



T.C.

ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SALINIMLI AKIM ORTAMINDA TABANDAKİ PARÇACIĞIN
HAREKETİNİN İZLENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Özdemir Alperen TAN

Danışman
Doç. Dr. Murat AKSEL

ALANYA
2025

T.C.
ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SALINIMLI AKIM ORTAMINDA TABANDAKİ PARÇACIĞIN
HAREKETİNİN İZLENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Özdemir Alperen TAN

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Program Adı: İnşaat Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Murat AKSEL

ALANYA
(2025)

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmamın Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Özdemir Alperen TAN

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını hazırlarken bana destek olan ve yol gösteren değerli tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Murat AKSEL'e araştırma sürecim boyunca sabırla rehberlik ettiği, bilgi ve deneyimlerini esirgemediği için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez dönemim boyunca deneyimleriyle bana katkıda bulunan ve beni motive eden, dürüstlüğü, yardımseverliği ve kişiliğiyle bana örnek olan hem ağabeyim hem de hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan ATAŞ'a teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca bu tez çalışmamda ricalarımı kırmayan, bilgi birikimleriyle yol gösteren, tezin ilerleyişini kolaylaştıran Sayın Doç. Dr. Mehmet DİKİCİ'ye ve Sayın Prof. Dr. Oral YAĞCI'ya ve Sayın Prof. Dr. Mustafa Ümit GÜMÜŞAY'a ve değerli jüri üyesi Doç. Dr. Rıfat TÜR'e saygılarımla teşekkür ediyorum.

Tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, bu süreçte yaşadığım olumsuz çevresel faktörlere karşı beni koruyup destekleyerek bu zorlu süreci başarı ile bitirmeme vesile olan saygıdeğer babam Mehmet Kenan TAN'a ve kıymetli annem Ayla TAN'a ve değerli arkadaşım Cennet SOLKOL'a saygılarımı sunuyor, sonsuz teşekkür ediyorum.

Özdemir Alperen TAN

ÖZET

SALINIMLI AKIM ORTAMINDA TABANDAKİ PARÇACIĞIN HAREKETİNİN İZLENMESİ

Özdemir Alperen TAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,

Temmuz, 2025 (49 Sayfa)

Günümüzde çevresel kirlilik düzeylerinin giderek artmasıyla birlikte, sucul ortamlardaki plastik atıkların hareketlerinin anlaşılmasına yönelik araştırmalar, çevre ve su mühendisliği alanında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Farklı boyutlardaki plastik parçacıkların akım içerisindeki davranışlarının incelenmesi, söz konusu maddelerin yayılım mekanizmalarının belirlenmesi açısından kritik bir gereklilik hâline gelmiştir. Bu doğrultuda, salınlı akım koşullarında parçacık hareketlerinin izlenmesi hem uygulamalı hem de kuramsal birçok çalışmaya temel oluşturabilecek bir konu olarak öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, salınlı akım etkisi altında tabanda bulunan bir plastik parçacığın davranışı deneysel yöntemlerle incelenerek analiz edilmiştir. Çalışmada ultraviyole aydınlatma koşulları altında çift kamera sistemiyle elde edilen görüntülerden yararlanılmış ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak parçacığın x, y ve z eksenlerindeki konum bilgisi elde edilmiştir. Ayrıca parçacık yüzeyine uygulanan yansıtıcı boya, görüntü ayırıştırma işleminin daha hassas bir şekilde yapılmasını sağlamış ve veri doğruluğunu artırmıştır.

Deney düzeneği, salınlı akım koşullarının yapay bir şekilde oluşturulduğu ve bir sarsma tablası aracılığıyla sağlandığı bir sistemden meydana gelmektedir. Bu sistem kapsamında ivme ölçümleri gerçekleştirilmiş, zamanla değişen verilerin grafiksel analizi yapılmış ve hem akım koşulları hem de parçacığın hareketine ilişkin sonuçlar bir arada değerlendirilmiştir. Böylece, parçacığın bulunduğu ortamdaki akım koşulları ile parçacığa özgü davranış biçimlerinin aynı anda incelenebilmesi mümkün olmuştur.

Çalışmanın özgün yönü, deneysel ölçümlerle görüntü işleme tekniklerinin entegre edilerek salınlı akım ortamında parçacık davranışlarının yüksek doğrulukla incelenmesine imkân tanınmasıdır. Bu kapsamda elde edilen verilerin, sucul ortamlarda plastik kirliliği sorununa yönelik modelleme çalışmalarına katkı sunması ve mühendislik çözümlerinin geliştirilmesine temel oluşturması beklenmektedir.

Anahtar Sözcükler: Parçacık hareketi, Salınlı akım, Çevresel kirlilik, Görüntü işleme, Plastik kirliliği



ABSTRACT

MONITORING THE MOTION OF A PARTICLE AT THE BED IN AN OSCILLATORY FLOW ENVIRONMENT

Özdemir Alperen TAN

Department of Civil Engineering

Graduate School of Alanya Alaaddin Keykubat University,

July, 2025

With the increasing levels of environmental pollution, research focusing on understanding the movement of plastic debris in aquatic environments has become increasingly significant in the fields of environmental and water engineering. Investigating the behavior of plastic particles of different sizes under flow conditions is critical for determining the dispersion mechanisms of these materials. In this context, monitoring particle motion under oscillatory flow conditions is regarded as a fundamental topic that can support many applied and theoretical studies.

In this thesis, the behavior of a plastic particle settled on the bed under the influence of oscillatory flow was investigated and analyzed using experimental methods. Images were captured using a dual-camera system under ultraviolet lighting conditions, and image processing techniques were employed to obtain the particle's positional data along the x, y, and z axes. Furthermore, the application of reflective paint on the particle surface allowed for more accurate image segmentation, improving data precision.

The experimental setup consisted of a system in which artificial oscillatory flow conditions were generated by means of a shaking table. Within this system, acceleration measurements were carried out, time-dependent data were graphically analyzed, and the flow conditions and the particle's motion were assessed simultaneously. This setup enabled the concurrent examination of both the flow environment and particle-specific behaviors.

The novelty of this study lies in the integration of experimental measurements with image processing techniques to achieve a highly accurate analysis of particle behavior under oscillatory flow conditions. The data obtained are expected to contribute

to modeling studies on plastic pollution in aquatic environments and to support the development of engineering solutions to address this issue.

Keywords: Particle motion, Oscillatory flow, Environmental pollution, Image processing, Plastic pollution



İÇİNDEKİLER

İÇ KAPAK SAYFASI	
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	i
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	ii
ÖNSÖZ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çevresel Kirlilik ve Sucul Ekosistemler	1
1.2. Plastik Kirliliği ve Yayılım Yolları	1
1.3. Dünyada ve Türkiye’ de Plastik Kirliliği	2
1.4. Salınlı Akımda Parçacık Hareketi	3
1.5. Akışkan İçinde Parçacık Hareketine Yönelik Fiziksel Yaklaşım	4
1.6. Tezin Amacı ve Önemi	5
2. LİTERATÜR	7
2.1. Salınlı Akım ve Dinamik Davranış	7
2.2. Salınlı Akım Ortamında Parçacığa Etki Eden Kuvvetler	8
2.3. Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle Salınlı Akım Davranışının İncelenmesi	9
2.4. Mikroplastik Parçacıkların Akışkan Ortamda Dinamik Davranışı	10
2.5. Salınlı Akım Altında Parçacık İzleme Yöntemleri	11
2.6. Simülasyon Yöntemleri ile Parçacık Hareketinin İncelenmesi	12
2.7. Salınlı Akım Ortamında Parçacık Hareketine Yönelik Güncel Yaklaşımlar ..	14
3. YÖNTEM	16
3.1. Deney Düzenineğinin Hazırlanması	16
3.1.1. Kullanılan tank	16
3.1.2. Ultrasonik mesafe sensörü	16
3.1.3. İvme ölçer	17
3.1.4. Step motor	17
3.1.5. Step motor sürücüsü	18

3.1.6. Arduino kart	19
3.2. Sarsma Tablası Çalıştırma Adımları	19
3.3. Görüntü İşleme ile Parçacık Takibi	20
3.4. Kamera ile Görüntüleme ve Video Kayıt Süreci	21
4. BULGULAR.....	24
4.1. Deneme 1	24
4.2. Deneme 2	26
4.3. Deneme 3	27
4.4. Deneme 4	29
4.5. Deneme 5	30
4.6. Deneme 6	32
4.7. Deneme 7	34
4.8. Deneme 8	36
4.9. Deneme 9	37
4.10. Deneme10	39
4.11. Deneme 11	41
4.12. Deneme 12	43
5. TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER.....	46
6. KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	49

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 2 Salınımlı Akım Etkisinde Parçacıkların Zamanla Dağılımı.....	13
Şekil 3. 1 Kullanılan Tank.....	16
Şekil 3. 2 Ultrasonik Mesafe Ölçer	17
Şekil 3. 3 İvmeölçer.....	17
Şekil 3. 4 Step Motor.....	18
Şekil 3. 5 Step Motor Sürücüsü	18
Şekil 3. 6 Arduino Kart.....	19
Şekil 3. 7 Sarsma Tablası	20
Şekil 4. 1 Deneme 1 Parçacığın Deplasman-Zaman Grafiği.....	25
Şekil 4. 2 Deneme 1 İçin Parçacığın İzlediği Yol	25
Şekil 4. 3 Deneme 1 İçin Parçacığın Başlangıç ve Bitiş Konumları	26
Şekil 4. 4 Deneme 2 İçin Parçacığın Deplasman-Zaman Grafiği.....	26
Şekil 4. 5 Deneme 2 İçin Parçacığın İzlediği Yol	27
Şekil 4. 6 Deneme 2 İçin Parçacığın Başlangıç ve Bitiş Konumları	27
Şekil 4. 7 Deneme 3 İçin Parçacığın Deplasman-Zaman Grafiği.....	28
Şekil 4. 8 Deneme 3 İçin Parçacığın İzlediği Yol	28
Şekil 4. 9 Deneme 3 İçin Parçacığın Başlangıç ve Bitiş Konumları	29
Şekil 4. 10 Deneme 4 İçin Parçacığın Deplasman-Zaman Grafiği.....	29
Şekil 4. 11 Deneme 4 İçin Parçacığın İzlediği Yol	30
Şekil 4. 12 Deneme 4 İçin Parçacığın Başlangıç ve Bitiş Konumları	30
Şekil 4. 13 Deneme 5 İçin Parçacığın Deplasman-Zaman Grafiği.....	31
Şekil 4. 14 Deneme 5 İçin Parçacığın İzlediği Yol	32
Şekil 4. 15 Deneme 5 İçin Parçacığın Başlangıç ve Bitiş Konumları	32
Şekil 4. 16 Deneme 6 İçin Deplasman-Zaman Grafiği	33
Şekil 4. 17 Deneme 6 İçin Parçacığın İzlediği Yol	33
Şekil 4. 18 Deneme 6 İçin Parçacığın Başlangıç ve Bitiş Konumları	34
Şekil 4. 19 Deneme 7 Parçacığın Deplasman-Zaman Grafiği.....	35
Şekil 4. 20 Deneme 7 İçin Parçacığın İzlediği Yol	35
Şekil 4. 21 Deneme 7 İçin Parçacığın Başlangıç ve Bitiş Konumları	36
Şekil 4. 22 Deneme 8 İçin Parçacığın Deplasman-Zaman Grafiği.....	37
Şekil 4. 23 Deneme 8 İçin Parçacığın İzlediği Yol	37
Şekil 4. 24 Deneme 8 İçin Parçacığın Başlangıç ve Bitiş Konumları	37

Şekil 4. 25 Deneme 9 İçin Parçacığın Deplasman-Zaman Grafiği.....	38
Şekil 4. 26 Deneme 9 Parçacığın İzlediği Yol.....	38
Şekil 4. 27 Deneme 9 Parçacığın Başlangıç ve Bitiş Konumları	39
Şekil 4. 28 Deneme 10 İçin Parçacığın Deplasman-Zaman Grafiği.....	40
Şekil 4. 29 Deneme 10 İçin Parçacığın İzlediği Yol	40
Şekil 4. 30 Deneme 10 İçin Parçacığın Başlangıç ve Bitiş Konumları	41
Şekil 4. 31 Deneme 11 İçin Parçacığın Deplasman-Zaman Grafiği.....	42
Şekil 4. 32 Deneme 11 İçin Parçacığın İzlediği Yol	42
Şekil 4. 33 Deneme 11 İçin Parçacığın Başlangıç ve Bitiş Konumları	43
Şekil 4. 34 Deneme 12 İçin Parçacığın Deplasman-Zaman Verileri.....	43
Şekil 4. 35 Deneme 12 İçin Parçacığın İzlediği Yol	44
Şekil 4. 36 Deneme 12 İçin Parçacığın Başlangıç ve Bitiş Konumları	44

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. 1 Türkiye’de Bazı Bölgelerde Gözlemlenen Mikroplastik Verileri ve Sebepleri (Güven Vd., 2017)	3
Tablo 2. 1 Mikroplastik Türlerinin Yoğunluklarına Göre Su Ortamındaki Davranışları ve Dalga Etkisi Altındaki Hareket Biçimleri.....	11
Tablo 4. 1 12 Farklı Deneme İçin Başlangıç ve Bitiş Konumları	45



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

U	Akış hızı (m/s)
Re	Reynold sayısı
f	Salınım frekansı (Hz)
g	Yerçekimi ivmesi (9,81 m/s ²)
P	Basınç

Kısaltmalar

HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
MP	Mikroplastik
AI	Yapay zekâ

1. GİRİŞ

1.1. Çevresel Kirlilik ve Sucul Ekosistemler

Çevresel kirlilik, sanayi devriminden bu yana artan üretim ve tüketim alışkanlıklarının doğal ekosistemler üzerinde oluşturduğu baskının bir sonucu olarak, günümüzde tüm dünyanın ortak sorunu hâline gelmiştir. Bu kirlilik, yalnızca kara ve hava ortamlarını değil, aynı zamanda sucul ekosistemleri de derinlemesine etkilemektedir. Akarsu, göl, kıyı ve deniz gibi sucul ortamlar gerek evsel ve endüstriyel atıklar gerekse tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan kirlenici maddeler nedeniyle giderek daha fazla kirlenmektedir. Bu durum, suyun doğal dengesini bozarak hem sucul canlıların yaşam koşullarını hem de ekosistemdeki enerji ve madde döngüsünü olumsuz yönde değiştirmektedir.

Sucul ekosistemler, biyoçeşitliliğin önemli bir parçası olmakla birlikte, insan topluluklarının sağlıklı su kaynaklarına erişimi ve ekonomik faaliyetlerin sürdürülebilirliği açısından da hayati rol oynamaktadır. Ancak çevresel kirlilik nedeniyle bu ortamların verimliliği azalmakta, bazı türler habitat kaybına uğramakta ve sucul canlıların popülasyonları tehdit altında kalmaktadır. Ayrıca, kirliliğe bağlı olarak sucul ortamlarda meydana gelen fizikokimyasal değişimler, bu ekosistemlerin kendi kendilerini arındırma kapasitesini zayıflatmakta, dolayısıyla uzun vadeli ekolojik dengeleri bozmaktadır.

Bu nedenlerle, sucul ekosistemlerin korunması ve iyileştirilmesi, yalnızca doğanın sürdürülebilirliği için değil, aynı zamanda insan sağlığının, gıda güvenliğinin ve sosyoekonomik istikrarın güvence altına alınabilmesi için önemli bir gereklilik hâline gelmiştir. Bu bağlamda, çevresel kirliliğin kaynaklarının belirlenmesi, yayılma yollarının anlaşılması ve kontrolüne yönelik etkin stratejilerin geliştirilmesi kritik önemdedir.

1.2. Plastik Kirliliği ve Yayılım Yolları

Son yıllarda plastik atıkların çevreye kontrolsüz şekilde karışması, sucul ekosistemlerde ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Plastik malzemelerin dayanıklılığı ve uzun ömürlü olması nedeniyle, doğaya bırakıldıklarında yüzyıllar boyunca bozulmadan kalabilmektedir. Bu atıkların bir kısmı yüzeyde görünür boyutlarda kalırken, önemli bir

bölümü zamanla rüzgâr, akıntı, dalga ve ultraviyole ışınlarının etkisiyle ufalanarak mikroplastiklere dönüşmektedir. Mikroplastikler, çok küçük boyutları sayesinde geniş alanlara yayılabilmekte, sucul canlılar tarafından yanlışlıkla tüketilerek besin zincirine dâhil olmaktadır.

Plastik kirliliğinin yayılımı, yalnızca yerel kaynaklarla sınırlı olmayıp uzun mesafeli taşınma mekanizmalarını da içermektedir. Karasal kaynaklardan akarsular aracılığıyla taşınan atıklar göllere ve denizlere ulaşırken, kıyı akıntıları ve dalga hareketleri plastik parçacıkların açık okyanuslara kadar ulaşmasını sağlamaktadır. Ayrıca, atmosferik taşınma ve rüzgâr etkisiyle çok küçük boyutlu plastik partiküller farklı kıtalara dahi yayılabilmektedir. Bu karmaşık yayılım mekanizmalarının bir sonucu olarak, plastik kirliliği yerel bir problem olmaktan çıkmış, küresel bir çevre sorununa dönüşmüştür.

