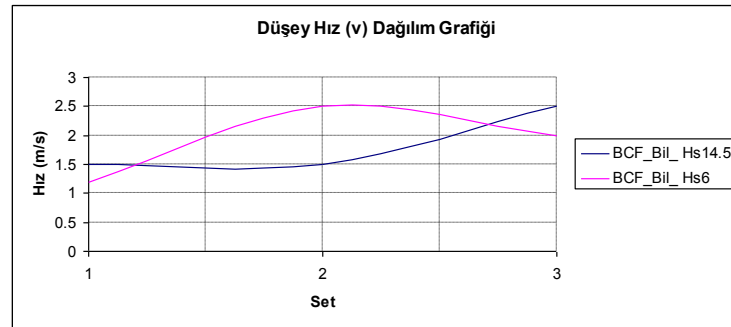
Tablolar incelendiğinde her iki durum için de ortalama hızlar birbirine çok yakın değerlerde çıkmıştır. Bileşke hız dışında ayrı ayrı hız bileşenleri de birbirine çok yakın değerlerde çıkmıştır. Setlere göre hız değişim grafikleri şekil 4.16' da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 4. 16.** Krater öncesi Hs 14,5 ve Hs 6 için maksimum bileşke hız (a), u hızı (b), v hızı (c) dağılım grafikleri

Grafiklerde yatay ekseninde yer alan 1, 2 ve 3 numaraları sırasıyla 100-105 aralığı, 723-728 aralığı ve 1445-1450 aralığında yapılan analiz gruplarını ifade etmektedir. Hızlardaki dalgalanma ölçüm süresi boyunca sabit hava debisine rağmen yataktan kopan partikül miktarının değişmesindedir. Bahsedilen dalgalanmalar yüksek hızlı kamera kayıtlarından da net olarak anlaşılabilir. Ölçümlerin alındığı sürede krater karakterindeki çukur oluşumu yakalanmış olsa da krater oluşumu henüz tamamlanmamıştır. Krater oluşumunun tamamlanması demek artık krateri oluşturan iç koni ve dış koni çaplarının değişmemesi demektir. Bu durumda akışkanın etkisi iyice



azalmakta ve akışkanın oluşturduğu kaldırma kuvveti ve kayma gerilmesi yataktan yeni partiküllerin kopması için yeterli olmamaktadır. Krater oluşumunun durması ise parçacık özellikleri ve nozul özelliklerine bağlı olarak saatleri bulabilmektedir. deney sonuçlarında karşılaşılan dalgalanmalar yaşanmaması ancak böyle bir üniform durumda söz konusu olabilir. Krater oluşumu tamamlandıktan sonra sadece krater kenarından yeniden pozisyonlanma açısı nedeniyle çukur içine yuvarlanan partiküller gaz akışıyla geri ittirilmektedir.

Kum yatak kalınlığının parçacık hızları üzerine net bir etkisi sonuçlardan da görüldüğü gibi yakalanmamıştır. Asıl farklılık yataktan ayrılan partikül doğrultuları ve maksimum hıza ulaşılan bölgelerin nozula göre durumu noktasında belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Kum partikül kalınlığının 14,5 cm olduğu durumda kum partikülleri yatağı yatay düzlemlerle neredeyse 90° açı yapacak şekilde terk etmektedir. Çok hızlı bir şekilde oluşan iç krater konisinin kenar açıları çok yüksek olduğundan parçacıklar yatağı düşeye yakın bir doğrultuda terk etmiştir. Tam krater çıkışında yatağı büyük kraterin yanak açısına yakın bir açıda terk eden partikül sayısı oldukça azdır. Maksimum hızın görüldüğü yer ilk sette kum yatak yüzeyinden yaklaşık olarak 35 cm yukarıdaki bir bölge iken daha sonraki setlerde maksimum hızlar yatak yüzeyine daha yakın bölgelerde gözlemlenmiştir.

Kum yatak kalınlığının 6 cm olduğu durum incelendiğinde önceki duruma nazaran belirgin farklar ortaya çıkmıştır. İlk sette maksimum hızlar yine 14,5 cm kum kalınlığındaki duruma benzer şekilde yatak yüzeyinden oldukça yukarıda gözlenmiştir. Fakat sonraki setlerde maksimum hızlar yatak yüzeyine yakın bölgelerde gözlemlenmiştir. Hızların doğrultusu anlamında ise;  $H_s = 6$  olduğu durumda, krater çıkış ağzına yakın bölgelerde yatay düzleme yakın açılarla yatağı terk eden partiküllerin belirgin olarak arttığı söylenebilir. Başlangıçtaki benzerlik ve ilerleyen setlerdeki farklılık, her bir durumdaki partikül taşınım mekanizmalarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Nozuldan çıkan gazın yatak yüzeyine temas etmeye başladığı ilk anlarda Viskoz Erozyonu gerçekleşmektedir. Fakat bu evre kameranın kayıt süresi kısıtlılığı nedeniyle her durum için gözlenememiştir. Her iki durumun ilk setlerinde yakalanan kısımda partiküller arasında difüze olmuş gaz patlamaları etkili olmuştur. Yatağın alt katmanlarına radyal olarak yayılan gaz molekülleri, yatak içi basıncını

arttırarak büyük kütlelerdeki kumun gruplar halinde patlamaya benzer şekilde yataktan ayrılmasına neden olmaktadır. Böylece o kadar büyük bir kütle yatak yüzeyine yakın kısımlarda yüksek hızlara ulaştırılmayıp daha üst bölgelerde maksimum hıza ulaşmıştır. Partikül taşınım mekanizmalarına daha önceki bölümlerde değinilmiştir.

Hs = 6 cm olduğu durum incelendiğinde partiküllerin yatak yüzeyine yakın bölgelerde daha büyük yatay hız bileşenlerine sahip olarak bölgeyi terk ettiği gözlenmiştir. Nozuldan gaz akışı başlamasından çok kısa bir süre sonra tam çıkış ağzının altındaki bölge kumdan arındırılır ve duvar jeti etkisi artar. Bu da partiküllerin yatay düzleme daha yakın bir açıyla yataktan ayrılmasına neden olmuştur. Aynı deneylerin hazır oluşmuş bir krater üzerinde yapılması sonucu elde edilen bulgular incelendiğinde hız dağılım tablosu Çizelge 4.2 'deki gibidir.

**Çizelge 4.2.** Krater sonrası Hs 6 ve Hs 14,5 için hız dağılım tabloları

|           | P 0,1_ HS 14,5_ HN 15 ACF |     |      |      |      |      |           | P 0,1_ HS 6_ HN 15 ACF |     |      |      |      |      |
|-----------|---------------------------|-----|------|------|------|------|-----------|------------------------|-----|------|------|------|------|
|           | Bileşke                   |     | u    |      | v    |      |           | Bileşke                |     | u    |      | v    |      |
|           | Maks                      | Min | Maks | Maks | Maks | Maks |           | Maks                   | Min | Maks | Maks | Maks | Maks |
| 100-105   | 1.6                       | 0   | 0.6  | 0.2  | 1.5  | 1    | 100-105   | 1.6                    | 0   | 0.6  | 0.4  | 1.5  | 0.5  |
| 723-728   | 3                         | 0   | 0.6  | 0.4  | 3    | 1.5  | 723-728   | 1.1                    | 0   | 0.5  | 0.4  | 1.4  | 0.6  |
| 1445-1450 | 3.5                       | 0   | 0.6  | 0.4  | 3.5  | 1    | 1445-1450 | 1.6                    | 0   | 1    | 1    | 1.5  | 1    |

Krater oluşumundan sonra alınan ölçümler sonucunda Hs = 14,5 için alınan ölçümlerde hızlar krater öncesi duruma göre daha yüksek çıkmıştır. Akış genel krater geometrisini takip ettiği için difüze gaz patlamalarıyla taşınım azalmıştır. Böylece partiküller daha fazla hızlandırılabilir. Böylece partiküller daha fazla hızlandırılabilir.

Hs = 6 cm için olan durumda partikül hızları yaklaşık olarak krater oluşumu öncesi durumla aynı çıkmıştır, fakat partikül doğrultuları yatay düzlemle daha küçük açı yapacak şekilde belirmiştir. Her iki durum da duvar jeti etkisinin artmasından kaynaklanmaktadır. Kum kalınlığı az olduğundan tam bir krater üzerine değil de kesik bir koni üzerine akış gönderilerek bir deney şartı oluşmuştur. Nozuldan çıkan akışkan kum partiküllü yüzeye ulaşmaya kadar etkisini bir miktar yitirmektedir. Bu nedenle hız artmamıştır.

## 4.2. Sabit Kum Kalınlığı Değişken Nozul Yüksekliği ( $H_N$ )

Kum partiküllerinin hız alanına etki edeceği düşünülen diğer bir parametre ise nozul yüksekliğinin yatak yüzeyinden olan uzaklığıdır. Böyle bir test iniş yada kalkış yapan aracın yere olan yüksekliğinin değişmesi durumunu simüle etmek şeklinde de düşünülebilir.

Ölçüm çeşitliliğini arttırmak için ek olarak bazı ölçümler alınmıştır. Bu ölçümler:

- P 0,1\_  $H_S$  14,5\_  $H_N$  20 BCF
- P 0,1\_  $H_S$  14,5\_  $H_N$  20 ACF
- P 0,1\_  $H_S$  6\_  $H_N$  10 BCF
- P 0,1\_  $H_S$  6\_  $H_N$  10 ACF

Alınan ölçümler arasında yapılacak karşılaştırma aşağıdaki gibi olup karşılaştırmalarla nozul yüksekliğinin hız alanı üzerine olan etkisi incelenecektir.

P 0,1\_  $H_S$  14,5\_  $H_N$  15 BCF < - > P 0,1\_  $H_S$  14,5\_  $H_N$  20 BCF

P 0,1\_  $H_S$  14,5\_  $H_N$  15 ACF < - > P 0,1\_  $H_S$  14,5\_  $H_N$  20 ACF

P 0,1\_  $H_S$  6\_  $H_N$  15 BCF < - > P 0,1\_  $H_S$  6\_  $H_N$  10 BCF

P 0,1\_  $H_S$  6\_  $H_N$  15 ACF < - > P 0,1\_  $H_S$  6\_  $H_N$  10 ACF

### 4. 2. 1. P 0,1\_ $H_S$ 14,5\_ $H_N$ 20 BCF

Analizler önceki durumda olduğu gibi 1450 kare fotoğrafın 100 - 105, 723 - 728 ve 1445 - 1450 aralığında incelenmesi şeklinde yapılmıştır.

Deney Şartları:

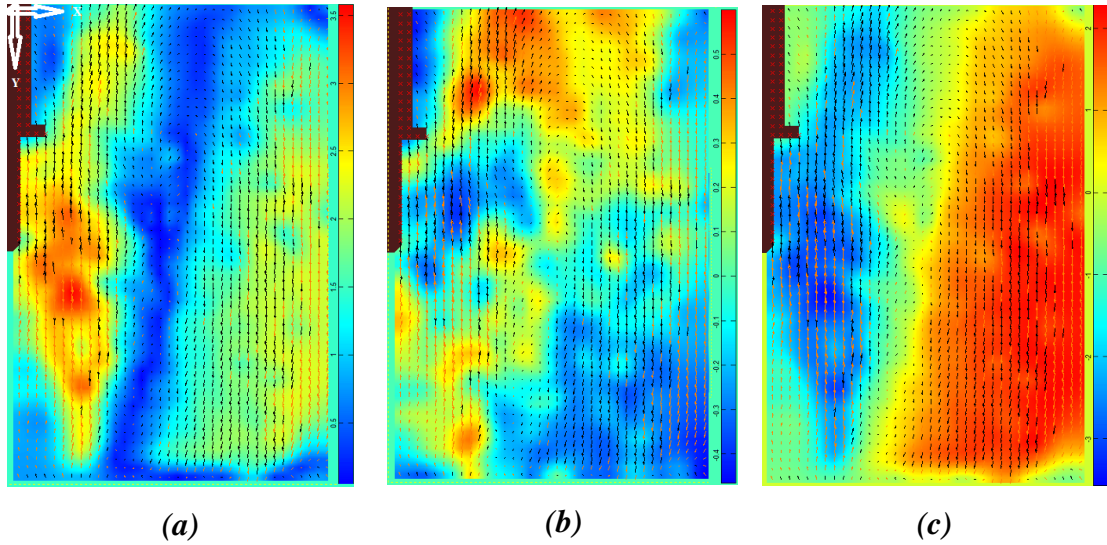
Rezervuar Basıncı (P<sub>0</sub>): 0.1 Bar

Kum Yatak üzerinden nozul yüksekliği (H<sub>N</sub>): 20 cm

Kum Yatak Kalınlığı (H<sub>S</sub>): 14,5 cm

- **Fotoğraf Aralığı 100 - 105**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 100-105' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.17' deki gibidir. Maksimum bileşke hız 3,5 m/s maksimum u hızı 0,5 m/s, maksimum v hızı 3 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum bileşke hıza yatak üst yüzeyinden çok uzak olmayan bir bölgede ulaşılmıştır.



**Şekil 4. 17.** P 0,1\_ HS 14,5\_ HN 20 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

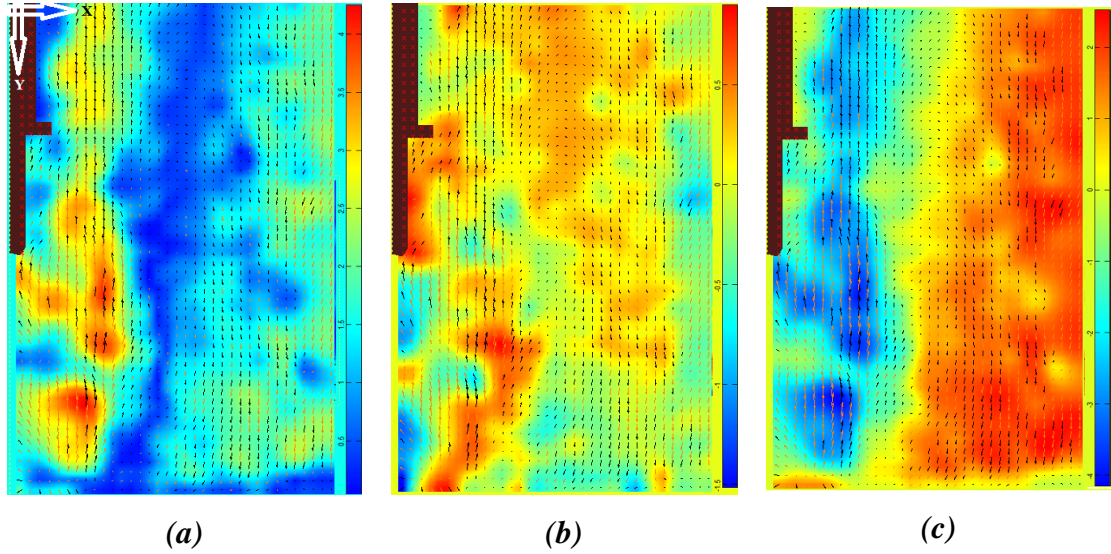
Yatay hız bileşeni çok belirgin olmasa da tam krater çıkışında belli oranda belirginleşmiştir. Fakat nozul yakınlarında hız ağırlıklı olarak düşey doğrultuda dır. Dikkat çeken diğer bir husus bileşke hızın maksimuma yakın görünmeye başladığı bölge yatak yüzeyine yaklaştıkça nozul ekseninden uzaklaşmıştır. Nozul yüksekliğinden dolayı serbest jet bölgesinin uzunluğu artmış ve buna bağlı olarak jetin çarptığı dairesel iz düşüm alanı genişlemiştir.

- **Fotoğraf Aralığı 723 - 728**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 723-728' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.18' deki gibidir. Maksimum bileşke hız 4 m/s maksimum u hızı 1,5 m/s, maksimum v

hızı 4 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum bileşke hızı yatak üst yüzeyinden çok uzak olmayan bir bölgede ulaşılmıştır.

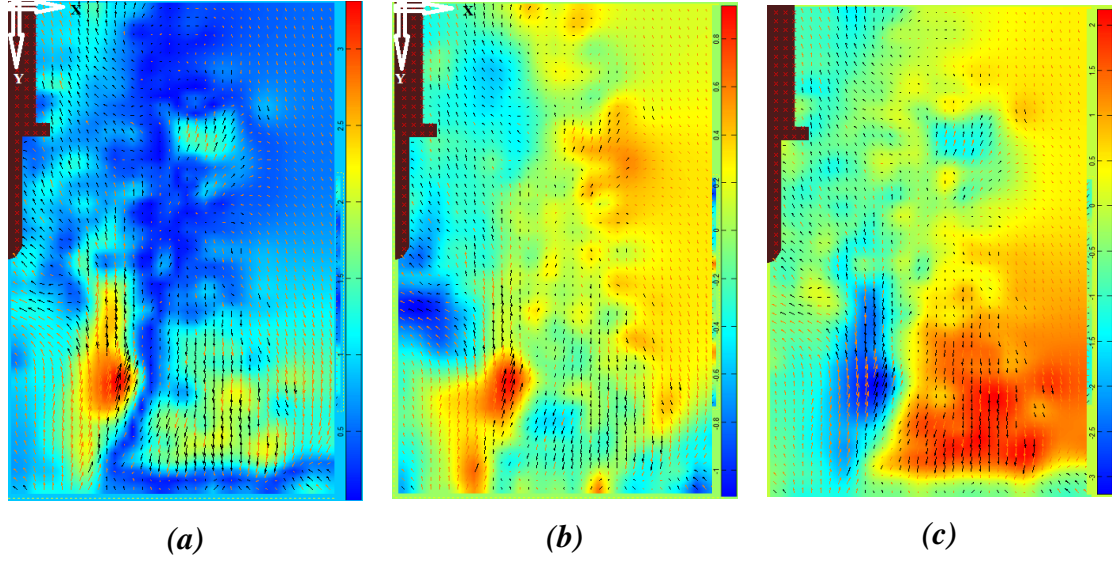
Yatay hız bileşeninin bu sette özellikle nozul eksenini yakın çevresinde ve yatak yüzeyi yakınlarında hızlandığı görülmüştür. Ayrıca maksimum u hız bileşeni negatif yönlü çıkmıştır. Bu partikül hareketinin çevreden nozul merkezine doğru olduğunu göstermektedir. Yataktan ayrıldıktan sonra yeniden gaz akışına kapılıp sirkülasyona giren partiküller daha net olarak gözlemlenmektedir.



**Şekil 4. 18.** P 0,1\_ HS 14,5\_ HN 20 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

- **Fotoğraf Aralığı 1445 - 1450**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 1445-1450' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.19' daki gibidir. Maksimum bileşke hız 3 m/s maksimum u hızı 1 m/s, maksimum v hızı 3 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum bileşke hızı yine yatak üst yüzeyine çok yakın bir bölgede ulaşılmıştır. Yataktan ayrıldıktan sonra tekrar sirkülasyona katılan partiküller oldukça net bir şekilde tespit edilmiş olup yatay hız bileşeni tam krater çıkış ağzı yakınlarında kuvvetlenmiştir.



**Şekil 4. 19.** P 0,1\_ HS 14,5\_ HN 20 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

#### 4. 2. 2. P 0,1\_ H<sub>S</sub> 6\_ H<sub>N</sub> 10 BCF

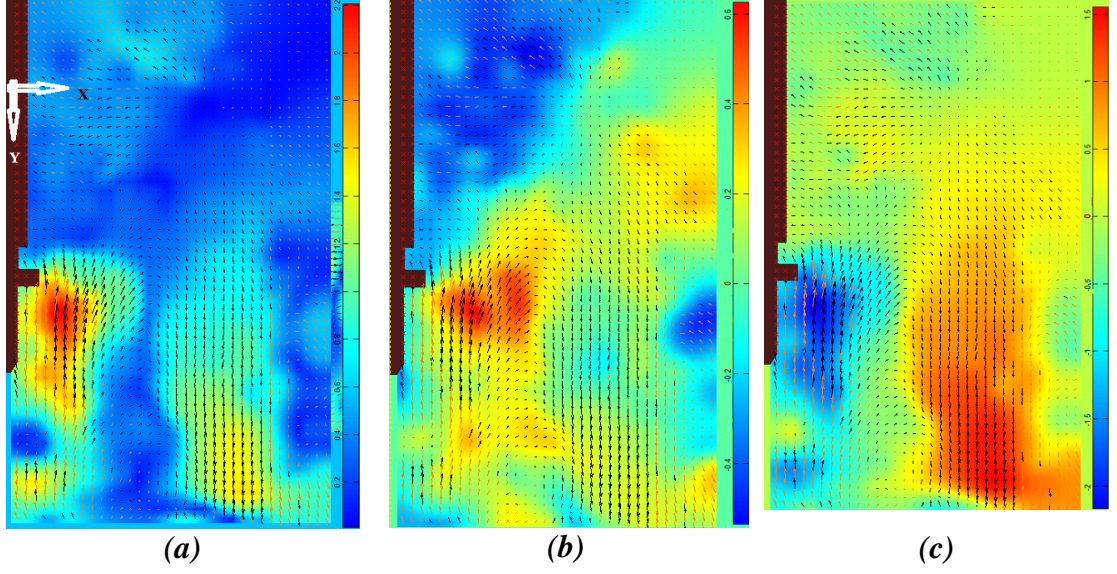
Analizler önceki durumda olduğu gibi 1450 kare fotoğrafın 100 - 105, 723 - 728 ve 1445 - 1450 aralığında incelenmesi şeklinde yapılmıştır.

Deney Şartları:

|                                      |                            |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Rezervuar Basıncı                    | (P <sub>0</sub> ): 0.1 Bar |
| Kum Yatak üzerinden nozul yüksekliği | (H <sub>N</sub> ): 10 cm   |
| Kum Yatak Kalınlığı                  | (H <sub>S</sub> ): 6 cm    |

- **Fotoğraf Aralığı 100 - 105**

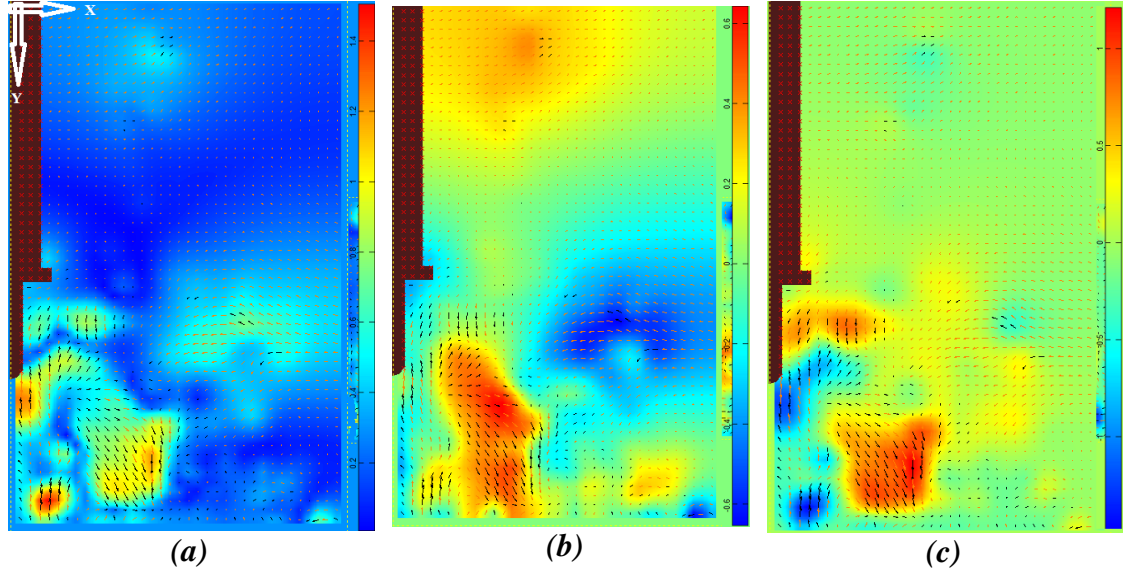
Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan önce yapılan deneyler neticesinde 100-105' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.20' deki gibidir. Maksimum bileşke hız 2,2 m/s maksimum u hızı 0,6 m/s, maksimum v hızı 2 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum bileşke hıza nozul çıkış ağzının az bir miktar yukarısında erişilmiştir. Partiküllerin menzili daha yüksek kum kalınlığındaki testlerle karşılaştırıldığında özellikle düşey doğrultuda oldukça kısa kalmıştır. Partikül yoğunluğu nedeniyle PIV analizlerinde net olarak belirlenemese de; tam büyük krater yanağında yataktan ayrılan partiküllerin u bileşenleri de belirgin oranda güçlenmiştir.



**Şekil 4. 20.** P 0,1\_ HS 6\_ HN 10 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

- **Fotoğraf Aralığı 723 - 728**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan önce yapılan deneyler neticesinde 723-728' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.21' deki gibidir. Maksimum bileşke hız 1,4 m/s maksimum u hızı 0,6 m/s, maksimum v hızı 1 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum hızların görülme bölgeleri yatak yüzeyine iyice yaklaşmıştır. Hatta partiküllerin seyrelmesi nedeniyle tam krater büyük konisi yanağından dışa doğru süpürülen partiküllerin maksimum hıza yakın hızlarda yatağı terk ettiği görülmüştür. Partiküllerin düşey doğrultudaki menzili belirgin olarak düşmüştür. Bunun sebebi de yine genişleyen kraterle ilgili olarak koni yanak açısının küçülmesi, artan duvar jeti etkisi gibi faktörlerdir.



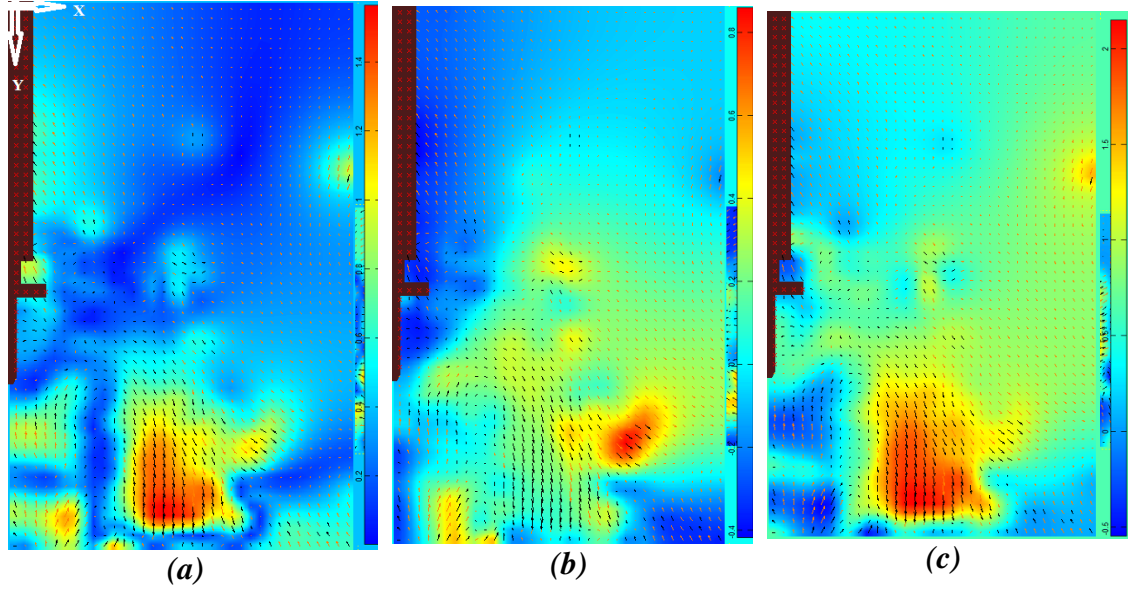
**Şekil 4. 21.** P 0,1\_ HS 6\_ HN 10 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

- **Fotoğraf Aralığı 1445 - 1450**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan önce yapılan deneyler neticesinde 1445-1450' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.22' deki gibidir. Maksimum bileşke hız 1,4 m/s maksimum u hızı 0,8 m/s, maksimum v hızı 2 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum hızlar yine yatak yüzeyine yakın bölgelerde görülmekle beraber maksimum u hızının görüldüğü bölgenin nozul merkezine olan yatay uzaklığı artmıştır.

Partiküllerin düşey doğrultudaki menzili düşmeye devam etmiş ve yatak yüzeyine iyice yaklaşmıştır.





**Şekil 4. 22.** P 0,1\_ HS 6\_ HN 10 BCF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

#### 4. 2. 3. P 0,1\_ HS 6\_ HN 10 ACF

Analizler önceki durumda olduğu gibi 1450 kare fotoğrafın 100 - 105, 723 - 728 ve 1445 - 1450 aralığında incelenmesi şeklinde yapılmıştır.

