

**Türbülansın Askıdaki Katı Maddenin Çökelme Hızına  
Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması**

**Program Kodu: 1002**

**Proje No: 116M035**

Proje Yürütücüsü:  
**Prof. Dr. Şebnem ELÇİ**

Bursiyerler:

Buse VURAL

Merve AY

MAYIS 2018

İZMİR

## İÇİNDEKİLER

Özet .....	1
Abstract .....	1
1.GİRİŞ .....	2
1.1 Literatür Özeti.....	4
2. GEREÇ VE YÖNTEM.....	9
2.1 Deney Düzenegi.....	9
2.2 Deneyde İzlenen Adımlar .....	12
2.3 Görüntü işleme.....	13
2.4 Çökelme Hızının Sayısal Modellenmesi .....	14
2.4.1 Fluent Sayısal Modeli.....	14
2.4.1.1 Standard k-ε Türbülans Modeli .....	16
2.4.1.2 K- w Türbülans Modeli.....	17
2.4.1.3 Lagrangian Dağınık Faz Modeli (DPM).....	17
2.4.1.4 Parçacık için Hareket Denklemi .....	18
2.4.1.5 Sayısal Modellerin Oluşturulması.....	19
3. BULGULAR .....	20
3.1 Deneylerin sonuçları.....	20
3.2 Sayısal Modelin Sonuçları.....	32
3.2.1 Sayısal Modelin Kurulumu .....	32
3.3.3 Laminer Akımda Lagrangian Dağınık Faz Modellemesi .....	34
3.3.4 Türbülanslı Akımda (Sabit hızlar) Lagrangian Dağınık Faz Modellemesi .....	35
3.3.5 Türbülanslı Akımda (Deneyde Gözlenen Hızlar) Lagrangian Dağınık Faz Modellemesi .....	37
3.3.5 Çökelme Hızının Hesabında Türbülans Şiddetinin Etkisinin Modellenmesi .....	39
4.TARTIŞMA/SONUÇ.....	45
KAYNAKLAR LİSTESİ .....	47
EKLER .....	48
Ek-1: Görüntü işleme analizi için Matlab’de yazılan program.....	48
Ek-2: Fluent programında parçacık çökelme hızının türbülans şiddetine bağlı olarak değiştirilmesi için yazılan kullanıcı tanımlı fonksiyonlar .....	50

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Büyük Menderes nehrinde su sütunu boyunca ADCP ile ölçülen düşey akım hızlarının Stokes' denklemi ile hesaplanan çökme hızları ile karşılaştırılması.....	4
Şekil 2. Büyük Menderes nehrinde su sütunu boyunca ADCP ile ölçülen düşey hızların türbülans şiddeti ile karşılaştırılması .....	4
Şekil 3. Durgun suda parçacıkların dane boyutuna bağlı çökme hızları değerleri (Julien 1995) .....	6
Şekil 4. Deneylerde kullanılan düzenek.....	10
Şekil 5. Türbülanslı akımı oluşturan motor sistemi a) dışarıda b) su tankında monte edilmiş hali.....	11
Şekil 6. Deneylerde kullanılan 10 MHz akım hız ölçer.....	12
Şekil 7. Deneylerde kullanılan elek seti .....	13
Şekil 8. Dane boyutu $d=2$ mm olan ve $1 \text{ m/s}^2$ ivme ile elde edilen akım altında bırakılan parçacıkların görüntü işleme ile elde edilen yörüngeleri. ....	13
Şekil 9. Laminer akımda gözlenen çökme hızlarının Julien (1995) tarafından tabloda sunulan teorik değerler ve Denklem (4) ile hesaplanan değerler ile karşılaştırılması.....	20
Şekil 10. Türbülanslı akım koşullarında ( $a=1 \text{ m/s}^2$ ), 2 mm dane boyutlu parçacığın, tabandan 20 cm mesafeden geçtiği anın 2 saniye öncesi ve sonrasında akım hız ölçer ile kaydedilen akım hızı ve sapınç hızı değerleri.....	21
Şekil 11. Türbülanslı akım koşullarında ( $a=1 \text{ m/s}^2$ ), 2 mm dane boyutlu parçacığın, tabandan 40 cm mesafeden geçtiği anın 2 saniye öncesi ve sonrasında akım hız ölçer ile kaydedilen akım hızı ve sapınç hızı değerleri.....	22
Şekil 12. Türbülanslı akım koşullarında ( $a=1 \text{ m/s}^2$ ), 2 mm dane boyutlu parçacığın, tabandan 60 cm mesafeden geçtiği anın 2 saniye öncesi ve sonrasında akım hız ölçer ile kaydedilen akım hızı ve sapınç hızı değerleri.....	23
Şekil 13. Türbülanslı akım koşullarında ( $a=1 \text{ m/s}^2$ ), 2 mm dane boyutlu parçacığın, tabandan 80 cm mesafeden geçtiği anın 2 saniye öncesi ve sonrasında akım hız ölçer ile kaydedilen akım hızı ve sapınç hızı değerleri.....	24
Şekil 14. 1 mm dane boyutundaki parçacığın görüntü işleme analizi sonucunda hazne tabanından 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerde elde edilen çökme hızlarının iki farklı ivme için karşılaştırması .....	25
Şekil 15. 2 mm dane boyutundaki parçacığın görüntü işleme analizi sonucunda hazne tabanından 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerde elde edilen çökme hızlarının iki farklı ivme için karşılaştırması .....	26
Şekil 16. 3,5 mm dane boyutundaki parçacığın görüntü işleme analizi sonucunda hazne tabanından 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerde elde edilen çökme hızlarının iki farklı ivme için karşılaştırması ....	26
Şekil 17. 4 mm dane boyutundaki parçacığın görüntü işleme analizi sonucunda hazne tabanından 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerde elde edilen çökme hızlarının iki farklı ivme için karşılaştırması .....	27
Şekil 18. Gözlenen çökme hızları değerlerinin düşük motor devriyle yaratılan türbülanslı akım koşullarında tabandan 80 cm mesafede teorik olarak hesaplanan laminer akım çökme hızı değerleriyle karşılaştırılması.....	28
Şekil 19. Gözlenen çökme hızları değerlerinin yüksek motor devriyle yaratılan türbülanslı akım koşullarında tabandan 80 cm mesafede teorik olarak hesaplanan laminer akım çökme hızı değerleriyle karşılaştırılması.....	28
Şekil 20. Gözlenen çökme hızları değerlerinin düşük motor devriyle yaratılan türbülanslı akım koşullarında tabandan 40 cm mesafede teorik olarak hesaplanan laminer akım çökme hızı değerleriyle karşılaştırılması.....	29