Bu bağlamda, plastik atıkların sucul ortamlardaki taşınma süreçlerinin detaylı şekilde anlaşılması hem kirliliğin kaynaklarının kontrol edilmesine hem de ekosistem üzerindeki etkilerin azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Bu da çevresel yönetim politikalarının oluşturulmasında ve uygulanmasında bilimsel verilerin önemli bir temel teşkil etmesini gerektirmektedir.

1.3. Dünya’da ve Türkiye’de Plastik Kirliliği

Plastik kirliliği, son yıllarda dünyanın farklı bölgelerinde giderek artan bir çevre sorunu hâline gelmiştir. Küresel ölçekte incelendiğinde, okyanuslarda biriken plastik atıkların oluşturduğu geniş çaplı kirlilik alanları en dikkat çekici örneklerden biridir. Özellikle Kuzey Pasifik’teki Büyük Okyanus Çöp Alanı, yüzen mikro ve makro plastik parçaların birikmesiyle meydana gelen ve milyonlarca ton atığı barındıran bir kirlilik odağıdır. Bu geniş alanda toplanan plastik atıklar, deniz kuşlarından balıklara kadar birçok canlının yaşamını tehdit etmekte ve gıda zinciri yoluyla insan sağlığını dolaylı biçimde riske sokmaktadır. Bunun yanı sıra, Güneydoğu Asya’daki bazı büyük nehirlerin her yıl okyanuslara taşıdığı tonlarca plastik atık, kıyı bölgelerinde ciddi ekolojik ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır.

Türkiye’de ise plastik kirliliği hem kıyı hem de iç su ekosistemlerinde giderek belirginleşen bir problem hâline gelmiştir. Marmara Denizi’nde yapılan çalışmalarda su

yüzeyinden tabana kadar geniş bir dikey profilde plastik parçacıklara rastlanmıştır; benzer şekilde Karadeniz ve Ege kıyılarında da önemli miktarda atığın biriktiği gözlemlenmiştir.

Örneğin, İstanbul Boğazı çevresindeki sahillerde sık sık görülen plastik ambalaj, şişe ve poşet atıkları, kentsel alanlardan denize ulaşan kirliliğin tipik örneklerindedir (Topçu vd., 2013). Ayrıca, Sakarya, Gediz ve Seyhan gibi akarsularda yürütülen örnekleme çalışmaları, tarımsal ve kentsel kaynaklardan taşınan mikroplastik parçacıkların akarsu yataklarında ve deltalarında birikerek bölgesel ekosistem sağlığını tehdit ettiğini göstermektedir (Güven vd., 2017).

Tablo 1. 1 Türkiye de bazı bölgelerde gözlemlenen mikroplastik verileri ve sebepleri (Güven vd., 2017)

Bölge/Su Kütlesi	Mikroplastik (adet/m³)	Kirlilik Kaynakları
Marmara Denizi	10.5	Kentsel, Endüstriyel
Karadeniz Kıyıları	7.8	Turizm, Balıkçılık
Ege Kıyıları	8.2	Kentsel Atıklar
Akdeniz Kıyıları	9.1	Turizm, Gemi Trafığı
Sakarya Nehri	0.15	Tarımsal, Eysel
Gediz Nehri	0.12	Tarımsal, Endüstriyel
Seyhan Nehri	0.1	Tarımsal, Kentsel

Bu örnekler, plastik kirliliğinin yerel, ulusal ve küresel ölçekte ortak bir tehdit oluşturduğunu açık şekilde vurgulamaktadır. Plastik atıkların uzun ömürlü olması ve küçük parçalara ayrılarak besin zincirine katılabilmesi, sorunun çözümünü güçleştirirken; atık yönetiminin iyileştirilmesi, kirliliğin önlenmesi ve bilimsel araştırmalarla verilerin desteklenmesi hayati önem taşımaktadır. Bu kapsamda, plastik kirliliğiyle mücadele için kapsamlı politikaların geliştirilmesi ve uygulanması hem küresel hem de yerel düzeyde sürdürülebilir bir çevre yönetiminin temel gerekliliklerinden biri hâline gelmiştir.

1.4. Salımlı Akımda Parçacık Hareketi

Plastik parçacıkların sucul ortamlardaki hareketi, akım koşullarının karakterine göre önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Özellikle sabit akımların aksine, doğal su ortamlarının önemli bir kısmında akış koşulları değişkenlik gösterir; akıntılar, dalgalar ve gelgit hareketleri, akım hızında ve yönünde periyodik değişimlere neden olur. Bu tür salımlı akım koşulları altında plastik parçacıkların taşınma, çökme ya da askıda kalma

davranışlarını anlamak, sucul ekosistemlerdeki kirliliğin yayılma dinamiklerini belirlemek için temel bir gereklilik hâline gelmiştir.

Salınlı akımların etkisiyle plastik parçacıklar taban malzemesiyle etkileşime girerek birikme veya yeniden hareketlenme eğiliminde bulunabilir. Bu durum, parçacıkların akış yönüne paralel ve dik hareketlerinin aynı anda gerçekleşmesine neden olurken, yüzey pürüzlülüğü, akımın periyodu ve parçacık boyutu gibi parametreler bu davranışı önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Dolayısıyla, salınlı akım ortamında yürütülen deneysel ve sayısal araştırmalar, plastik kirliliğinin su ortamındaki taşınma mekanizmalarını daha iyi kavramamızı sağlamaktadır. Bu bilgilerin elde edilmesi, yalnızca mühendislik uygulamaları için değil, aynı zamanda plastik kirliliğiyle mücadele politikalarının geliştirilmesinde de önemli bir veri kaynağı oluşturur. Böylece, plastik parçacıkların hangi koşullarda daha fazla biriktiği, hangi bölgelerde yoğunlaştığı ve hangi yollarla yayıldığı hakkında güvenilir öngörüler yapılabilir. Sonuç olarak, salınlı akım koşulları altındaki plastik parçacık hareketlerinin incelenmesi hem çevresel risk değerlendirmesi hem de sürdürülebilir su yönetimi uygulamaları için önemli bir araştırma alanıdır.

1.5. Akışkan İçinde Parçacık Hareketine Yönelik Fiziksel Yaklaşım

Akışkan ortam içerisinde bulunan bir parçacığın hareketi; parçacığın fiziksel özellikleri ile akışkanın hız dağılımı, viskozitesi ve yoğunluğu arasındaki etkileşim sonucunda şekillenmektedir. Parçacık fiziği kapsamında, bu hareketler Newton mekaniği ve akışkanlar mekaniği ilkeleriyle birlikte değerlendirilir. Özellikle salınlı akım ortamlarında, parçacığın maruz kaldığı kuvvetler sürekli yön ve büyüklük değiştirerek hareketin karmaşık hâle gelmesine neden olur.

Parçacığın hareket denklemi genel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$m \cdot a(t) = \sum F(t) \quad (1.1)$$

Burada, m parçacığın kütlesi (kg), $a(t)$ ivmesi (m/s^2), $\sum F(t)$ ise zamana bağlı toplam kuvvetlerin bileşkesidir. Bu toplam kuvvetler; sürüklenme kuvveti, kaldırma kuvveti, ağırlık, taşıma kuvveti, ek kütle kuvveti ve taban ile olan sürtünme kuvvetini kapsar.

Parçacığın akım içindeki davranışını etkileyen temel parametrelerden biri Reynolds sayısı (Re)'dir:

$$Re = (P \cdot v \cdot d) / \mu \quad (1.2)$$

- P : Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)
- v : Akışkanın parçacığa göre göreceli hızı (m/s)
- d : Parçacık çapı (m)
- μ : Akışkanın dinamik viskozitesi (Pa.s)

Düşük Reynolds sayılarına sahip ortamda ($Re < 1$), parçacıklar genellikle laminar koşullarda, viskoz kuvvetlerin hâkim olduğu şekilde hareket eder. Ancak salınımlı akım ortamlarında, ivmelenme ve yön değiştirme etkileri nedeniyle geçici türbülanslar ve karmaşık hareket paternleri ortaya çıkabilir. Bu durum, özellikle mikroplastiklerin askıda kalma süresi ve tabanla etkileşim süresini doğrudan etkiler.

Ayrıca, parçacığın yoğunluğu ile akışkanın yoğunluğu arasındaki oran da parçacığın hareket biçimini belirleyen önemli bir faktördür. Yoğunluğu akışkandan düşük olan parçacıklar yüzeyde veya askıda kalma eğilimindeyken, yoğunluğu yüksek olanlar tabanda yuvarlanma, kayma veya sıçrama hareketi gösterebilir.

Bu kapsamda yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, parçacık davranışlarının modellenmesi, sucül ortamlardaki kirlilik dağılımının doğru tahmin edilmesi ve mühendislik çözümlerinin geliştirilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

1.6. Tezin Amacı ve Önemi

Son yıllarda sucül ortamlarda plastik kirliliği hem ekolojik sürdürülebilirliği tehdit eden hem de çevresel yönetim açısından çözüm gerektiren kritik bir sorun hâline gelmiştir. Özellikle mikroplastik parçacıkların taşınımı ve dağılımı, parçacığın fiziksel

özellikleri ile çevresindeki akışkanın yapısal karakteristikleri arasındaki etkileşime bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Boyut, yoğunluk ve şekil gibi etmenlerin yanı sıra, akım türü ve akışkanın zamana bağlı değişimleri, parçacık hareketinin dinamik yapısını doğrudan belirlemektedir.

Bu bağlamda, yönü ve hızı zamana göre değişen salınlı akım yapılarının, plastik parçacıkların davranışları üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemek çevresel modelleme çalışmaları için önemli bir katkı sağlamaktadır. Salınlı akım altında, parçacıkların konum ve hareket paternlerinin doğru şekilde izlenmesi, bu tür atıkların sucul sistemlerdeki yayılımını anlamada temel bir adımdır. Ayrıca, bu bilgiler plastik kaynaklı kirliliğin izlenmesi, etkilerinin azaltılması ve bilimsel temelli müdahale stratejilerinin geliştirilmesi açısından da değerlidir.

Bu tez çalışmasının temel amacı, kontrollü bir laboratuvar ortamında oluşturulan salınlı akım koşullarında, tabana yerleştirilen bir plastik parçacığın hareketinin deneysel olarak izlenmesi ve analiz edilmesidir. Çalışmada, görüntü işleme teknikleri kullanılarak parçacığın üç boyutlu konum verileri elde edilmiş; ayrıca akım karakteristiği ivme ölçümleriyle desteklenerek parçacık-akım etkileşimi detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulguların, mikroplastiklerin çevresel dağılımına yönelik ileri düzey modellemelere katkı sunması ve ilerleyen dönemlerde benzer deneysel çalışmalara temel oluşturması amaçlanmaktadır.

2. LİTERATÜR

2.1. Salınımlı Akım ve Dinamik Davranış

Salınımlı akım (sloshing), özellikle sıvı içeren sistemlerde, dışsal kuvvetler ya da ivmeler etkisiyle sıvı yüzeyinde meydana gelen düzensiz dalgalanma ve salınım hareketi olarak tanımlanır. Bu fenomen, ilk olarak gemi mühendisliği bağlamında incelenmiş ve sıvı kargo tanklarındaki serbest yüzey hareketlerinin gemi stabilitesi üzerindeki etkileriyle gündeme gelmiştir. Salınımlı akım hareketi, depolama tanklarında, uzay araçlarında, nükleer reaktörlerde ve özellikle deneysel modelleme yapılan sarsma tablalarında yoğun şekilde çalışılmıştır. Özellikle sıvının bulunduğu ortamın sınır koşulları, doluluk oranı, titreşim frekansı ve sarsma genliği, salınımlı akım davranışını belirleyen temel parametreler olarak öne çıkmaktadır.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, bu salınımlı sıvı hareketinin yalnızca taşıyıcı yapılar üzerindeki etkilerini değil, aynı zamanda sıvı içinde bulunan partiküllerin dinamiğini de önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Örneğin, “Water Sloshing in Rectangular Tanks” adlı deneysel çalışmada, dikdörtgen tank içerisinde oluşturulan kontrollü dalgalanmalarla sıvının içindeki hareketin zamanla nasıl şekillendiği gözlemlenmiştir. Bu tür çalışmalar, özellikle düşük viskoziteli sıvılarda sınır tabaka oluşumlarının ve yüzey gerilim kuvvetlerinin parçacık hareketi üzerindeki rolünü de aydınlatmıştır.

Salınımlı akım davranışı, tipik olarak doğrusal olmayan ve karmaşık akış karakteristiklerine sahip olup; sıvının serbest yüzeyinde oluşan kuvvetlerin genliği ve frekansı zamanla değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle, mühendislik uygulamalarında bu hareketin modellenmesi için genellikle deneysel yöntemler (örneğin sarsma tablası testleri) ya da sayısal yöntemler (örneğin SPH ve CFD tabanlı simülasyonlar) kullanılmaktadır. DualSPHysics yazılımıyla yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, sloshing hareketinin etkilerini sayısal ortamda başarılı bir şekilde taklit edebildiğini göstermiştir (Gomez-Gesteira vd., 2012). Bu bağlamda, sloshing hareketinin mikroplastik gibi küçük boyutlu katı partiküller üzerindeki etkilerinin incelenmesi hem teorik hem de uygulamalı açıdan yeni bir araştırma alanı açmaktadır. Mikroplastiklerin su yüzeyine yakın bölgelerde ya da taban yakınlarında nasıl davrandıkları, maruz kaldıkları kuvvetlerin dengesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, salınımlı akım ortamında parçacık hareketini anlamak; kaldırma kuvveti, yerçekimi, sürüklenme ve salınım kaynaklı kuvvetlerin

birleşimini analiz etmeyi zorunlu kılar. Literatürde bu yönde yapılan çalışmalar, çoğunlukla tank içi sloshing davranışlarını ölçekli modellerle incelemekte ve deneysel sonuçları, sayısal modellemelerle karşılaştırarak sistem davranışını doğrulamaya odaklanmaktadır.

2.2. Salınlı Akım Ortamında Parçacığa Etki Eden Kuvvetler

Salınlı akım ortamları, sınırlı hacimli su kütlelerinde periyodik ileri-geri hareketlerin oluştuğu, serbest yüzey dalgalanmaları ve taban yakınındaki türbülans yapılarının bir arada bulunduğu akış rejimleridir. Bu ortamlar, tanklar, dalga havuzları ve dalga etkisine maruz kıyı bölgelerinde gözlenir. Mikroplastikler veya sediment gibi parçacıklar burada farklı kuvvetlerin etkisine maruz kalır. Bu kuvvetlerin büyüklüğü; parçacığın yoğunluğu, şekli, yüzey pürüzlülüğü, akım genliği, frekansı ve ortam viskozitesi gibi faktörlere bağlıdır.

Yerçekimi sürekli aşağı yönde etki ederken, Arşimet prensibine göre sıvı tarafından yukarı yönlü kaldırma kuvveti uygulanır. Yoğunluğu suya yakın parçacıklar bu iki kuvvet arasındaki denge sayesinde süspansiyonda kalabilir. Akış yönünün sürekli değiştiği bu ortamda hidrodinamik sürüklenme kuvveti, akışkan ile parçacık arasındaki görelî hız farkının karesiyle orantılı olarak ortaya çıkar. Akış hızlanma evrelerinde sürüklenme kuvveti maksimuma ulaşırken, yön değişim anlarında azalır.

Parçacık ivmelendiğinde çevresindeki sıvının bir kısmını da hareket ettirir; bu ek kütle kuvveti olarak bilinir ve akım frekansı arttıkça etkisi büyür. Akışkanın sınır tabakasının hız değişimine uyum sağlayamaması ise Basset tarihsel kuvvetini oluşturur; bu etki küçük parçacıklarda ve düşük Reynolds sayılı akımlarda belirgindir. Dalga hareketleri ve serbest yüzey salınımları, basınç gradyanı kuvvetlerini doğurur; taban ve duvarlara yakın bölgelerde sınır tabakası etkisiyle kayma kuvvetleri artar.

Tüm bu kuvvetler birlikte, parçacık hareketinin karmaşık ve doğrusal olmayan bir yapıya sahip olmasına neden olur. Maxey ve Riley (1983) tarafından geliştirilen hareket denklemleri bu kuvvetleri birlikte ele alarak tahmin imkânı sunarken, Faltinsen ve Timokha (2009) bu kuvvetlerin periyodik yön değişimlerinin parçacık dinamiklerine etkilerini deneysel ve teorik olarak ortaya koymuştur. Bu bilgiler hem mikroplastiklerin

çevresel yayılımının modellenmesi hem de deniz yapılarının güvenliği açısından önemlidir.

2.3. Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle Salınlı Akım Davranışının İncelenmesi

Salınlı akım (sloshing) fenomeni, mühendislik uygulamalarında özellikle sıvı taşıyan tank yapılarında meydana gelen dinamik etkileşimler açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, salınlı akım davranışının analizi hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle yapılmaktadır. Özellikle sıvı–katı etkileşimlerinin incelendiği çalışmalarda, parçacıkların bu tür akış rejimlerinde sergilediği davranışları anlamak için çeşitli modelleme teknikleri geliştirilmiştir.