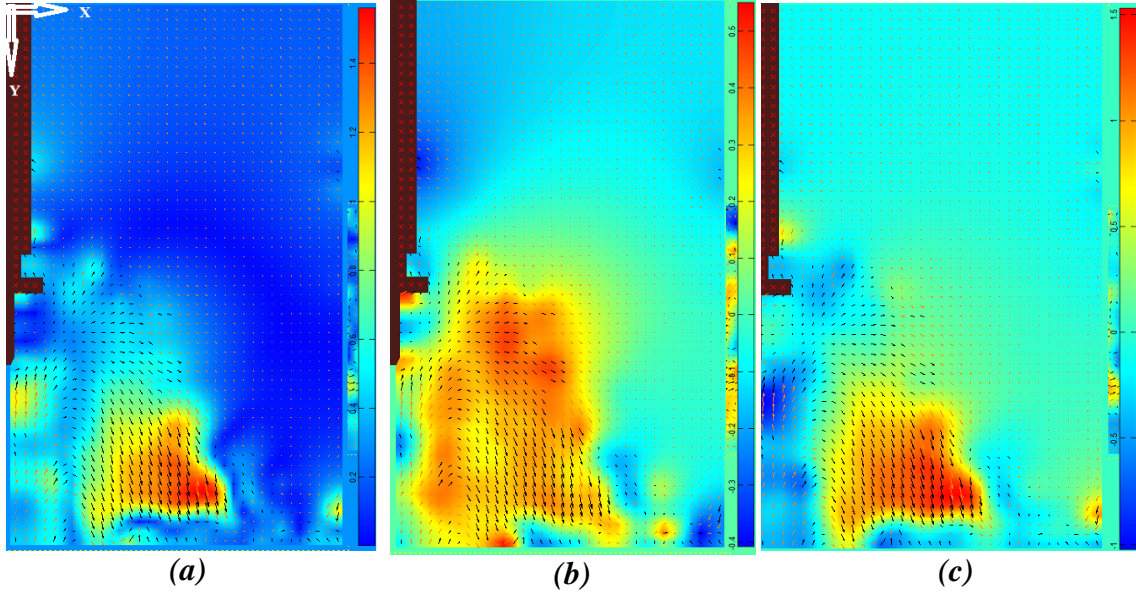
Deney Şartları:

|                                      |                            |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Rezervuar Basıncı                    | (P <sub>0</sub> ): 0.1 Bar |
| Kum Yatak üzerinden nozul yüksekliği | (H <sub>N</sub> ): 10 cm   |
| Kum Yatak Kalınlığı                  | (H <sub>S</sub> ): 6 cm    |

- **Fotoğraf Aralığı 100 - 105**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 100-105' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.23' deki gibidir. Maksimum bileşke hız 1,4 m/s maksimum u hızı 0,5 m/s, maksimum v hızı 1,5 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum hızlara nozul çıkış ağzı altında erişilmiştir. Partiküllerin menzili daha yüksek kum kalınlığındaki testlerle karşılaştırıldığında özellikle düşey doğrultuda oldukça kısa kalmıştır. Yatay hız bileşeni çok güçlü bir görünümde değildir. Partikül menzilinün düşüklüğü PIV kayıtlarında da

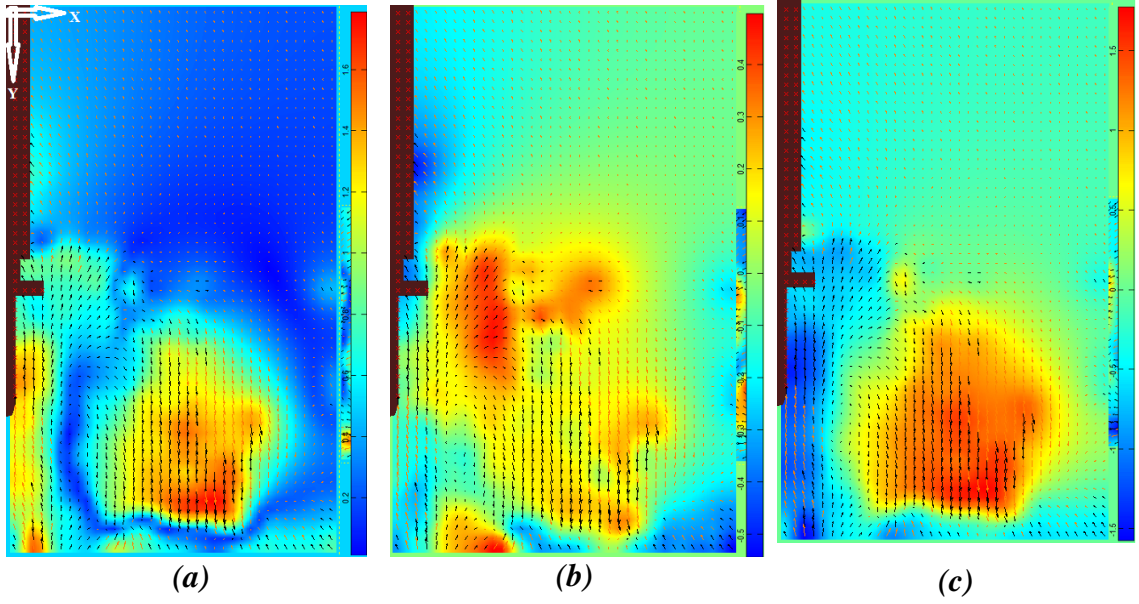
dikkat çekmektedir. Yataktan ayrılıp büyük krater konisini terk etmeden yatağa düşen partiküller dikkat çekmektedir.



**Şekil 4. 23.** P 0,1\_ HS 6\_ HN 10 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

- **Fotoğraf Aralığı 723 - 728**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 723-728' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.24' deki gibidir. Maksimum bileşke hız 1,6 m/s maksimum u hızı 0,5 m/s, maksimum v hızı 1,5 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum hızlar bu sette de nozula yakın bölgelerde görülmekle beraber ince tabakalar halinde difüze gaz patlamaları şeklinde kum taşınımı görülmektedir.

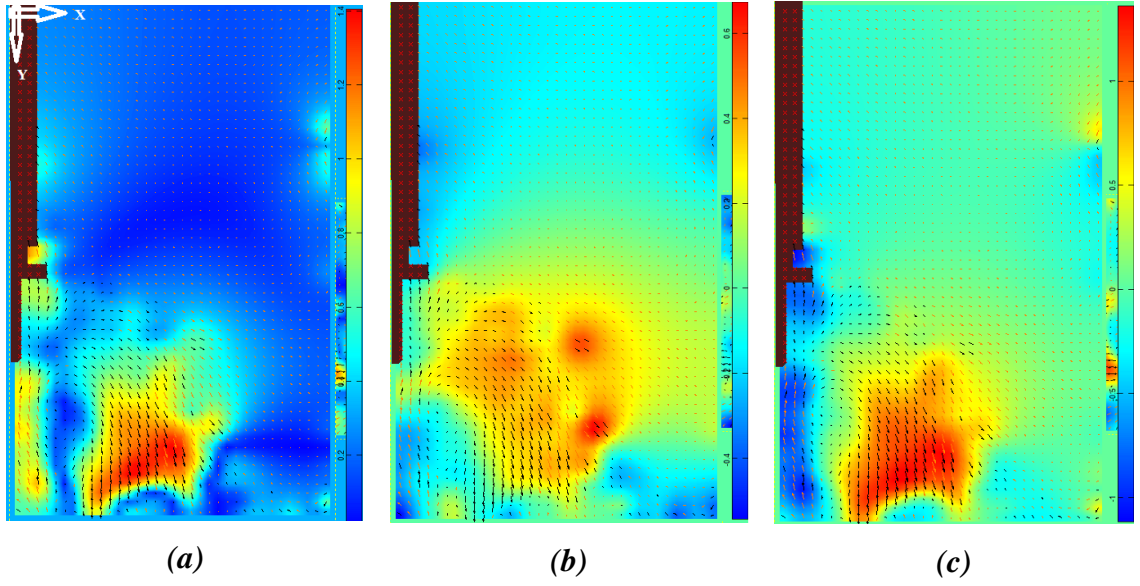


**Şekil 4. 24.** P 0,1\_ HS 6\_ HN 10 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

- **Fotoğraf Aralığı 1445 - 1450**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 1445-1450' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.25' deki gibidir.

Maksimum bileşke hız 1,4 m/s maksimum u hızı 0,6 m/s, maksimum v hızı 1 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum hızlar bu sette de nozula yakın bölgelerde görülmekle beraber kenarlardan nozula doğru yönelen partiküller de gözlemlenmiştir. Bunun sebebi daha önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi difüze kum patlamalarıyla taşınım mekanizmasının varlığıdır.



**Şekil 4. 25.** P 0,1\_ HS 6\_ HN 10 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

#### 4. 2. 4. P 0,1\_ HS 14,5\_ HN 20 ACF

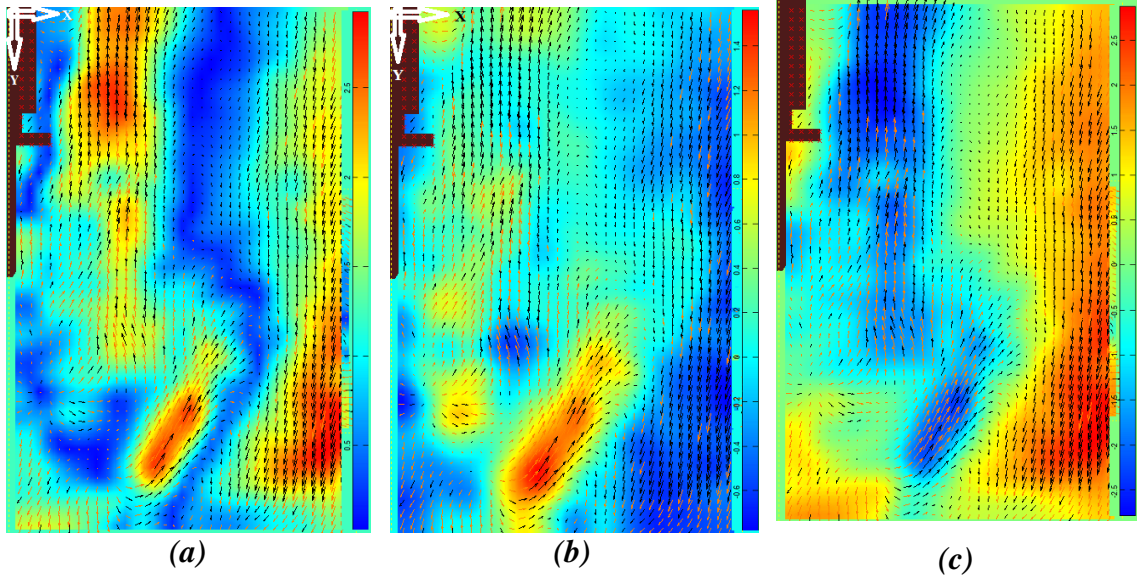
Analizler önceki durumda olduğu gibi 1450 kare fotoğrafın 100 - 105, 723 - 728 ve 1445 - 1450 aralığında incelenmesi şeklinde yapılmıştır.

Deney Şartları:

|                                      |                            |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Rezervuar Basıncı                    | (P <sub>0</sub> ): 0.1 Bar |
| Kum Yatak üzerinden nozul yüksekliği | (H <sub>N</sub> ): 20 cm   |
| Kum Yatak Kalınlığı                  | (H <sub>S</sub> ): 14,5 cm |

- **Fotoğraf Aralığı 100 - 105**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 100-105' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.26' daki gibidir. Maksimum bileşke hız 2,5 m/s maksimum u hızı 1,4 m/s, maksimum v hızı 2,5 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum hızlara partiküllerin küçük krater ağzını terk ettiği noktada erişilmiştir. Partiküllerin ulaştığı maksimum yükseklik oldukça fazladır. Yatay hız bileşeni oldukça belirgin karakterdedir. Dış krater yanağını takip ederek yatağı terk eden partiküllerin yatay doğrultudaki menzilleri düşüktür.

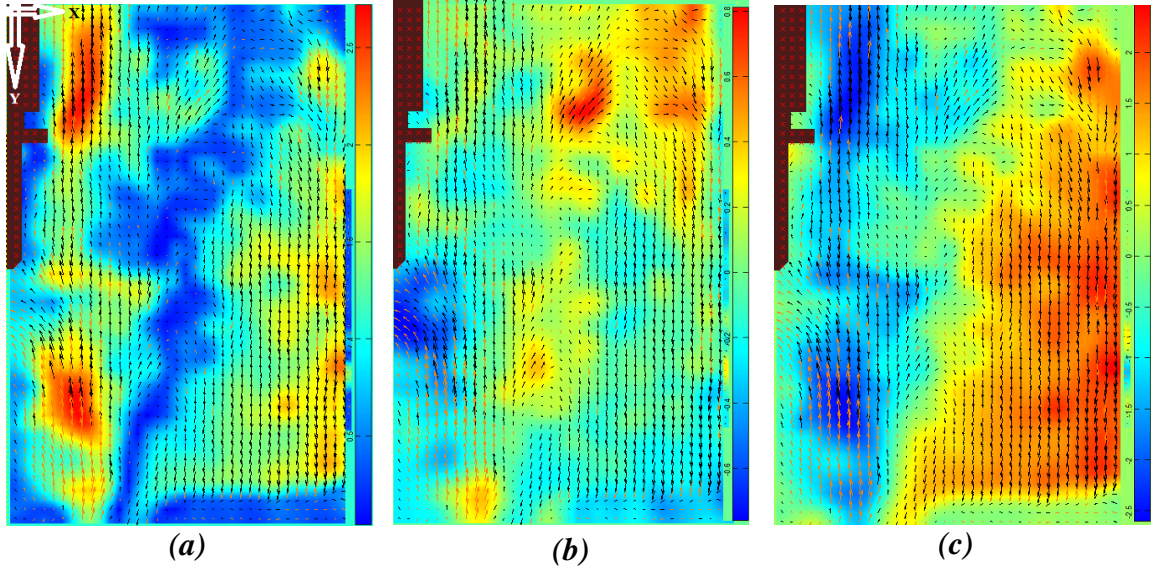


**Şekil 4. 26.** P 0,1\_ HS 14,5\_ HN 20 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

- **Fotoğraf Aralığı 723 - 728**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 723-728' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.27' deki gibidir.

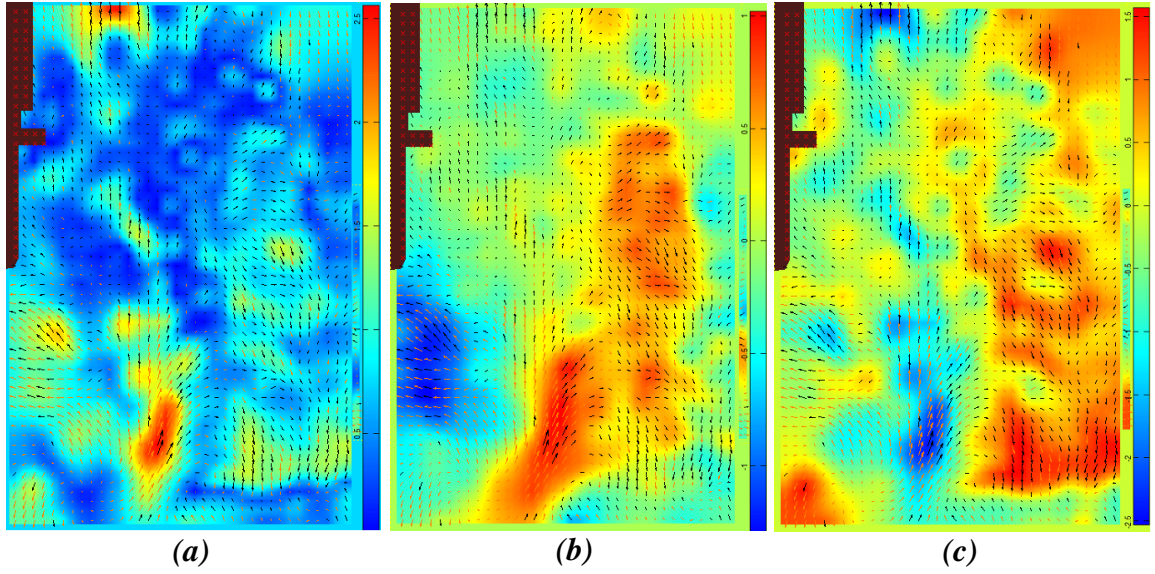
Maksimum bileşke hız 2,5 m/s maksimum u hızı 0,8 m/s, maksimum v hızı 2,5 m/s civarında tayin edilmiştir. Nozul yakınlarında gazın dönümlülüğünün artarak yeniden sirkülasyona giren partiküllerin net yönelimi oldukça belirgin bir şekilde tayin edilmiştir.



**Şekil 4. 27.** P 0,1\_ HS 14,5\_ HN 20 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

- **Fotoğraf Aralığı 1445 - 1450**

Yukarıda şartları verilen durum için krater oluşumundan sonra yapılan deneyler neticesinde 1445-1450' inci fotoğraflar arasındaki durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.28' deki gibidir. Maksimum bileşke hız 2,5 m/s maksimum u hızı 1 m/s, maksimum v hızı 2,5 m/s civarında tayin edilmiştir. Maksimum hızlar bu sette de iç krater yanağı eğimiyle iç krateri terk ettiği bölgede gözlemlenmiştir. Nozula doğru yönelen partiküller bu sette de daha kuvvetli hız bileşenleri şeklinde gözlemlenmiştir.



**Şekil 4. 25.** P 0,1\_ HS 6\_ HN 10 ACF için bileşke hız alanı (a), u hız alanı (b), v hız alanı (c)

#### 4. 2. 5. Nozul yüksekliğinin hız alanına etkisi

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi çalışmanın temelini uzay ve hava araçlarının iniş kalkış operasyonları sırasında etrafa saçılan parçacıkların hareket karakteristiklerinin incelenmesi oluşturmaktadır. Bu nedenle iki farklı kum kalınlığı ve iki farklı yükseklik için testler yapılmıştır. Yapılan testlerin karşılaştırması şu şekildedir.

- P 0,1\_ H<sub>S</sub> 14,5\_ H<sub>N</sub> 15 BCF < - > P 0,1\_ H<sub>S</sub> 14,5\_ H<sub>N</sub> 20 BCF

Tablo 4.3' de 14,5 cm kum yatak kalınlığında 20 cm ve 15 cm nozul yüksekliği için üçer set halinde hız dağılımının krater oluşumundan önceki değerleri verilmiştir. Farklı nozul yüksekliklerinde hız dağılımları incelendiğinde bileşke hızın özellikle ilk iki sette büyük nozul yükseklikleri için (HN 20) belirgin olarak yüksek çıktığı görülmüştür. Son sette bileşke hızlar arasındaki farkın azalması önem arz etmektedir. Başlangıç safhasında baskın olan difüze gaz patlamaları şeklindeki taşınım mekanizması partiküllerin her iki nozul pozisyonu için de yataktan ayrılma hızlarının düşük seviyelerde kalmasına neden olmuştur. Son sette maksimum bileşke hızların birbirine yakın seviyelerde çıkmasının nedeni yatak yüzeyinde oluşan çukurun artık krater karakteri kazanmasıyla difüze gaz patlamaları şeklindeki mekanizmanın etkisinin azalması olduğu düşünülmektedir.

**Çizelge 4. 3.** 20 cm ve 10 cm nozul yükseklikleri için krater oluşumu öncesi hız dağılımı tablosu

| P 0,1_ HS 14,5_ HN 15 BCF |         |     |      |        |      |        | P 0,1_ HS 14,5_ HN 20 BCF |         |         |      |        |      |        |
|---------------------------|---------|-----|------|--------|------|--------|---------------------------|---------|---------|------|--------|------|--------|
|                           | Bileşke |     | u    |        | v    |        |                           | Bileşke |         | u    |        | v    |        |
|                           | Maks    | Min | Maks | - Maks | Maks | - Maks |                           | Maks    | Min     | Maks | - Maks | Maks | - Maks |
|                           | 100-105 | 1.8 | 0    | 0.6    | 0.2  | 1.5    |                           | 1       | 100-105 | 3.5  | 0      | 0.5  | 0.4    |
| 723-728                   | 1.6     | 0   | 0.6  | 0.3    | 1.5  | 1      | 723-728                   | 4       | 0       | 0.5  | 1.5    | 4    | 2      |
| 1445-1450                 | 2.5     | 0   | 0.5  | 0.3    | 2.5  | 1      | 1445-1450                 | 3       | 0       | 0.8  | 1      | 3    | 2      |

- P 0,1\_ H<sub>s</sub> 14,5\_ H<sub>N</sub> 15 ACF < - > P 0,1\_ H<sub>s</sub> 14,5\_ H<sub>N</sub> 20 ACF

Tablo 4.4' de 14,5 cm kum yatak kalınlığında 20 cm ve 15 cm nozul yüksekliği için üçer set halinde hız dağılımının krater oluşumundan sonraki değerleri verilmiştir.

**Çizelge 4. 4.** 20 cm ve 10 cm nozul yükseklikleri için krater oluşumu sonrası hız dağılımı tablosu

| P 0,1_ HS 14,5_ HN 20 ACF |         |     |      |        |      |        | P 0,1_ HS 14,5_ HN 15 ACF |         |         |      |        |      |        |
|---------------------------|---------|-----|------|--------|------|--------|---------------------------|---------|---------|------|--------|------|--------|
|                           | Bileşke |     | u    |        | v    |        |                           | Bileşke |         | u    |        | v    |        |
|                           | Maks    | Min | Maks | - Maks | Maks | - Maks |                           | Maks    | Min     | Maks | - Maks | Maks | - Maks |
|                           | 100-105 | 2.5 | 0    | 1.4    | 0.6  | 2.5    |                           | 2.5     | 100-105 | 1.6  | 0.2    | 0.6  | 0.2    |
| 723-728                   | 2.5     | 0   | 0.8  | 0.6    | 2.5  | 2      | 723-728                   | 3       | 0.5     | 0.6  | 0.4    | 3    | 1.5    |
| 1445-1450                 | 2.5     | 0   | 1    | 1      | 2.5  | 1.5    | 1445-1450                 | 3.5     | 0.5     | 0.6  | 0.4    | 3.5  | 1      |

Bileşke hız değerleri incelendiğinde ilk set dışında bileşke hızın H<sub>N</sub>20 durumu için H<sub>N</sub>15 durumuna göre daha düşük seviyelerde kalmıştır. Söz konusu durum teoriye uygundur. Teoriye göre nozulu terk eden gazın çıkış ağzından yatağa temas ettiği noktaya kadar olan mesafenin artmasıyla; gaz yoğunluğu, yatak temas yüzeyine kadar daha fazla azalmış olacaktır. Yoğunluğu azalan gazın partiküllere uygulayacağı



kaldırma kuvveti ve taşıma kabiliyeti azalacaktır. Böylece nozulun yatak yüzeyine daha yakın olduğu durumlarda partikül hızları nozulun yatak yüzeyine daha uzak olduğu duruma göre daha büyük çıkması teoriye uygundur. İlk sette teoriye aykırı bir durum görülmektedir. Başlangıç fazına yakın bir durumu ifade eden bu set krater formunun henüz yakalanamadığı bir durum olduğundan yine difüze gaz patlamalarıyla taşınım mekanizmasının baskın olduğu bir safhadır. Çünkü krater oluşumundan sonra gaz akımı kesilmekte ve bu sırada krater yanaklarındaki partikülleri yeniden pozisyonlanma açısını yakalayınca kadar koni tabanına doğru kayıp orada sıkıştırılmamış ve gaz difüzyonuna müsaade edecek gevşek bir yatak bölgesi oluşturmaktadır. Dolayısıyla difüze gaz patlamalarıyla taşınım mekanizması etkisi görülmekte ve sadece ilk sette teoriye aykırı bir durum gerçekleşmektedir. Fakat testin genel durumu teoriye uyum içindedir.

- $P_{0,1\_H_S 6\_H_N 15} BCF < - > P_{0,1\_H_S 6\_H_N 10} BCF$

Tablo 4.5' de 6 cm kum kalınlığında 10 cm ve 15 cm nozul yükseklikleri için krater oluşumu öncesi bileşke hız dağılımı üçer set halinde verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** 15 cm ve 10 cm nozul yükseklikleri için krater oluşumu öncesi hız dağılımı tablosu

| P 0,1_ HS 6_ HN 15 BCF |         |     |      |     |      |     |
|------------------------|---------|-----|------|-----|------|-----|
|                        | Bileşke |     | u    |     | v    |     |
|                        | Maks    | Min | Maks | -   | Maks | -   |
| 100-105                | 1.2     | 0   | 0.5  | 0.2 | 1.2  | 0.8 |
| 723-728                | 2.5     | 0   | 0.5  | 0.4 | 2.5  | 1   |
| 1445-1450              | 2       | 0   | 0.8  | 0.6 | 2    | 1.5 |

| P 0,1_ HS 6_ HN 10 BCF |         |     |      |     |      |     |
|------------------------|---------|-----|------|-----|------|-----|
|                        | Bileşke |     | u    |     | v    |     |
|                        | Maks    | Min | Maks | -   | Maks | -   |
| 100-105                | 2.2     | 0   | 0.6  | 0.4 | 2    | 1.5 |
| 723-728                | 1.4     | 0   | 0.6  | 0.6 | 1    | 1   |
| 1445-1450              | 1.4     | 0   | 0.8  | 0.4 | 0.5  | 2   |

Bileşke hız dağılımı incelendiğinde 6 cm kum yatak kalınlığında nozulun yatak yüzeyinden olan uzaklığının bileşke hıza net bir etkisi tespit edilememiştir. Teoriye uygun olan genel görüş daha önce de belirtildiği gibi nozulun partiküllü yüzeye daha yakın olması halinde parçacık hızlarının daha büyük olmasıdır. Bu testte ise hızların çok fazla dalgalanmakta olduğu gözlenmiştir. Söz konusu durumun nedeninin, difüze gaz patlamaları şeklindeki taşınım mekanizmasının, kum kalınlığının azalması nedeniyle ciddi şekilde baskın hale gelmesi olduğu düşünülmektedir.

Daha ince olan kum yatak kalınlığı partiküler yüzeyin hemen alt kısmında gazın difüze olamayacağı sert bir düzlem oluşmasına neden olmuştur. Bu şartlar altında daha derinlere dağılamayan gaz molekülleri, granüller arasında yayıldıktan sonra sert kap tabanına çarparak çalkantılı bir malzeme taşınımına neden olmuştur.

- P 0,1\_ H<sub>S</sub> 6\_ H<sub>N</sub> 15 ACF < - > P 0,1\_ H<sub>S</sub> 6\_ H<sub>N</sub> 10 ACF

Tablo 4.6' da 6 cm kum kalınlığında 10 cm ve 15 cm nozul yükseklikleri için krater oluşumu sonrası bileşke hız dağılımı üçer set halinde verilmiştir.

**Çizelge 4. 6.** 15 cm ve 10 cm nozul yükseklikleri için krater oluşumu sonrası hız dağılımı tablosu

| P 0,1_ HS 6_ HN 15 ACF |         |     |      |      |      |      |
|------------------------|---------|-----|------|------|------|------|
|                        | Bileşke |     | u    |      | v    |      |
|                        | Maks    | Min | Maks | -    | Maks | -    |
|                        | Maks    | Min | Maks | Maks | Maks | Maks |
| 100-105                | 1.6     | 0.2 | 0.6  | 0.4  | 1.5  | 0.5  |
| 723-728                | 1.1     | 0.1 | 0.5  | 0.4  | 1.4  | 0.6  |
| 1445-1450              | 1.6     | 0.2 | 1    | 1    | 1.5  | 1    |

| P 0,1_ HS 6_ HN 10 ACF |         |     |      |      |      |      |
|------------------------|---------|-----|------|------|------|------|
|                        | Bileşke |     | u    |      | v    |      |
|                        | Maks    | Min | Maks | -    | Maks | -    |
|                        | Maks    | Min | Maks | Maks | Maks | Maks |
| 100-105                | 1.4     | 0   | 0.5  | 0.4  | 1    | 1.5  |
| 723-728                | 1.6     | 0   | 0.4  | 0.5  | 1.5  | 1.5  |
| 1445-1450              | 1.4     | 0   | 0.6  | 0.4  | 1    | 1    |

6 cm sabit kum yatak kalınlığı, 15 cm ve 10 cm olmak üzere iki farklı nozul yüksekliği şartları altında yapılan deneylerde krater oluşumu sonrası nozul yüksekliğinin etkisi belirgin olarak görülememektedir. Fakat teori incelendiğinde nozul yüksekliğinin artmasıyla nozuldan çıkan gazın temas edeceği yüzeye kadar olan mesafenin artmasına bağlı olarak partikül taşıma kapasitesinin düşeceği beklenmektedir. Bu testte belirgin bir fark yakalanamamasının nedeni nozul yüksekliklerinin belirgin oranlarda farklılık göstermemesi ve hava jetinin ilk çarptığı yüzeyde partiküllü bir yüzeyin yokluğudur.