Şekil 21. Gözlenen çökme hızları değerlerinin yüksek motor devriyle yaratılan türbülanslı akım koşullarında tabandan 40 cm mesafede teorik olarak hesaplanan laminar akım çökme hızı değerleriyle karşılaştırılması.....	29
Şekil 22. Tabandan 20 cm mesafede her iki motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım koşullarında farklı dane boyutları için gözlenen çökme hızları ve türbülans şiddeti değerleri.....	30
Şekil 23. Tabandan 40 cm mesafede her iki motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım koşullarında farklı dane boyutları için gözlenen çökme hızları ve türbülans şiddeti değerleri.....	31
Şekil 24. Tabandan 60 cm mesafede her iki motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım koşullarında farklı dane boyutları için gözlenen çökme hızları ve türbülans şiddeti değerleri.....	31
Şekil 25. Model kurulurken oluşturulan kontrol hacmi.....	32
Şekil 26. Model kurulurken oluşturulan sayısal ağ.....	33
Şekil 27. Sayısal ağın kalitesini belirten istatistik verileri .....	33
Şekil 28. 2 mm dane boyutuna sahip parçacığın laminar akım koşullarında koşullarında modellenen yörüngesi.....	35
Şekil 29. Türbülanslı koşullarda parçacığın bırakıldığı orta noktada alınan düzlemsel bir kesit üzerinde modellenen akım hızları. ....	36
Şekil 30. 2 mm dane boyutuna sahip parçacığın türbülanslı akım koşullarında koşullarında modellenen yörüngesi.....	36
Şekil 31. Türbülanslı koşullarda parçacığın bırakıldığı orta noktada alınan düzlemsel bir kesit üzerinde modellenen türbülans şiddeti. ....	37
Şekil 32. Fluent modeliyle hesaplanan parçacık çökme hızları değerlerinin laminar akım ve türbülanslı akım koşullarında karşılaştırılması .....	38
Şekil 33. Fluent modeliyle hesaplanan türbülans kinetik enerjisi değerlerinin iki farklı türbülanslı akım koşullarında karşılaştırılması .....	38
Şekil 34. Fluent modeliyle hesaplanan türbülans şiddeti değerlerinin iki farklı türbülanslı akım koşullarında karşılaştırılması .....	39
Şekil 35. Türbülans şiddeti %5 iken Fluent modeliyle hesaplanan x yönündeki akım hızları.....	40
Şekil 36. Türbülans şiddeti %5 iken Fluent modeliyle hesaplanan düşey (y) yönündeki akım hızları ...	40
Şekil 37. Türbülans şiddeti %5 iken Fluent modeliyle hesaplanan z yönündeki akım hızları .....	41
Şekil 38. Türbülans şiddeti %5 iken Fluent modeliyle hesaplanan bileşke akım hızları .....	41
Şekil 39. Farklı türbülans yoğunluklarında parçacığın bırakıldığı düşey düzlemde y yönündeki akım hızının mesafeye göre değişimi. ....	42
Şekil 40. Enjeksiyon özellikleri sekmesinden kullanıcı tanımlı fonksiyonun modele tanımlanması.....	43
Şekil 41. Kullanıcı tanımlı fonksiyon modele dahil edilmeden ve edilerek modellenen parçacık çökme hızlarının karşılaştırılması.....	44
Şekil 42. Kullanıcı tanımlı fonksiyon modele dahil edilmeden ve edilerek modellenen parçacık çökme hızlarının karşılaştırılması.....	44

## TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. Deneylerde uygulanan akım hız ölçerin (ADV) konfigürasyonu .....	9
Tablo 2. Motor devir hızı ve ivmesinin voltaja göre değişimi.....	10

## Özet

Türbülanslı akımlarda düşey yönde akı nispeten küçük olsa da, gözlenen biyolojik ve kimyasal değişimlerin açıklanmasında büyük önem taşır. Türbülans genel olarak, rüzgar ve gelgitler etkisiyle kinetik enerjide oluşan değişimlerle ve potansiyel enerjide değişim sonucu tabakalaşmada oluşan kararsızlıklar sebebiyle oluşur. Yüzeysel akımlarda hem karışım hem de askıdaki katı madde modellenmek istendiğinde türbülansın hem karışıma, hem de askıdaki katı madde çökme hızına etkisinin gerçekçi olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmayla kontrollü bir deney tankında parçacık çökme hızına türbülansın etkisinin araştırılması ve gözlenen 3 boyutlu akım hızı ölçümleri ile türbülans karakteristiğinin belirlenerek türbülanslı akımlarda askıdaki parçacığın çökme hızının belirlenmesine yönelik yeni bir yaklaşım geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışma için tasarlanan deney düzeneğinde türbülans kontrollü bir şekilde ivme ölçerli ve motorlu bir sistem ile gerçekleştirilmiştir. Yine kontrollü olarak düzeneğe beslenen boyutu belli parçacıkların çökme hızları ise görüntüleme yöntemiyle deney düzeneğinde oluşturulacak farklı türbülans koşullarında ölçülmüştür. Deneysel çalışma özünde türbülanslı ortamda görüntüleme yöntemiyle elde edilecek boyutu belli parçacık çökme hızının, akım hız ölçer ile anlık olarak ölçülen akım hızlarından elde edilecek türbülans karakteristikleriyle ilişkilendirilmesini içermektedir.