Ettouney vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada, dikdörtgen tank içinde gerçekleşen serbest yüzey salınımlarının deneysel sonuçları değerlendirilmiş ve bu salınımların tank yapısı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Bu deneylerde, sıvının frekansına ve doluluk oranına bağlı olarak oluşan dalga yüksekliklerinin, tank tabanında bulunan mikro cisimler üzerinde ne tür kuvvetler oluşturduğu rapor edilmiştir. Ayrıca salınlı akım sırasında meydana gelen ani yer değiştirmelerin, parçacıkların konumlarını rastgele değiştirdiği tespit edilmiştir.

Sayısal yöntemler açısından bakıldığında, Gómez-Gesteira vd. (2012) tarafından geliştirilen DualSPHysics gibi Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) tabanlı simülasyon programları, salınlı akım etkisinin yüksek doğrulukta modellenmesini sağlamaktadır. Bu tür yöntemler, parçacık-temelli çözüm yaklaşımı sayesinde hem sıvı hem de katı cisimlerin birbirleriyle olan etkileşimlerini zamana bağlı olarak izleyebilmektedir. Özellikle düşük Re sayılarında parçacıkların akış tarafından sürüklenmesi ve kaldırılması gibi etkiler net şekilde modellenebilmektedir.

Ibrahim (2005) tarafından yayımlanan Liquid Sloshing Dynamics adlı kapsamlı kaynakta, sloshing hareketinin diferansiyel denklemlerle tanımlanması, sınır koşullarının belirlenmesi ve titreşim frekanslarının etkisi gibi temel teorik konular ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu kaynakta sunulan doğrusal ve doğrusal olmayan dalga teorileri, tank geometrisinin ve titreşim genliğinin parçacık davranışı üzerindeki etkilerini anlamada temel teşkil etmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, deneysel verilerin doğruluğunu artırmak amacıyla yüksek hızlı kameralar ve görüntü işleme algoritmaları kullanarak parçacık hareketlerinin daha hassas biçimde takip edildiğini göstermektedir. Bu yöntemler, özellikle mikroplastik gibi küçük ve düzensiz şekilli parçacıkların davranışlarını anlamak açısından önemli bir ilerleme sağlamıştır.

2.4. Mikroplastik Parçacıkların Akışkan Ortamda Dinamik Davranışı

Mikroplastik parçacıkların akışkan ortamlar içerisindeki davranışları, özellikle deniz mühendisliği, çevre mühendisliği ve akışkanlar mekaniği alanında son yıllarda yoğun şekilde araştırılmaktadır. Bu parçacıkların hareketi; yoğunluk, şekil, boyut ve akışkanın türü gibi fiziksel parametrelerin yanı sıra, ortamın hareket özellikleriyle de yakından ilişkilidir. Özellikle salınımlı akım ortamlarında, mikroplastiklerin sergilediği devinim, klasik durağan akımlara kıyasla daha karmaşık ve doğrusal olmayan bir karakter gösterir.

Reisser vd. (2015) ve Zhang vd. (2017) tarafından yapılan çalışmalarda, deniz yüzeyinde gözlemlenen mikroplastiklerin dalga etkisi altında hem yatay hem de düşey yönde hareket ettikleri ve zamanla kıyı bölgelerinde birikme eğiliminde oldukları rapor edilmiştir. Bu durum, dalga hareketinin parçacıklar üzerinde etkili bir sürüklenme ve kaldırma kuvveti oluşturduğunu göstermektedir.

Kooi vd. (2018), mikroplastiklerin sudaki yüzmeye, batma veya süzülme davranışlarını incelerken, parçacıkların özgül ağırlığının kritik bir rol oynadığını vurgulamıştır. Düşük yoğunluklu mikroplastikler (örneğin polietilen, polipropilen) yüzeyde kalmaya eğilimli olurken; yoğunluğu daha fazla olan plastik türleri (örneğin PVC) dalgaların etkisiyle daha hızlı bataabilmekte veya tabanda sürüklenmektedir. Bu gözlem, özellikle sarsma tablası gibi deneysel düzeneklerde gözlemlenen tabana yakın hareketlerin nedenini açıklamaktadır.

Ayrıca, Michels vd. (2018) gibi bazı araştırmacılar, parçacıkların yüzey geriliminden, burgaçlı (vorteksli) yapıların etkisinden ve dalga enerjisinden nasıl etkilendiklerini araştırmıştır. Salınımlı akım altında mikroplastiklerin düzensiz (kaotik) davranış sergilemesi, bu kuvvetlerin bir arada ve zamana bağlı olarak değişkenlik göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 2. 1 Mikroplastik türlerinin yoğunluklarına göre su ortamındaki davranışları ve dalga etkisi altındaki hareket biçimleri

Plastik Türü	Yoğunluk (g/cm ³)	Su Üzerindeki Davranışı	Dalga Etkisiyle Hareket
Polietilen (PE)	0.91	Yüzeyde kalır	Yatay dalgalanma
Polipropilen (PP)	0.9	Yüzeyde kalır	Yatay dalgalanma
Polistiren (PS)	1.05	Süzülür	Süzülme ve devinim
Polivinil Klorür (PVC)	1.38	Batar	Tabanda sürüklenme
Polietilen Tereftalat (PET)	1.37	Batar	Tabanda sürüklenme

Bu literatür çalışmaları, deneysel olarak izlenen mikroplastik davranışlarının sayısal simülasyonlarla desteklenebileceğini ve doğru modellerle çevresel analizlere entegre edilebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, bu tez çalışmasında olduğu gibi görsel izleme teknikleriyle desteklenen analizlerin hem bilimsel hem de çevresel farkındalık açısından büyük katkı sunduğu söylenebilir.

2.5. Salınlı Akım Altında Parçacık İzleme Yöntemleri

Salınlı akış koşullarında parçacık hareketlerinin izlenmesi hem deneysel hem de sayısal yöntemlerin eş zamanlı kullanımını gerektiren çok disiplinli bir alandır. Özellikle mikroplastik gibi küçük kütleli parçacıkların, dalga etkisi altındaki hareketlerinin incelenmesi; görüntü işleme teknikleri, yüksek hızlı kamera sistemleri ve veri analiz yazılımlarının birlikte kullanılmasını zorunlu kılmıştır.

Son yıllarda bu alanda yapılan çalışmaların çoğu, yüksek çözünürlüklü video kaydı ile elde edilen görüntülerin işlenmesine dayanır. Örneğin, Chen vd. (2021), çift kamera sistemi kullanarak dalga etkisi altındaki mikro parçacıkların üç boyutlu hareket izini çıkarmıştır. Lee & Kang (2018) ise salınlı tank deneylerinde parçacıkların x-y düzlemindeki yer değiştirmelerini analiz etmek için bir dizi görüntü işleme algoritması geliştirmiştir.

Bu izleme sistemlerinde kullanılan yöntemlerden biri, zaman içinde alınan görüntülerden parçacık konumlarının belirlenmesi ve bu veriler üzerinden hız, ivme ve yer değiştirme grafiklerinin oluşturulmasıdır. Elde edilen bu veriler, parçacığın sürüklenme (drag), kaldırma (lift), yerçekimi ve eylemsizlik kuvvetleri altındaki

dinamiğini sayısal olarak tanımlamada kullanılır. Bu tarz izleme yöntemleri, özellikle Lagrange yaklaşımı ile hareket eden tekil parçacıkların takibinde oldukça etkilidir.

Ayrıca, Mutsuda vd. (2017) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, parçacıkların hareketini etkileyen parametrelerin (örneğin; akış frekansı, tank şekli, sıvı derinliği) istatistiksel olarak analiz edildiği ve deneysel izleme yöntemlerinin modelleme sonuçları ile yüksek uyum sağladığı görülmüştür.

Bu bağlamda, parçacık izleme yöntemleri yalnızca laboratuvar ortamında değil; liman yapıları, su arıtma sistemleri ve çevresel izleme çalışmaları gibi mühendislik uygulamalarında da kullanılabilir hâle gelmiştir. Tez kapsamında kullanılan görüntü işleme algoritmaları da bu yaklaşımlardan esinlenmiş ve deneysel düzenden elde edilen video verileri ile mikroplastik hareketlerinin güvenilir şekilde belirlenmesine olanak sağlamıştır.

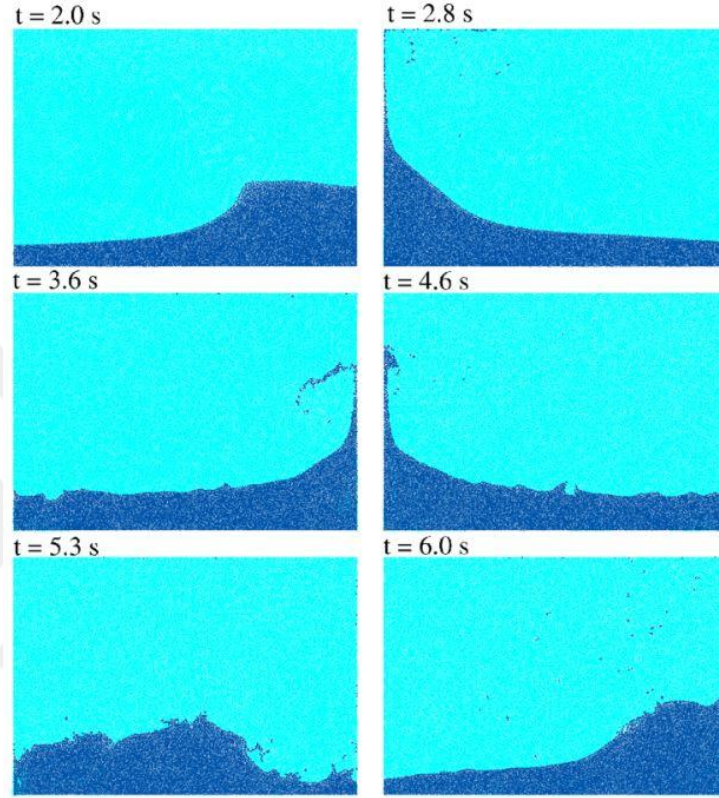
2.6. Simülasyon Yöntemleri ile Parçacık Hareketinin İncelenmesi

Salınımlı akım ortamında parçacık hareketinin analizi, deneysel çalışmalarla elde edilen bulguların ötesine geçmek ve sistem davranışını farklı parametrelerle detaylı olarak inceleyebilmek amacıyla sayısal modelleme ve simülasyon tekniklerine dayandırılmıştır. Son yıllarda, özellikle çevresel mühendislik ve deniz yapıları alanında yapılan çalışmalarda, mikro ve makro ölçekteki parçacıkların sıvı ortam içerisindeki davranışlarını modellemek için gelişmiş hesaplamalı yöntemler kullanılmaktadır.

Bu kapsamda en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD), hem tek fazlı hem de çok fazlı akışların modellenmesine olanak sağlamaktadır. CFD analizlerinde parçacıklar genellikle Eulerian-Lagrangian yaklaşımla ele alınmakta; sıvı fazı Eulerian çerçevede, katı parçacıklar ise Lagrangian temsille modellenmektedir. Bu yöntem sayesinde parçacığın yer değiştirmesi, hız profili ve ivmesi zamana bağlı olarak elde edilebilmektedir. Ayrıca bu yöntemler, parçacığın bulunduğu ortamın sınır koşulları, dalga frekansı ve genliği gibi değişkenleri de dikkate alarak daha gerçekçi bir modelleme süreci sunmaktadır (Liu & Liu, 2010).

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) yöntemi ise parçacık bazlı çözümlere sunan mesh-free bir modelleme tekniği olup, özellikle deformasyonun fazla olduğu veya serbest yüzey hareketlerinin ön planda olduğu sistemlerde tercih edilmektedir. SPH

yöntemiyle yapılan çalışmalar, salınımlı akım ortamlarında parçacıkların dalga frekansına karşı gösterdiği tepkilerin sayısal olarak modellenmesinde etkin rol oynamıştır. Örneğin, Zhao vd. (2019) çalışmasında, farklı yoğunluk ve çaplara sahip mikroplastiklerin sarsma tablalı tank ortamındaki hareketleri SPH yöntemi ile incelenmiş ve parçacıkların tabana ulaşma süreleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. 1 Salınımlı akım etkisinde parçacıkların zamanla dağılımı

Şekil 2.2 de , dalga etkisi altında parçacıkların sıvı içerisindeki konumsal değişimi SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) yöntemiyle zamana bağlı olarak modellenmiştir. Bu tür modellemeler sayesinde “parçacıkların yüzeye çıkma, tabana çökme ve akış yönünde yer değiştirme davranışları sayısal olarak doğru biçimde tahmin edilebilmektedir” (Zhang vd., 2022). Zaman aralıklarıyla alınan görüntüler, dalga yüksekliği ve frekans gibi parametrelerin mikroplastik benzeri parçacıkların hareketine etkisini gözlemlene imkânı sunar.

Bunun yanı sıra, Volume of Fluid (VOF) yöntemi de çok fazlı akışlarda sıvı-serbest yüzey davranışlarının modellenmesi için sıkça kullanılan bir yaklaşımdır. Özellikle dalga etkisiyle parçacıkların yüzeye çıkma veya dibe çökme davranışlarının analizinde tercih edilmektedir. Yuan vd. (2017) tarafından yapılan bir araştırmada, VOF yöntemiyle tank

içerisindeki dalga hareketi modellenmiş ve akış içerisindeki hız dağılımının mikroplastik parçacıkların hareketine etkisi detaylı biçimde incelenmiştir.

Sayısal modelleme çalışmaları, aynı zamanda deneysel verilerle karşılaştırma yapılarak modelin geçerliliğini sınama açısından da büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda Jin vd. (2016) tarafından yürütülen çalışmada, laboratuvar ölçekli deneylerden elde edilen mikroplastik hareketleri verileri ile CFD sonuçları karşılaştırılmış ve aralarındaki uyumun oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde, Raouf A. Ibrahim (2005) çalışmasında da sayısal modellemelerin sarsma tabanlı sistemlerde sıvı-parçacık etkileşimini doğru bir şekilde tahmin edebildiği vurgulanmıştır.

Bütün bu çalışmalar, sayısal yöntemlerin yalnızca teorik düzeyde değil, aynı zamanda mühendislik uygulamalarında da kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Özellikle çevresel kirlilik, mikroplastiklerin izlenmesi ve davranışlarının tahmin edilmesi açısından bu tür simülasyon yöntemleri hem zaman hem de maliyet açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar da bu literatür bulgularıyla desteklenmiş; elde edilen video analizlerinden çıkarılan parçacık konum ve hız verileri, uygun bir sayısal modelleme altyapısına entegre edilerek sistemin davranışı daha derinlemesine analiz edilmiştir.

2.7. Salınlı Akım Ortamında Parçacık Hareketine Yönelik Güncel Yaklaşımlar

Salınlı akım ortamlarında parçacık hareketinin anlaşılması, günümüzde disiplinler arası yöntemlerin bir arada kullanılmasıyla mümkün hâle gelmiştir. Deneysel çalışmalar, görüntü işleme algoritmaları ve sayısal modelleme tekniklerinin entegre edilmesiyle, parçacıkların karmaşık davranışlarını yüksek doğrulukla analiz edebilen kapsamlı yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar, parçacıkların akışkan içerisindeki hareketini etkileyen başlıca kuvvetlerin (kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti, yerçekimi, ek kütle kuvveti vb.) detaylı biçimde modellenmesini sağlamıştır. Özellikle mikroplastiklerin çevresel ortamlarda nasıl hareket ettiğini anlamaya yönelik deneysel düzenekler ve simülasyon modelleri, bu alandaki veri eksikliğini kapatmaktadır. Görüntü işleme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, deney ortamlarında elde edilen görüntülerden sayısal verilere ulaşmak daha hızlı ve güvenilir hâle gelmiştir.

Bu kapsamda hem akademik hem de çevresel uygulamalarda kullanılabilir yöntemlerin geliştirilmesi, sürdürülebilirlik açısından büyük önem arz etmektedir. Salınlı akım ortamında parçacık takibi konusundaki araştırmalar; mühendislik, çevre bilimleri ve deniz yapıları gibi pek çok alanda yeni çalışma olanaklarının da önünü açmaktadır. Güncel yaklaşımlar, bu alanlarda geliştirilecek modellemelerin temelini oluşturmakta ve gelecekteki çalışmalara yol göstermektedir.