### 4.3. Partiküllü Yüzeylerde Ses Altı Akışlarda Görünürlük

#### 4.3.1. Nozul yüksekliğinin görünürlüğe etkisi

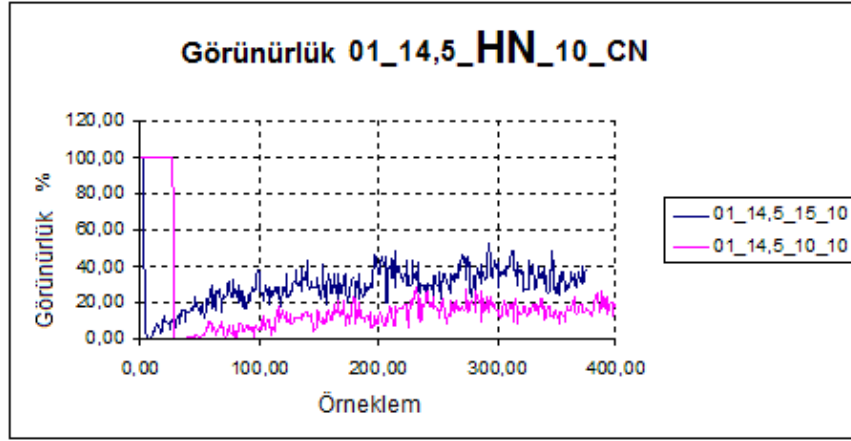
Norman ve ark. (1965), Stark ve ark. (1965) gibi bilim adamlarının yaptığı çalışmalarından da görülebileceği gibi kum yatakta meydana gelen erozyonun azalan nozul yüksekliğiyle artması beklenmektedir. Aynı zamanda görünürlük seviyesinin de ortamda birim hacimde artan parçacık miktarına bağlı olarak azalması beklenmektedir. Görünürlüğün azalan nozul yüksekliğiyle düştüğü genel görüşü, Andreotti (2004)' nin "Partiküllü yüzeyler üzerinde akan havanın uyguladığı kayma gerilmesi" hakkındaki doktora tezinde de doğrulanmıştır. Andreotti tezinde oluşan kayma gerilmesini şu şekilde ifade etmiştir.

$$\tau = \rho_{air} u_*^2 \quad (4.1)$$

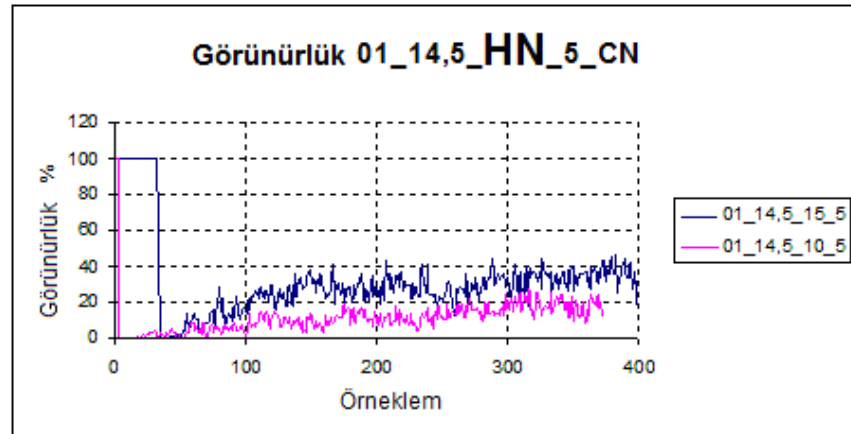
Denklem 4.1' de belirtildiği gibi hareket halindeki hava tarafından partiküllü yüzeye uygulanan kayma gerilmesi havanın yoğunluğu ve kayma hızının karesiyle doğru orantılıdır. Diğer yandan hava yoğunluğu nozul çıkışından itibaren yatay ve düşey doğrultuda havanın dağılmasıyla azalmaktadır. Nozul çıkışından uzak bölgelerde hava yoğunluğu yakın bölgelere göre daha düşük olacağından gazın uyguladığı kayma gerilmesi de nozulun yakın olduğu durumda yüksek uzak olduğu durumda düşük olacaktır. Roberts (1964). Bu durumda teorik olarak nozul çıkışının kum yatağa yakın olduğu hallerde görünürlüğün düşük uzak olduğu hallerde de yüksek olması beklenir. Teoriyle karşılaştırılmak üzere bazı deneyler yapılarak teoriye uygunluğu araştırılmıştır. Nozul yüksekliğinin görünürlük üzerindeki etkisini incelemek için yapılan deneylerin test şartları şu şekildedir:

|                                      |                                |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| Rezervuar Basıncı                    | (P <sub>0</sub> ): 0.1 Bar     |
| Kum Yatak üzerinden nozul yüksekliği | (H <sub>N</sub> ): 15 ve 10 cm |
| Kum Yatak Kalınlığı                  | (H <sub>S</sub> ): 14,5 cm     |
| Fotodiyot yüksekliği                 | (H <sub>D</sub> ): 10 ve 5 cm  |

Yapılan deneylerin sonucunda merkez pozisyonda elde edilen görünürlük değişimi Şekil 4.26' da 10 cm fotodiyot yüksekliğinde alınan ölçümler için (a) ve 5 cm fotodiyot yüksekliği için (b) verilmiştir.



( a )



( b )

**Şekil 4. 26.** Nozul yüksekliğine bağlı görünürlük değişimi

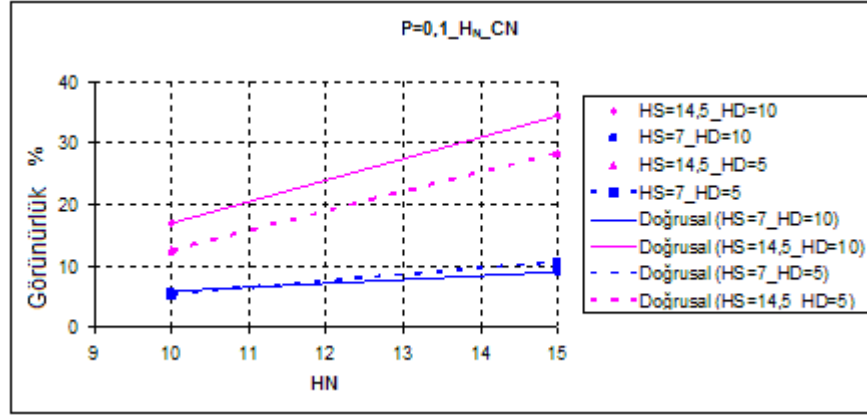
Şekil 4.26' daki ölçümler nozulun kum yatak yüzeyine daha yakın olduğu durumlarda görünürlüğün daha düşük seviyelerde seyrettiğini göstermektedir. Şekil 4. 26' daki grafiğin davranışı incelendiğinde görünürlük çok kısa bir süre sıfıra düştüğü ve ardından kademeli olarak artarak belli bir seviyeye ulaştığı görülmektedir. Görünürlüğün böyle bir davranış sergilemesinin nedeni hava jetinin yatak yüzeyine ilk çarptığı anda yatak dayanma kapasitesi aşımına bağlı erozyon gerçekleşmesi ve bu şekildeki madde taşınımının çok yoğun büyük kütleler halinde çok kısa bir süreliğine olmasıdır. Bir

anlığına yataktan kopan çok büyük ve yoğun miktardaki kum partikül grubunun lazerin önünü tamamen kesmesiyle söz konusu durum gerçekleşmiştir .

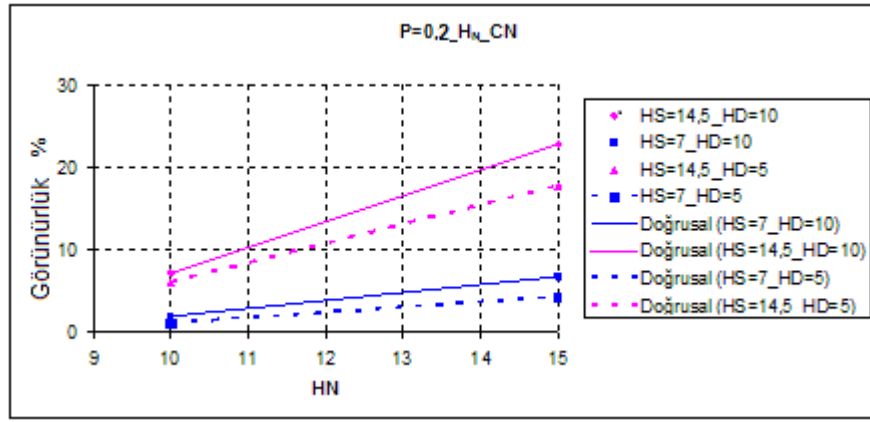
Şekil 4. 26' daki grafik incelenmeye devam edildiğinde grafiğin genel olarak belli bir seviyeye kadar yükseliş trendinde olduğu ve orada sabit kalma eğilimi gösterdiği fakat bu süreç içerisinde dalgalanmalar gösterdiği belirlenmiştir. Jeti terk eden soğuk gaz yatak yüzeyine ilk temas ettiği anda yatak dayanma kapasitesi aşımına bağlı erozyon şeklindeki taşınım mekanizması kısa bir süre sonra yerini difüze gaz patlamaları şeklindeki erozyon mekanizmasına bırakmıştır. Grafikteki küçük dalgalanmaların sebebi de budur.

Grafik üzerinde yapılan incelemelere devam edildiğinde kısa bir süre kademeli olarak artan görünürlük değeri belli bir seviyede sabit kalma eğilimi göstermiştir. Fakat görünürlük değerinin bu kadar kısa sürede sabitlenmesi mümkün değildir. Erozyona bağlı olarak belirginleşmeye başlayan krater karakteri, kum partiküllerinin yataktan daha düzenli bir şekilde taşınmasını sağlayarak görünürlük değerini sadece biraz daha stabil hale getirmiştir, bu arada difüze gaz patlamaları şeklindeki taşınım etkisini azaltmakla beraber devam etmiştir. Ortamın sabit bir ışık geçirgenlik değerine ulaşması bu kadar kısa sürede mümkün değildir. Bu şartların oluşması saatler alabilir. Ayrıca böyle bir durum krater yanak açılarının yeniden pozisyonlanma açısına ulaştığı ve nozul çıkışından itibaren yavaşlayarak yoğunluğu azalan gazın, kum partiküllerini taşımak için yeterli kayma gerilmesini oluşturamayacak kadar yavaşlaması ve seyrelmesi durumunda mümkün olur.

Şekil 4.26' da verilen grafikler kırk sekiz adet ölçüm için de mevcuttur. Fakat bu grafikler konu içinde yeniden verilmeyecektir. Grafiklerin tamamı Ek 3' de sunulmuştur. Fakat Nozul yüksekliğinin etkisini araştırmaya yönelik yapılan deneylere ait çok sayıda grafik analiz edilerek Şekil 4. 27' deki özet grafikler elde edilmiştir. Genel durumu özetleyen Şekil 4.27' deki grafik incelendiğinde azalan nozul yüksekliğiyle beraber görünürlüğün de azaldığı belirlenmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 4. 27.** Farklı basınç ve fotodiyot yüksekliklerinde görünürlük - nozul yüksekliği ilişkisi

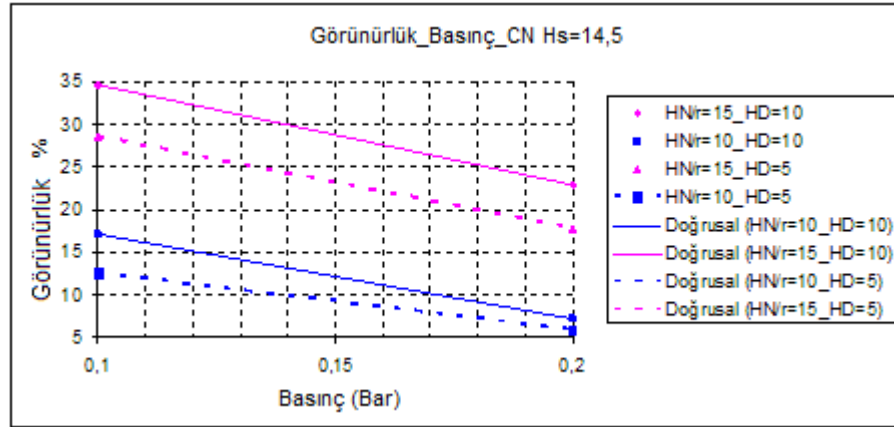
#### 4.3.2. Rezervuar basınç değişiminin görünürlüğe etkisi

Nozul rezervuar basıncı krater oluşum mekanizmasında ve bunun yanında görünürlüğü etkileyen en baskın etkenlerden biridir. George ve ark. (1964)' in yaptığı çalışmada görünürlük düşüşünün nozullara ekstra güç verildiği yüksek basınçla çalışma anında ciddileştiği belirlenmiştir. Eşitlik 4.2' deki nozul itiş eşitliği incelendiğinde rezervuar basıncı ve ortam basıncı arasındaki fark arttıkça itişin artacağı açıktır.

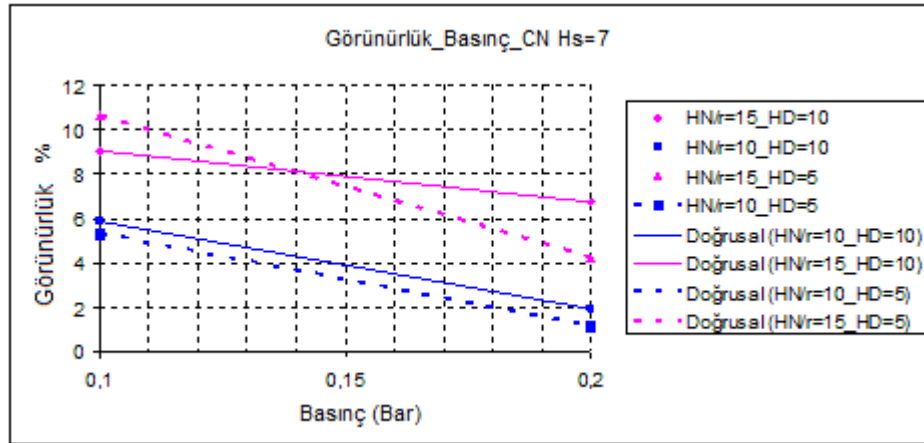
$$F = \dot{m} \cdot V_e + (P_e - P_0) \cdot A_e \quad (4.2)$$

Rezervuar basıncının artmasına bağlı olarak kuvvetlenen itkinin kum yataktan daha fazla miktarda kum partikülü koparması ve görünürlüğü daha fazla azaltması

beklenmektedir. Basınç arttığı için gaz çıkış hızı ve yatak üzerinde oluşturacağı kayma gerilmesi de artacaktır. VKI' de konuyla ilgili olarak yapılan çok sayıda deney özetlendiğinde şekil 4.28' deki basınç - görünürlük grafikleri elde edilmiştir. Bilindiği gibi yapılan deneyler çok sayıda değişken içermektedir. Görünürlük değerinin basınca bağlılığını elde etmek için oluşturulan grafikler basınç dışındaki kum yatak kalınlığı, nozul yüksekliği, fotodiyot yüksekliği gibi parametreler sabit tutularak kendi arasında değerlendirilmiştir. Grafikler incelendiğinde basınç artışının bütün değişkenler için görünürlüğü düşüren bir etki olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçların teori ile uyum içinde olduğu görülmektedir.



( a )



( b )

**Şekil 4.28.** Görünürlük değerinin 14,5 cm yatak kalınlığı için (a) ve 7 cm yatak kalınlığı için (b) basınca bağlı değişim grafiği

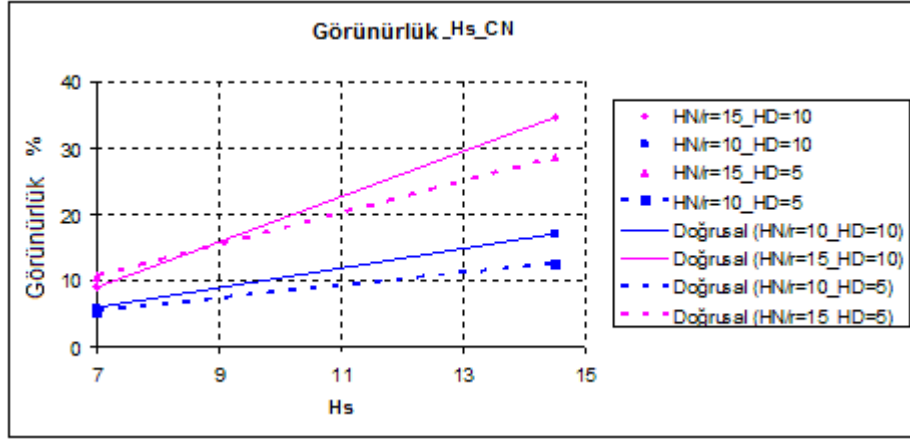
### 4.3.3. Partikül yatak kalınlığı değişiminin görünürlüğe etkisi

Önceki keşiflerden elde edilen birçok radar ve fotometrik veriler mevcut olmasına rağmen bu veriler ay ve gezegen yüzeyleri ile ilgili net bilgi vermemektedir. Bu tip yüzeylerin sert kaya tabakası üzerinde sınırlı kalınlıktaki bir partiküllü yatak tabakasının kombinasyonundan oluştuğu tahmin edilmektedir ( Roberts 1964 ). Bu yüzden görünürlük deneyleri 14,5 ve 7 cm olmak üzere iki farklı kum kalınlığı için yapılmıştır. Deneyler her bir kum kalınlığında ayrıca iki farklı basınç değeri iki farklı nozul yüksekliği, iki farklı nozul yüksekliği gibi değişkenler uygulanarak yapılmıştır. Deneylerin hangi durumlar için yapıldığı Tablo 3.1' de görülebilir.

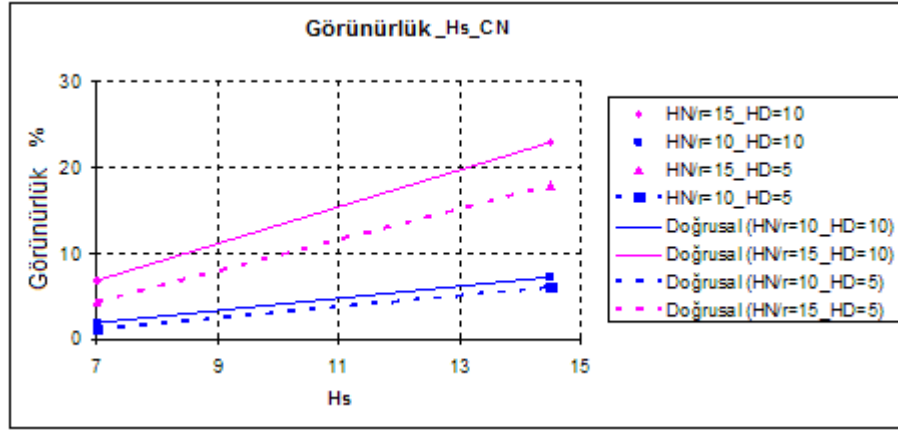
Şekil 4.29' da 0,1 bar rezervuar basıncında diğer değişkenler de dikkate alınarak yapılan deneyler sonucunda fotodiyotun merkez pozisyonunda elde edilen görünürlük değeri ( a ) ve aynı şekilde 0,2 bar rezervuar basıncı altında yapılan deney sonuçları sunulmuştur ( b ).

Grafikte yatay eksen kum kalınlığını diğer eksen ise yüzde olarak görünürlük değeri göstermektedir. Görüldüğü üzere yatak kalınlığının artışı nozul eksenini dik kesen eksen doğrultusunda alınan ölçümlerde her iki basınç grubu için ve diğer bütün değişkenler için artmıştır. Elde edilen sonuçlar Norman ve ark. ( 1965 )' in çalışmasında elde edilen sonuçlarla birbirini tutmamaktadır. Norman ve ark. ( 1965 )' e göre tabanda sığ bir partiküllü tabaka varlığı görünürlük değeri daha yüksek değerlerde seyretmesini sağlamaktadır. Mevcut çalışmalar ve VKI' bünyesinde yeni yapılan çalışma arasındaki farklılığın sebebi tahmin edilebilmektedir. Norman ve ark. ( 1965 )' in çalışmasında akışkan hızı bu çalışmada kullanılan akışkan hızlarının çok üzerindedir.





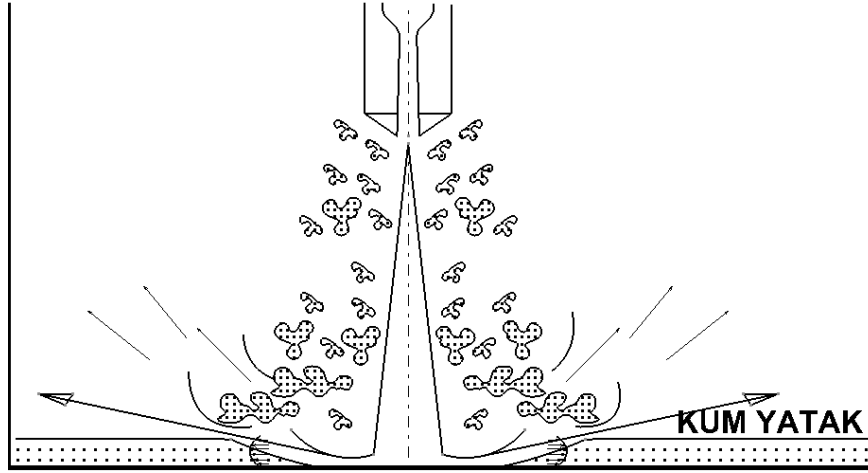
( a )



( b )

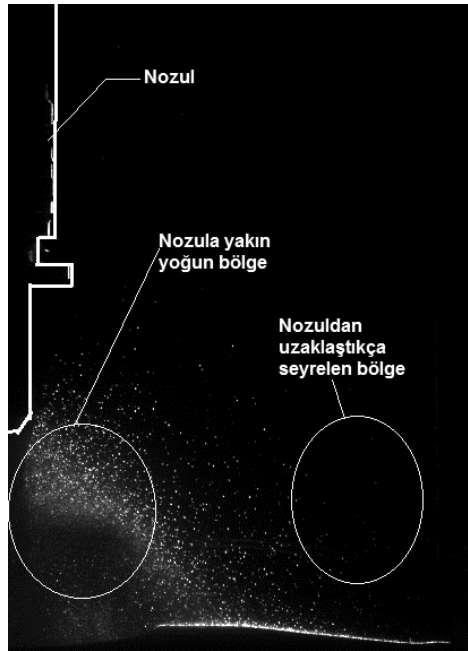
**Şekil 4.29.** Görünürlük değerinin 0,1 bar rezervuar basıncı için ( a ) ve 0,2 bar rezervuar basıncı için ( b ) kum kalınlığına bağlı değişimi

Akışkanın yüksek hızlarda yüzeye çarpması nozul çıkış ağzı çevresindeki partikülleri gazın tanecikler arasında difüzyona uğramasına fırsat vermeden çok kısa bir sürede temizleyip hava akışıyla sirkülasyona giren parçacık miktarının azalması demektir. Gaz hızlarının yüksek olması aynı zamanda difüze gaz patlamaları şeklindeki taşınım mekanizmasının da minimuma düşmesi demektir. Bu çalışmada düşük gaz hızları nedeniyle parçacıklar arasında dağılan akışkan miktarı fazladır ve difüze gaz patlamaları şeklinde erozyon görülmektedir. Anlatılan durumun şematik olarak izahı Şekil 4.30' da belirtilmiştir.



**Şekil 4. 30.** 7 cm yatak kalınlığında difüze gaz patlamalarıyla erozyon

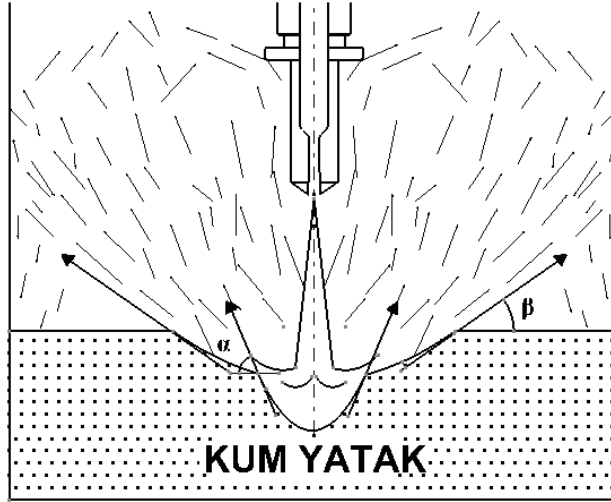
Kum yatak kalınlığının yedi cm olduğu durumda gaz molekülleri partiküller arasında hızla yayılarak nozul merkezinden belli uzaklıkta tekrar yatak yüzeyine çıkarak ve merkeze yakın bölgelerde büyük kütleler halinde partikülleri de beraberinde taşıyarak Şekil 4.31' deki gibi merkez pozisyonunda yoğun bir bölge oluşmasına neden olmuştur.



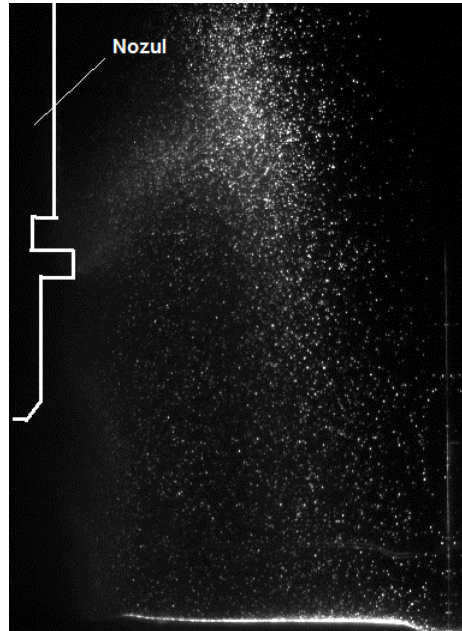
**Şekil 4. 31.** 7 cm yatak kalınlığında partikül saçılımı

Kum yatak kalınlığının 14,5 cm olduğu durumda partiküllerin hacme saçılımı çok daha homojen olmaktadır. Partiküller arasına nüfuz eden gaz molekülleri yeterli, kum yatak kalınlığı başka deyişle gözenekli tabaka kalınlığı sayesinde çok daha homojen bir

yapıya kavuşmuştur. Partiküler tabakanın yeterince büyük olması sayesinde difüzyona uğrayan gaz kısa bir derinlikten sonra hemen geçirgen olmayan bir yüzeye karşılaşmadığı için difüze gaz patlamaları şeklindeki erozyon mekanizmasına sebep olsa da bu mekanizmanın düşük kum kalınlığındaki testlere göre daha az etkili olmasına neden olmuştur. Sözü edilen durum Şekil 4.32' de şematik olarak belirtilmiştir. Şekil 4.33' de ise yüksek hızlı kamera görüntüsü ile izahı verilmiştir.