Çalışma sonucunda elde edilen bulgular kullanılarak sayısal model yardımıyla (Fluent modeli) türbülans karakteristiği çökme hızına entegre edilmiş ve düzeneğe beslenen parçacığın çökme hızı türbülanslı akım etkisi altında sayısal olarak modellenmiştir. Bu sayede dane boyutu belli bir parçacığın çökme hızının türbülans etkisi altında tahmini ve modellenmesi yolunda literatürde önemli bir aşama kaydedildiği düşünülmektedir. Proje çıktılarının özellikle erozyon etkisiyle askıda katı madde miktarının fazla olduğu baraj göllerinde su alma yapısının askıdaki katı maddeyi dışarıda bırakacak şekilde yeniden tasarımında ve nehirlerde köprü ayakları için koruma yapılarının tasarımında kullanılabileceği düşünülmektedir.

## Abstract

Although the vertical flux is relatively small in turbulence flows, it plays an important role in the transport of heat, momentum and suspended and dissolved substances. In general, the turbulence is produced by mean shear due to changes in kinetic energy generated by winds or tides and by unstable stratification due to changes in potential energy. For accurate

modeling of mixing and sediment transport in surface flows, the effects of turbulence on mixing and on settling velocity of the particles in the water column should be well defined.

This study aims to quantify the turbulence from direct measurements of 3D velocity and measurements and to develop an approach for estimation of the settling velocity of suspended sediments under the effect of turbulent flow in a controlled experiment tank. The turbulence in the water tank is created by a motor system having an accelerator designed specifically for this study. The settling velocities of sediment particles with a known size is estimated by image processing under different turbulent conditions. Experimental study involves relation of settling velocity measured by image processing with the turbulence characteristics obtained from the flow velocities measured by the acoustic Doppler velocimeter.

The results of this study has enabled the entegration of turbulence characteristics of flow on modeling of the particle settling velocity via numerical model (Fluent model). This approach lead to an advancement in the literature for estimation of settling velocity of suspended sediment particles with a known particle size under turbulent flow conditions. The end result of this study, the approach for modeling of the settling velocity of particles under the effects of turbulent flow is assumed to be beneficial in the design of water intake structures in high turbid reservoirs and also in the design of protection structures of bridge piers.

## 1.GİRİŞ

Bu çalışmada, kontrollü bir deney tankında parçacık çökme hızına türbülansın etkisinin araştırılması ve yapılan 3 boyutlu akım hızı ölçümleri ile türbülans karakteristiğinin hesaplanarak türbülanslı akımlarda askıdaki parçacığın çökme hızının belirlenmesine yönelik yeni bir yaklaşım geliştirilmesi hedeflenmiştir. Türbülanslı akımlarda düşey yönde akı nispeten küçük olsa da, gözlenen biyolojik ve kimyasal değişimlerin açıklanmasında büyük önem taşır. Yüzeysel akımlarda karışım modellenmek istendiğinde hem niceliksel olarak büyüklüğünün bilinmesi hem de karışımı harekete geçiren mekanizmaların gerçekçi olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmayla karışım, düşeyde Akustik Doppler akım hızı ölçer ile hassas bir şekilde gözlenen 3 boyutlu akım özellikleri ile hesaplanan Reynolds gerilmeleri ile ifade edilen türbülans özellikleri ile tanımlanmış ve parçacık çökme hızına etkisi değerlendirilmiştir.

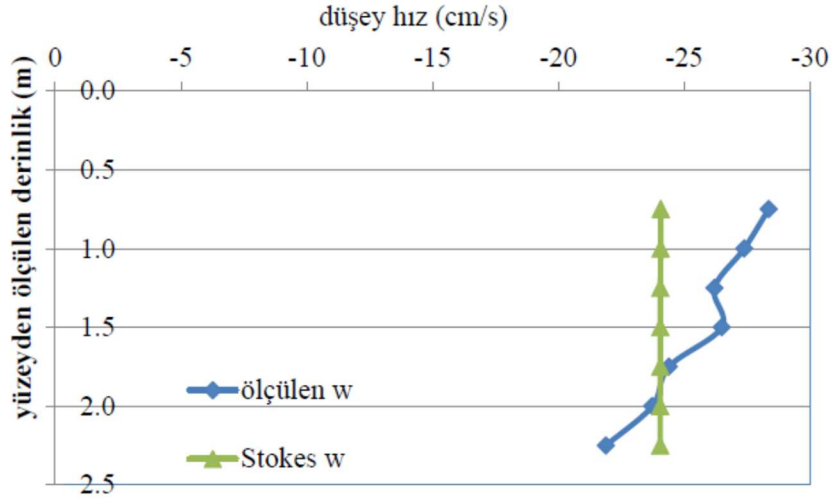
Sunulan çalışma daha önce tamamlanan bir Tübitak projesinin (114M019 nolu) devamı niteliğinde olup, çalışma esnasında belirlenen eksiklerin giderilmesi için planlanmış özgün bir deneysel çalışmayı içermektedir. Yürütücü tarafından tamamlanan Tübitak projesi kapsamında daha önce Büyük Menderes Nehri üzerinde bulunan Aydın Köprüsü'nden nehir

su sütunu boyunca akım hız ölçer ve sıcaklık/yoğunluk ölçer yardımıyla eş zamanlı ölçüm yapılmış ve türbülans kinetik enerjisinin yayılımı, Reynolds gerilmeleri ve sıcaklık varyansı ölçülmüştür. Ölçülen verilerin analizi ile parçacık çökme hızının türbülanslı karakteristiği arasında ilişki kurulmuş ve çalışma alanı 3 boyutlu Fluent 15.0 sayısal modeli yardımıyla modellenmiştir.