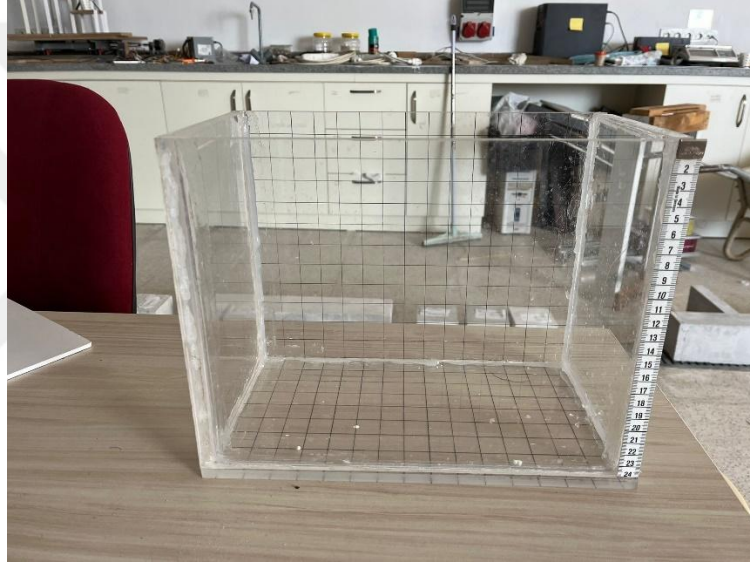


3. YÖNTEM

3.1. Deney Düzeneginin Hazırlanması

3.1.1. Kullanılan tank

Yapılan tüm deneylerde uzunluğu 32 cm, genişliği 18 cm, yüksekliği 25 cm olan pleksi malzeme tank kullanılmıştır. Tank içerisinde kullanılan sıvı ortam, içme suyu olup, sabit sıcaklık ve viskozite koşullarında tutulmuştur. Su yüksekliği 5 cm olarak belirlenip, mor ışık etkisinde gözlemlenmesi için parçacık boyanmıştır. Deney sırasında su içerisine bırakılan mikropplastik parçacık, taban seviyesine yakın konumlandırılmış ve hareketleri boyunca gözlemlenmiştir.



Şekil 3. 1 Kullanılan tank

3.1.2. Ultrasonik mesafe sensörü

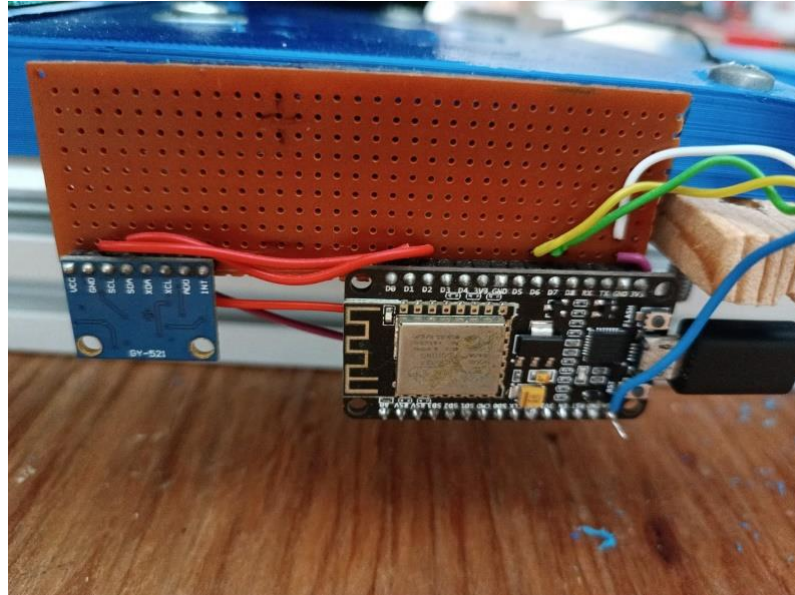
Deney düzeneginde, sarsma tablasının yer değiştirme miktarını hassas bir şekilde ölçmek amacıyla ultrasonik mesafe ölçer kullanılmıştır. Bu sensör, tabla ile sabit bir referans noktası arasındaki mesafeyi milimetre duyarlılığında ölçerek, salınım genliği ve frekansının doğru şekilde belirlenmesini sağlamıştır.



Şekil 3. 2 Ultrasonik mesafe ölçer

3.1.3. İvme ölçer

Deneyde, sarsma tablasına uygulanan ivmenin zamanla değişimini ölçmek amacıyla bir ivme ölçer kullanılmıştır. Bu sensör, doğrusal ivme değerlerini üç eksende kaydederek deneyin dinamik karakteristiklerinin analizinde temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır.



Şekil 3. 3 İvmeölçer

3.1.4. Step motor

Deney düzeneğinde sarsma tablasının kontrollü ve tekrarlanabilir hareketini sağlamak amacıyla step motor kullanılmıştır. Bu motor, belirli adımlarla dönebilme

3.1.6. Arduino kart

Deney sisteminin kontrolü ve sensörlerden gelen verilerin işlenmesi amacıyla bir Arduino mikrodenetleyici kartı kullanılmıştır. Arduino, step motor, ivme ölçer ve ultrasonik sensör gibi bileşenlerin eşzamanlı çalışmasını sağlayarak sistemin otomasyonunu mümkün kılmıştır.

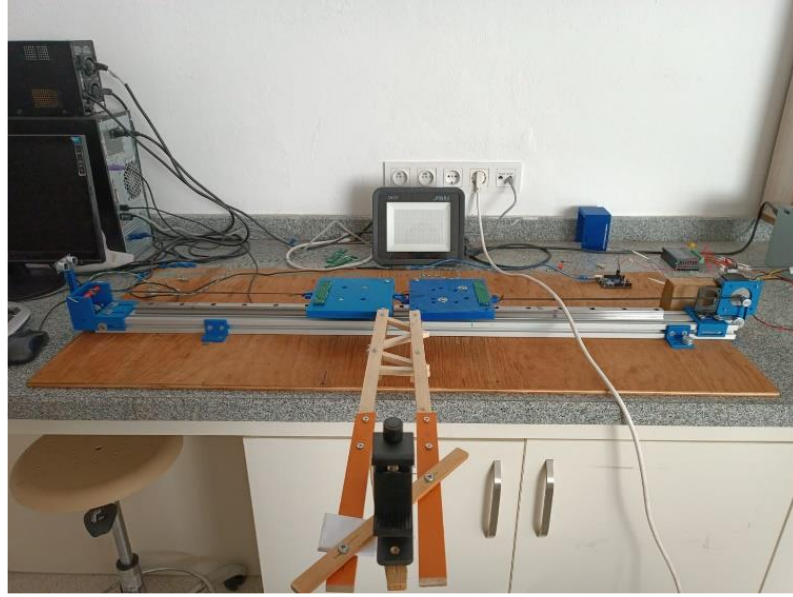


Şekil 3. 6 Arduino kart

3.2. Sarsma Tablası Çalıştırma Adımları

Deneyel çalışmalarda kullanılan sistemin başlatılması belirli bir sıralamaya göre gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, sistemin enerji kaynağı aktive edilmiş ve step motor sürücüsünün çalışır durumda olduğu, üzerindeki yeşil LED göstergesi ile doğrulanmıştır. Ardından, ultrasonik mesafe sensörü ile ivme ölçerin doğru şekilde çalışıp çalışmadığı kontrol edilerek veri üretimine hazır hâle getirilmiştir.

Veri toplama sürecinde, seri port üzerinden veri alışverişi sağlayan “CoolTerm” yazılımı açılmış, bağlantı ayarları ve haberleşme parametreleri (baud rate, port seçimi vb.) kontrol edilmiştir. Paralel olarak, deney sistemine özel olarak geliştirilmiş kontrol kodu “Arduino IDE” aracılığıyla “Arduino Uno” kartına yüklenmiştir. Bu kod, jumper kablolar yardımıyla step motor sürücüsüne aktarılmış ve ardından step motora yönlendirilerek sarsma tablasının harekete geçmesi sağlanmıştır.



Şekil 3. 7 Sarsma tablası

Deneyin başlamasıyla birlikte sarsma tablası, tanımlanan frekans ve genlik değerlerinde periyodik hareket gerçekleştirmiştir. Elde edilen ivme ve mesafe verileri, sensörlerden gelen anlık ölçümler ile “CoolTerm” arayüzü üzerinden bilgisayara aktarılmış ve kayıt altına alınmıştır. Toplanan bu veriler, ilerleyen aşamalarda analiz edilmek üzere dışa aktarılmıştır.

3.3. Görüntü İşleme ile Parçacık Takibi

DeneySEL çalışmalarda parçacıkların akım içerisindeki hareketlerinin detaylı olarak analiz edilebilmesi için görüntü işleme yöntemlerinden faydalanılmıştır. Bu amaçla, deney düzeneğinde yerleştirilen iki farklı kamera aracılığıyla hareket hâlindeki parçacıkların video kayıtları alınmıştır. Kameralardan biri yandan, diğeri ise tabandan bakacak şekilde konumlandırılarak üç boyutlu hareketin izlenmesi sağlanmıştır.

Elde edilen video verileri, dijital ortama aktarıldıktan sonra özel olarak geliştirilmiş görüntü işleme algoritmaları ile analiz edilmiştir. Bu algoritmalar, her bir karede parçacığın konumunu belirlemek amacıyla eşikleme (thresholding), kontur belirleme (contour detection), morfolojik filtreleme ve nesne takibi gibi işlemleri gerçekleştirmiştir. Görüntü işleme süreci, Matlab tabanlı yazılım araçları kullanılarak yürütülmüştür.

Analiz edilen görüntülerden her bir parçacığın zamana bağlı konum bilgisi elde edilmiş ve bu veriler sayesinde parçacığın hız, yön ve ivme gibi hareket parametreleri

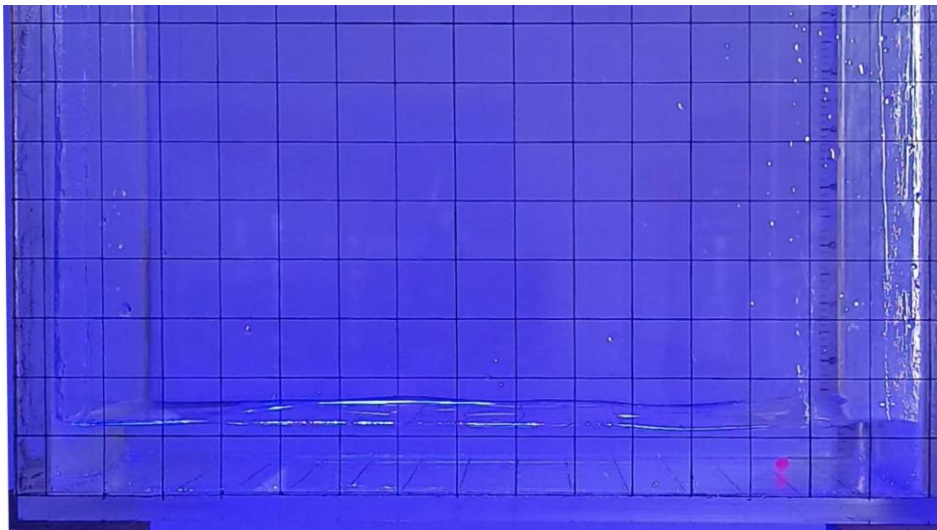
hesaplanmıştır. Ayrıca parçacıkların sarsma tablasının periyodik hareketiyle olan etkileşimi, taban ile temas sıklığı ve yüzey üzerindeki kayma davranışı da gözlemlenmiştir.

Bu yöntem, sadece sayısal veri elde etmekle kalmayıp, aynı zamanda parçacıkların farklı frekans ve genlik değerlerinde nasıl davrandığını görsel olarak değerlendirme imkânı sunmuştur. Böylece, deneysel çalışmanın doğruluk seviyesi artırılmış, sistemdeki fiziksel süreçlerin daha iyi anlaşılması sağlanmıştır.

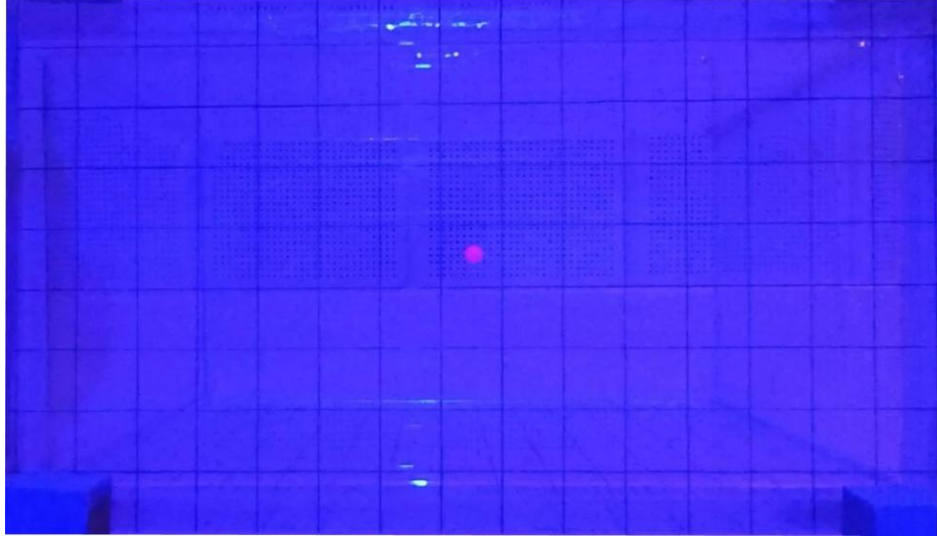
3.4. Kamera ile Görüntüleme ve Video Kayıt Süreci

Bu çalışmada, salınımlı akım ortamında su tabanına bırakılan mikroplastik parçacıkların hareketlerinin izlenebilmesi amacıyla çift yönlü görüntüleme sistemi kullanılmıştır. Deney düzeneğinde yer alan şeffaf tankın bir yüzeyi, referans koordinatları oluşturmak üzere eşit aralıklı karelerden oluşan bir karelaj sistemi ile kaplanmıştır. Bu sistem, parçacıkların konumlarının zamana bağlı olarak belirlenebilmesi için gerekli olan görsel ölçeklendirmeyi sağlamaktadır.

Görüntüleme işlemleri, tankın hem önünden hem de altından yerleştirilen yüksek çözünürlüklü kameralar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Böylece parçacığın hem yatay hem de düşey düzlemdeki hareketi eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Elde edilen videolar, analiz öncesinde karelere (frame) ayrılarak dijital ortama aktarılmıştır. Bu sayede her bir zaman aralığına karşılık gelen görüntü, sayısal olarak işlenmeye hazır hale getirilmiştir.

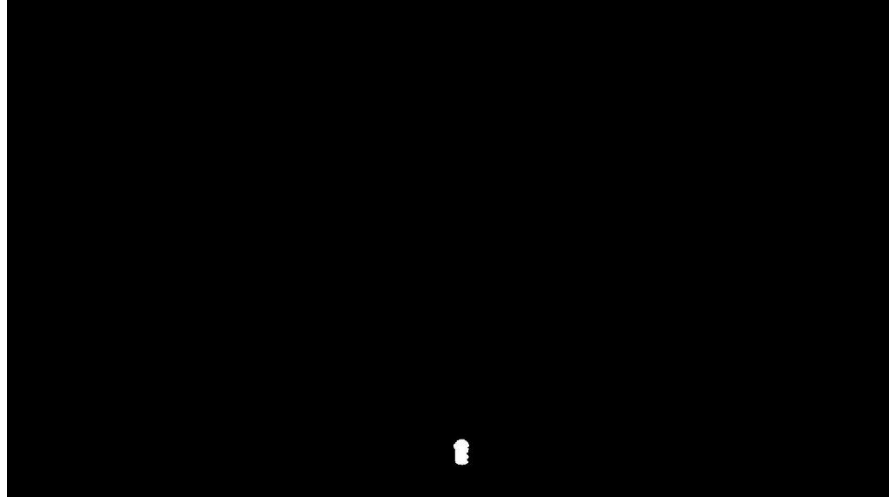


Şekil 3. 8 Yan kesit

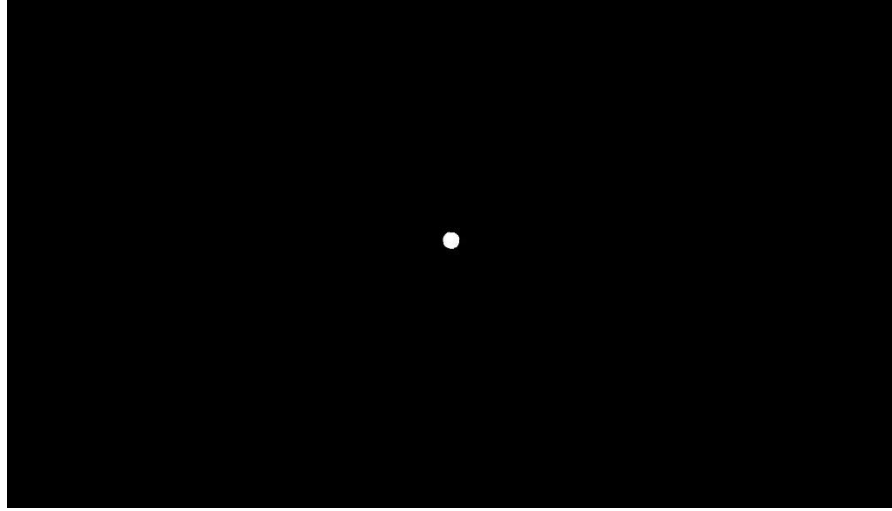


Şekil 3. 9 Alt kesit

Görüntü işleme süreci, MATLAB yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Parçacığın takip edilebilirliğini artırmak amacıyla, her bir video karesi renk dönüşüm algoritmaları yardımıyla işlenmiştir. Özellikle, arka planı tamamen siyah ve mikroplastik parçacıkları beyaz olarak görünür hale getiren magenta renk filtresi ve eşikleme (thresholding) teknikleri uygulanmıştır. Bu işlem sayesinde, parçacık ve arka plan kolaylıkla ayrıştırılabilmiş, konum tespiti daha hassas hale getirilmiştir.