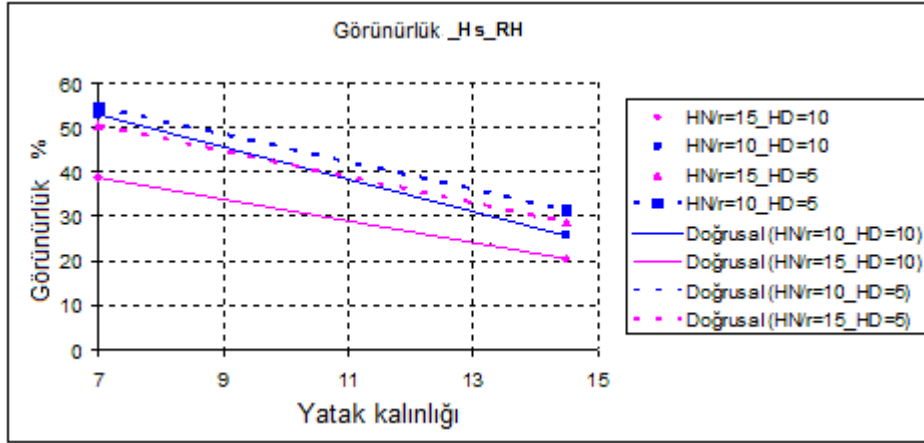


Şekil 4. 32. 14,5 cm yatak kalınlığında şematik partikül saçılımı

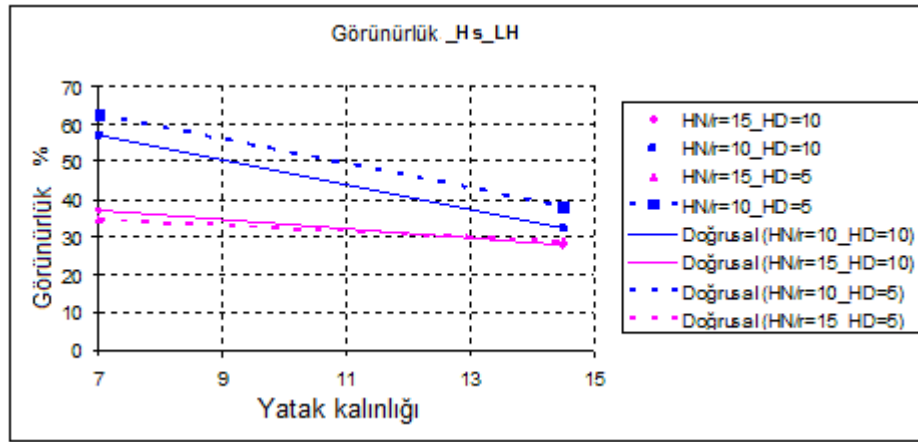


Şekil 4. 33. 14,5 cm yatak kalınlığında partikül saçılımı

Partikül saçılımı merkez pozisyon dışında bir de yatay olarak merkezden 15 cm uzaktaki durum için ölçülmüştür. Nozul merkezinin 15 cm sağında ve solunda alınan ölçümlerde görünürlüğün teoriye uygun olarak artan kum yatak kalınlığıyla azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4. 34' deki grafikler 0,1 bar rezervuar basıncı için nozul merkezinin sağında ( a ) ve solunda görünürlüğün kum kalınlığına bağlı değişimini göstermektedir.



( a )



( b )

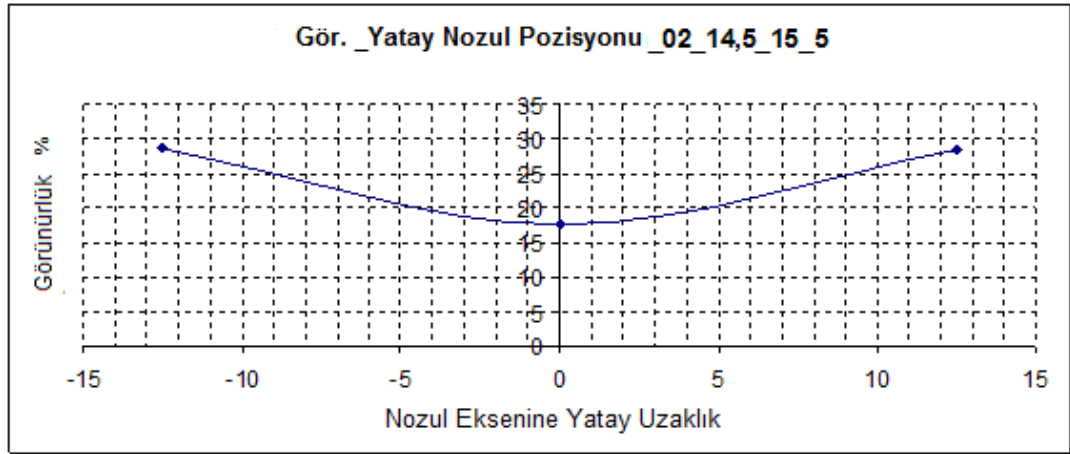
**Şekil 4.33.** 0,1 bar basınçta nozul merkezinin sağında ( a ) ve solunda ( b ) yatak kalınlığına bağlı görünürlük değişimi

Nozul merkezinden değil de nozulun belli bir miktar uzağından simetrik olarak alınan ölçümler teoriyle ve birbirleriyle uyum içindedir.

#### 4.3.4. Farklı ölçüm noktalarına göre görünürlüğün değişimi

Partiküllü yüzeylere ses altı jet akışı için yapılan deneylerde; nozul çevresinde nasıl bir görünürlük alanı oluştuğunu gözlemleyebilmek için foto diyotun yatayda nozulun

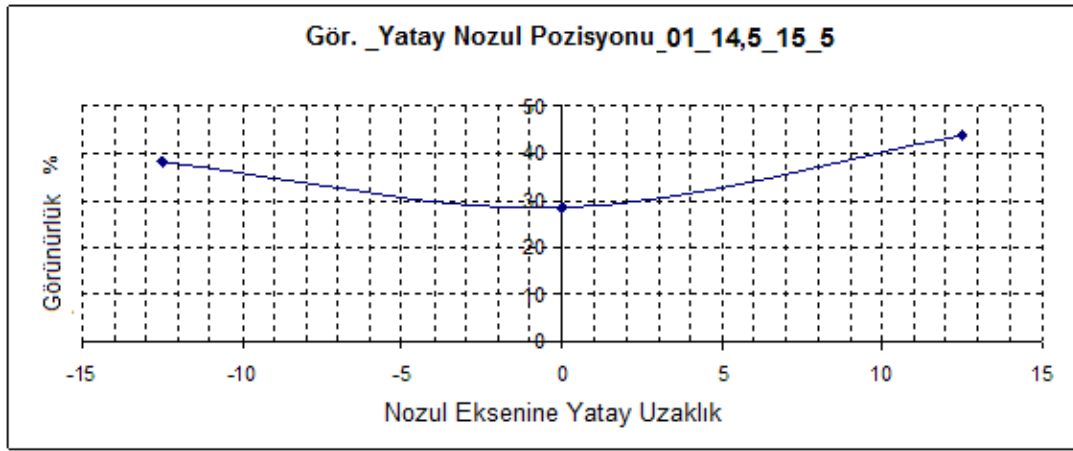
sağında ve solunda kalacak şekilde nozul merkezine göre uzaklığı değiştirilerek ve düşeyde kum yatak yüzeyine olan mesafesi değiştirilerek bazı ölçümler alınmıştır. Deneyle sonunda elde edilen çok sayıda grafiğin işlenmesi sonucu elde edilen özet grafikler genel karakteristik hakkında bilgi vermektedir. Böyle bir deneyin amacı ölçüm alınabilecek en uygun noktanın optimizasyonu ile ilgili fikir sahibi olabilmektir. Grafiklerden anlaşılacağı gibi yatay doğrultuda görünürlük değerleri belli bir karaktere sahiptir. Yatayda nozul merkezinin 12,5 cm sağında ve solunda görünürlük değerinin neredeyse birbirinin aynı ve merkez doğrultuda ölçülen değer çok üstünde olduğu görülmüştür. Şekil4. 34' de 0,2 bar rezervuar basıncı 14,5 cm kum yatak kalınlığı, 15 cm nozul yüksekliği ve 5 cm foto diyot yüksekliği şartları altında görünürlüğün nozul sağında ve solunda, nasıl değiştiğini gösteren grafik verilmiştir.



**Şekil 4. 34.** 0,2 bar için yan ve merkez pozisyonlarda görünürlük değişimi

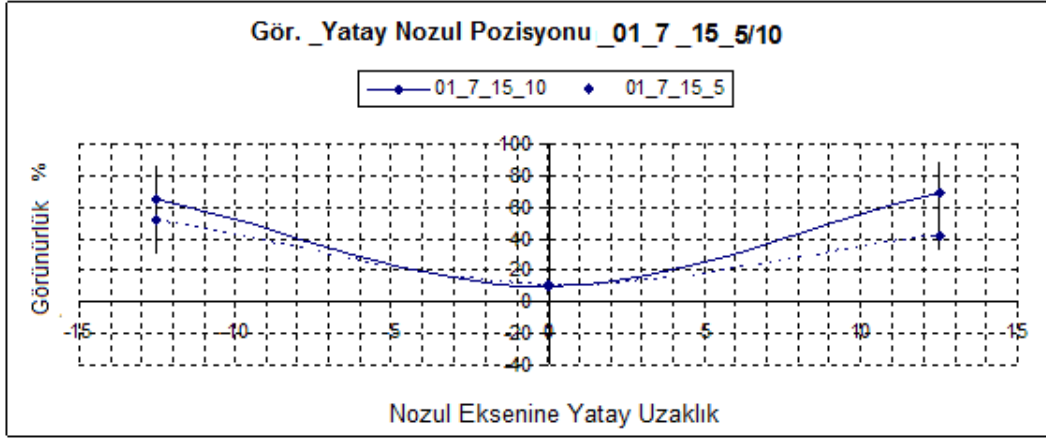
Merkez doğrultuda alınan ölçümlerde görünürlük değerinin düşük olması lazer önünden geçen partikül perdesi sayısının kenarlara göre daha fazla olması ve difüze gaz patlamaları şeklindeki erozyon mekanizmasının baskın olmasındandır. Partikül perdesinden kastedilen şudur. Kum parçacıkları yataktan ayrıldıktan sonra yatayla belli bir açı yapacak şekilde bulunduğu kum havuzunu ter eder. Bu birinci perde katmanıdır. Yatak yüzeyinin üst kısmına yayılan bu parçacıklar daha sonra yer çekiminin etkisiyle yatağa doğru düşüşe geçer. Bu grubun oluşturduğu tabaka ise ikinci perde katmanıdır. Diğer bir husus ise nozul merkezine yakın bölgelerde bir miktar partikülün tekrar gaz akışına katılarak sirkülasyona girmesidir. Bu olay yeni bir kum perdesi katmanı demektir. Nozulun iki yanında nozula belli uzaklıklarda alınan ölçümlerde görünürlük

ölçümünün yapılmasını sağlayan lazer ışık demeti, sadece düşmekte olan partiküllerin oluşturduğu katmanları kat etmektedir. Merkez pozisyonda ise ışık demeti hem yukarı doğru çıkmakta olan hem de düşmekte olan parçacıkların oluşturduğu katmanları kat etmek zorundadır. Bu nedenle merkez pozisyonda alınan görünürlük ölçümleri daha düşük seviyelerde çıkmışken merkezden daha uzak bölgelerde alınan ölçümlerde görünürlük değeri daha üst seviyelerde ölçülmüştür. Bu durumdan anlaşılacağı gibi birim hacimdeki partikül yoğunluğu merkez pozisyonda kenarlardakinden daha yüksektir. Ayrıca Şekil 4. 35' de 0,1 bar için yan ve merkez pozisyonlarda görünürlük değişimi grafiği eklenmiştir.



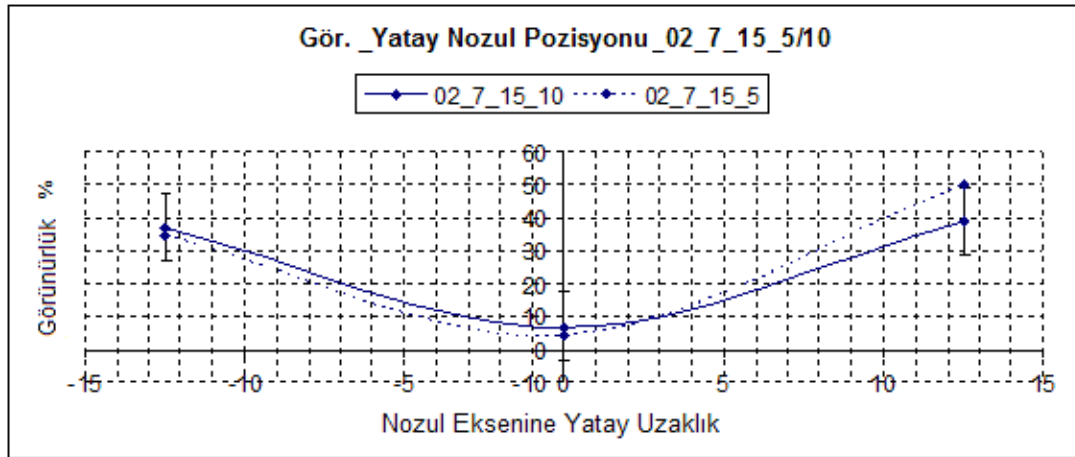
Şekil 4. 35. 0,1 bar için yan ve merkez pozisyonlarda görünürlük değişimi

Şekil 4. 34 ve 4. 35 grafikleri ele alındığında pozisyona göre görünürlük değişim olayı, hem 0,2 hem de 0,1 bar basınç altında alınan ölçümlerde aynı karakterdedir. Görünürlük testlerinin diğer bir adımı ise ölçüm yapılan fotodiyotun kum yüzeyine olan yüksekliğinin değiştirilmesiyle oluşacak görünürlük farkını tespit etmektir. Yapılan incelemelerde görünürlük değerinin kum yatak yüzeyinden farklı uzaklıklarda farklı değerlerde çıkması beklenmektedir. Bu nedenle ölçüm yapılan fotodiyot yüksekliği yatak yüzeyinden 5 cm ve 10 cm olacak şekilde değiştirilmiştir. Alınan çok sayıda ölçümün sonucunun özeti olarak oluşturulmuş grafikler üzerinden bir karşılaştırma yapıldığında Şekil 4. 36' da 0,1 bar için ve Şekil 0,2 bar için yapılan deneylerin karşılaştırması bulunabilir.



**Şekil 4. 36.** 0,1 bar için 5 ve 10 cm fotodiyot yüksekliğinde görünürlük değişimi

Şekil 4.36' daki grafikte kesik çizgi ile verilen grafik 5 cm fotodiyot yüksekliği ve sürekli çizgi ise 10 cm fotodiyot yüksekliği için alınan ölçüm sonuçlarını ifade etmektedir. Merkez pozisyonda alınan ölçümlerde görünürlük değeri her iki durumda da yoğun partikül akışı nedeniyle sıfıra yakın çıkmıştır. Nozul ekseninden 12,5 cm uzakta yapılan ölçümlerde 10 cm fotodiyot yüksekliğindeki görünürlük değeri 5 cm fotodiyot yüksekliğine ait değerlerden daha yüksek çıkmıştır. Fakat buna rağmen aradaki fark iki durum arasında net bir fark olduğunu ispatlayacak netlikte değildir.



**Şekil 4. 36.** 0,2 bar için 5 ve 10 cm fotodiyot yüksekliğinde görünürlük değişimi

Bu grafikte de yine aynı şekilde 0,2 bar rezervuar basıncı için yapılan deneylerin sonuçları değerlendirilmiştir. Sol pozisyonda 5 cm ve 10 cm foto diyot yüksekliğinde ölçülen görünürlük değerleri aynı çıkmakla beraber sağ pozisyonda bu değerlerin birbirinden farklı olduğu gözlenmiştir. fakat bu farklılık 0,1 bar ölçümleri için yapılan yorumda da bahsedildiği gibi net bir kaniya varmaya yetecek belirgin bir fark değildir.

Farklı fotodiyot yüksekliklerinde ölçülen görünürlük değerlerinin farklı olması beklenmektedir. Akışkanın daha yüksek noktalarda taşıyıcılık yeteneğinin azalmasından dolayı görünürlüğün de düşmesi beklenir. Fakat bu ölçümlerde farklı fotodiyot yükseklikleri için belirgin derecede farklı değerler elde edilmemiştir. Bunun sebebi difüze gaz patlamalarıyla taşınım ve ölçüm aralığının dar olmasıyla açıklanabilir.



## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

İki kısımdan oluşan bu yüksek lisans tezi hem görünürlük karakterleri ile ilgili hem de parçacık hareketi ile ilgili faydalı bilgilere erişme anlamında verimli olmuştur. Görünürlük konusunda mevcut çalışmalar incelendiğinde teoriyle büyük ölçüde uyum olduğu fakat bazı çevresel faktörlerin sonuçlar üzerine etkisi hissedilmiştir.

Görünürlük üzerinde nozul yüksekliğinin ve nozul itkisinin çok belirgin azaltıcı etkisi tespit edilmiştir. Nozul seviyesi altında kalmak kaydıyla alınan ölçümler de belirgin bir fark gözlenememiştir. Fakat daha geniş bir aralıkta yapılacak ölçümlerde bu noktada belirgin bir farkın varlığı beklenmektedir. Krater oluşumunun simetrikliğine de açıklık getirecek olan nozul çevresinde eşit yatak uzaklıklarda alınan ölçümler krater oluşumunun simetrikliğini doğrulamakla beraber kırk sekiz ölçümden sadece iki tanesi beklenin altında çıkarak simetriyi bozmuş; bunun sebebi olarak da yatak yüzeyinin sağlıklı bir şekilde düzleştirilmemiş olması belirlenmiştir. Ayrıca nozul itkisindeki artış görünürlüğü belirgin bir şekilde düşüreceği teyit edilmiştir.

Partikül hareketine açıklık kazandırmak için yapılan PIV araştırması kısmında temel noktalarda yine literatürle uyum içinde kalınmıştır. Fakat teoriler üretilirken çok fazla kabul ve sadeleştirme yapıldığı için gerçek durumu ifade etmekte yetersiz kalan teorilerin bu duruma açıklık kazandıracak faydalı bilgiler elde edilmiştir. Özellikle atmosferik şartlara özgü olan ve mevcut çalışmalarda önemine fazlaca değinilmeyen "Difüze Gaz Patlamalarıyla Erozyon" mekanizmasının ve partiküller arası kohezyon etkisi bu çalışmada şiddetle hissedilmiştir. Özellikle atmosferli ortamlar için geliştirilmeye çalışılan çözümlerde bu etkiler dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmadan sonraki safha partiküllü yüzey ses üstü jet akışı etkileşim olmalıdır. Yatak malzemesi olarak mevcut kum partiküllerine karıştırılmış daha büyük boyutlu cam parçacıkları kullanılması PIV ölçüm metodu açısından kolaylık sağlayabilir. Nozul altı bölgenin daha güçlü bir şekilde aydınlatılması için aydınlatma doğrultusunun değiştirilmesi de yine faydalı olması beklenen faaliyetlerdir.

Deneylerin pileksiglas kap gibi ışık geçirgenliği olan bir ortamda yapılması iyi bir yöntem olmakla beraber kap boyutlarının daha büyük tutulması daha sağlık sonuçlar elde etmede faydalı olacaktır. Bu tip deneyler sırasında nozul çıkışında akış

modülasyonun çok kısa bir sürede tamamlanması istenen bir özelliktir. Bu nedenle nozul kontrolü çıkış ağzına çok yakın noktalarda yapılmalıdır. Bunun yanında mevcut çalışmanın CFD şartlarında tekrarlanması hem deneysel verilerin hem de CFD çalışmasının doğrulanması açısından önemli bir adım olacaktır.

## KAYNAKLAR

**Andreotti B., 2004** A two species model of aeolian sand transport. J. Fluid Mech. 2004. France.

**Anthony J., Arts T., Boerrigter T. L., 2009**, Measurement Techniques in Fluid Dynamics, Third edition, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, ISBN 978-2-930389-96-6

**Haehnel R., Dade W.B., 2008** Physics of particle entrainment under the influence of an impinging jet. U.S. Army Engineer Research and Development Center Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hannover, NH 03755.

**Khalid ve ark., 2010** Feasibility for an ESA Planetary plume surface interaction facility. Space Propulsion Conference, San Sebastian, Spain. 3-6/05/2010.

**M. L. Riethmuller, 2008**, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium

**Norman ve ark. , 1964** Experimental investigation of jet impingement on surfaces of fine particles in a vacuum environment. NASA Technical Note NASA-TN-D-2633. Langley Research Center. *Langley Station, Hampton, U.S.A.*

**Philip ve ark. , 2009** Jet induced cratering of a granular surface with application to lunar spaceports. KSC Applied Physics Lab. NASA, *Kennedy Space Center, Florida 32899.*

**Philip ve ark., 2009** Craters formed in granular beds by impinging jets of gas. Granular Mechanics and Regolith Operations Lab. NASA, Kennedy Space Center, Florida 32899.

**Roberts, L. , 1964** The interaction of a rocket exhaust with the lunar surface. NASA Langley Research Center. *Langley Station, Hampton, U.S.A.*

**Robert ve ark., 2008** Crater evolution due to a jet impinging on a bed of loose particles. ASCE, Earth & Space 2008. Hanover

**Stark ve ark., 1965** Lunar dust/debris hazards associated with the manned flying system. NASA Contractor Report NASA-CR-61106, Huntsville, Alabama.

**Viegas ve ark., 1985** An erosion technique for the measurement of the shear stress field on a flat plate. J. Phys. E: Sci. Instrum. 1985. Britain.

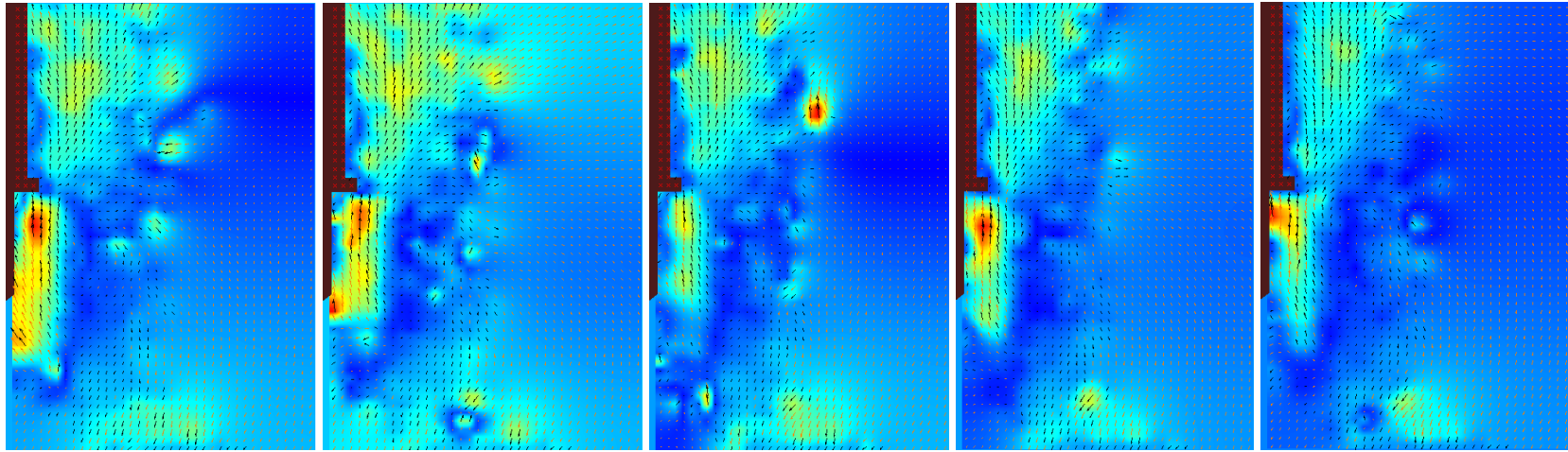
## EK 1

### Voltaj Farkı Olarak Alınan Görünürlük Ölçümlerini Görünürlük Oranına Çeviren Matlab Kodu

```
clear all;
close all;
clc
A=load('01_14,5_10_10_12,5R.dat');
X=A(:,1);
m=max(X);
s=0;
k=length(X);
for i=1:length(X)
    if X(i)==m;
        s=i;
    end
end
for j=1:(k-s+1);
    b(j,1)=X(s+j-1,1);
end
c=(b./m*100);
p=length(c);
for l=1:100;
    d(l,1)=c(200+l-1,1);
end
OO=mean(d);
O=mean(c);
B=zeros(length(c),2);
for t=1:length(c)
    B(t,1)=c(t);
    B(t,2)=t;
end
plot(d);
```

## EK 2

Po0.1\_Hs14.5\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_100-105 ( Bileşke Hız)



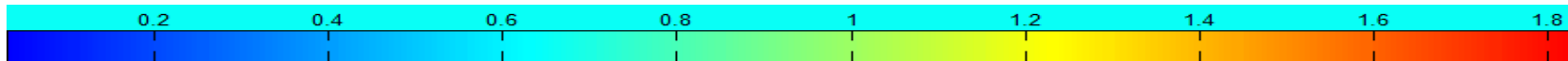
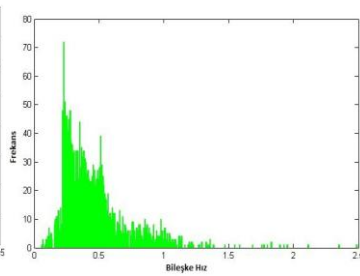
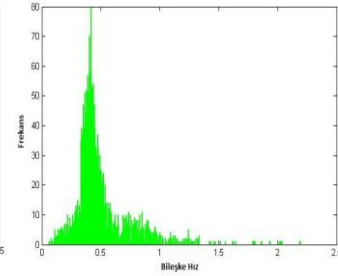
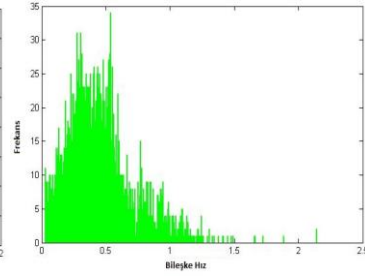
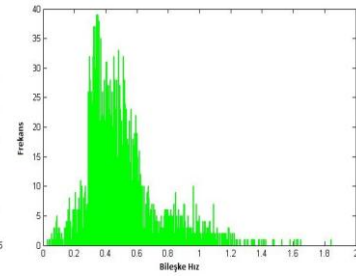
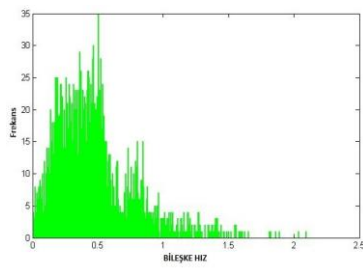
100 - 101

101 - 102

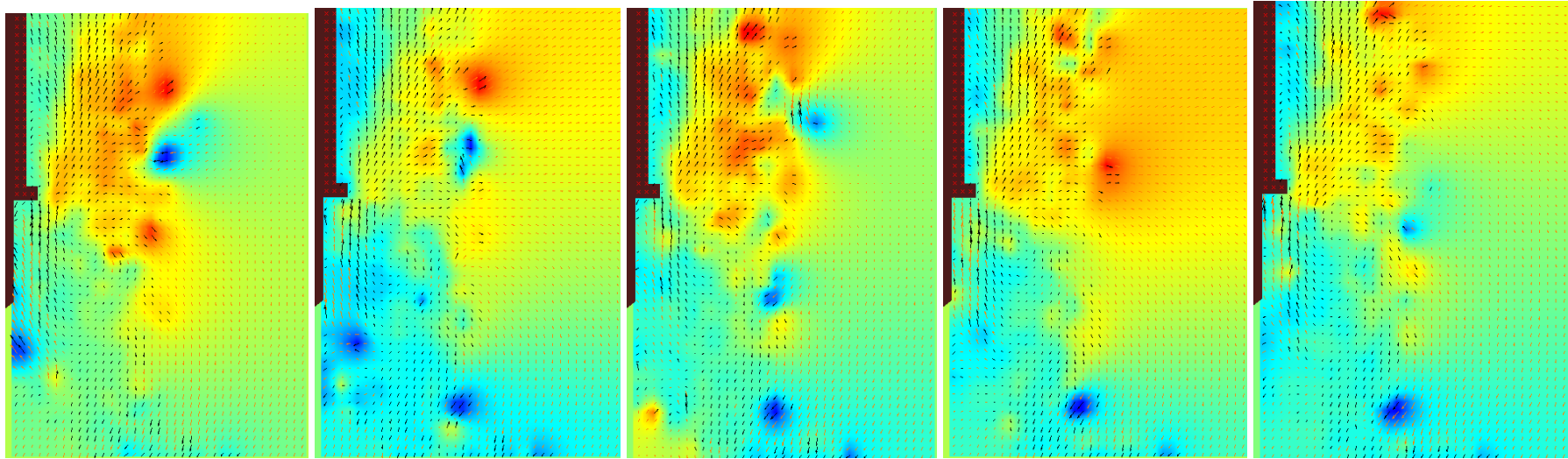
102 - 103

103 - 104

104 - 105



Po0.1\_Hs14.5\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_100-105 ( Yatay Hız Bileşeni)