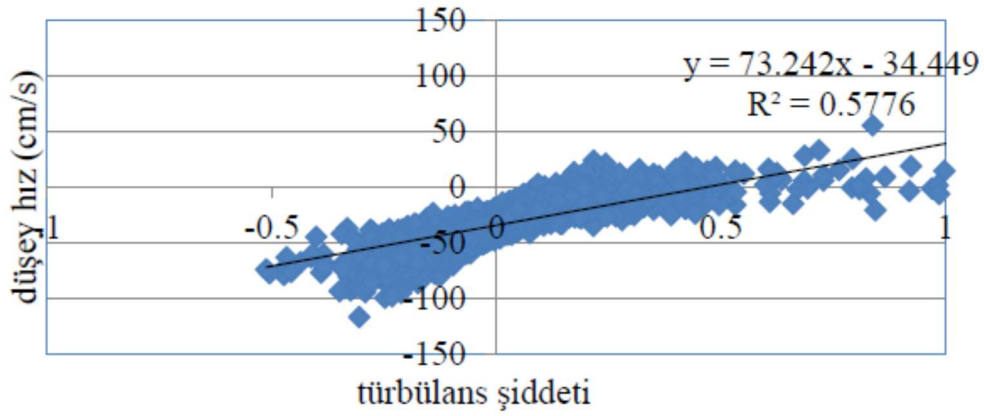
Sunulan deneysel çalışmada ise kontrollü olarak düzeneğe beslenen boyutu belli parçacıkların çökme hızlarının görüntüleme yöntemiyle deney düzeneğinde oluşturulan farklı türbülans koşullarında ölçülmesini ve akım hız ölçer ile ölçülen anlık hızlardan elde edilen türbülans karakteristikleri ile ilişkilendirilmesini kapsamaktadır. Deney düzeneğinde türbülans ise kontrollü bir şekilde bu düzenek için tasarlanan ivme ölçerli ve motorlu bir sistem ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal model çalışmasında ise türbülans karakteristiğini çökme hızına entegre edebilmek için farklı yaklaşımlar belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular ışığında kullanılan sayısal modelde söz konusu akımın türbülans özelliklerinin çökme hızına entegre edilebileceği bir yaklaşım belirlenmiş ve uygulaması yapılmıştır. Bu sayede dane boyutu belli bir parçacığın çökme hızının türbülans etkisi altında tahmini ve modellenmesi yolunda literatürde önemli bir aşama kaydedildiği düşünülmektedir.

Bu çalışma; önceki çalışmada Büyük Menderes Nehri'nde su sütunu boyunca eş zamanlı Akustik Dopler Akım Profil Ölçer (ADCP) ve sıcaklık/yoğunluk ölçer ile yaptığı akım ve sıcaklık ölçümleri ise çökme hızının türbülans kinetik enerjisi ile ilişkisinin olduğu gözlem yoluyla görülerek tasarlanmıştır. ADCP ile düşeyde ölçülen akım hızlarının Stokes' denklemi kullanılarak hesaplanan çökme hızları ile karşılaştırılması sonucu türbülanslı akımlarda cihazın çalışma prensibi gereği ölçülen düşey hızlarla özleştirilen çökme hızlarının Stokes' ve benzer denklemlerle tanımlanamayacağı görülmektedir (Şekil 1). Hesaplanan türbülans şiddeti ( $w'/U$ ) ile düşey hız birlikte çizdirildiğinde ise düşey hızın türbülans şiddeti ile değiştiği görülmektedir (Şekil 2). Ancak önceki çalışma kapsamında tanımlanamayan konu türbülans şiddeti ve parçacık dane boyutu ve yoğunluğunun birlikte çökme hızına nasıl etki ettiği. Sunulan çalışma deneysel ve sayısal yöntemlerle bu konuyu araştırmayı amaçlamıştır.

Raporun 'giriş' bölümü neden bu çalışmayı yaptığımızı, ve konuyla ilgili yapılan literatür taramasını, 'gereç ve yöntem' bölümü deney düzeneğinin hazırlanması ve özelliklerini, deneyde izlenen adımları, uygulanan görüntü işleme tekniğini, ve kullanılan sayısal modelin özelliklerini içermekte, 'bulgular' bölümü ise deneysel modelin sonuçlarını, uygulanan sayısal modelin sonuçlarını ve türbülans özelliklerinin sayısal modele entegrasyonunu içermektedir. Sonuçların yorumlanması ise 'tartışma/ sonuç' bölümünde yer almaktadır.



Şekil 1. Büyük Menderes nehrinde su sütunu boyunca ADCP ile ölçülen düşey akım hızlarının Stokes' denklemi ile hesaplanan çökeltme hızları ile karşılaştırılması.



Şekil 2. Büyük Menderes nehrinde su sütunu boyunca ADCP ile ölçülen düşey hızların türbülans şiddeti ile karşılaştırılması

### 1.1 Literatür Özeti

Parçacık çökeltme hızının hassas tayini birçok mühendislik problemi için gereklidir. Bu mühendislik problemlerine örnek olarak çökeltim havuzlarının tasarımı, nehir ve göllerde birikmenin hesabı, dere kıyılarının erozyunun hesabı verilebilir. Askıda katı madde miktarının yüksek olduğu baraj göllerinde ise doğru su alma yapısının tasarımı hala araştırılmakta olan önemli konulardan biridir. Çökeltme hızının tahmini birçok araştırmacının ilgisini çekmişse de yapılan çalışmalar büyük oranda laminar akım için sınırlı kalmış, türbülansın etkisi hesaba katılmadan çökeltme hızı formülleri parçacık özelliklerine bağlı olarak geliştirilmiştir. Sadat-Helbar ve Amiri-Tokaldany (2009) makalelerinde 17 ayrı çalışmadan elde edilen çökeltme hızı