Şekil 3. 10 Matlab kodu sonrası işlenmiş yan kesit



Şekil 3. 11 Matlab kodu sonrası işlenmiş alt kesit

İşlenmiş siyah-beyaz görseller üzerinden parçacıkların merkez koordinatları, piksel bazında tespit edilerek zamana bağlı pozisyon verisi oluşturulmuştur. Bu veriler sayesinde parçacığın hızı, ivmesi ve deplasmanı gibi parametreler hesaplanmış; salınımlı akımın etkisi altındaki davranışı nicel olarak analiz edilmiştir. Özellikle zaman serisi analizleri ile parçacığın hareket eğilimleri yorumlanmış, deneysel sonuçların güvenilirliği artırılmıştır.

Yapılan bu kapsamlı görüntüleme ve işleme süreci, parçacık davranışlarının hem görsel hem de sayısal olarak ortaya konmasına olanak sağlamıştır. Böylelikle, mikroplastik hareketliliğiyle ilgili literatüre özgün ve bilimsel açıdan değerli katkılar sunulmuştur.

4. BULGULAR

Bu bölümde, salınlı akım etkisi altındaki su ortamında yer alan mikroplastik parçacıkların hareket davranışlarının incelendiği deneylerden elde edilen sonuçlara yer verilmektedir. Deneyler, farklı frekans ve genlik değerlerinde oluşturulmuş toplam 12 Deneme kapsamında yürütülmüş ve her denemede parçacığın tabandaki hareketi sistematik biçimde analiz edilmiştir.

Deneysel süreçte, parçacık hareketlerinin izlenebilmesi amacıyla tankın alt ve ön yüzeylerine konumlandırılmış iki ayrı kamera yardımıyla video kayıtları alınmıştır. Bu videolar daha sonra karelerine (frame) ayrılarak, görüntü işleme algoritmalarının uygulanabileceği yapıya dönüştürülmüştür. Karelere ayrılan görseller, MATLAB ortamında özel yazılmış kodlarla işlenmiş; görüntüler siyah arka plan – beyaz parçacık yapısına dönüştürülerek parçacıkların konumları piksel hassasiyetinde tespit edilmiştir.

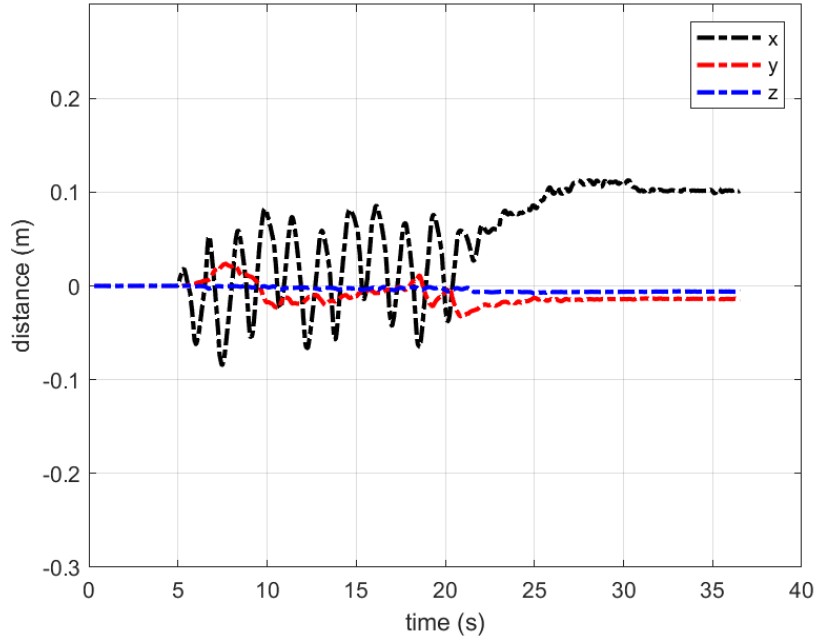
Bu görsel veriler sayesinde zamana bağlı parçacık hareketleri nicel olarak belirlenmiş, pozisyon verilerine dayanarak hız, ivme ve deplasman parametreleri çıkarılmıştır. Her bir denemeye ait hareket profilleri grafiklerle desteklenmiş, parçacıkların akış koşullarına verdiği tepkiler karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

4.1. Deneme 1

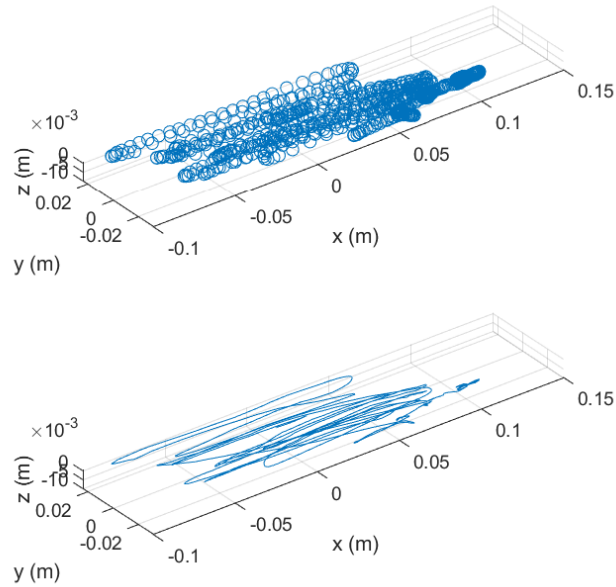
Bu denemede, düşük frekanslı salınlı akım altında tabanda yer alan mikroplastik parçacığın hareket dinamiği analiz edilmiştir. Deney, parçacığın hem alt hem de yan düzlemlerden eş zamanlı olarak video kaydıyla izlenmesi ve bu görüntülerin karelerine ayrılarak dijital ortamda işlenmesi esasına dayanmaktadır. Elde edilen her görüntü karesi, MATLAB yazılımı yardımıyla siyah arka plan-beyaz parçacık formatında işlenmiş, böylece parçacık konumu zaman içinde nicel olarak belirlenmiştir.

Her bir düzlem için elde edilen konum verileri grafikleştirilerek zamana bağlı hareket eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler, parçacığın salınım yönüne bağlı olarak maruz kaldığı kuvvetlerin etkisiyle konum değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Parçacığın alt düzlemde izlediği yol, yüzeydeki akım salınımlarının etkisiyle periyodik sapmalar göstermiştir. Yan düzlemden yapılan ölçümler ise parçacığın dikey doğrultudaki salınımlarını ve zamanla oluşan yer değiştirmesini ortaya koymuştur.

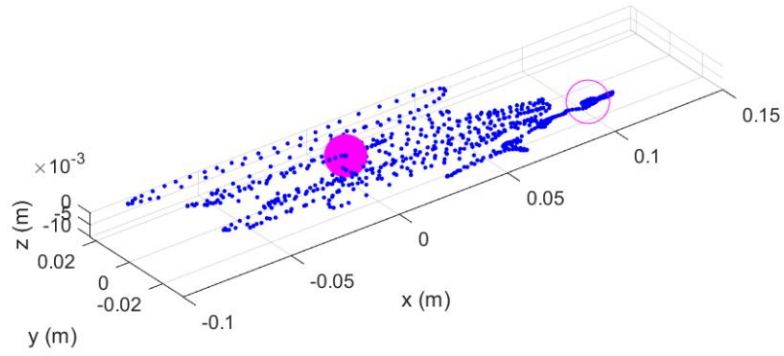
Elde edilen analiz sonuçları, düşük frekansta uygulanan akımın parçacığı belirli bir yörüngede tutma eğiliminde olduğunu, ancak akımın periyodik doğası nedeniyle bu yörüngede dalgalanmalar yaşandığını göstermiştir. Bu bulgular, düşük enerjili salınımlı akım ortamlarının mikroplastik taşınımı üzerindeki etkisinin daha kontrollü ve sınırlı olduğunu göstermesi açısından önemlidir.



Şekil 4. 1 Deneme 1 parçacığın deplasman-zaman grafiği



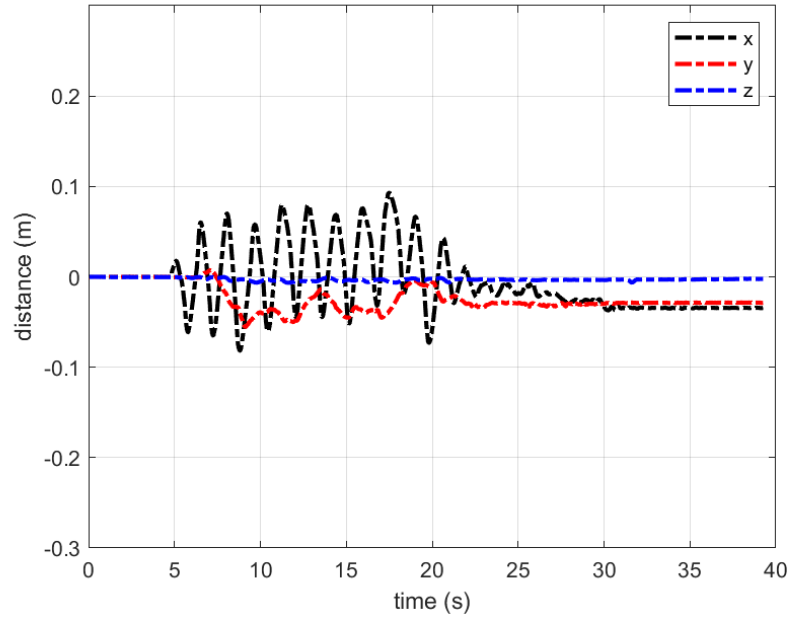
Şekil 4. 2 Deneme 1 için parçacığın izlediği yol



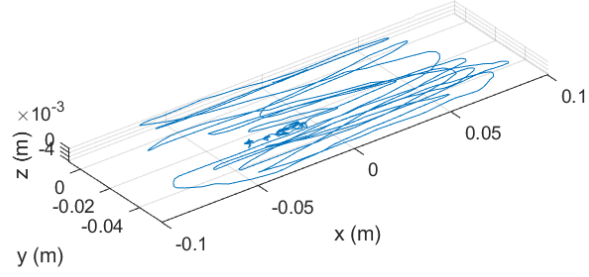
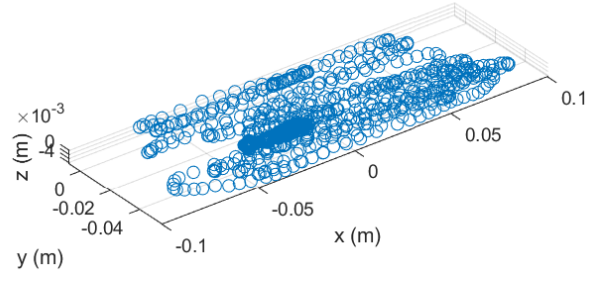
Şekil 4. 3 Deneme 1 için parçacığın başlangıç ve bitiş konumları

4.2. Deneme 2

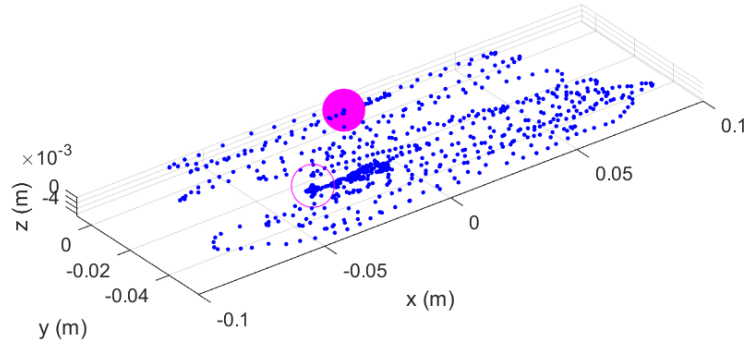
Salınımlı akım frekansı ve deneysel düzenek sabit tutularak aynı koşullarda deney gerçekleştirilmiştir Her ne kadar sistem parametreleri değiştirilmemiş olsa da parçacığın izlediği yol ve yer değiştirme eğrileri her deneyde farklılık göstermiştir. Bu durum, mikro ölçekte yapılan deneylerde akışkan dinamiği etkilerinin ve parçacık-temas ilişkilerinin sonuca olan duyarlılığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4. 4 Deneme 2 için parçacığın deplasman-zaman grafiği



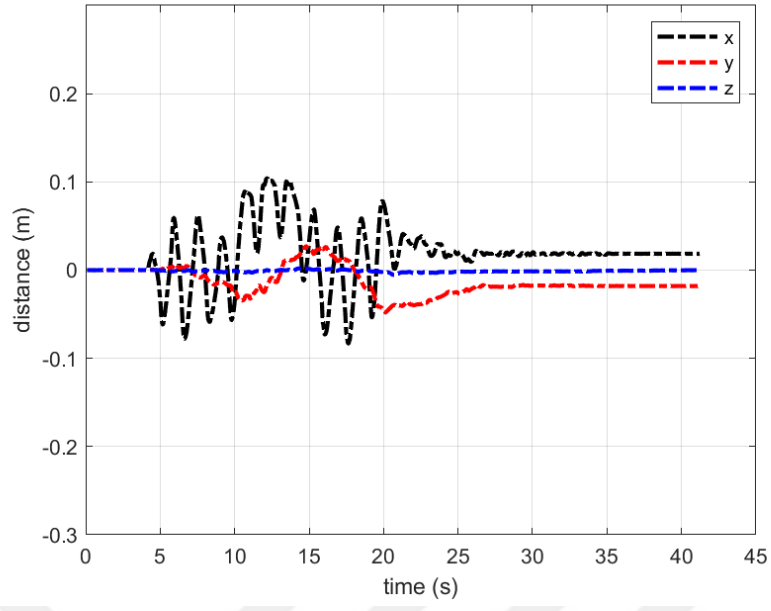
Şekil 4. 5 Deneme 2 için parçacığın izlediği yol



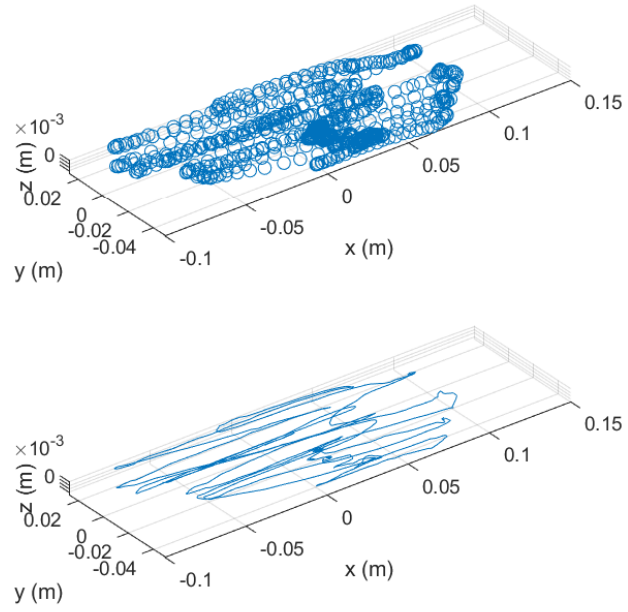
Şekil 4. 6 Deneme 2 için parçacığın başlangıç ve bitiş konumları

4.3. Deneme 3

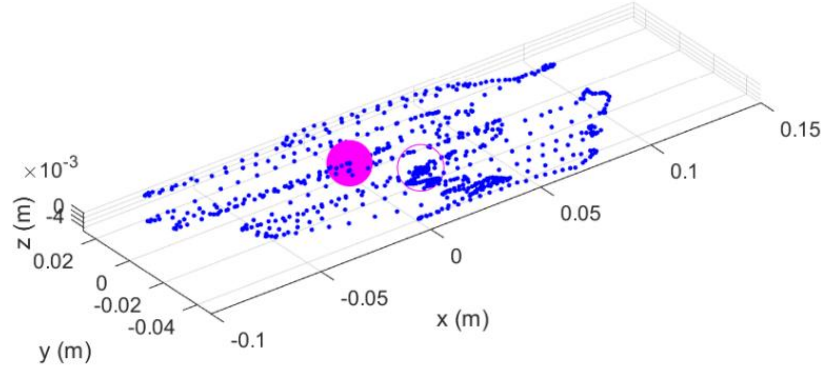
Aynı koşullarda deney tekrar edilmiş ve sonuçta parçacığın çıkış verilerinin değiştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 7 Deneme 3 için parçacığın deplasman-zaman grafiği