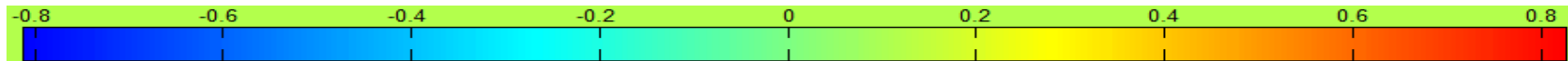
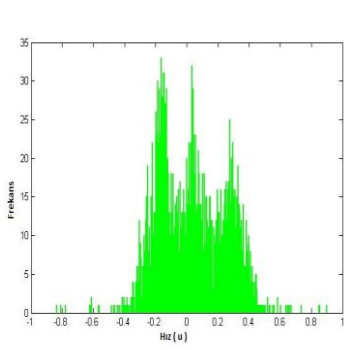
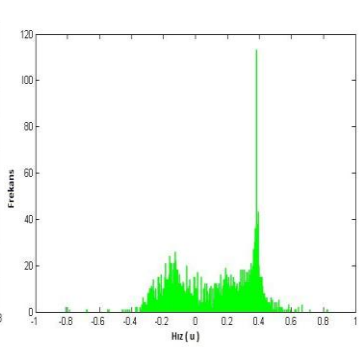
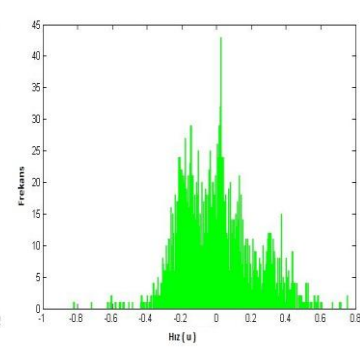
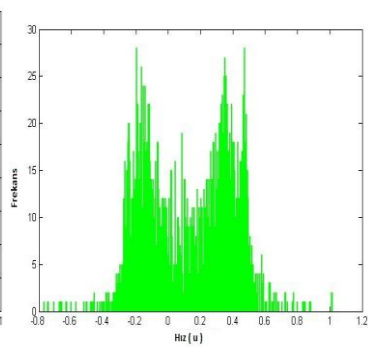
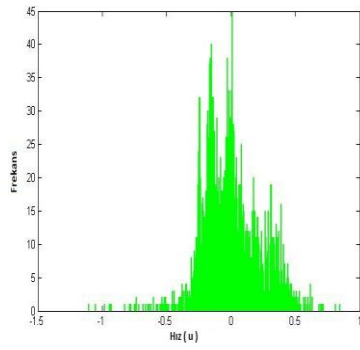
100 - 101 u

101 - 102 u

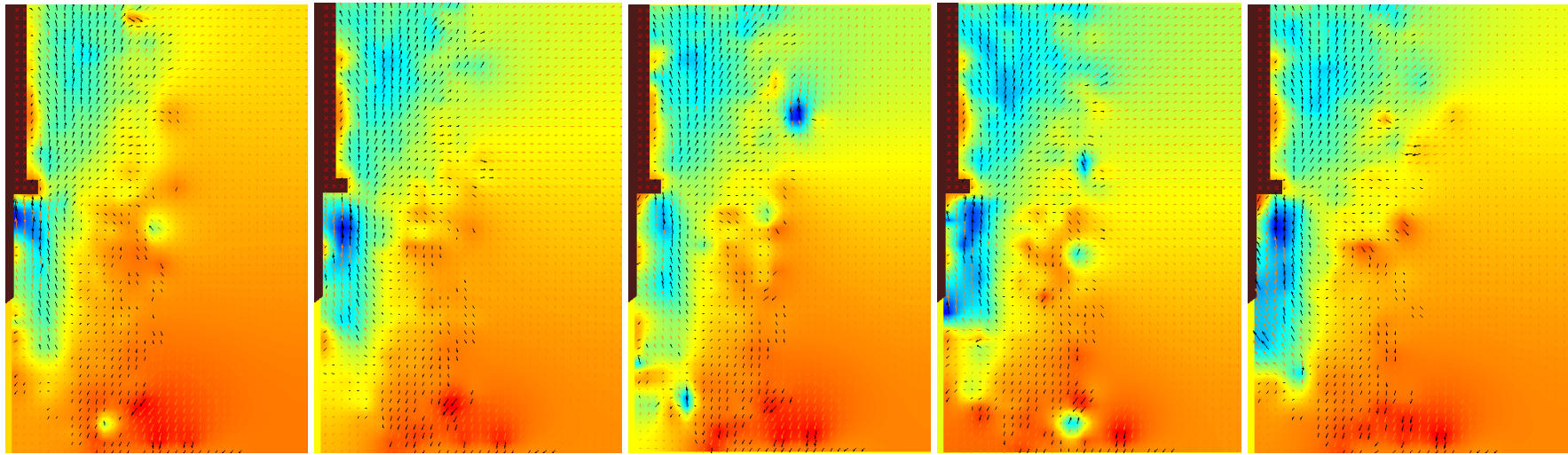
102 - 103 u

103 - 104 u

104 - 105 u



Po0.1\_Hs14.5\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_100-105 ( Düşey Hız Bileşeni)



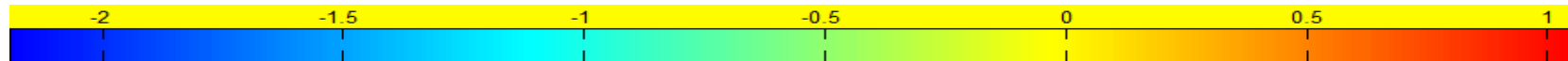
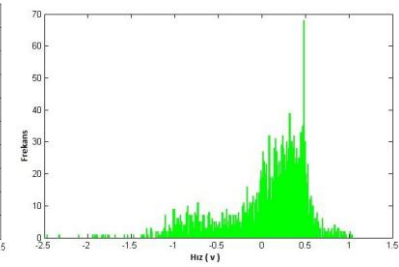
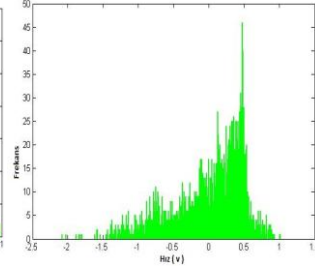
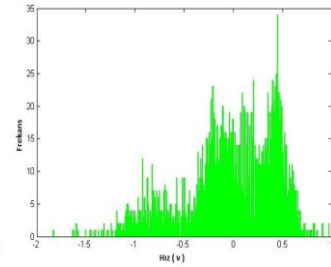
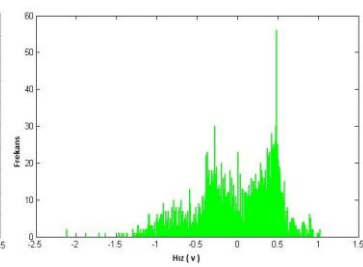
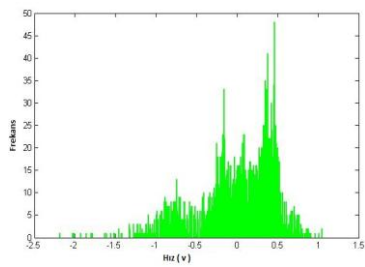
100 - 101 v

101 - 102 v

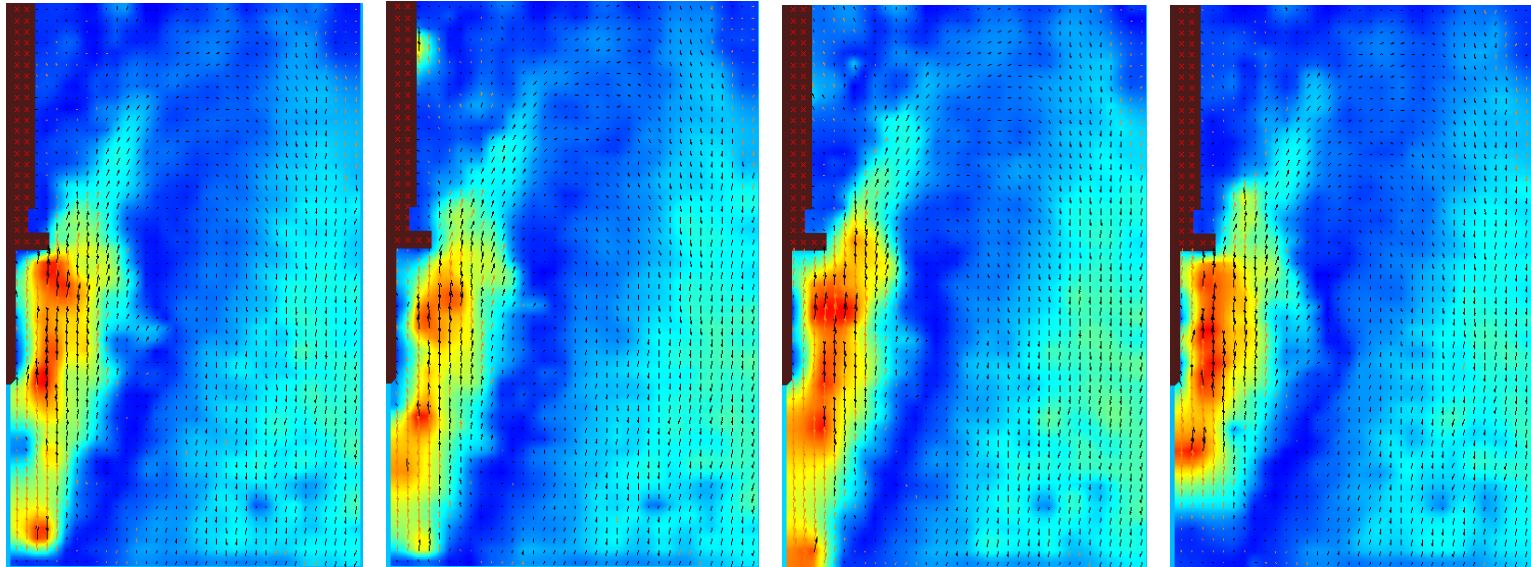
102 - 103 v

103 - 104 v

104 - 105 v



Po0.1\_Hs14.5\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_1446-1450 ( Bileşke Hız)

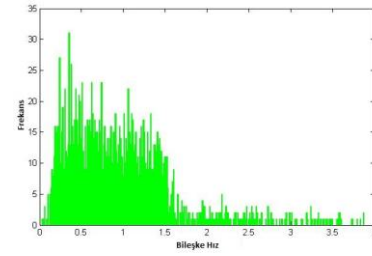
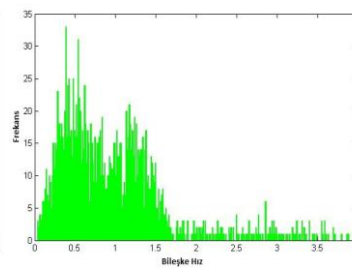
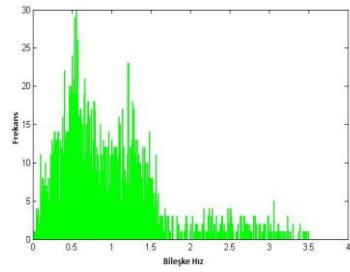
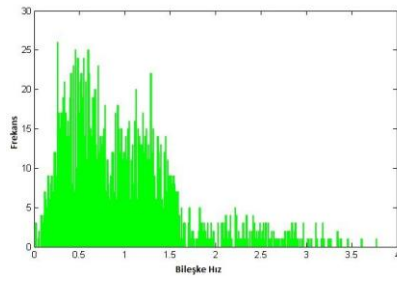


1446 - 1447

1447 - 1448

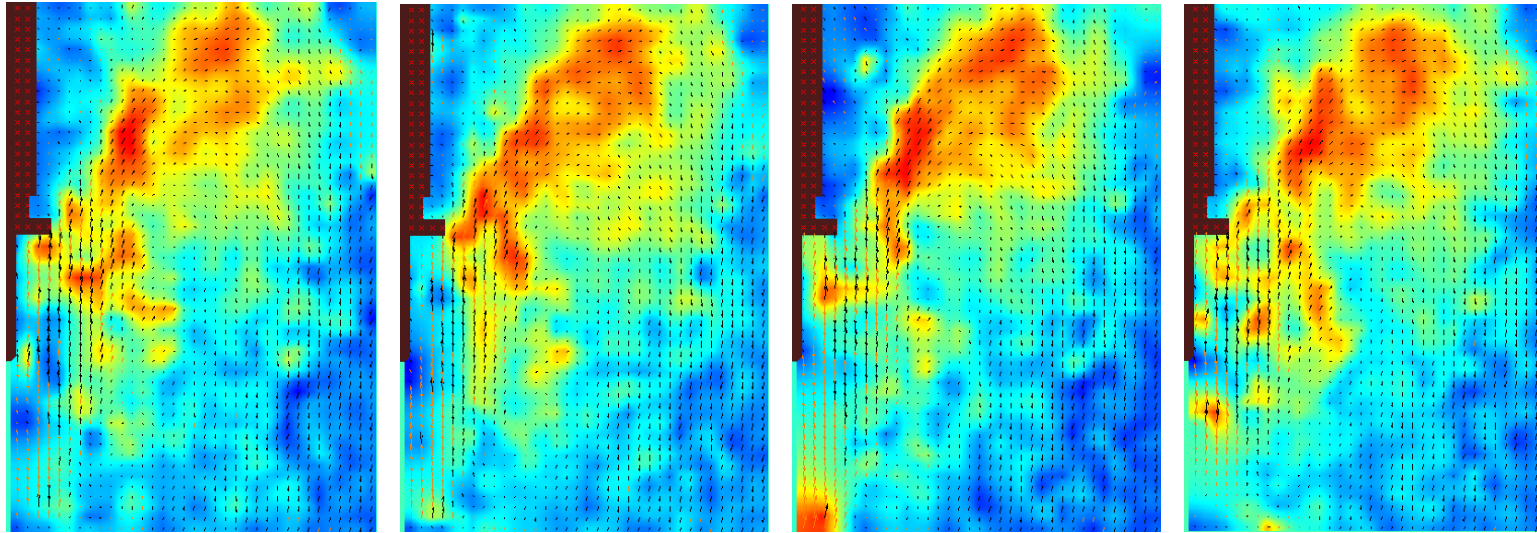
1448 - 1449

1449 - 1450





Po0.1\_Hs14.5\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_1446-1450 ( Yatay Hız Bileşeni)

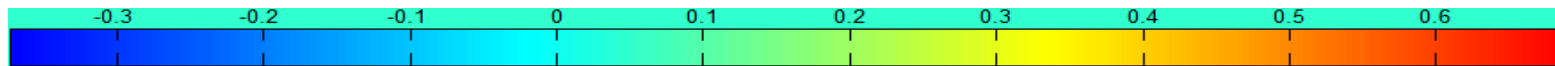
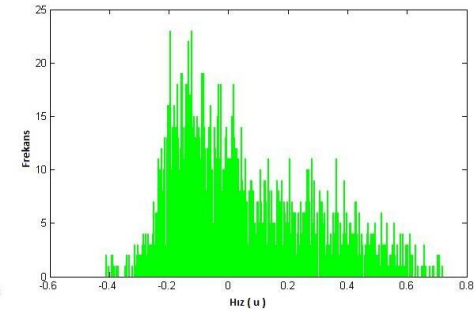
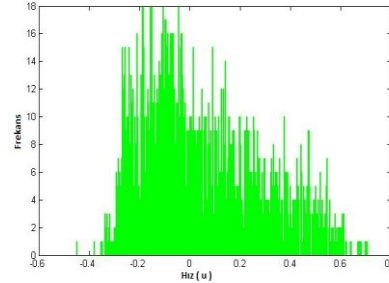
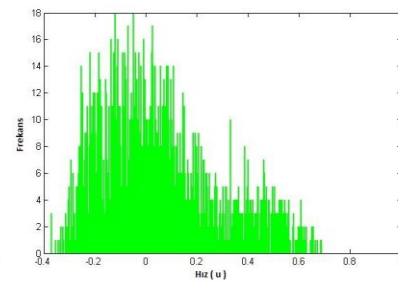
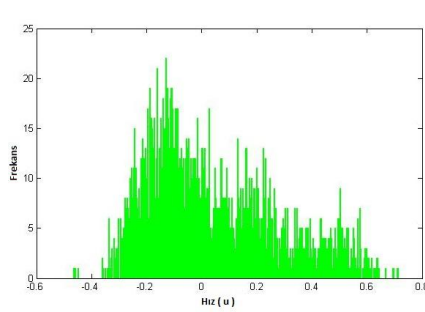


1446 - 1447 u

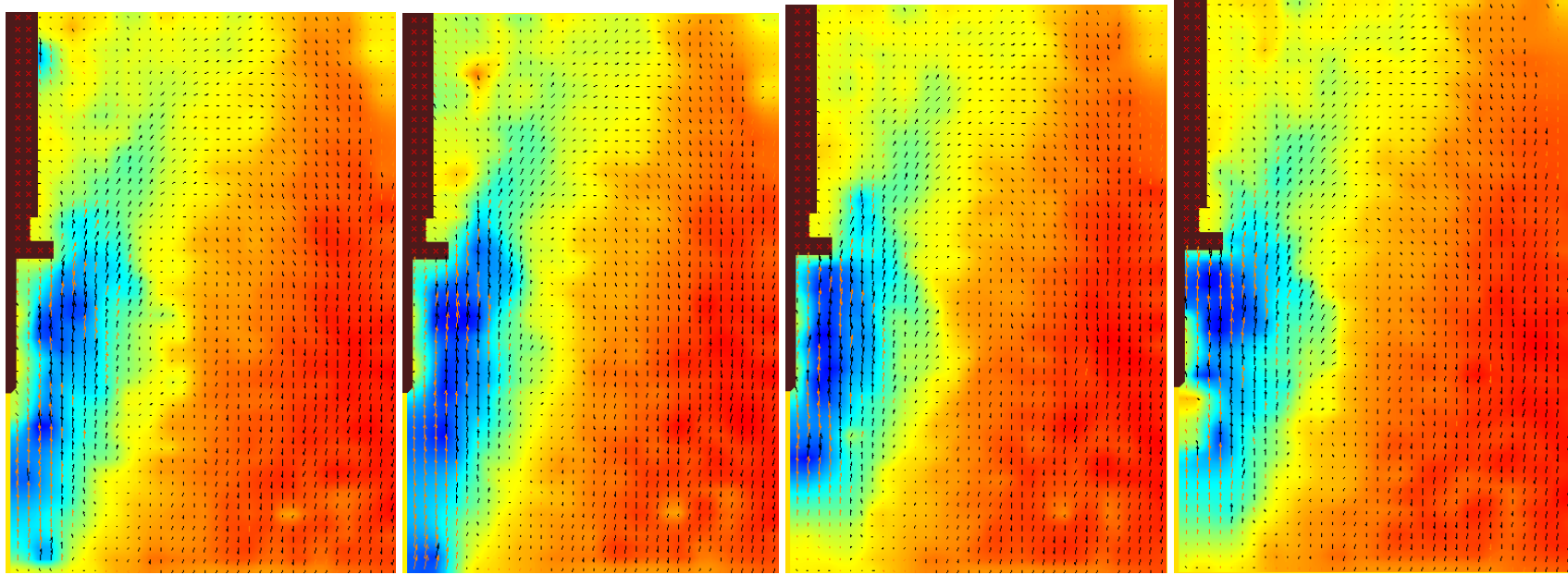
1447 - 1448 u

1448 - 1449 u

1449 - 1450 u



Po0.1\_Hs14.5\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_1446-1450 ( Düşey Hız Bileşeni)

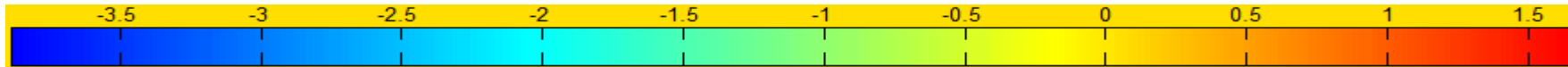


1446 - 1447 v

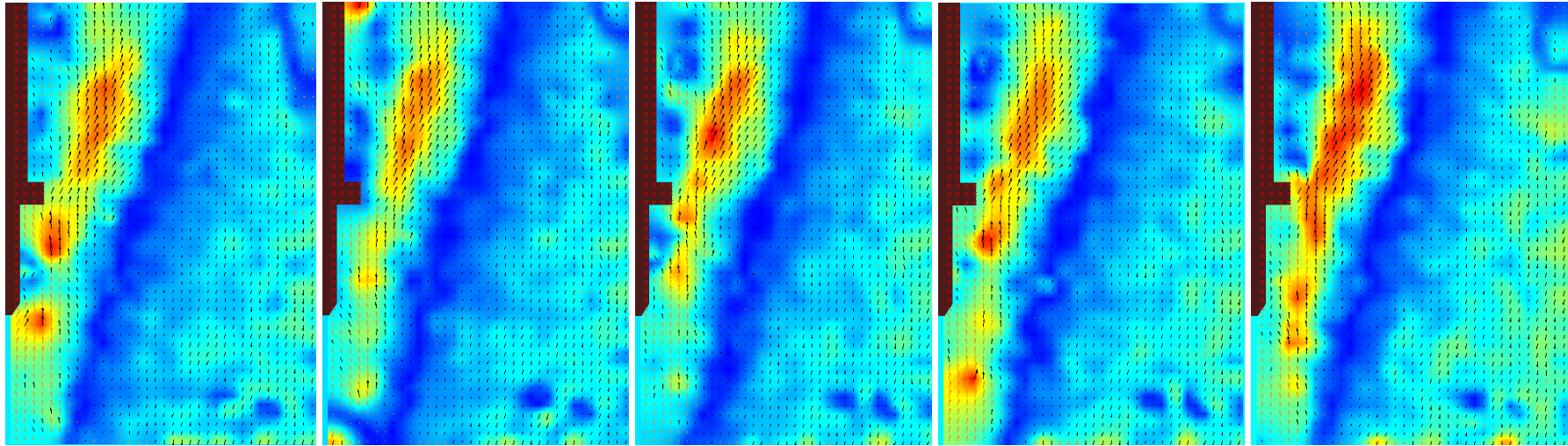
1447 - 1448 v

1448 - 1449 v

1449 - 1450 v



Po0.1\_Hs14.5\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_ACF\_100 - 105 ( Bileşke Hız)



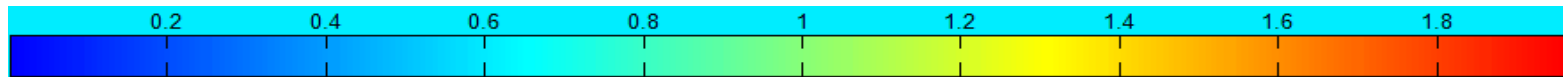
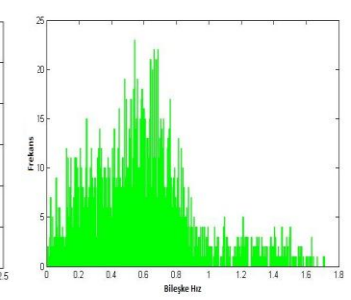
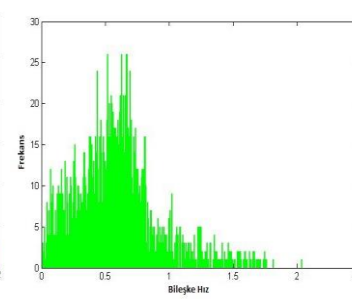
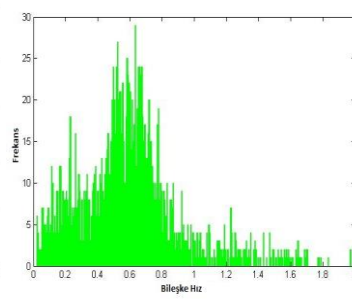
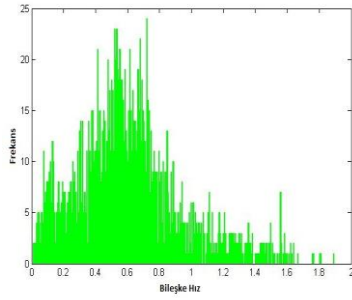
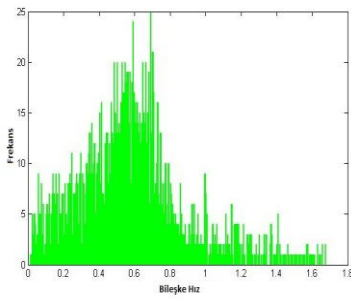
100 - 101

101 - 102

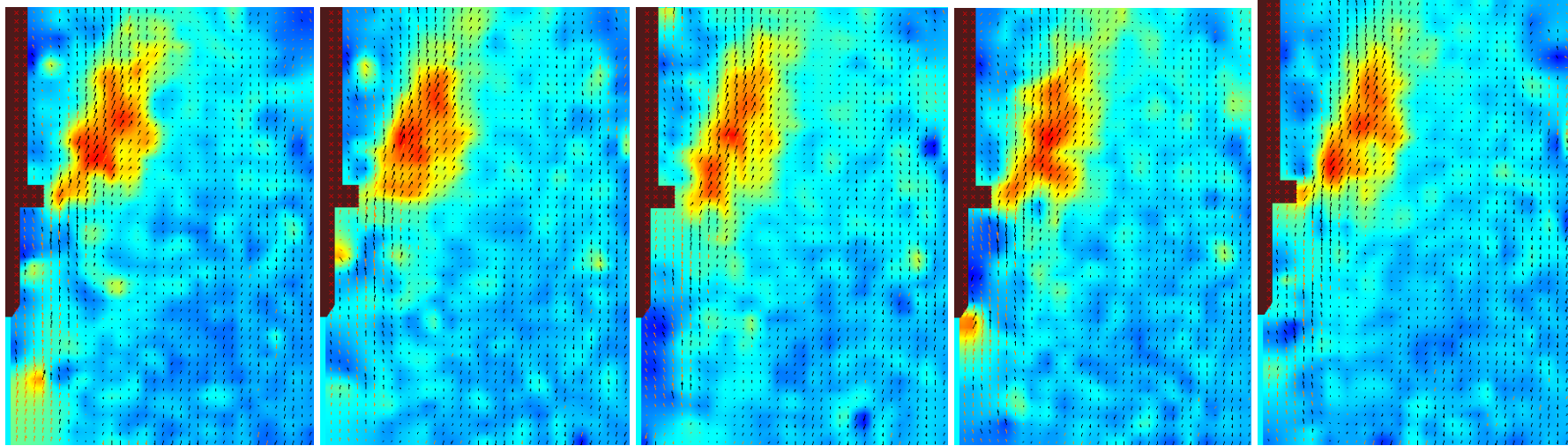
102 - 103

103 - 104

104 - 105



Po0.1\_Hs14.5\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_ACF\_100 - 105 ( Yatay Hız Bileşeni )



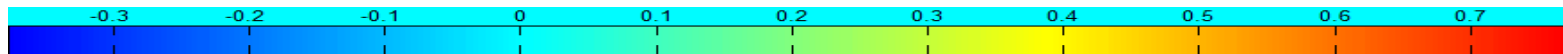
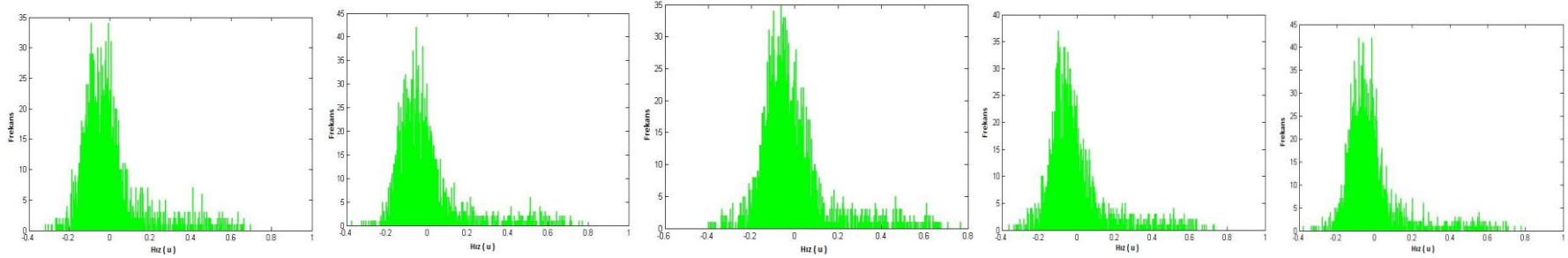
100 - 101 u

101 - 102 u

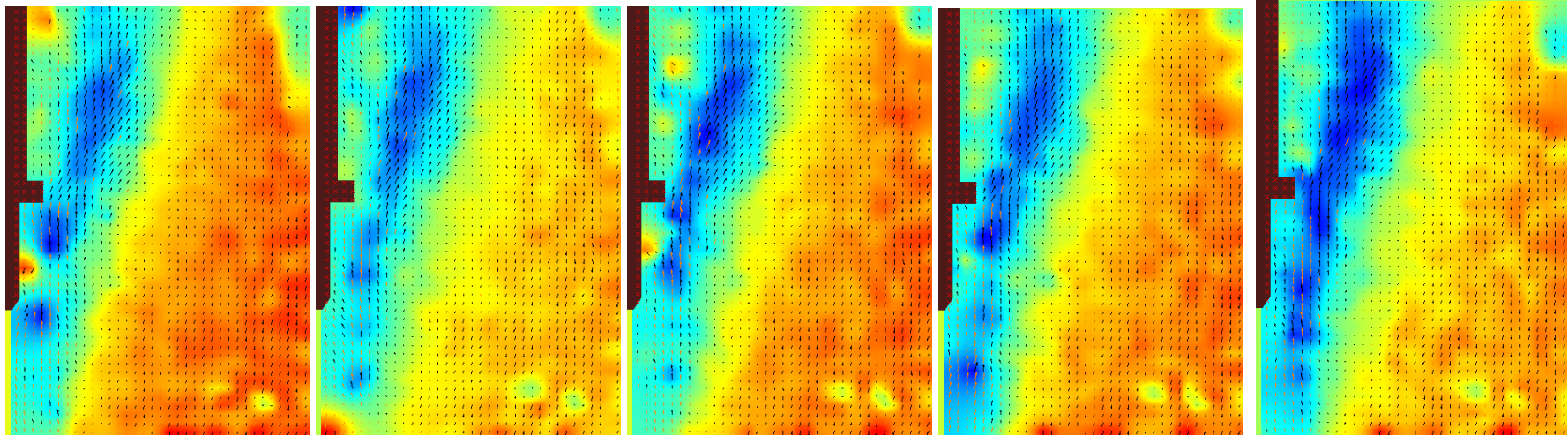
102 - 103 u

103 - 104 u

104 - 105 u



Po0.1\_Hs14.5\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_ACF\_100 - 105 ( Düşey Hız Bileşeni )