formüllerini güzel bir şekilde özetlemiştir. Bu özet birçok ünlü çalışmayı ve konu uzmanlarının geliştirdikleri formülleri kapsamaktadır. Bunlar arasında sırasıyla Stokes (1851), Rubey (1933), Yalın (1977), Van Rijn (1989), Zhang (1989), Julien (1995) ve Wu ve Wang (2006) tarafından geliştirilen bu formüller arasında en bilinenleridir. Stokes (1851) tarafından ve ağırlık, kaldırma ve itki kuvvetlerinin eşitliğine dayanan çökme hızı denklemi; geliştirildiği zamandan bu yana uzun bir süre sedimentle ilgili çalışmalarda olduğu gibi kullanılmış ve sonrasında ise Reynolds sayısı 1'den küçük olma durumu için geçerli olan denklem; farklı Reynolds sayısı aralıkları için parçacık boyutu, Reynolds sayısı ve itki katsayısı içerecek şekilde değiştirilmiş ve geliştirilmiştir. Sayısal modellerde en yaygın olarak kullanılan Van Rijn (1989) denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$w = \frac{1}{18} (s - 1) \frac{gd^2}{\nu} \quad d < 0.01 \text{ cm} \quad (1)$$

$$w = 1.1 \sqrt{(s - 1)gd} \quad d > 0.1 \text{ cm} \quad (2)$$

Van Rijn (1989) tarafından geliştirilen denklemlerde  $w$ , çökme hızını;  $s$ , parçacık yoğunluğunun su yoğunluğuna oranını;  $\nu$ , vizkoziteyi;  $d$ , dane boyutunu;  $d^*$  ise boyutsuz etkin dane boyutunu belirtmektedir. Julien (1995) ise benzer şekilde itki katsayısının ( $C_D$ ) Denklem 3' teki gibi tanımlandığı kum parçacıkları için  $s$ ,  $\nu$ , ve  $d$  'ye bağlı olarak aşağıdaki formülü (Denklem 4) geliştirmiştir.

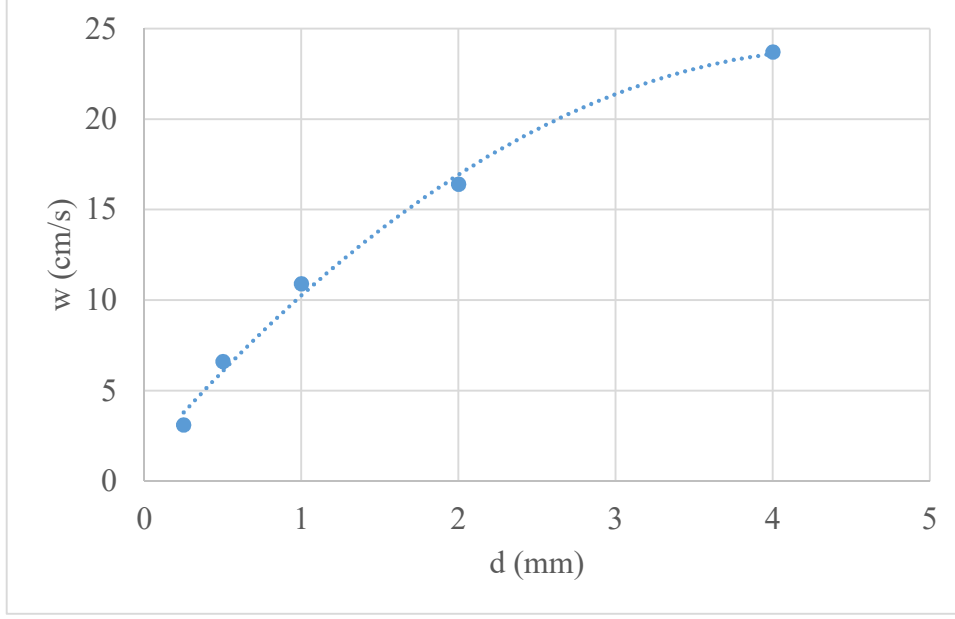
$$C_D = (24g/\omega d) + 1,5 \quad (3)$$

$$\omega = \frac{8g}{d} \left\{ \left[ 1 + 0,0139 * d_*^3 \right]^{0,5} - 1 \right\} \quad (4)$$

$$d_* = d \left[ \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (5)$$

Yine Julien (1995) tarafından durgun suda; parçacıkların dane boyutuna bağlı çökme hızları değerleri tablo halinde sunulmuş ve bu değerlere göre grafik çizdirildiğinde Şekil 3 elde edilmiştir.

Bu çalışmalarda geliştirilen formüller mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılmakla birlikte bir çok kısıtlamaları vardır. Bu kısıtlamaların başında geliştirilen eşitliklerin  $Re < 1$  için ve parçacıkların küresel olduğu durumda geçerli olmaları gelmektedir. Bu koşulların sağlanmadığı durumlardaki eksikleri gidermek amacıyla deneysel çalışmalardan elde edilen grafik eğrileri (e.g. Rubey 1933; Graf 1984) geliştirilse de pratik kullanımları olmadığı için tercih edilmemişlerdir. Wu and Wang (2006) ise literatürde sunulan mevcut eğriler üzerinde çalışarak bir matematiksel ifade geliştirmişlerdir (Denklem 6):



Şekil 3. Durgun suda parçacıkların dane boyutuna bağlı çökme hızları değerleri (Julien 1995)

$$w_s = \frac{Mv}{Nd} \left[ \sqrt{\frac{1}{4} + \left( \frac{4N}{3M^2} d_*^3 \right)^{1/n}} - \frac{1}{2} \right]^n \quad (6)$$

Burada  $S_f$  dane şekline bağlı katsayı,  $d_*$  ise boyutsuz etkin dane boyutu olmak üzere  $M = 53,5e^{-0,65S_f}$  ;  $N = 5,65e^{-2,5S_f}$  ;  $n = 0,7 + 0,9S_f$  şeklinde ifade edilmektedir.