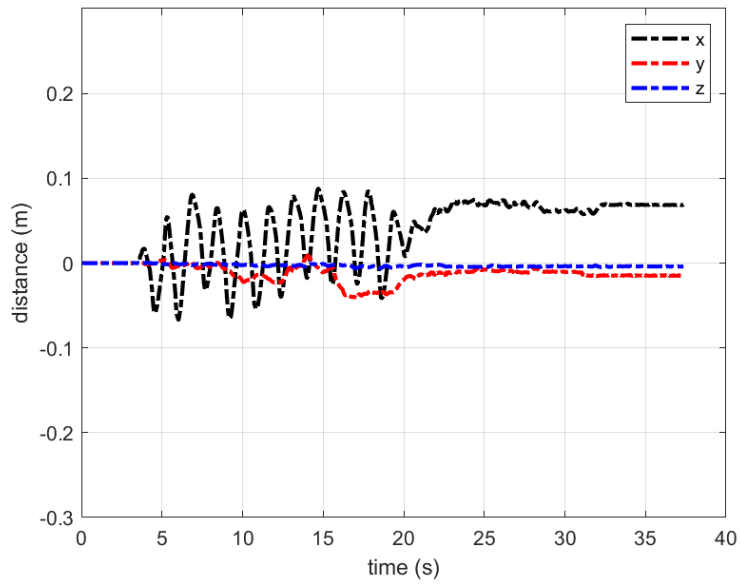
Şekil 4. 8 Deneme 3 için parçacığın izlediği yol



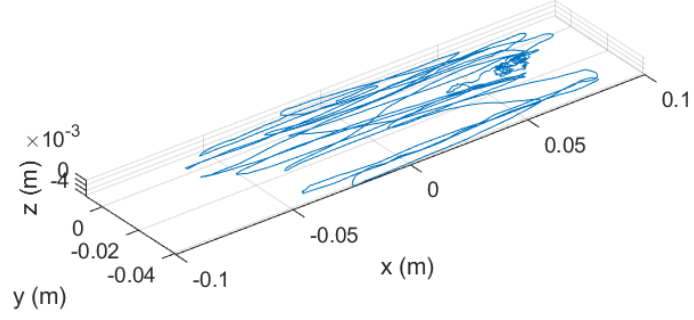
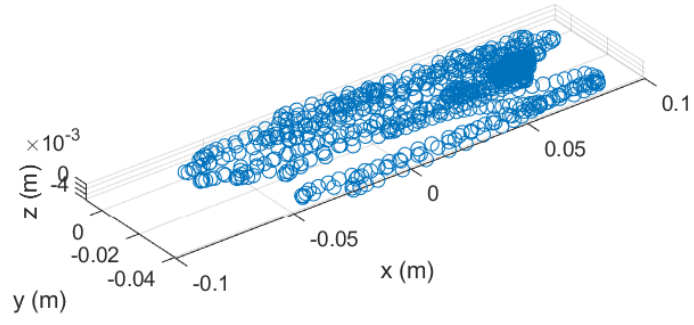
Şekil 4. 9 Deneme 3 için parçacığın başlangıç ve bitiş konumları

4.4. Deneme 4

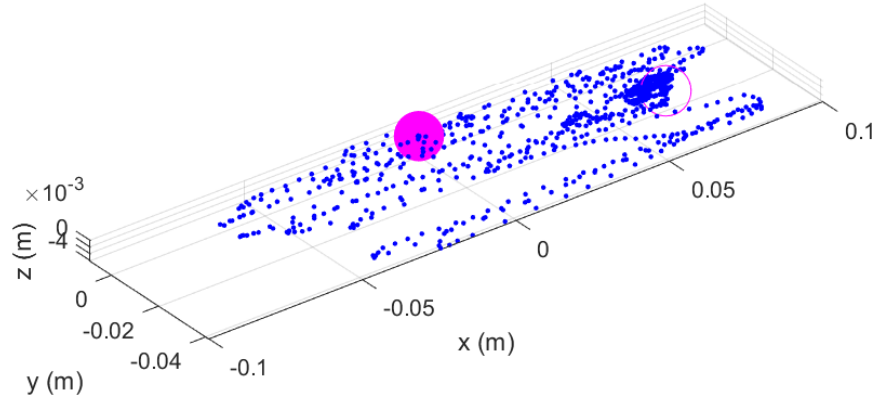
Yan ve alt düzlemden elde edilen videolar, karelere ayrılarak MATLAB ortamında analiz edilmiş; parçacıkların konumları, siyah arka plan üzerinde beyaz hedef olarak işlenmiştir. Görüntü işleme algoritması sayesinde parçacık hareketi daha yüksek doğrulukla izlenmiş, manuel gözlemlerle tespit edilemeyen ani yön değişimleri ve ivmelenmeler detaylı biçimde ortaya konulmuştur.



Şekil 4. 10 Deneme 4 için parçacığın deplasman-zaman grafiği



Şekil 4. 11 Deneme 4 için parçacığın izlediği yol

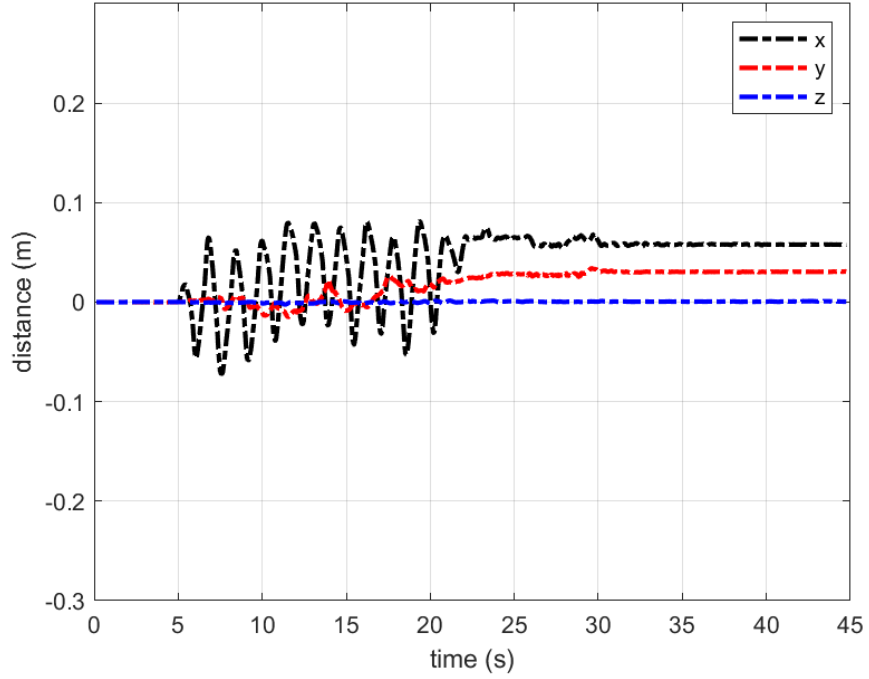


Şekil 4. 12 Deneme 4 için parçacığın başlangıç ve bitiş konumları

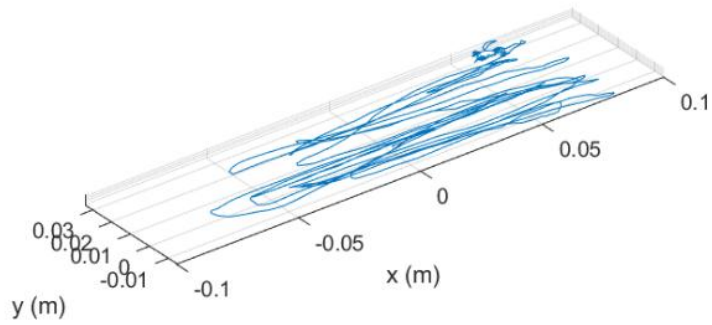
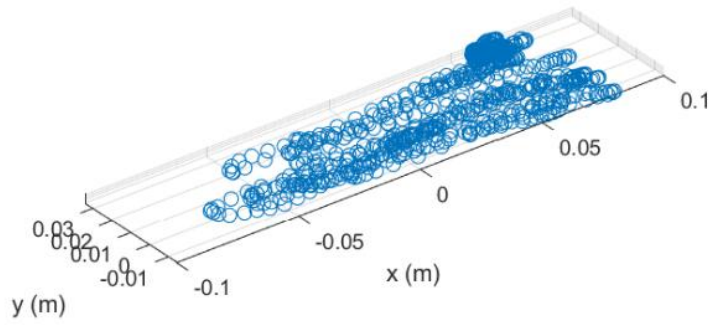
4.5. Deneme 5

Deney boyunca parçacığın yer değiştirme hareketleri dikkatle izlenmiş, özellikle belirli zaman aralıklarında yüzeyle sürtünmeye bağlı olarak hızında ani azalmalar

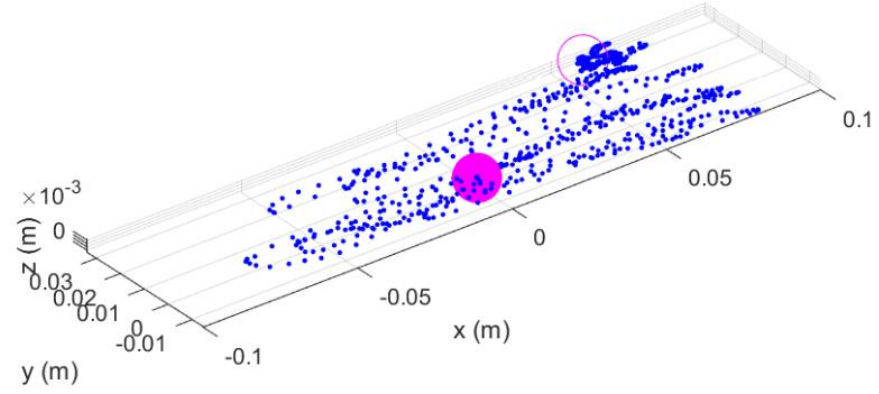
kaydedilmiştir. Bu durum, akım kuvveti sabit olmasına rağmen parçacığın mikroskobik temas etkileri nedeniyle farklı tepkiler verebildiğini ortaya koymuştur. Parçacığın yerel çökme, duraksama veya yön değiştirme gibi davranışları, yüzeyle olan dinamik ilişkisinin önemli bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4. 13 Deneme 5 için parçacığın deplasman-zaman grafiği



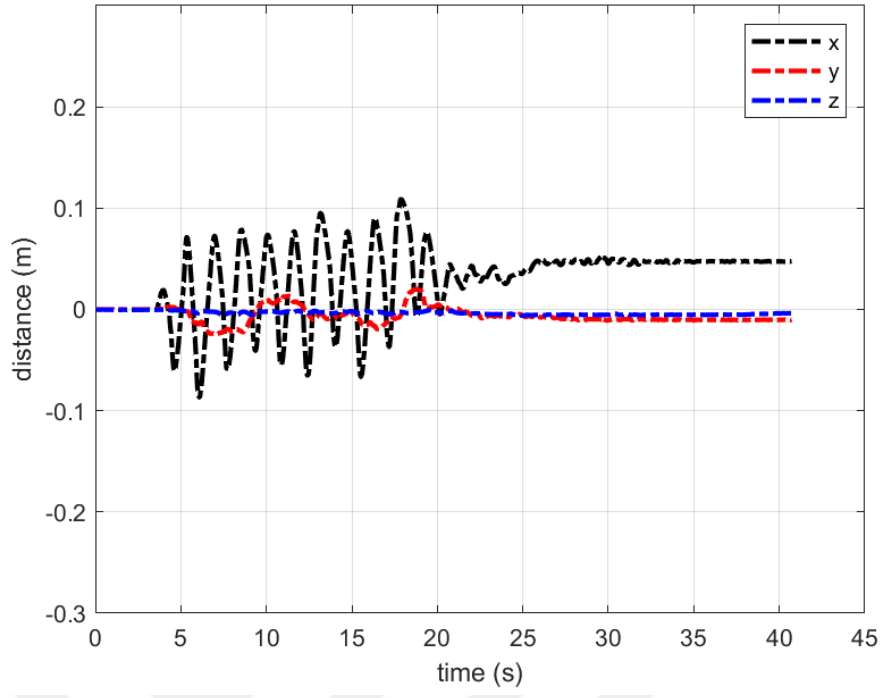
Şekil 4. 14 Deneme 5 için parçacığın izlediği yol



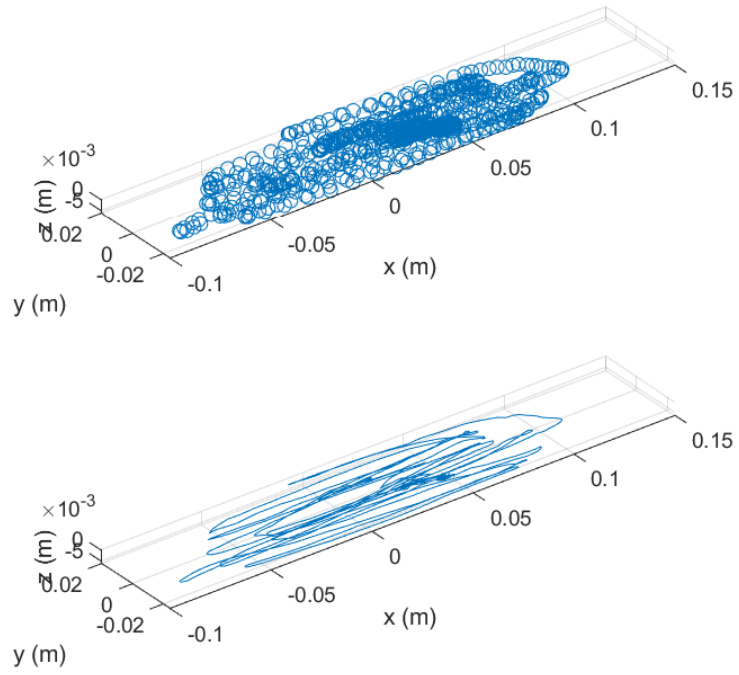
Şekil 4. 15 Deneme 5 için parçacığın başlangıç ve bitiş konumları

4.6. Deneme 6

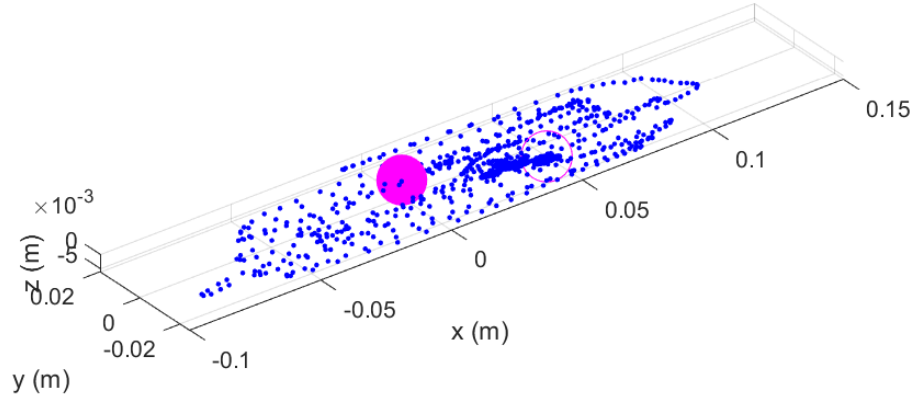
Görüntü işleme algoritmasıyla karelere ayrılan verilerde, parçacığın ivmelenme eğilimleri, yön değiştirme hızı ve kısa süreli duraksamaları incelenmiştir. Özellikle hareketin başlangıç anında parçacığın bir süre yerinde salındığı, ardından belirli bir yönde ivmelendiği gözlemlenmiştir. Bu durum, akımın ilk etkisinin parçacık üzerinde yarattığı geçici kararsızlık evresini ve ardından gelen dengeye yönelim sürecini açıkça ortaya koymuştur. Bu gözlem, salınımlı akıslarda parçacık hareketinin zamanla oturan bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 16 Deneme 6 için deplasman-zaman grafiği



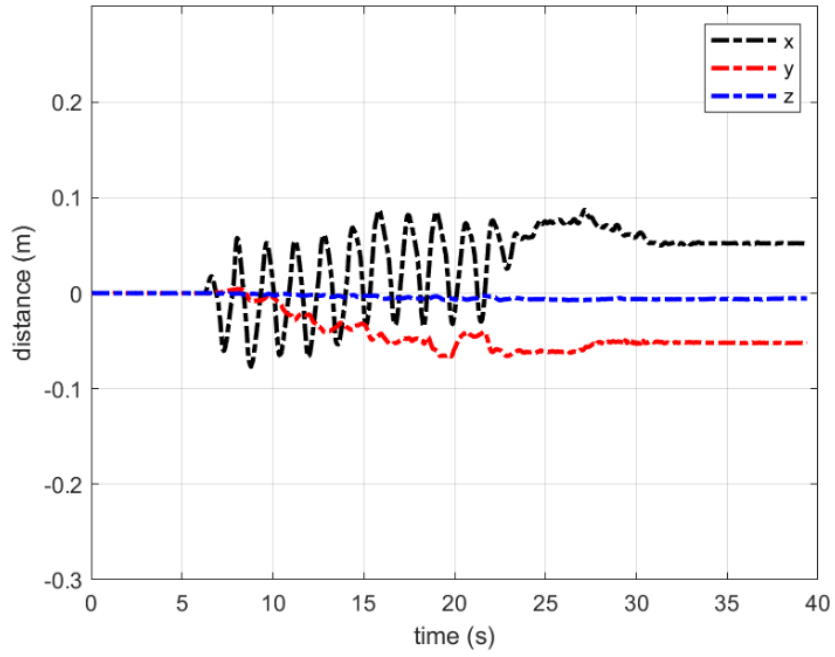
Şekil 4. 17 Deneme 6 için parçacığın izlediği yol