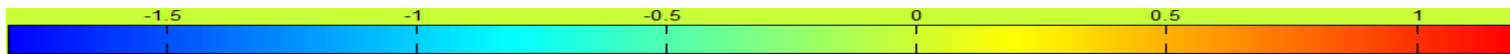
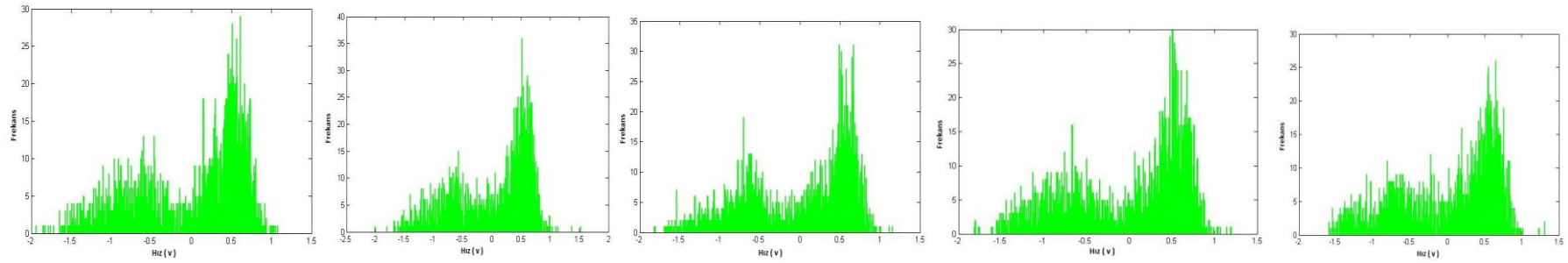
100 - 101 v

101 - 102 v

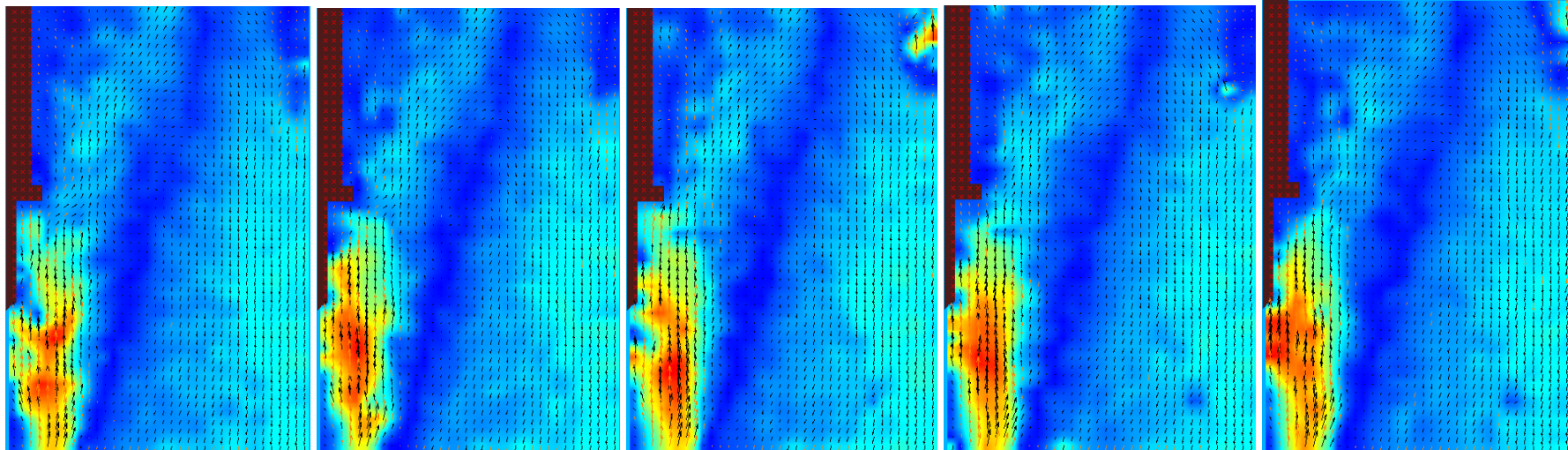
102 - 103 v

103 - 104 v

104 - 105 v



Po0.1\_Hs14.5\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_ACF\_1445 - 1450 ( Bileşke Hız )



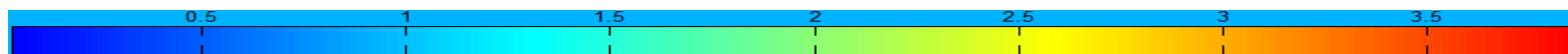
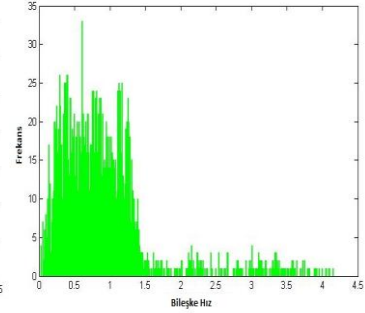
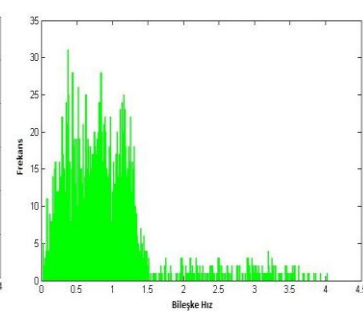
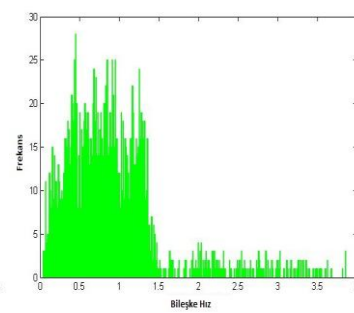
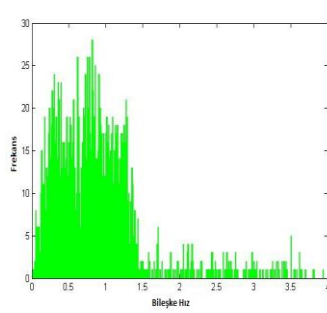
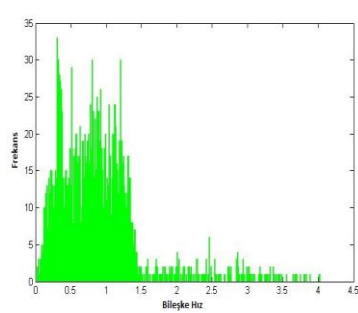
1445 - 1446

1446 - 1447

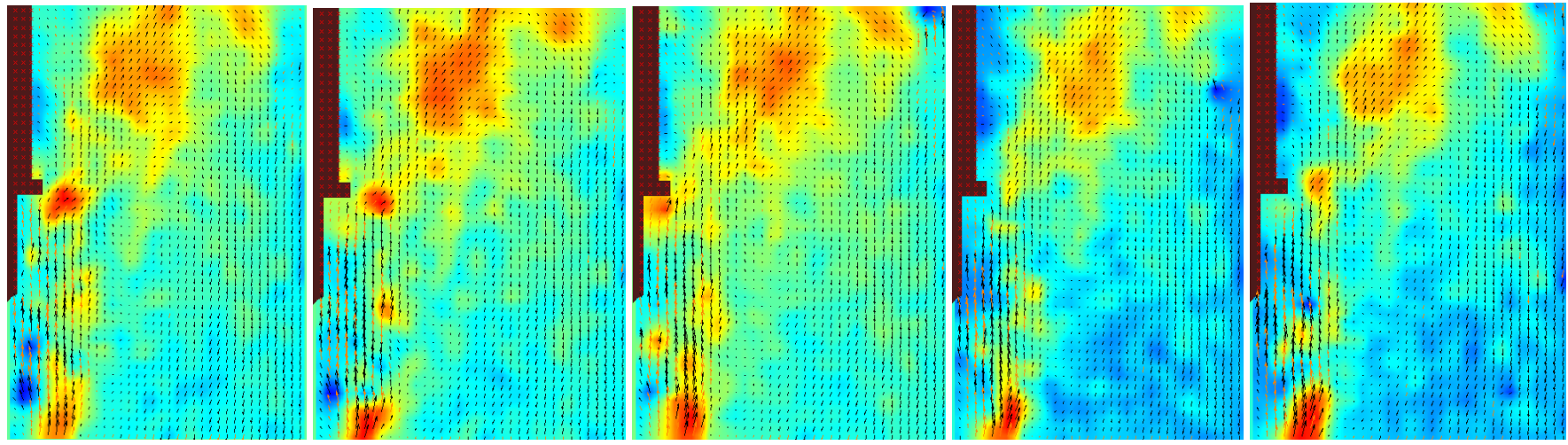
1447 - 1448

1448 - 1449

1449 - 1450



Po0.1\_Hs14.5\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_ACF\_1445 - 1450 ( Yatay Hız Bileşeni )



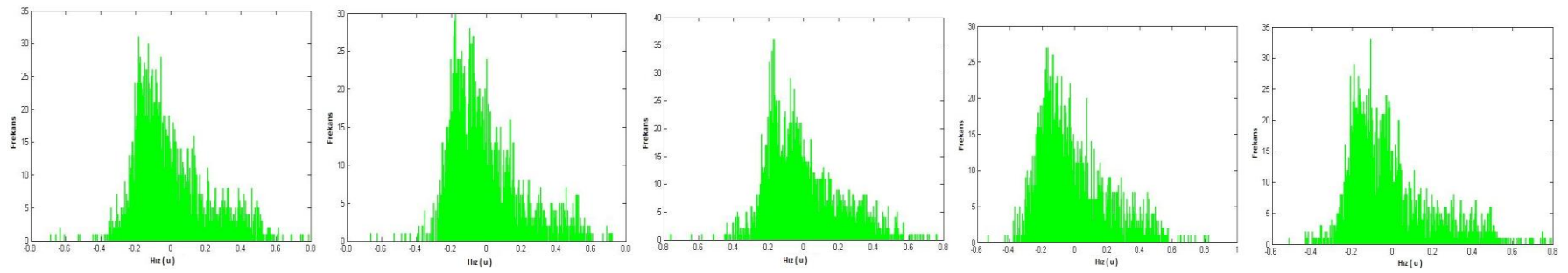
1445 - 1446 u

1446 - 1447 u

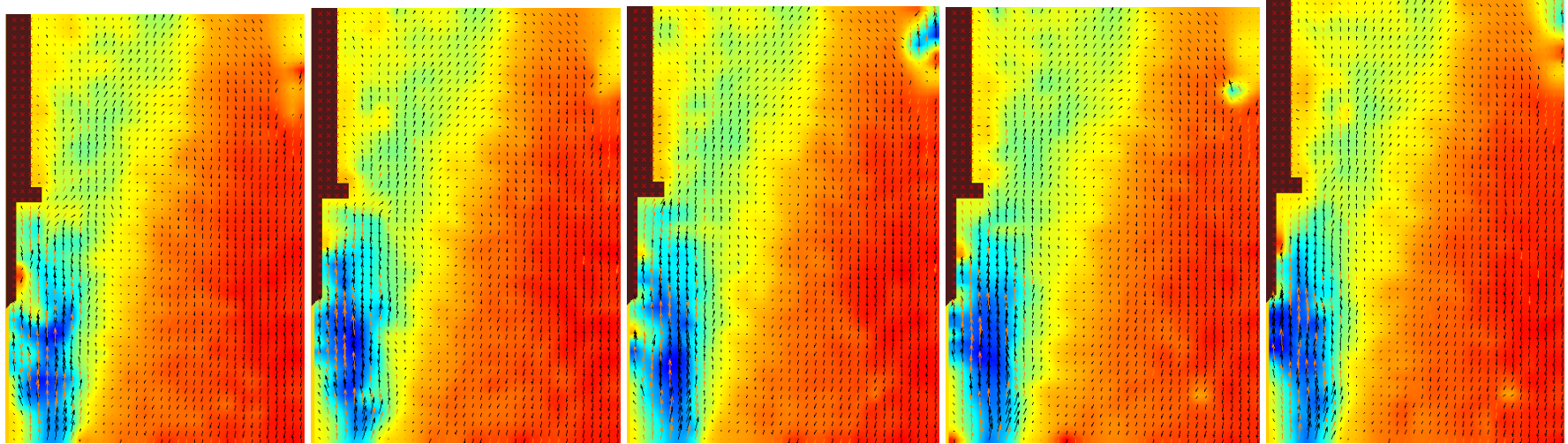
1447 - 1448 u

1448 - 1449 u

1449 - 1450 u



Po0.1\_Hs14.5\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_ACF\_1445 - 1450 ( Düşey Hız Bileşeni )



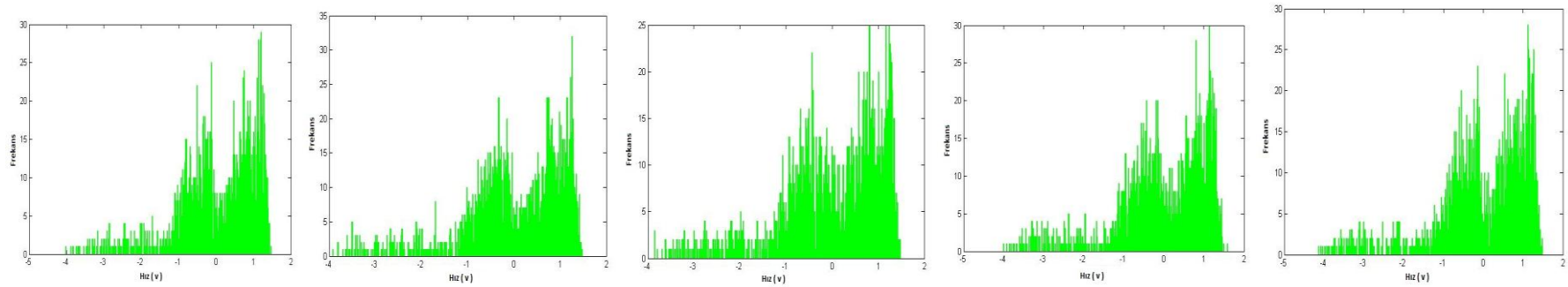
1445 - 1446 v

1446 - 1447 v

1447 - 1448 v

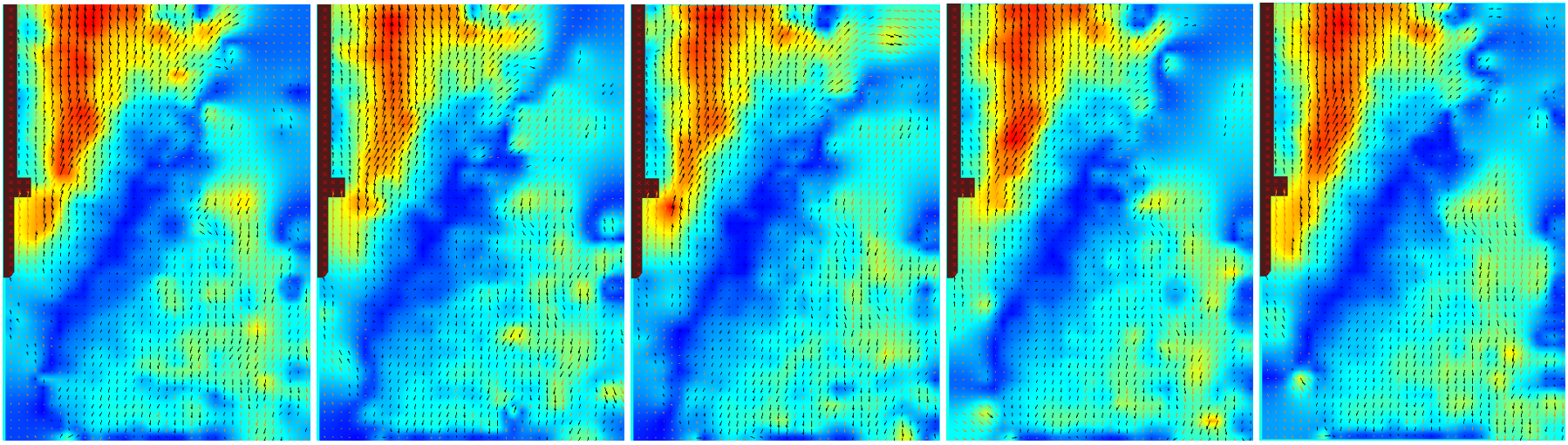
1448 - 1449 v

1449 - 1450 v





Po0.1\_Hs6\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_100 - 105 ( Bileşke Hız )



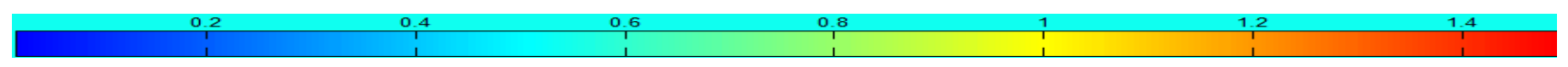
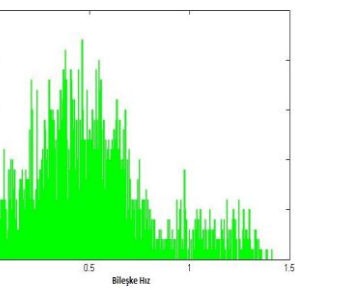
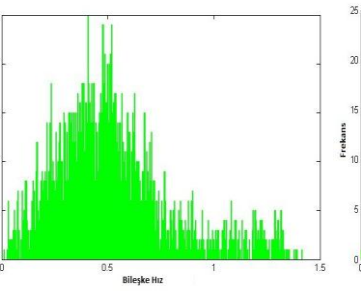
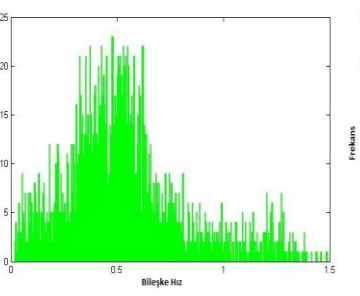
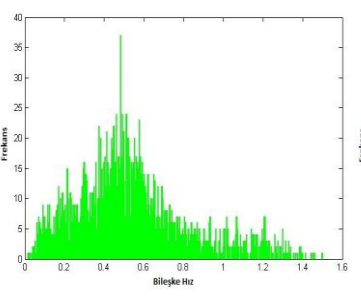
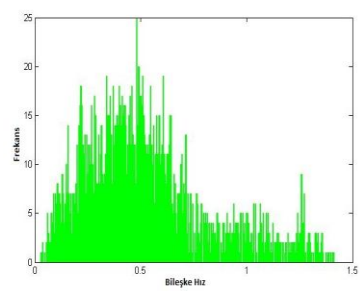
100 - 101

101 - 102

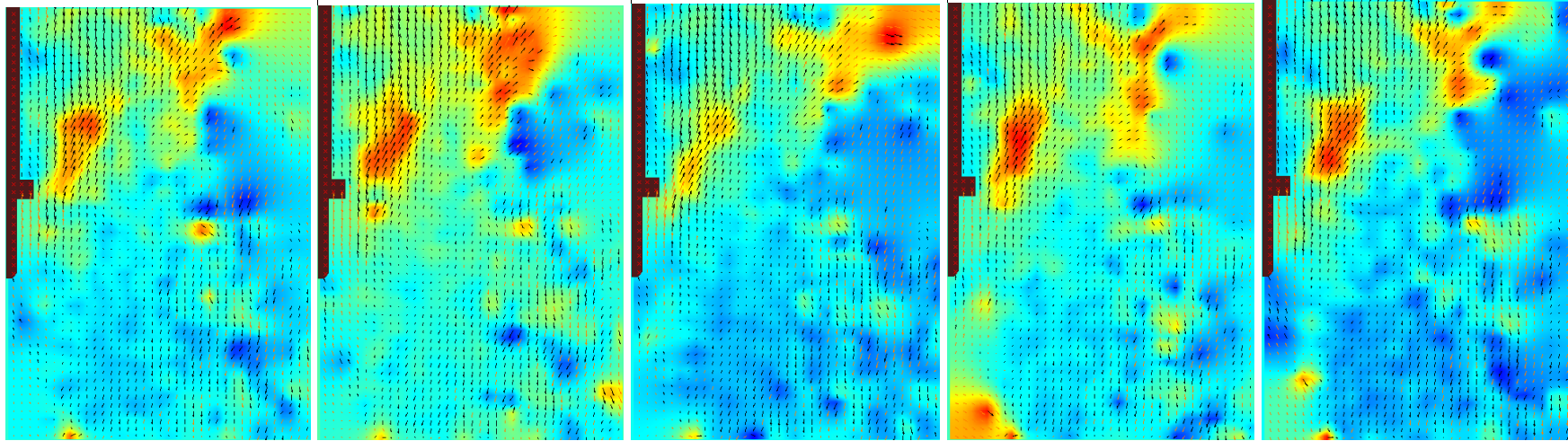
102 - 103

103 - 104

104 - 105



Po0.1\_Hs6\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_100 - 105 ( Yatay Hız Bileşeni )



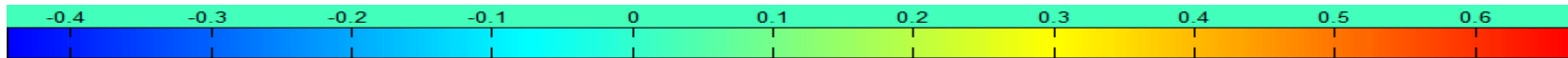
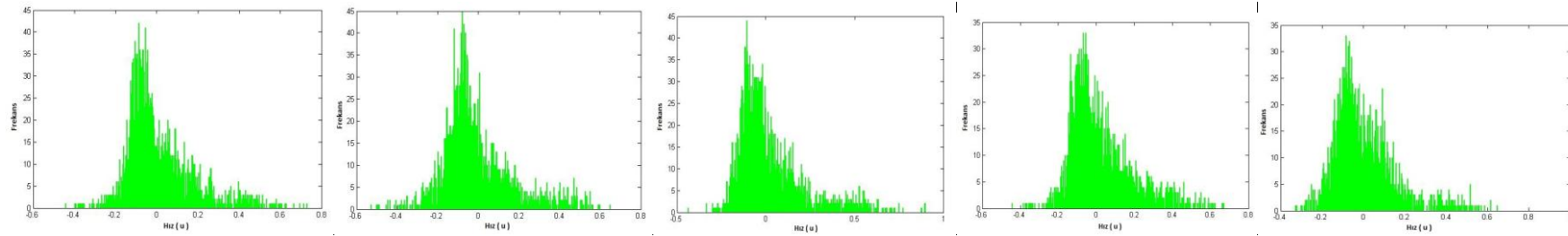
100 - 101 u

101 - 102 u

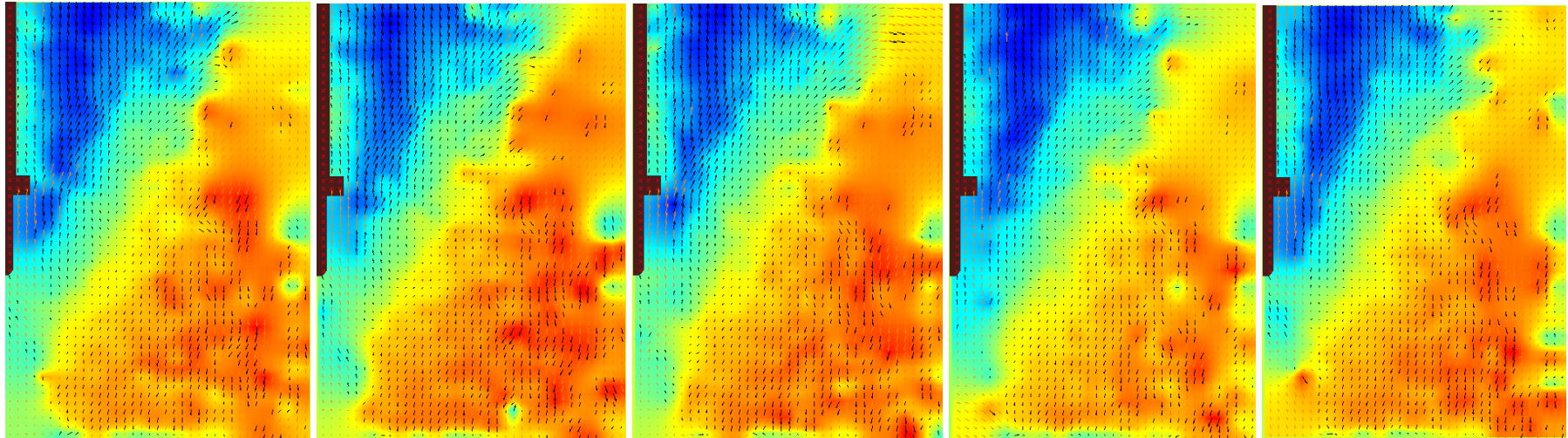
102 - 103 u

103 - 104 u

104 - 105 u



Po0.1\_Hs6\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_100 - 105 ( Düşey Hız Bileşeni )



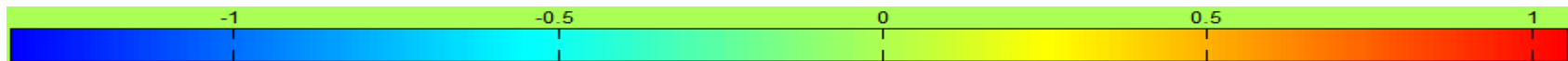
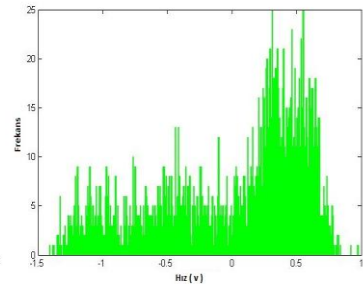
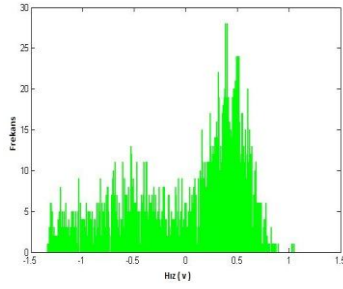
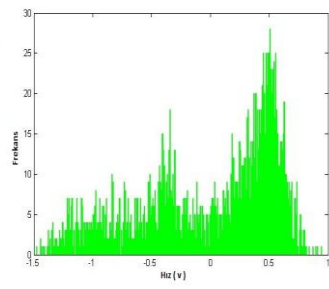
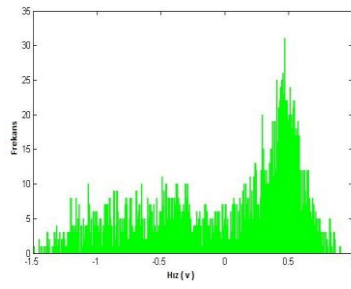
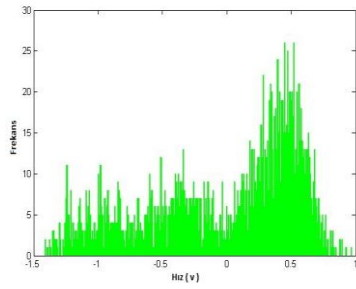
100 - 101 v