Parçacıkların çökme hızlarını hesaplayan mevcut denklemlerin özetlendiği Sadat-Helbar ve Amiri-Tokaldany (2009) makalesinde her durum için önerilen genel bir denklem mevcuttur. Söz konusu yazarlar, etkin dane boyutu ( $d_*$ ) 10'dan büyük ve küçük olma durumuna göre iki adet ilişki bulmuşlardır. Etkin dane boyutu 10'dan büyük ise

$$\omega = \frac{0,033g}{d} \left( \frac{d^3 g (s-1)}{g^2} \right)^{0,963} \quad (7)$$

Etkin dane boyutu 10'dan küçük ise

$$\omega = \frac{0,51g}{d} \left( \frac{d^3 g (s-1)}{g^2} \right)^{0,553} \quad (8)$$

ilişkisi geçerli olmaktadır. Görüldüğü gibi tüm bu denklemler **türbülanslı akımın özelliklerini ve etkisini** hesaba katmadan parçacık çökme hızını tahmine yöneliktir, o yüzden de eksik kaldığı düşünülmektedir.

Son yıllarda bu eksiği gidermek üzere ve türbülans kinetik enerjisinin karakteristiğini tanımlayabilmek amacıyla çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan Etemad-Shahidi ve Imberger (2001) tarafından yapılan ve türbülansın tabakalaşmış akımlarda anatomisini inceleyen çalışma özellikle dikkate değerdir. Japonya'da (Lake Biwa) ve İsrail'de (Lake Kinneret) iki tabakalaşmış gölde yaptıkları gözlemlerde yüksek çözünürlükte akım hızları ve sıcaklık ölçmüşlerdir. Tabakalaşmış bölgede türbülansın kesikli (intermittent) ama yayılcı (dissipative) bir karakter izlediğini, bunun sonucunda türbülans Froude sayısının ( $Fr_t = q/(L_T \times N)$ ) düşük ve net karışım verimliliğinin çok düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Hatta yayılma katsayısı ( $D = 3 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ ), okyanusta gözlenen değerlerin çok üstünde bulunmuştur ve bunun sonucu olarak türbülans Reynolds sayısı ( $Re_t = (q \times L_T)/\nu$ ) yüksek bulunmuştur. Yine bu çalışma türbülans kinetik enerjisinin, sıcaklığın düşey gradyanına bağlı olarak hesaplanan türbülans kinetik enerjisinin dağılımına ( $\varepsilon_B$ ) ve türbülans ölçeğine doğrudan ilişkili olduğu ortaya konmuştur ( $q = 1.3 \times (\varepsilon_B L_T)^{1/3}$ ).

Saggio ve Imberger (2001) tarafından yapılan çalışma ise üç yaz boyunca İsrail'de tabakalaşmış bir gölde (Lake Kinneret) yapılan yüksek çözünürlüklü akım hızları ve sıcaklık ölçümlerinin değerlendirmesini içermektedir. Bu çalışmada ölçülen verilerden türbülans çalkantılarını eldesi ve akı hesabı için detaylı bir yaklaşım sunulmuştur. Bu çalışmada araştırmacılar topladıkları veriyi çeşitli parametreler kanalıyla analiz etmişler ve karışımı bu parametrelerin farklı değerleri için incelemişlerdir. Bu parametrelerden türbülans Froude sayısı, türbülans Reynolds sayısı, ve gerilme oranı ( $Fr_\gamma = \sqrt{\varepsilon/(\nu \times N^2)}$ ) özellikle önemli olarak bulunmuştur. Gerilme oranı arttıkça, karışımın arttığı gözlenmiş, tabakalaşmış katmanın %40'ında türbülansın etkili olduğu ve bu bölgede, gerilme oranının 6'dan büyük değerler aldığı gözlenmiştir. Ayrıca Richardson sayısı ile gerilme oranı ilişkilendirilmiştir ( $Fr_\gamma = 2.3/Ri^{3/4}$ ).

Ivey ve diğerleri (2008) yaptıkları çalışmada düşeyde karışımın ne ölçüde gerçekleştiğinin belirlenmesinde karşılaşılan zorluklara değinmişlerdir. Temel problemin yerçekimiyle etkilenen türbülanslı karışımın düşey bileşeninin zamana bağlı değişimi ve homojen olmayan yapısı olması ve bunun ölçüm ve sonrasında verilerin değerlendirilmesi esnasında zorluklara yol açması olarak tanımlanmıştır. Türbülansın şiddetinin laminar ve türbülanslı akımda sürekli geçiş halinde olması ve zaman ve mekandaki düzensizlikler zorluğu arttırmaktadır. Yine bu çalışmada da yukarıda bahsi geçen çalışmalara paralel şekilde türbülans Froude sayısı, türbülans Reynolds sayısı ve gerilme oranı boyutsuz parametreleri yardımıyla analiz yapılmıştır. Bu parametrelerden gerilme oranının kaldırma kuvveti akısının türbülansın oluşma süresine oranı olarak yorumlanabileceği belirtilmiş ve önemi vurgulanmıştır. Karışım mekanizmasının moleküler, geçiş ve enerjik rejimlerde tanımlandığı

makalede, moleküler rejimin gerilme oranı 7'den küçük olduğunda karışımda etkili olduğu, enerjik rejimin ise gerilme oranı 100'den büyük olduğunda etkili olduğu belirtilmiştir.

Geyer ve diğerleri (2008) haliçlerde düşeyde karışımı ifade etmeye çalışmışlardır. Nehirlerin denizlere ulaştığı yer olan haliçlerde hem yayılım oranının ( $\epsilon$ ) hem de kaldırma kuvveti akısının (B) yüksek değerlere ulaşıyor olması nedeniyle farklı haliçlerden toplanan veri setlerini birleştirerek türbülans yayılımı ve kaldırma kuvveti frekansı ( $N = ((g/\rho) \times (\partial\rho/\partial z))^{1/2}$ ) arasında ilişki aramışlardır. Haliçlerde gözledikleri  $\epsilon$  değeri  $10^{-4}$  W/kg civarındadır ki bu da okyanuslara göre  $10^3$ - $10^4$  kat fazladır. Benzer şekilde tabakalaşmanın göstergesi olan kaldırma kuvveti frekansı haliçlerde okyanusa göre fazladır ( $N=0.1$ - $0.3$  s $^{-1}$ ). Bu çalışmada karışım verimliliği de hesaplanmış ve 0.15 civarında bulunmuştur, bu da tabakalaşmanın zayıf oluşu ile ilişkilendirilmiştir. Çalışma sonuçlarının haliçlerde türbülansın çok karmaşık yapısının nümerik model parametrelerinin seçilmesinde baz alınabileceği belirtilmiştir.