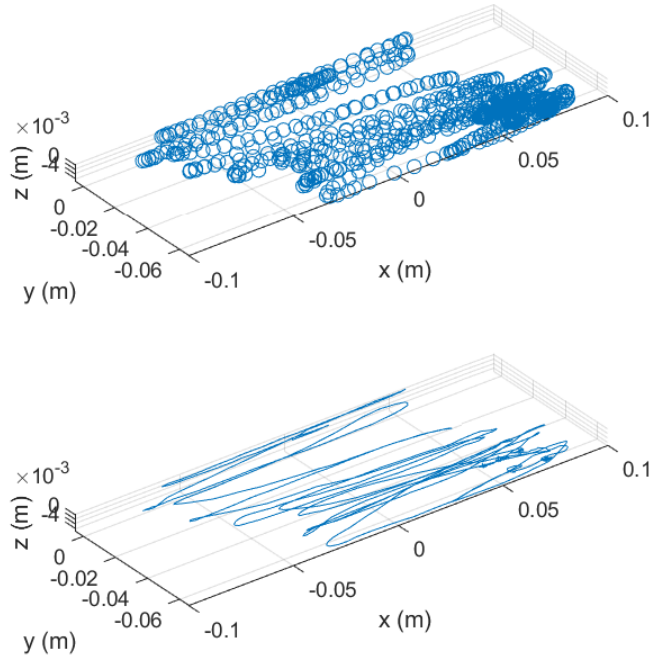
Şekil 4. 18 Deneme 6 için parçacığın başlangıç ve bitiş konumları

4.7. Deneme 7

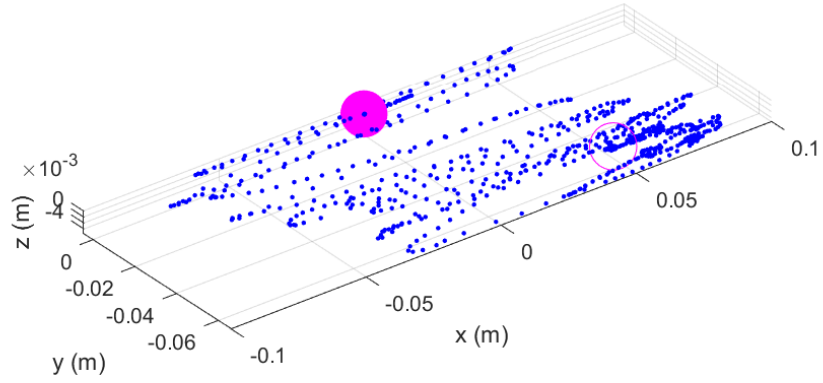
Bu denemede, deney boyunca parçacığın ulaştığı maksimum yer değiştirme değeri belirlenmiş ve bu anın zamansal konumu analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, parçacığın salınım periyodunun belirli bir evresinde en uzak noktaya ulaştığını ve ardından ters yönde ivmelendiğini göstermiştir. Bu gözlem, parçacık hareketinin akım döngüsüne bağlı olarak simetrik bir davranış sergileyebileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 4. 19 Deneme 7 parçacığının deplasman-zaman grafiği



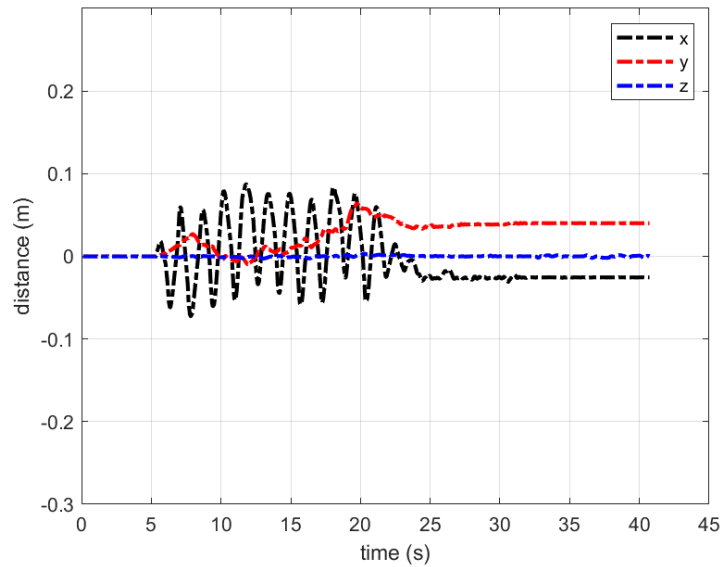
Şekil 4. 20 Deneme 7 için parçacığının izlediği yol



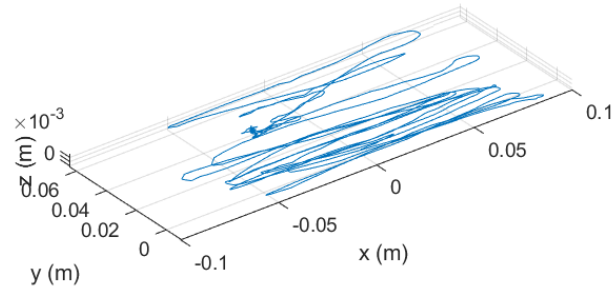
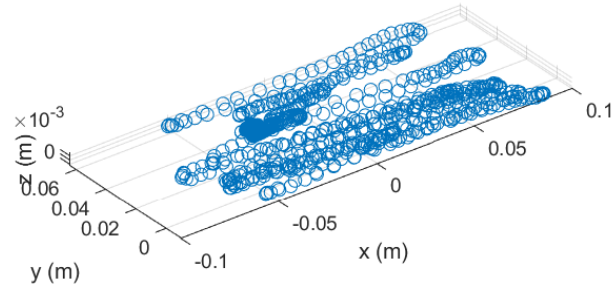
Şekil 4. 21 Deneme 7 için parçacığın başlangıç ve bitiş konumları

4.8. Deneme 8

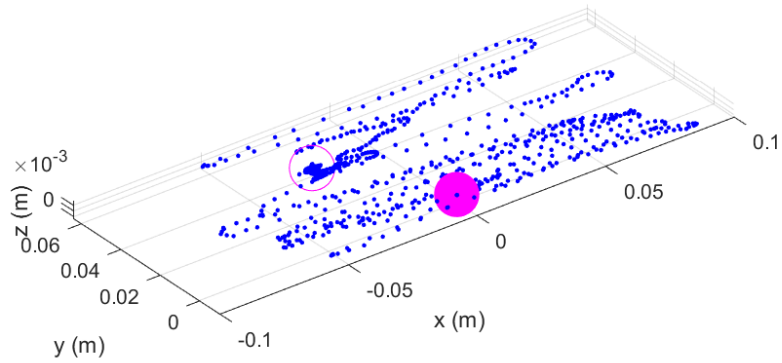
Bu denemede, parçacığın salınımlı akımın frekansına karşı gösterdiği hareket biçimi analiz edilmiştir. Deney boyunca parçacığın belirli bir süre sonra akımla uyumlu bir şekilde hareket etmeye başladığı gözlemlenmiştir. Zamanla bu hareketin düzenli bir salınım şekline dönüştüğü ve parçacığın aynı yönde tekrarlayan bir hareket sergilediği tespit edilmiştir. Bu durum, parçacığın frekansa duyarlı olduğunu ve salınımlı ortama zamanla uyum sağladığını göstermektedir.



Şekil 4. 22 Deneme 8 için parçacığın deplasman-zaman grafiği



Şekil 4. 23 Deneme 8 için parçacığın izlediği yol

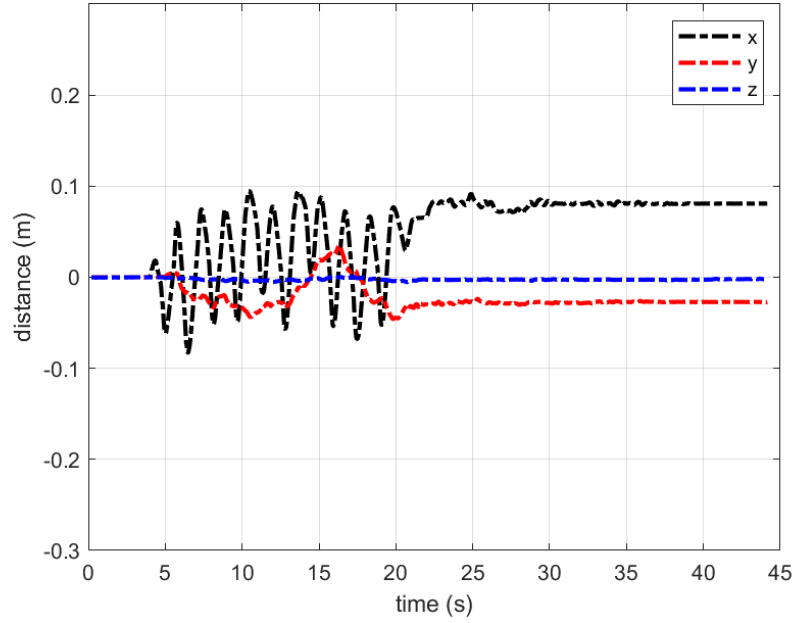


Şekil 4. 24 Deneme 8 için parçacığın başlangıç ve bitiş konumları

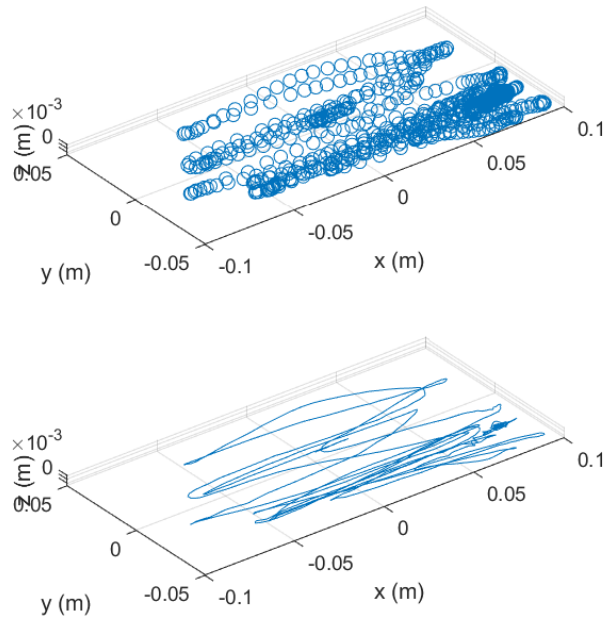
4.9. Deneme 9

Bu denemede, salınımlı akım etkisi altında hareket eden parçacığın zamanla yavaşlama gösterdiği anlar ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Görüntü işleme yöntemiyle elde edilen veriler, parçacığın bazı zaman aralıklarında ivmesinin sıfıra yaklaştığını ve

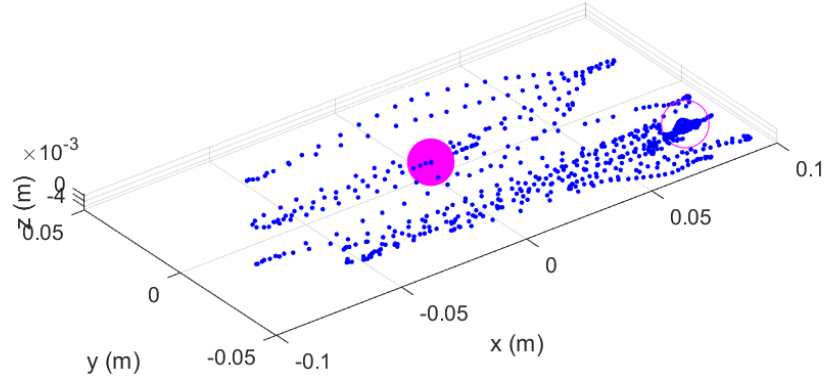
geçici olarak durağanlaştığını ortaya koymuştur. Bu yavaşlama eğilimlerinin, akım yönünün değişmesi ve tabanla temasın artmasıyla ilişkili olduğu değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, parçacığın hareketinin sadece akım şiddetine değil, temas yüzeyine ve hareket yönüne de duyarlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 25 Deneme 9 için parçacığın deplasman-zaman grafiği



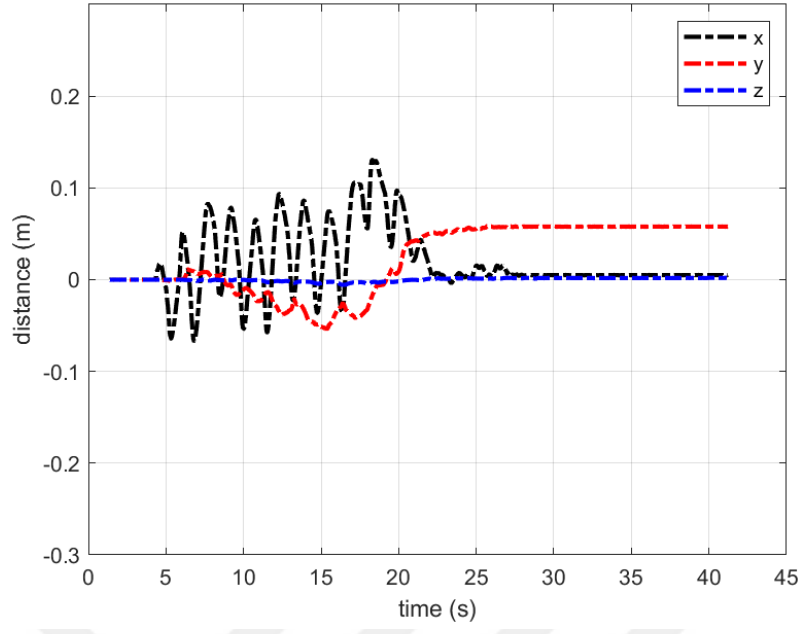
Şekil 4. 26 Deneme 9 parçacığın izlediği yol



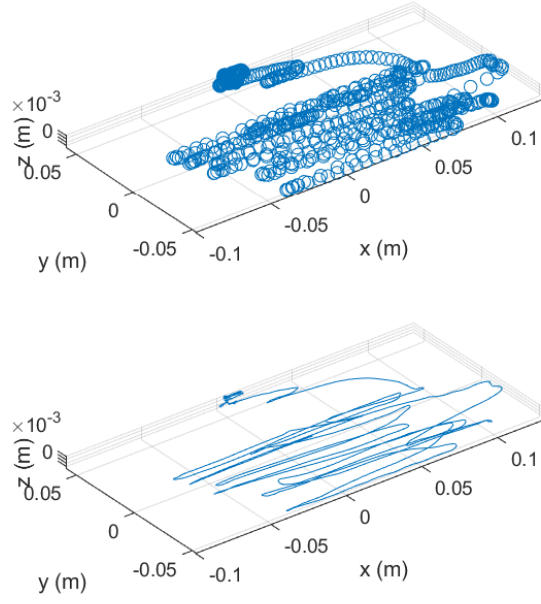
Şekil 4. 27 Deneme 9 parçacığın başlangıç ve bitiş konumları

4.10. Deneme10

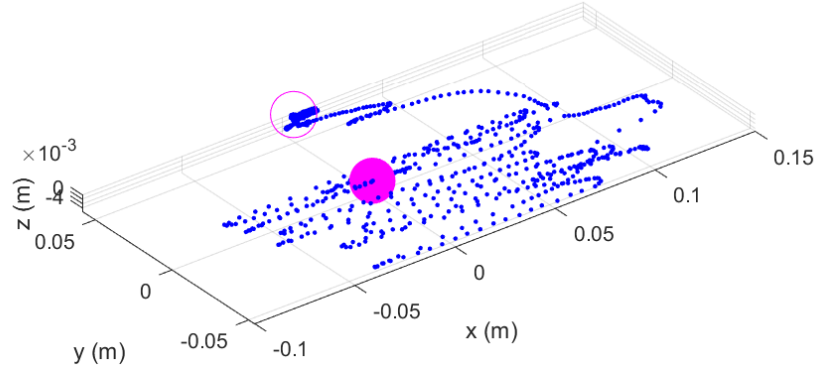
Bu denemede, parçacık hareketi hem yan hem de alt kamera görüntülerinden elde edilen verilerle eşzamanlı olarak değerlendirilmiştir. Aynı zaman dilimine ait iki farklı bakış açısından elde edilen görüntüler, parçacığın üç boyutlu hareketini daha net bir şekilde ortaya koymuştur. Özellikle zeminle olan temasın yoğunlaştığı anlarda, alt görüntülerde parçacığın pozisyonunun sabit kaldığı, yan görüntülerde ise ileri-geri salınımın sürdüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, parçacığın dikey ve yatay düzlemlerde farklı dinamiklere maruz kaldığını göstermektedir.