101 - 102 v

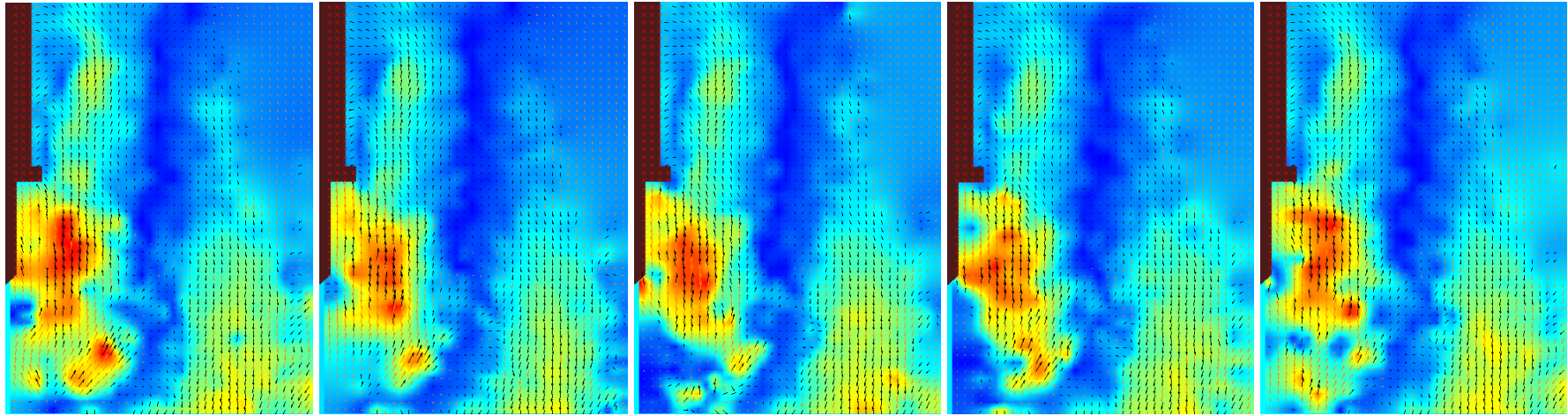
102 - 103 v

103 - 104 v

104 - 105 v



Po0.1\_Hs6\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_1445 - 1450 ( Bileşke Hız )



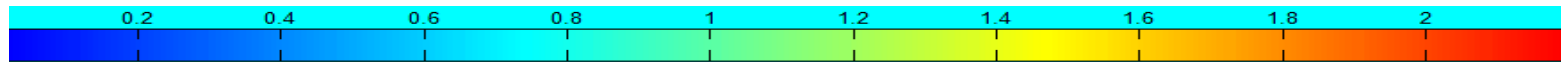
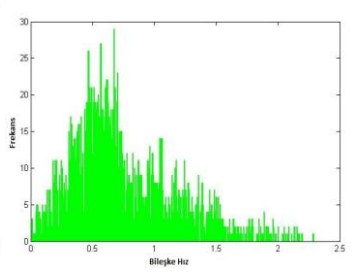
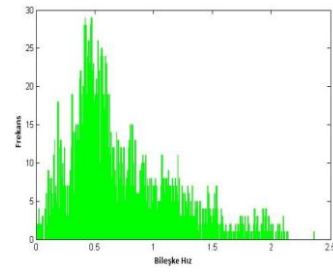
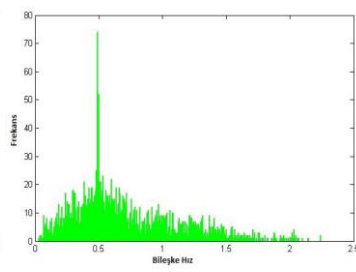
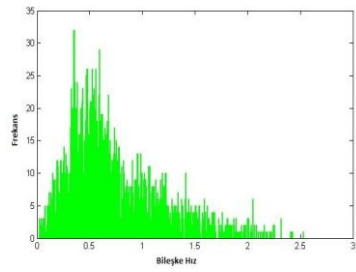
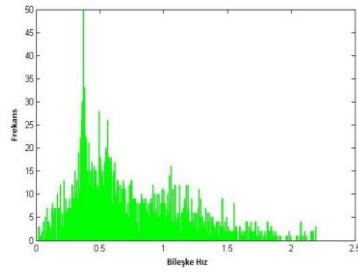
1445 - 1446

1446 - 1447

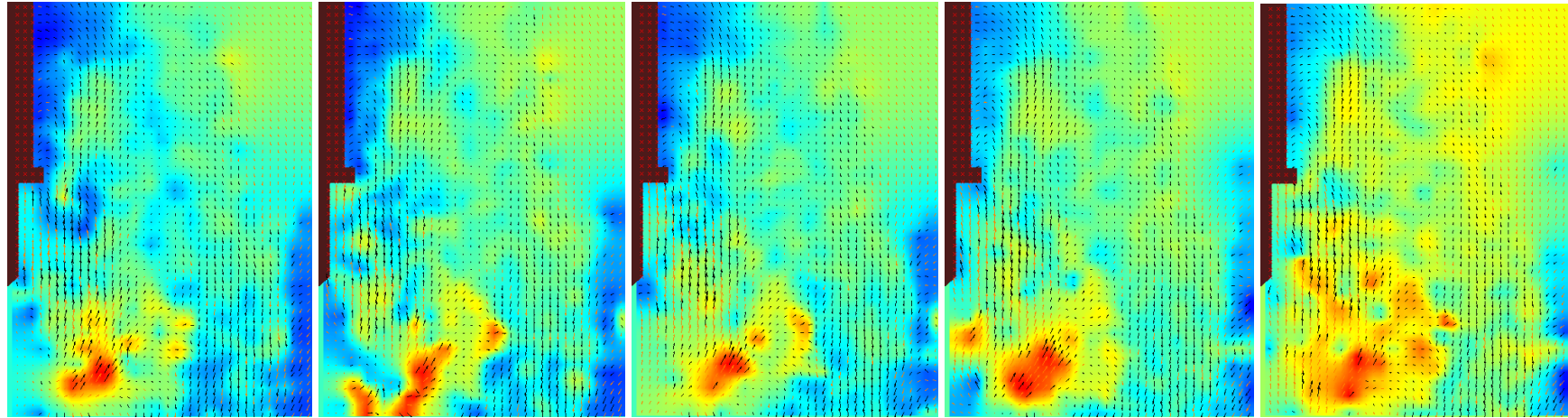
1447 - 1448

1448 - 1449

1449 - 1450



Po0.1\_Hs6\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_1445 - 1450 ( Yatay Hız Bileşeni)



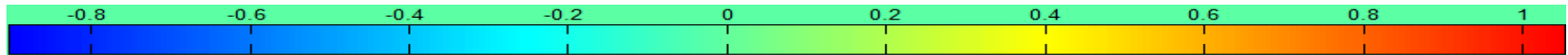
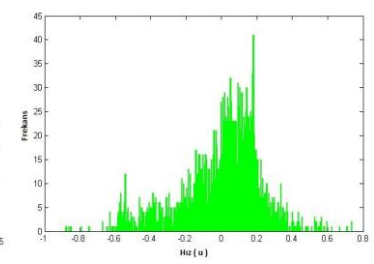
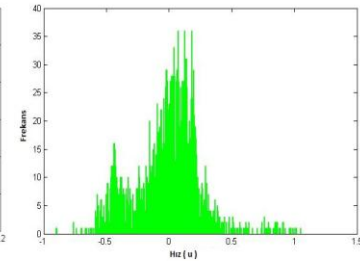
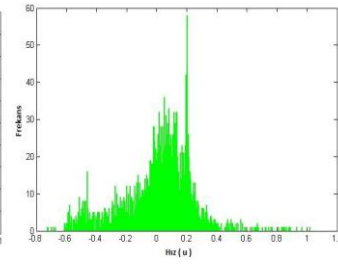
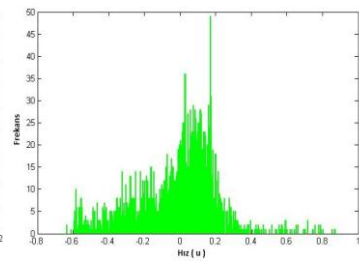
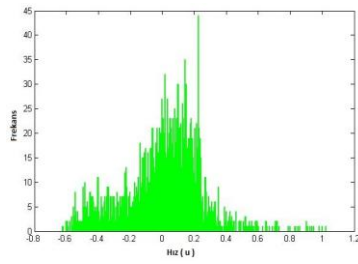
1445 - 1446 u

1446 - 1447 u

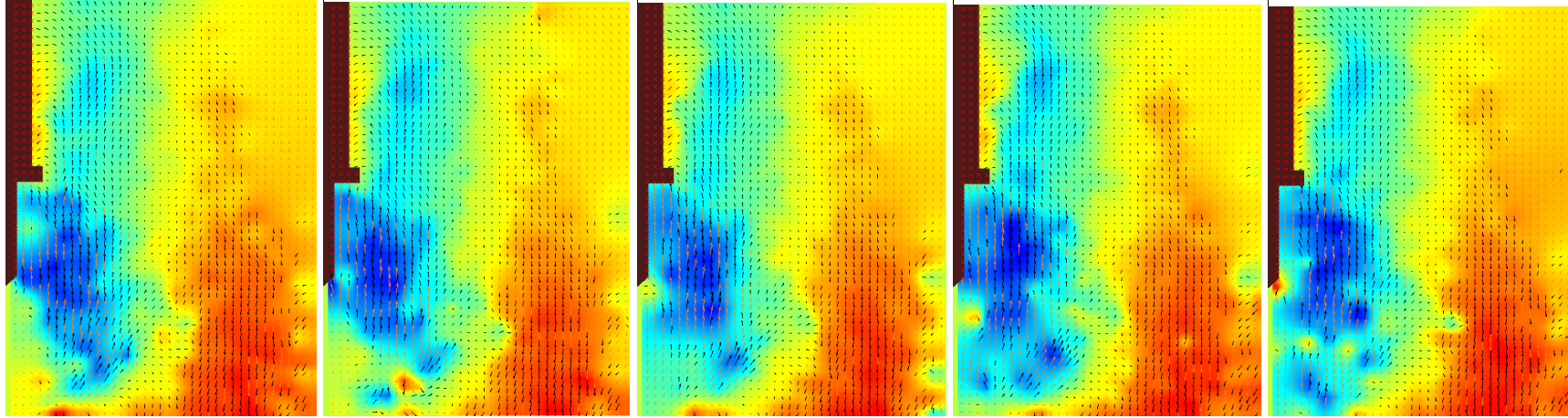
1447 - 1448 u

1448 - 1449 u

1449 - 1450 u



Po0.1\_Hs6\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_1445 - 1450 ( Düşey Hız Bileşeni)



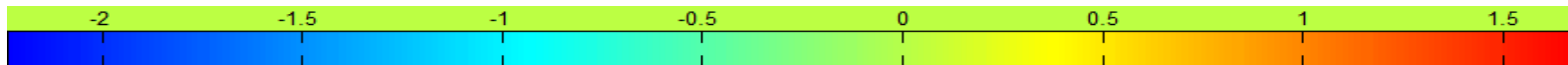
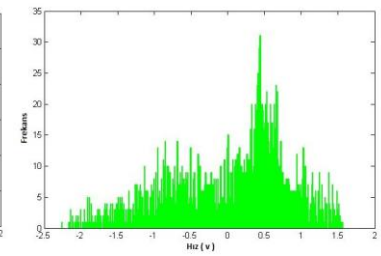
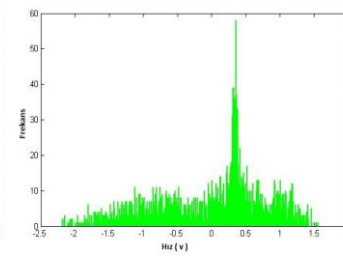
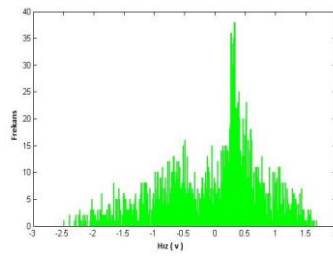
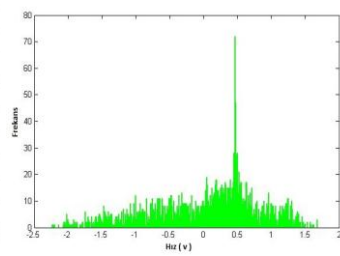
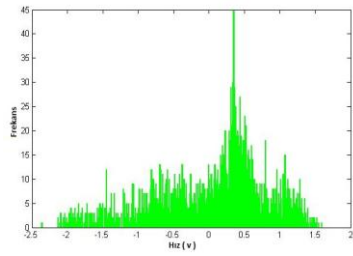
1445 - 1446 v

1446 - 1447 v

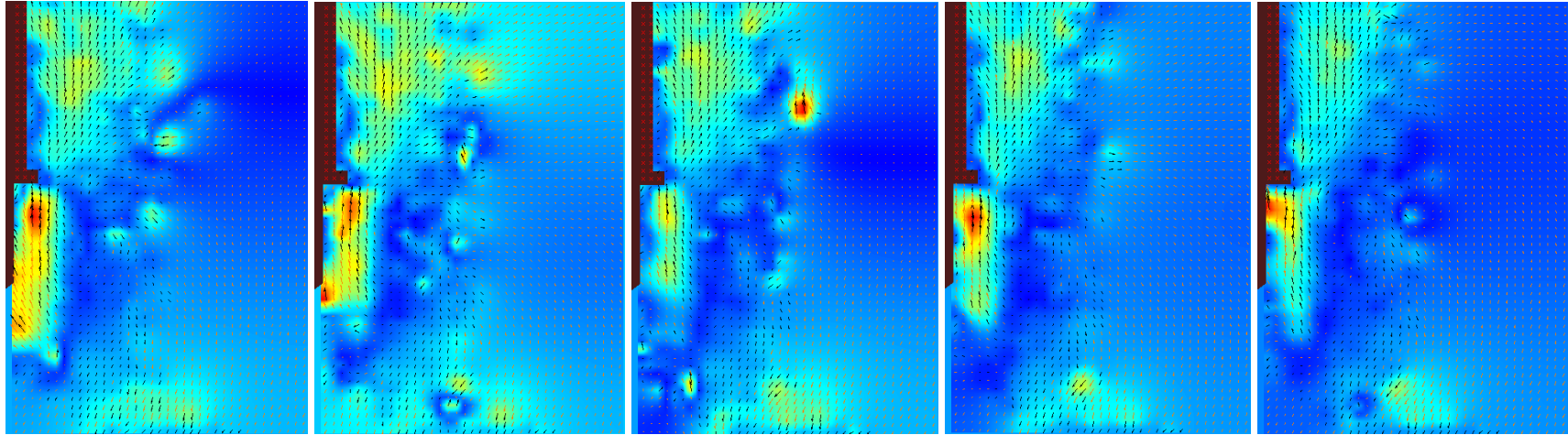
1447 - 1448 v

1448 - 1449 v

1449 - 1450 v



08\_Po0.1\_Hs6\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_\_ACF\_ 100 - 105 ( Bileşke Hız )



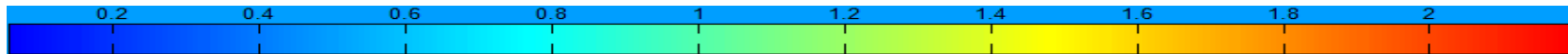
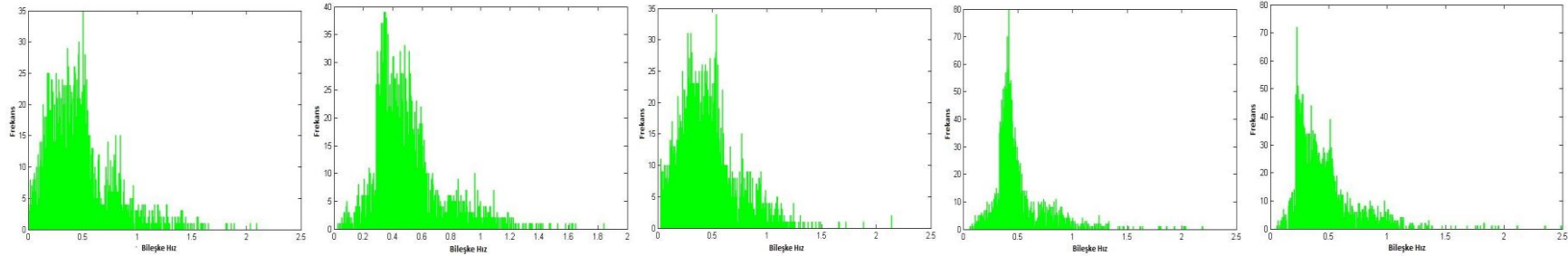
100 - 101

101 - 102

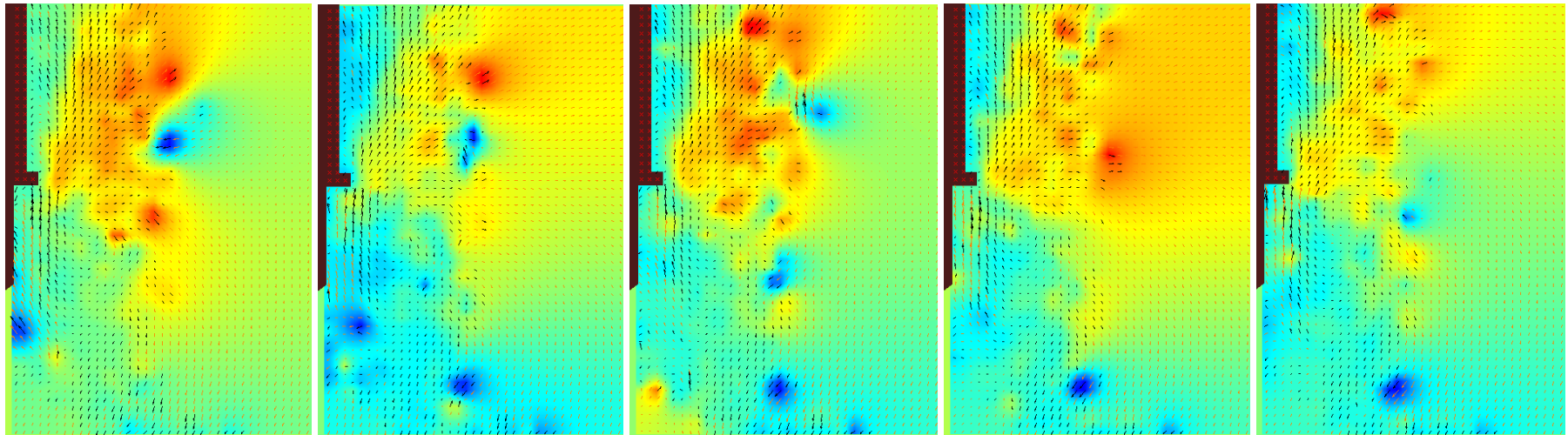
102 - 103

103 - 104

104 - 105



08\_Po0.1\_Hs6\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_\_ACF\_100 - 105 ( Yatay Hız Bileşeni )



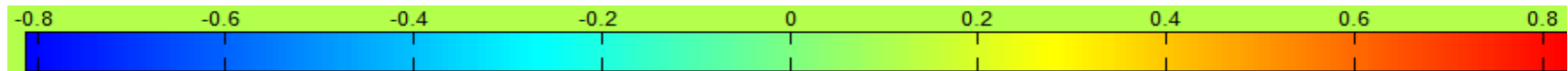
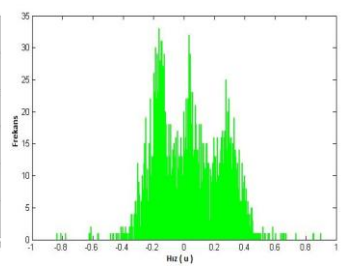
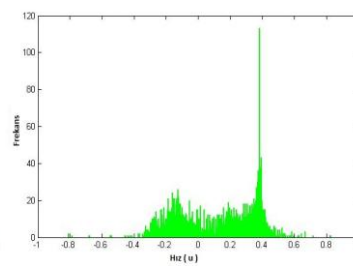
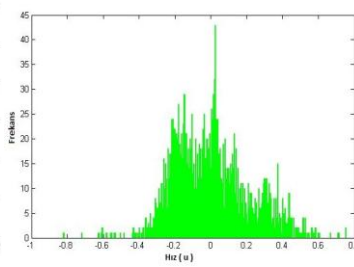
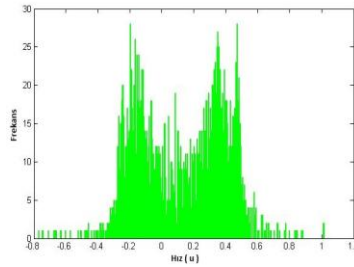
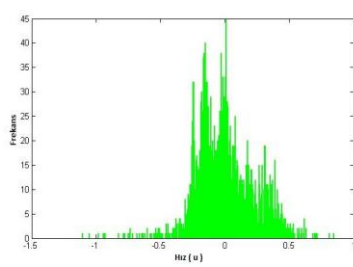
100 - 101 u

101 - 102 u

102 - 103 u

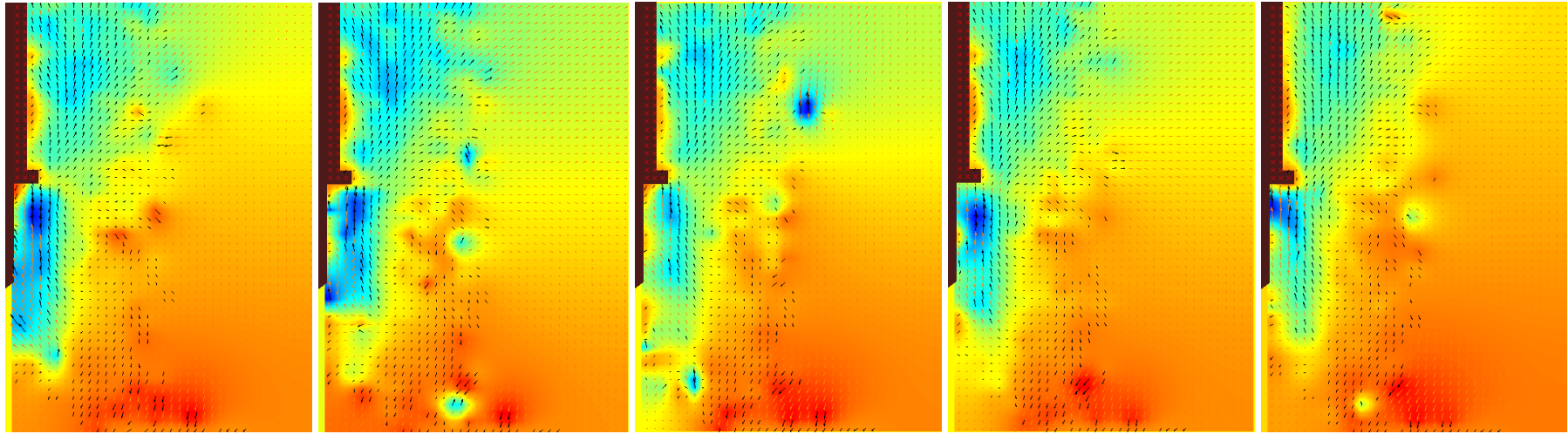
103 - 104 u

104 - 105 u





08\_Po0.1\_Hs6\_Hn15\_Res800x600\_Fps1000\_\_ACF\_100 - 105 ( Düşey Hız Bileşeni )



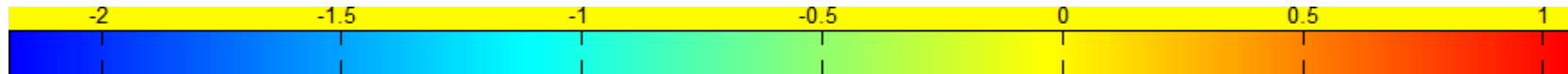
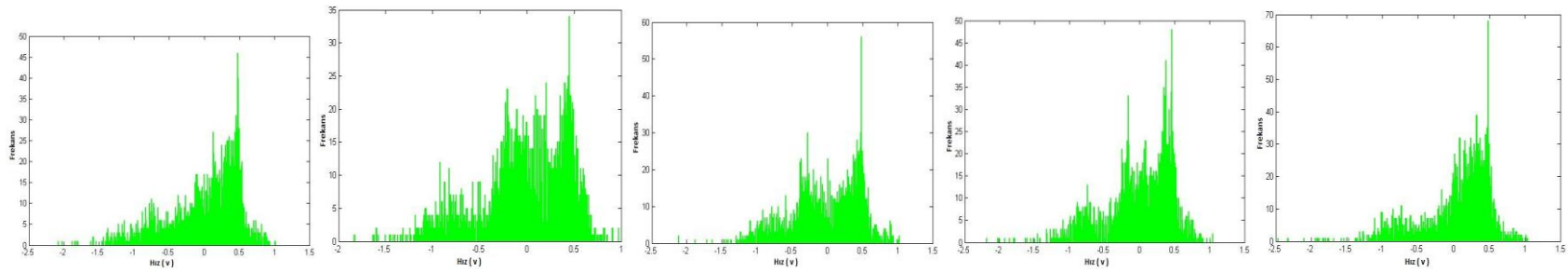
100 - 101 v