Stacey ve diğerleri (1998) ise yine bir haliçte yaptığı gözleme bağlı olarak su kolonunu kaldırma kuvveti akısının etkisine göre bölgelere ayrılabilirliğini belirtmişlerdir. Diğer araştırmalara paralel şekilde gerilme oranının önemini vurgulamışlar ve gerilme oranının zamanın tamamında 20'den büyük olmasının türbülansın kaldırma kuvveti akısından kaynaklandığının (içsel dalgalar yerine) göstergesi olduğunu belirtmişlerdir. Haliçte yaptıkları ölçümleri ayrıca sıklıkla kullanılan bir türbülans modeli olan Mellor Yamada 2.5 türbülans modeli sonuçları ile mukayese etmişler ve modelin türbülans kinetik enerjisini tabakalaşmanın güçlü olduğu bölgelerde daha az, zayıf olduğu bölgelerde ise olduğundan daha fazla hesapladığını belirtmişlerdir.

Türbülansın parçacığın çökme hızı üzerine etkilerini inceleyen az sayıda çalışmadan biri olan Kawanisi ve Shiozaki (2008) ise bu etkiyi deneysel yolla incelemişlerdir. Bu çalışmada çökme hızının zayıf türbülans koşullarında %40 oranında azaldığı, türbülans etkisi arttıkça çökme hızının da arttığı (6 kat kadar) gözlenmiştir. Çalışmada Stokes sayısının ( $St = \tau_p / \tau_\lambda$ ) ;  $\tau_p = sd^2 / 18\nu$  ;  $\tau_\lambda = (15\nu/\epsilon)^{(1/2)}$ ) etkisi üzerinde özellikle durulmuş ve yüksek Stokes sayısında parçacık çökme hızının yavaşladığı belirtilmiştir. Burada  $\tau_p$  tepki zamanını;  $\tau_\lambda$  ise Taylor zaman ölçeğini göstermektedir.

## 2. GEREÇ VE YÖNTEM

### 2.1 Deney Düzeneği

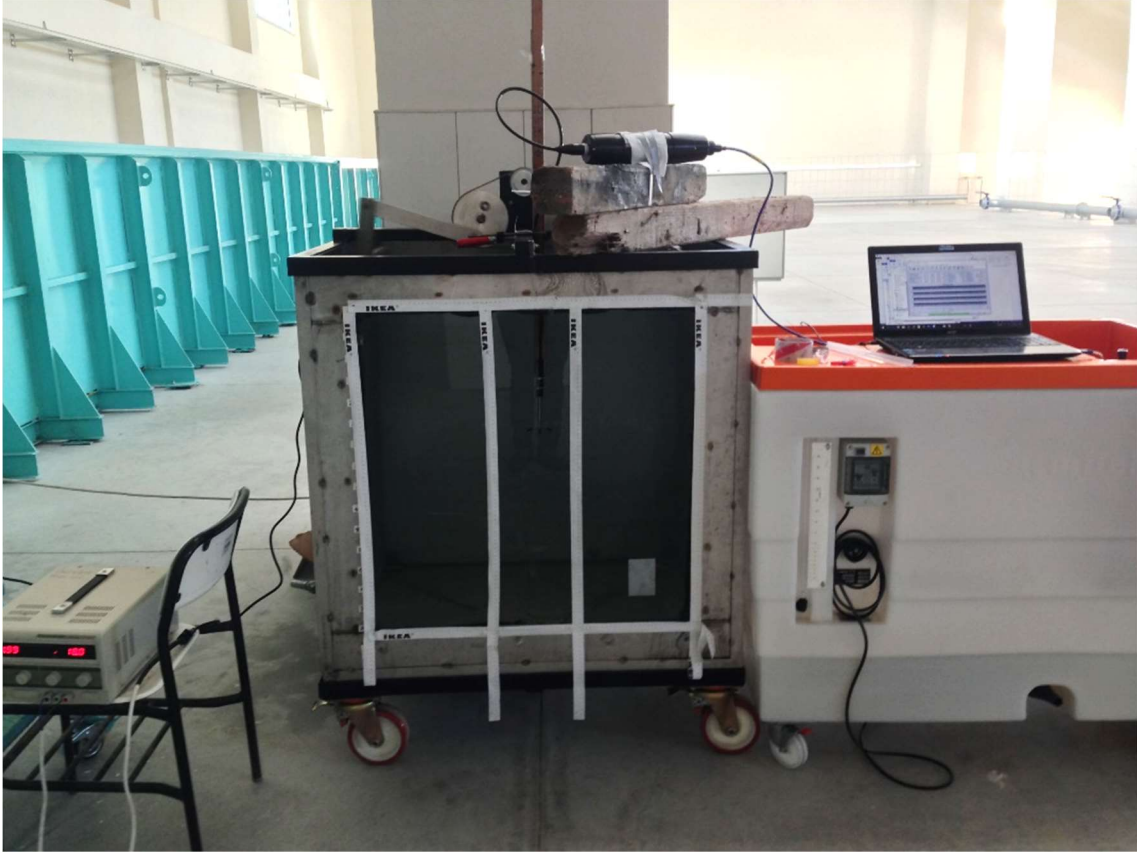
Deneyler bu çalışma için tasarlanan deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Bu deney düzeneğinde türbülans kontrollü bir şekilde ivme ölçerli ve motorlu sistem ile gerçekleştirilebilmektedir. Elek analiziyle dane boyutu belirlenen parçacıklar üstten tanka bırakılarak, bırakıldığı andan itibaren görüntü işleme yöntemiyle parçacıkların çökme hızları tankta motor sistemiyle oluşturulan farklı türbülans koşullarında ölçülebilmektedir. Deneysel çalışma özünde türbülanslı ortamda görüntüleme yöntemiyle elde edilecek boyutu belli parçacık çökme hızının, akım hız ölçer ile anlık olarak ölçülen akım hızlarından elde edilecek türbülans karakteristikleriyle ilişkilendirilmesini içermektedir.