Şekil 4. 28 Deneme 10 için parçacığın deplasman-zaman grafiği



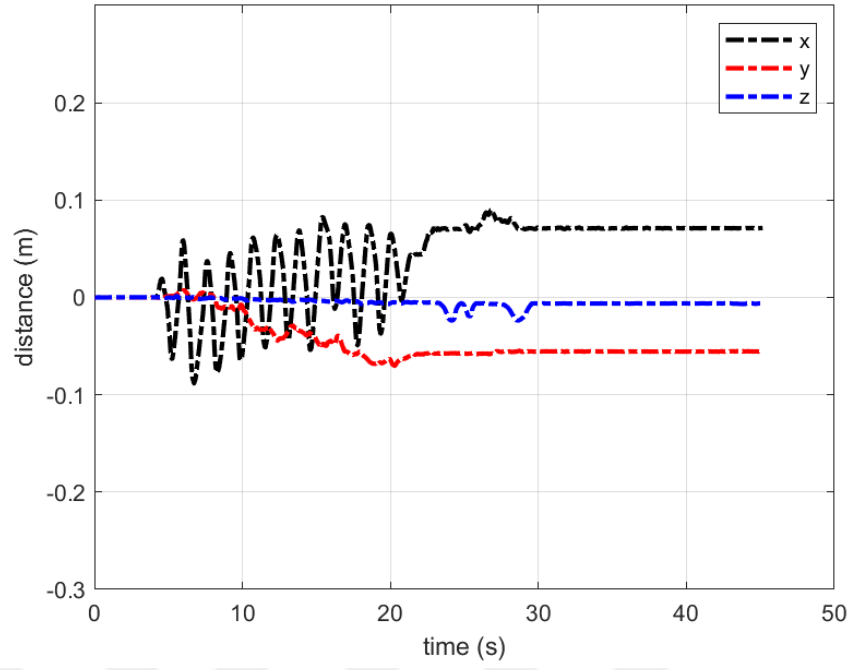
Şekil 4. 29 Deneme 10 için parçacığın izlediği yol



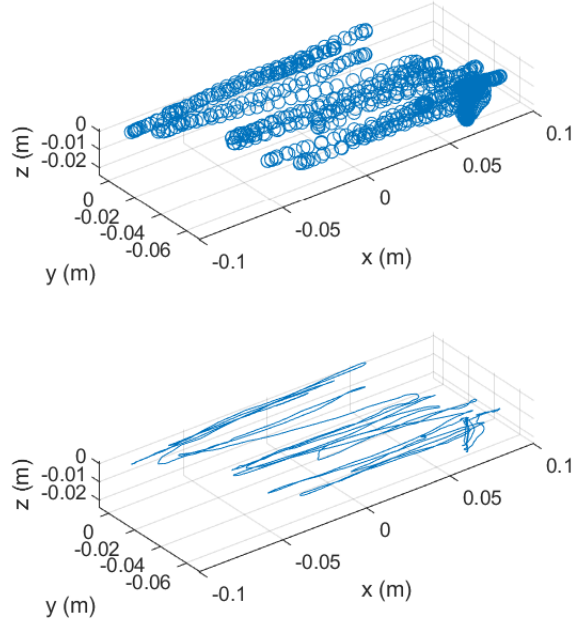
Şekil 4. 30 Deneme 10 için parçacığın başlangıç ve bitiş konumları

4.11. Deneme 11

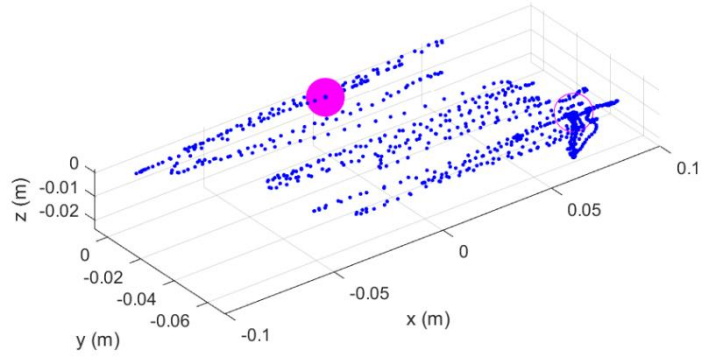
Bu denemede, parçacığın salınımlı hareket sırasında deney düzeneğinin tabanıyla temas ettiği ve sürtünmeye bağlı yavaşladığı anlar analiz edilmiştir. Görüntü işleme çıktılarında, parçacığın belirli konumlarda hareket hızının aniden azaldığı ve yön değiştirmeden önce kısa süreli duraksamalar yaşadığı tespit edilmiştir. Bu davranışlar, parçacığın yüzeyle temas ettiği noktalarda sürtünme kuvvetinin etkili olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen veriler, salınımlı akım altında yüzey-sürtünme etkileşiminin parçacık hareketi üzerindeki kritik rolünü göstermektedir.



Şekil 4. 31 Deneme 11 için parçacığın deplasman-zaman grafiği



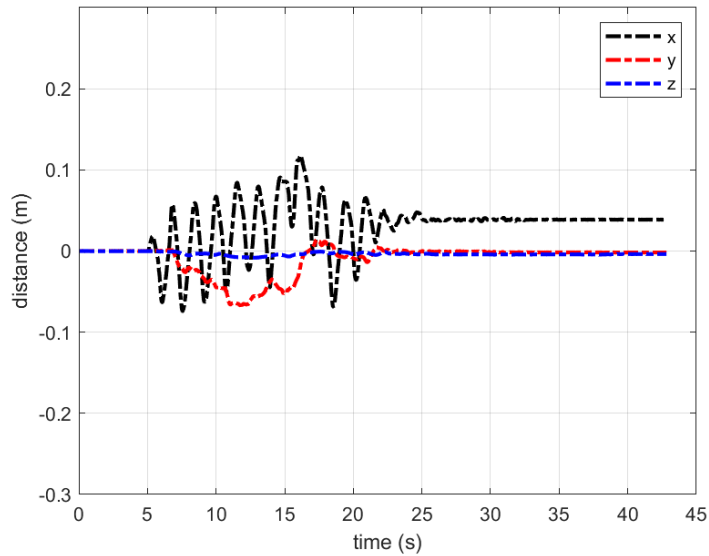
Şekil 4. 32 Deneme 11 için parçacığın izlediği yol



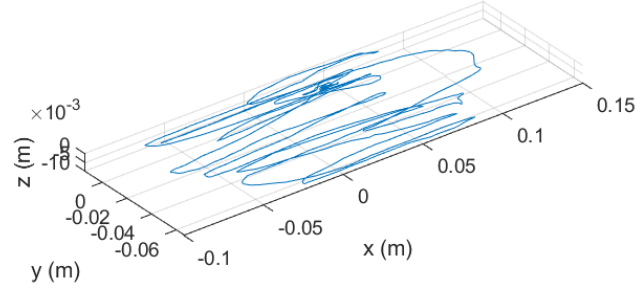
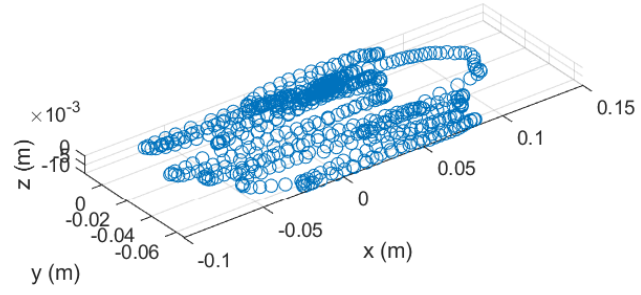
Şekil 4. 33 Deneme 11 için parçacığın başlangıç ve bitiş konumları

4.12. Deneme 12

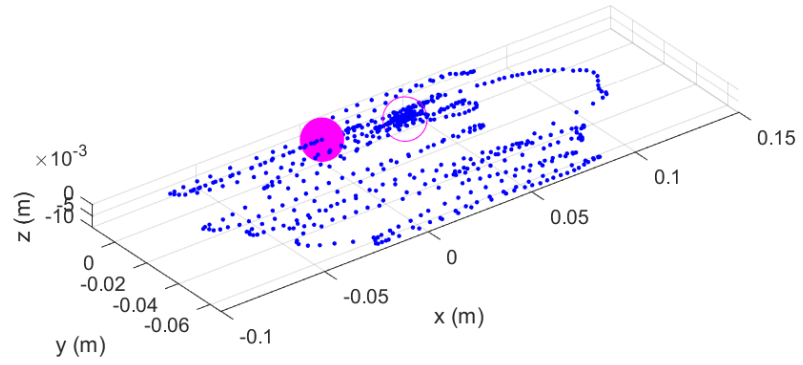
Bu son denemede, benzer koşullarda tekrarlanan deneylerde elde edilen veriler karşılaştırılmış ve sistemin tekrarlanabilirliği sorgulanmıştır. Aynı frekansta ve benzer başlangıç konumlarında yapılan deneylerde dahi parçacığın izlediği yolların farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, deney ortamındaki küçük değişkenlerin (örneğin başlangıç açısı, yüzey pürüzlülüğü gibi) parçacık hareketi üzerinde belirgin etkiler oluşturabildiğini ortaya koymuştur. Bulgular, sistemin karmaşık ve kaotik doğasını yansıtarak her tekrarın benzersiz bir iz bıraktığını göstermektedir.



Şekil 4. 34 Deneme 12 için parçacığın deplasman-zaman verileri



Şekil 4. 35 Deneme 12 için parçacığın izlediği yol



Şekil 4. 36 Deneme 12 için parçacığın başlangıç ve bitiş konumları

Tablo 4. 1 12 farklı Deneme için başlangıç ve bitiş konumları

Deneme No	Başlangıç Konumu(m)			Bitiş Konumu(m)		
	x	y	z	x	y	z
1	0	0	0	0.10137145	-0.0140098	-0.006266764
2	0	0	0	-0.03435324	-0.0287468	-0.00224419
3	0	0	0	0.01851701	-0.0179745	-0.000145992
4	0	0	0	0.06895943	-0.0148262	-0.003964289
5	0	0	0	0.05785955	0.03075001	0.000484905
6	0	0	0	0.04760484	-0.0101467	-0.003793175
7	0	0	0	0.05224858	-0.0520966	-0.005510133
8	0	0	0	-0.02550123	0.0400981	1.72E-05
9	0	0	0	0.08081879	-0.0271296	-0.002015318
10	0	0	0	0.00502284	0.05779499	0.002070132
11	0	0	0	0.07131993	-0.0555628	-0.006037698
12	0	0	0	0.03873573	-0.0017154	-0.003726382

5. TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, salınımlı akım ortamında tabanla etkileşim halindeki bir mikroplastik parçacığın hareketi deneysel olarak incelenmiş, elde edilen veriler görüntü işleme ve sayısal analiz yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, parçacıkların salınımlı su hareketlerine karşı verdiği tepkilerin karmaşık ve çok boyutlu bir yapıda gerçekleştiğini göstermiştir. Deneyler sırasında benzer sınır koşullarına rağmen elde edilen farklı hareket desenleri, parçacık davranışının deterministik olmaktan çok kaotik bir doğaya sahip olduğunu işaret etmektedir.

Parçacıkların davranışlarını etkileyen başlıca parametreler arasında; sıvı içindeki viskoz direnç, yerçekimi kuvveti, kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti, sıvı-parçacık yoğunluk farkı ve akış yönündeki ivmelenmeler sayılabilir. Ayrıca, yüzey ile parçacık arasında oluşan sürtünme etkisi ve parçacığın geometrik şekli de hareket üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Çalışmada elde edilen verilere göre, parçacıkların bazen yönünü sıkça değiştirdiği, bazen ise sabit bir salınım düzleminde ilerlediği gözlenmiştir. Bu farklılıkların, deney düzeneğindeki mikro ölçekli yüzey düzensizliklerinden, su içindeki enerji dağılımından veya parçacığın şekline bağlı olarak oluşan asimetric kuvvet dengelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Görüntü işleme tekniklerinin uygulanması sayesinde, binlerce karelik video görüntüsü karelere ayrılarak analiz edilmiş ve parçacıkların zamana bağlı konum bilgileri elde edilmiştir. Bu yöntem sayesinde yalnızca gözleme dayalı nitel analizlerin ötesine geçilerek, nicel ölçümlere dayalı bilimsel bir değerlendirme yapılmıştır. Alt ve yan kamera kayıtlarının eş zamanlı değerlendirilmesi ile üç boyutlu hareket algısı sağlanmış, parçacığın hem düşey hem de yatay düzlemdeki davranışı ortaya konmuştur.

Bu çalışma, özellikle mikroskobik kirlilik unsurlarının (örneğin mikroplastikler) suda nasıl davrandıklarını anlamak ve bu davranışları modellemek açısından önemli katkılar sunmaktadır. Elde edilen veriler, doğal sulardaki partikül taşınımı, kıyı mühendisliği, kanalizasyon sistemlerinin tasarımı ve çevresel modelleme çalışmaları için temel oluşturabilecek niteliktedir. Ayrıca, benzer deney sistemlerinin daha gelişmiş versiyonlarının tasarlanarak farklı akış tipleri (örneğin türbülanslı, laminer veya darbe etkili akımlar) altında da test edilmesi önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Aksel, M., Yagci, O., Valyrakis, M., & Kirca, V. S. Ö. (2023). Flow structures around a sphere attached to the bottom of a prismatic sloshing tank. *Sustainable Marine Structures*, 5(2), 134–148. <https://doi.org/10.32604/sms.2023.043637>
- Barry, J. D., Broomhead, D. S., & Jones, R. D. (1994). Topographic mapping of spectral dynamics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 257(1349), 331–336.
- Dabbagh, A., Dabbagh, F., Nouri, N., & Dorostkar, S. (2017). Tracking particle motion in an oscillatory flow field using MATLAB. *Journal of Fluids Engineering*, 139(10), 104501.
- Gravesen, H. B. (2018). On the necessity of model simplification in experimental hydraulics. *Hydraulic Engineering Reports*, 123(4), 201–209.
- Kooi, M., & Koelmans, A. A. (2019). Simplifying microplastic via continuous probability distributions for size, shape, and density. *Environmental Science & Technology Letters*, 6(9), 551–557. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.9b00379>
- Li, H., Zhang, J., & Zheng, B. (2021). Automated particle tracking and analysis in three-dimensional microscopy using MATLAB. *Journal of Microscopy*, 281(1), 18–29. <https://doi.org/10.1111/jmi.12969>
- Liu, S., Guo, Y., & Xu, M. (2020). Particle tracking in microfluidics using MATLAB. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 30(9), 095001.
- Mehta, P., & Majumdar, S. (2018). Particle tracking in non-uniform acoustic fields using MATLAB. *Ultrasonics*, 84, 111–119.
- Ochs, S., & Bozinovski, J. (2016). 3D particle tracking velocimetry in MATLAB. *Journal of Visualization*, 19(1), 65–73.
- Patel, R. V., & Bhoi, A. K. (2016). Particle tracking in low-speed flow using MATLAB. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(9), 1214–1219.
- Sahl, S. J., & Hell, S. W. (2019). Random-access scanning microscopy for 3D imaging in awake behaving animals. *Nature Methods*, 16(5), 507–510. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0412-z>
- Topçu, E., Toner, E., Doğan, M., & Tolun, L. (2013). Microplastics in the surface waters of the Gulf of Gemlik and Istanbul Strait, Turkey. *Marine Pollution Bulletin*, 75(1–2), 331–337. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.052>
- Verma, N., & Singh, R. (2021). Automated particle tracking in microfluidics using MATLAB and image processing toolbox. *Biophysical Reviews*, 13(4), 499–510.
- Wang, C., Ma, L., & Qiu, T. (2020). Real-time particle tracking in complex flows using MATLAB. *Computers & Fluids*, 200, 104422. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2020.104422>
- Wang, C., Ma, L., & Qiu, T. (2020). Real-time particle tracking in complex flows using MATLAB. *Computers & Fluids*, 204, 104563. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2020.104563>

Wu, Y., Yan, J., & Su, Y. (2017). Motion tracking of particles in the underwater environment based on MATLAB. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 82, 012043.

Wu, Z., & Zhang, X. (2019). Particle tracking velocimetry in high-speed flows using MATLAB. *Experiments in Fluids*, 60(6), 102.

Yang, X., Wang, X., Li, J., & Yang, X. (2016). Automatic tracking of particle motion in microscale atmospheric pressure plasma jets using MATLAB. *Plasma Science and Technology*, 18(6), 612–618.

Zhang, J., Zheng, B., & Li, H. (2020). Particle tracking and analysis in bioimaging using MATLAB. *Journal of Biophotonics*, 13(2), e201960093.

Zhang, L., Zhu, Y., & Liu, J. (2020). Numerical study of turbulent flow around a fixed sphere using RANS and LES. *International Journal of Multiphase Flow*, 125, 103225. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103225>

Zhou, X., Zhao, L., & Liu, Q. (2019). Particle tracking and reconstruction in tomographic particle image velocimetry using MATLAB. *Experiments in Fluids*, 60, Article 55. <https://doi.org/10.1007/s00348-019-2693-4>

Zhou, X., Zhao, L., & Liu, Q. (2019). Particle tracking and reconstruction in tomographic particle image velocimetry using MATLAB. *Measurement Science and Technology*, 30(6), 065302.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Özdemir Alperen TAN

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2022, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- 2023, Şantiye Şefi, Siberia İnşaat

Yayınları ve Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- 2023, Bildiri, Sloshing Damping using Vertical Piles in a Rectangular Tank, Antalya