101 - 102 v

102 - 103 v

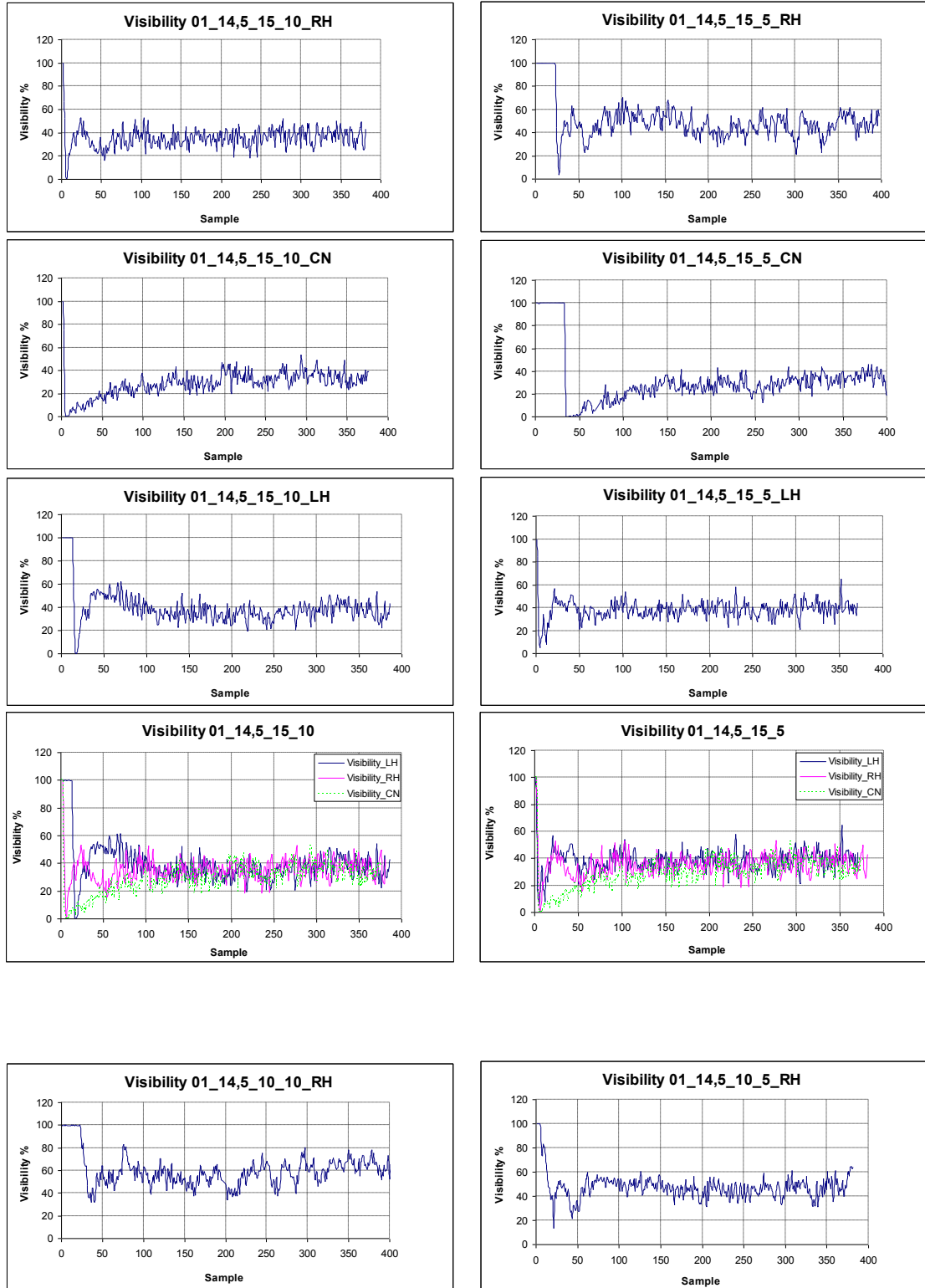
103 - 104 v

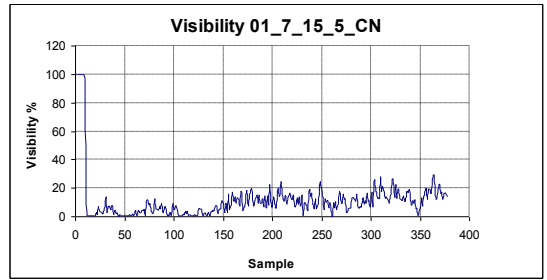
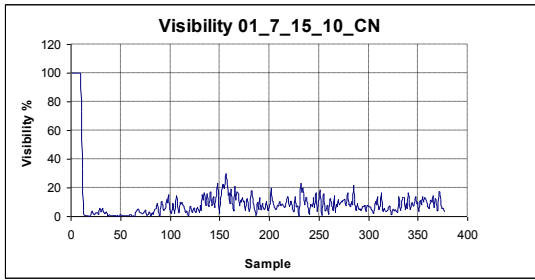
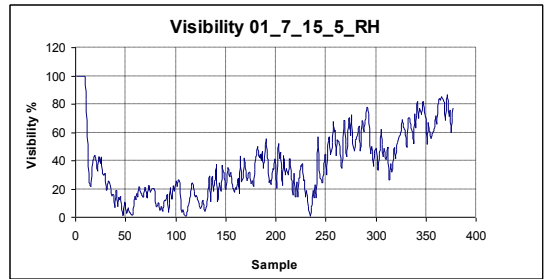
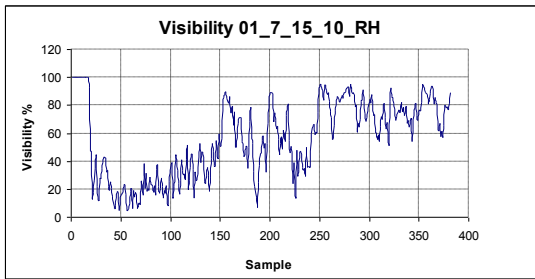
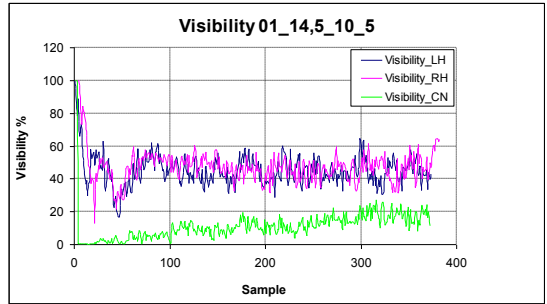
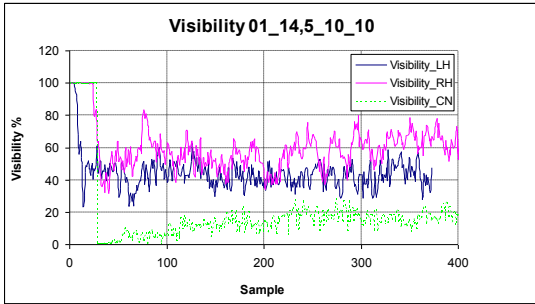
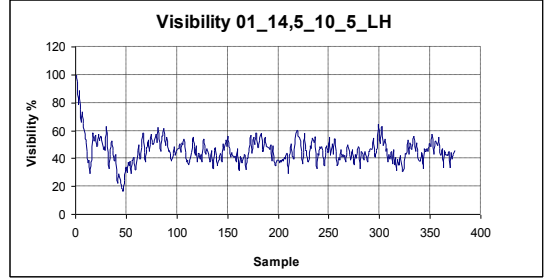
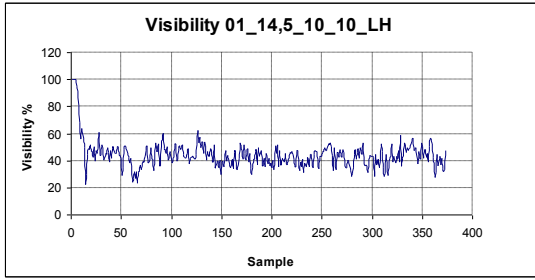
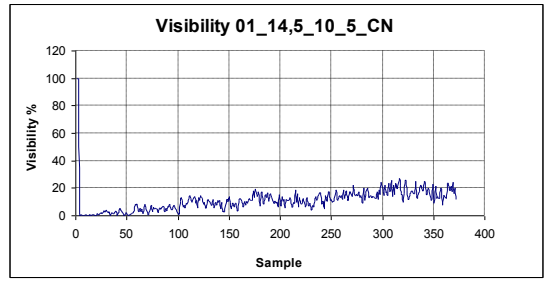
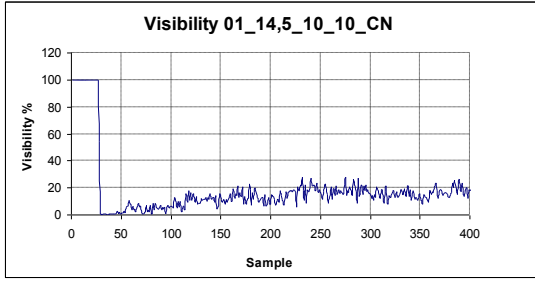
104 - 105 v

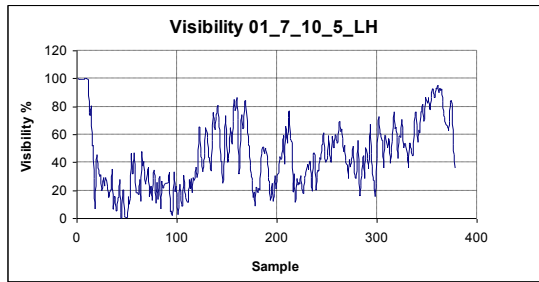
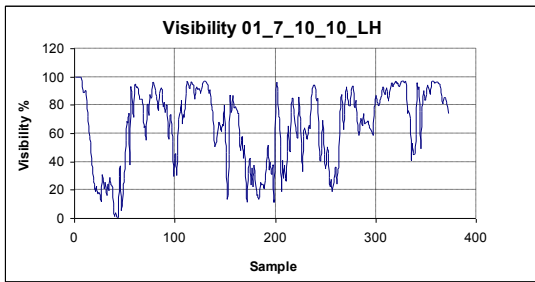
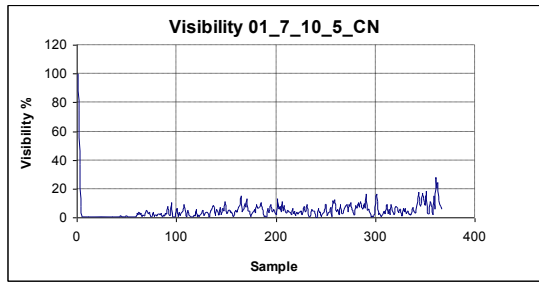
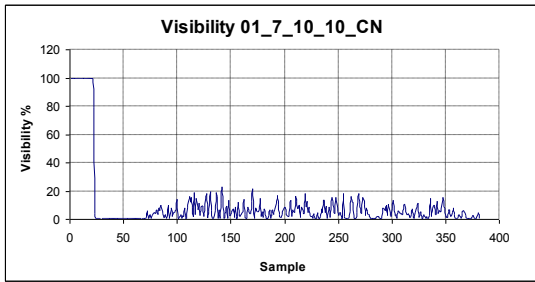
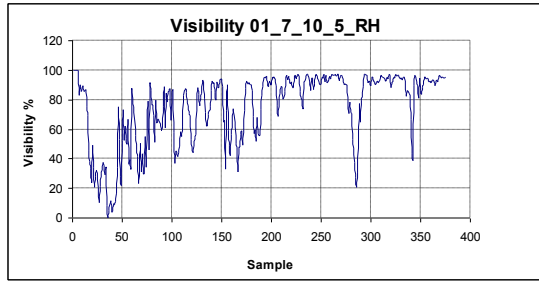
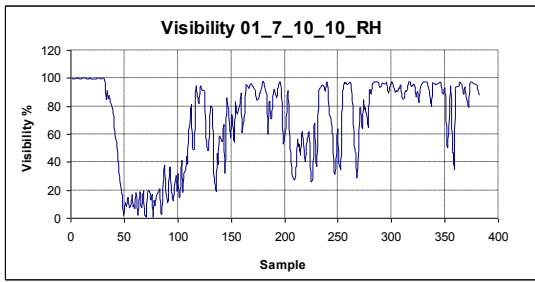
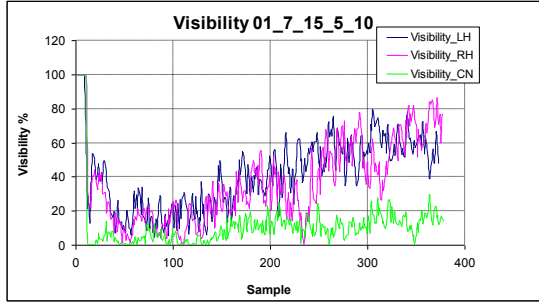
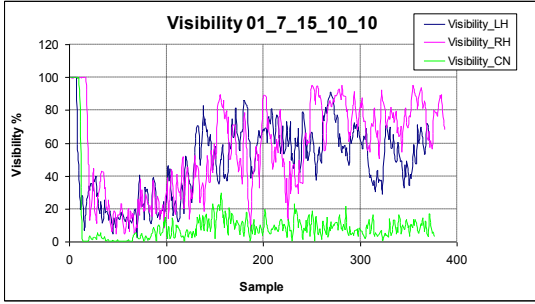
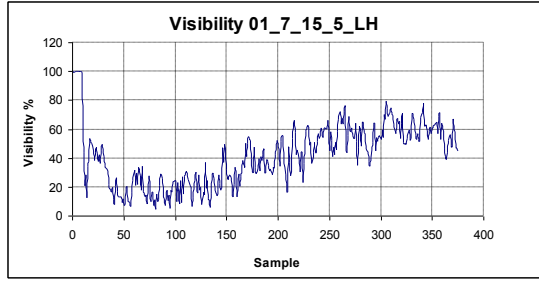
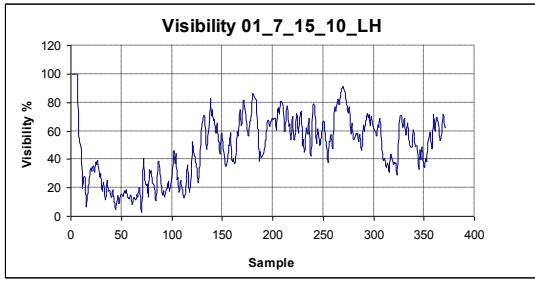


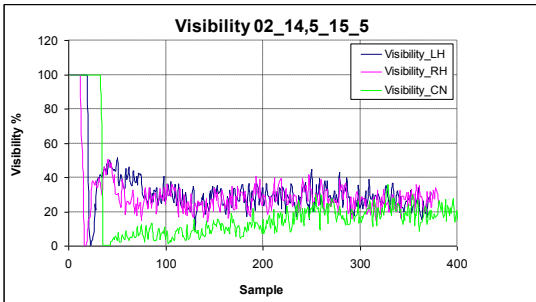
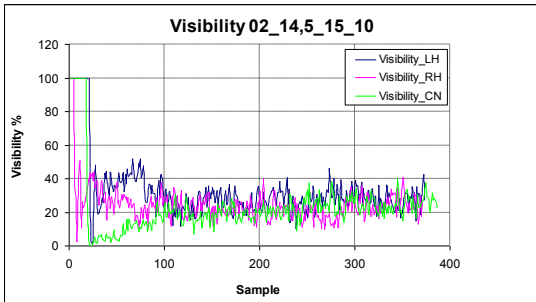
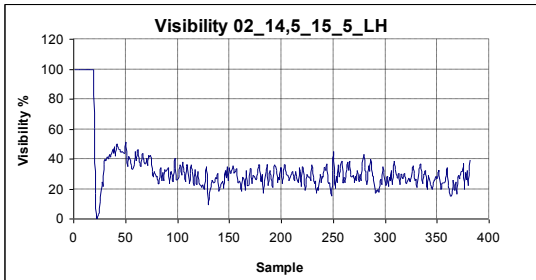
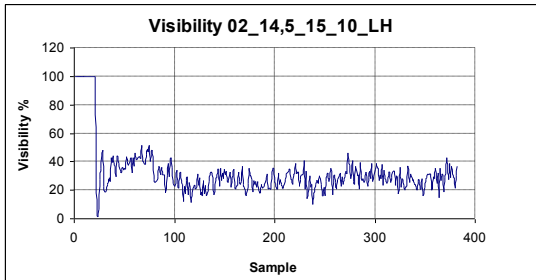
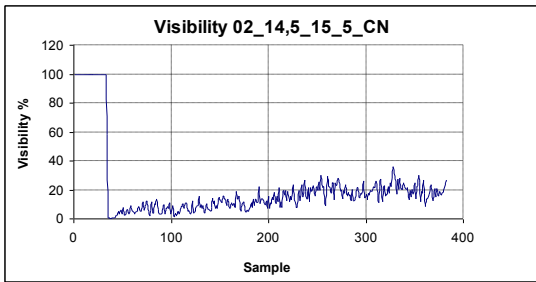
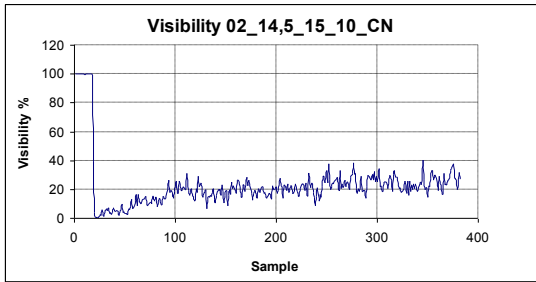
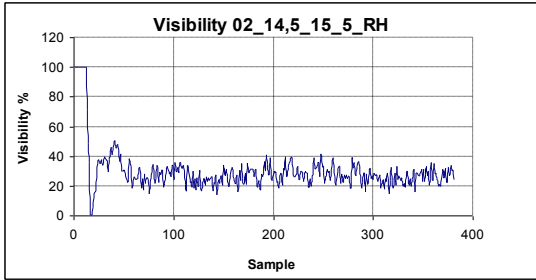
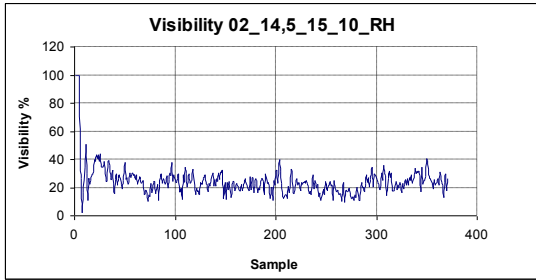
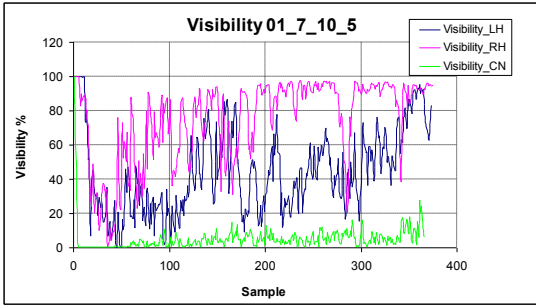
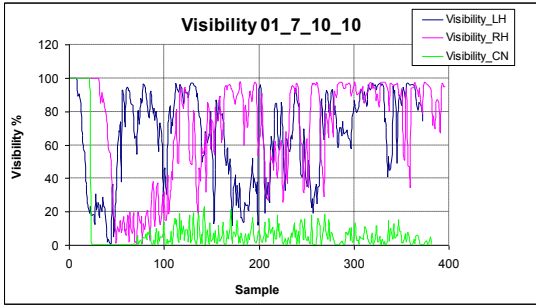
### EK 3

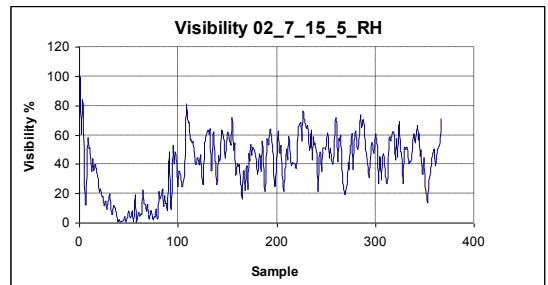
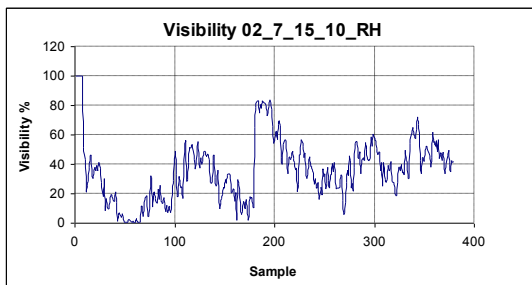
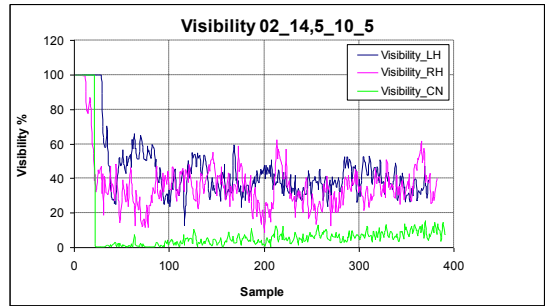
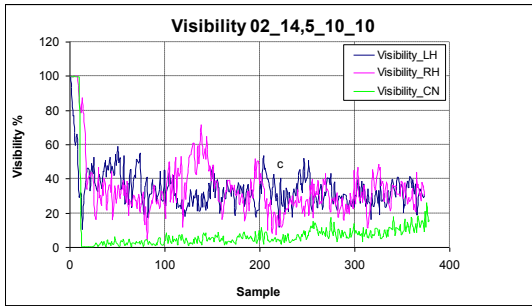
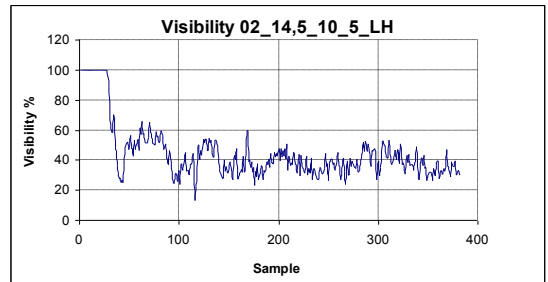
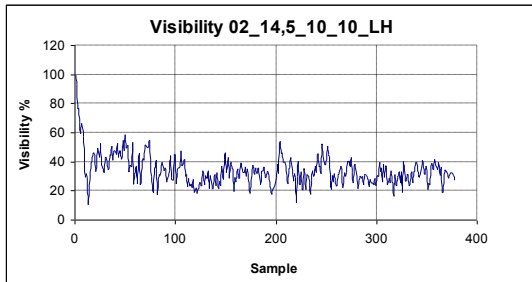
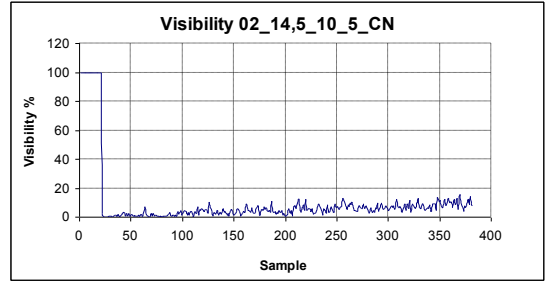
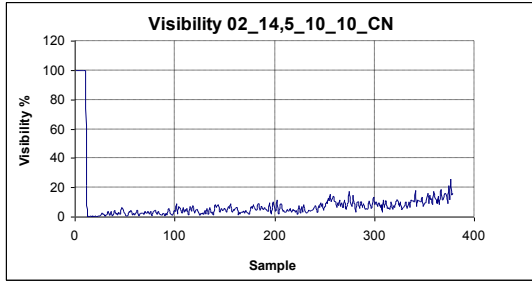
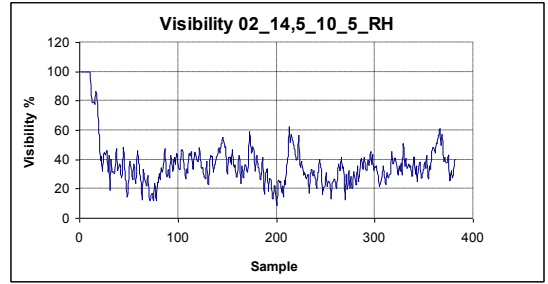
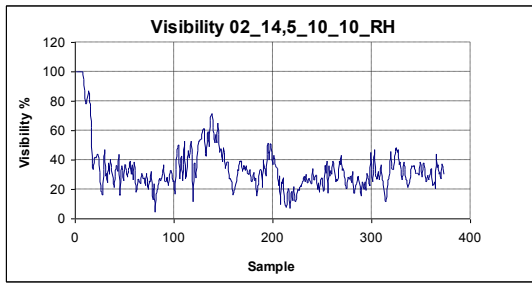
Merkez ve yan pozisyonlarda görünürlük grafikleri.

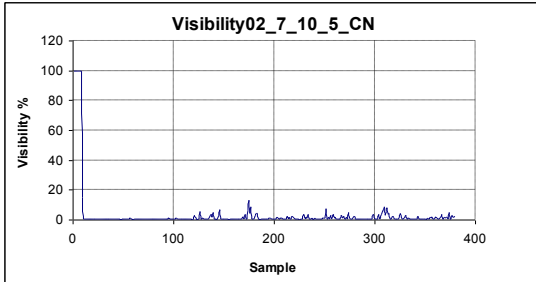
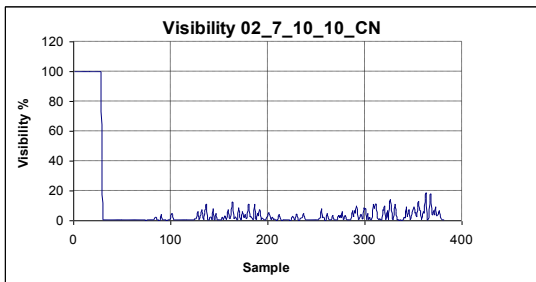
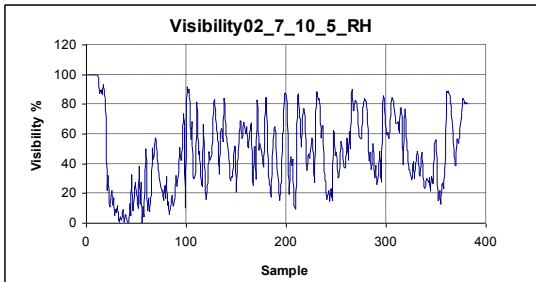
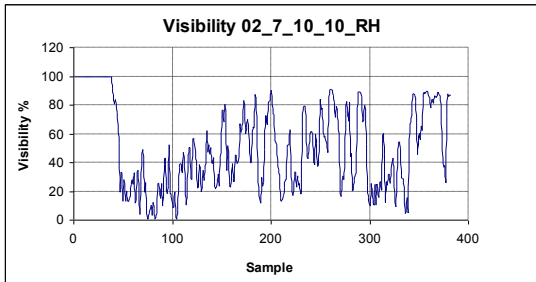
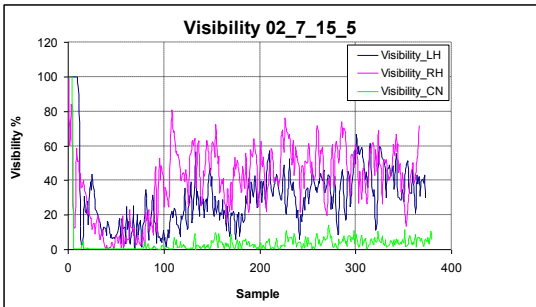
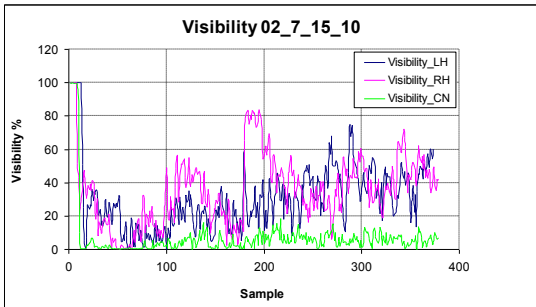
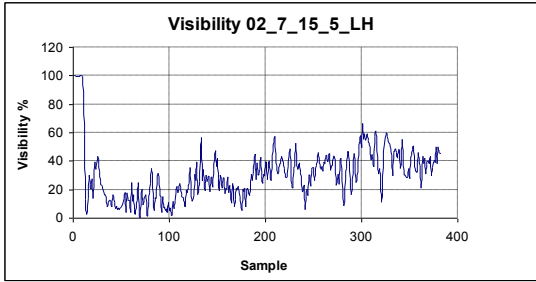
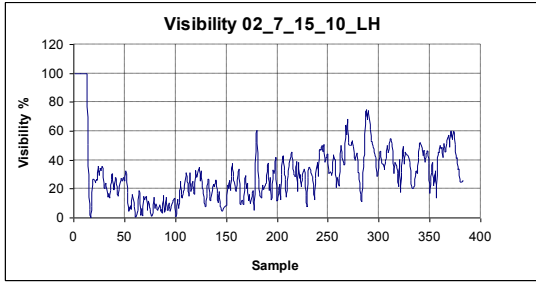
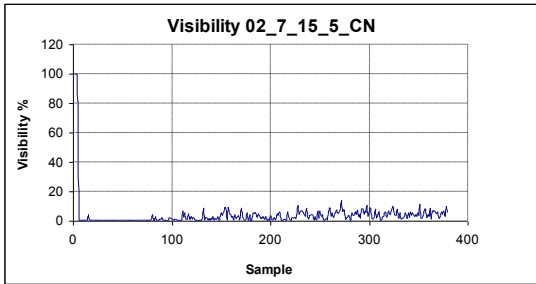
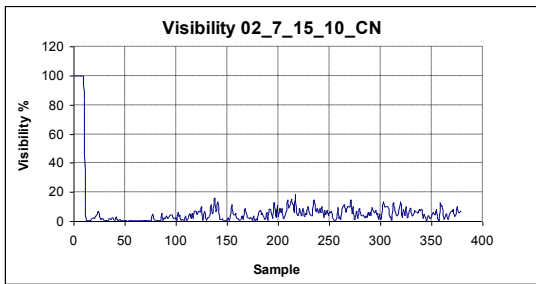


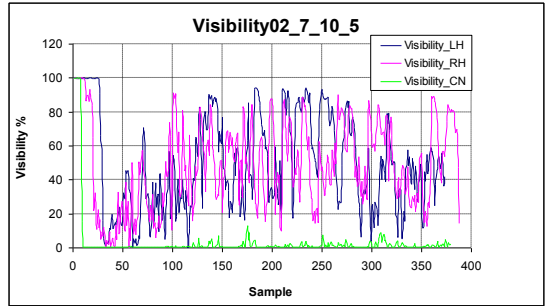
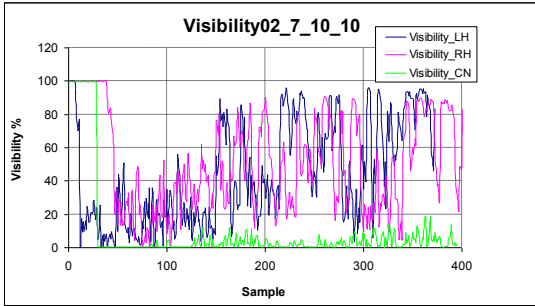
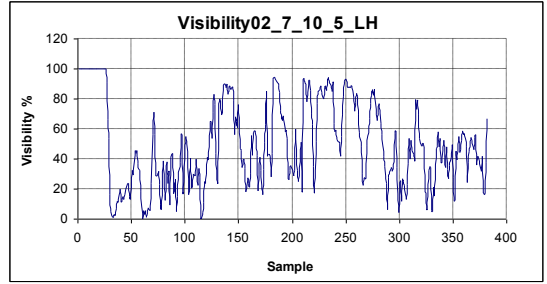
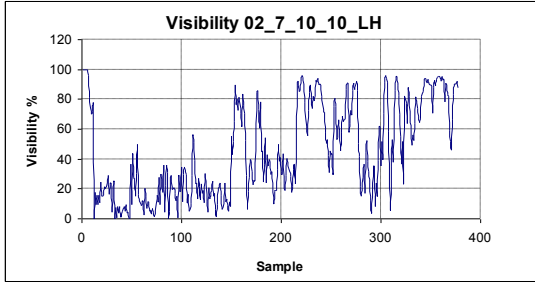














## ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Erman ÇELİK  
Doğum Yeri ve Tarihi : Elazığ / 11. 11. 1986

### Eğitim Durumu ( Kurum ve Yıl )

Lise : Elazığ Anadolu Lisesi 1999 - 2003  
Lisans : Uludağ Üniversitesi 2004 - 2008  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi 2008 - 2011

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl : Tekno Tasarım A. Ş. 2009 - 2010  
Fırat Üniversitesi 2010 - ~

İletişim (e- posta) : ermancelik86@gmail.com

Yayımları :