Deney düzeneği bir yüzü gözlemlenecek şekilde camdan, diğer yüzleri kromdan üretilmiş, 1m\*1m\*1m boyutlarına sahip, alt kısmında tankın kolaylıkla boşaltılmasına olanak veren deşarj borusu ve vanasını içeren su tankı ve motor sisteminden oluşmaktadır. Bu sistem 5.6 m/s<sup>2</sup> ivmeye kadar kontrollü ivme artışına izin veren bir motor sistemi ve motora bağlı olarak ve suda hareketi salınım yaparak sağlayan iki delikli plaka yardımıyla türbülanslı akımı oluşturmaktadır. Deney düzeneği Şekil 4'de görülmektedir.

Deney esnasında parçacıkların hareketi hızlı kamera (Sony HDR-CX290) ile görüntülenirken, türbülanslı akım ise saniyede 25 veri kaydedebilen 10 MHz frekansına sahip 3 boyutlu akustik Doppler akım hızı ölçer – ADV (Nortek – Vectrino) ile eş zamanlı olarak ölçülmüştür. Deneylerde akım ölçümü esnasında kullanılan ADV'nin seçilen konfigürasyon değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan motor sistemi Şekil 5'de; akım hız ölçer ise Şekil 6'de daha detaylı olarak görülmektedir. Motor sisteminin devir hızı ve ivmesinin voltaja göre değişimi ise Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 1. Deneylerde uygulanan akım hız ölçerin (ADV) konfigürasyonu

ADV'nin frekansı	10 MHz
Hassasiyeti	Ölçülen değer $\pm 0.5\%$ $\pm 1$ mm/s
İletim uzunluğu	2,4 mm
Örnekleme hacmi	9,1 mm
Nominal hızı	0,3 m/s
Örnekleme hızı	25 Hz



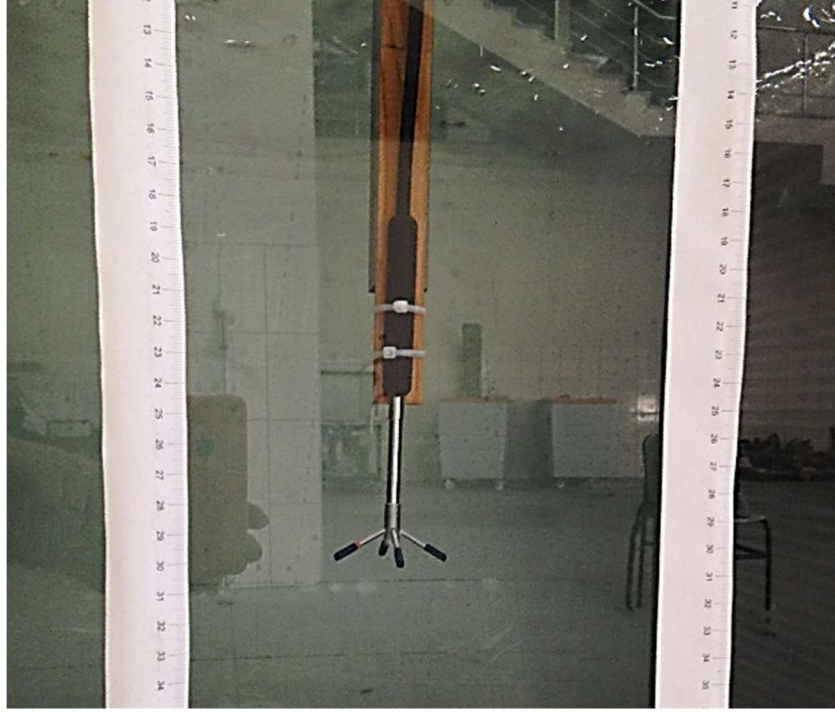
Şekil 4. Deneylerde kullanılan düzenek.

Tablo 2. Motor devir hızı ve ivmesinin voltaja göre değişimi

	<b>Voltaj (Volt)</b>	<b>Akım (Amper)</b>	<b>Devir (rpm)</b>	<b>Devir (<math>m/s^2</math>)</b>
<b>1</b>	8,0	1,04-1,38	27	0,578
<b>2</b>	9,0	1,01-1,41	30	0,71
<b>3</b>	10,0	1,07-1,49	34	0,917
<b>4</b>	11,0	1,09-1,60	38	1,147
<b>5</b>	12,0	1,08-1,69	40	1,27
<b>6</b>	13,0	1,12-1,76	44	1,54
<b>7</b>	14,0	1,21-1,99	47	1,75
<b>8</b>	15,0	1,11-2,12	50	1,98
<b>9</b>	16,0	1,12-2,15	54	2,32
<b>10</b>	17,0	1,20-2,27	58	2,67
<b>11</b>	18,0	1,25-2,41	61	2,95
<b>12</b>	19,0	1,27-2,58	65	3,36
<b>13</b>	20,0	1,28-2,76	70	3,89
<b>14</b>	21,0	1,11-2,50	72	4,11
<b>15</b>	22,0	1,18-2,70	78	4,83
<b>16</b>	23,0	1,3-3,04	80	5,01
<b>17</b>	24,0	1,38-3,09	84	5,6



Şekil 5. Türbülanslı akımı oluşturan motor sistemi a) dışarıda b) su tankında monte edilmiş hali



Şekil 6. Deneylerde kullanılan 10 MHz akım hız ölçer.

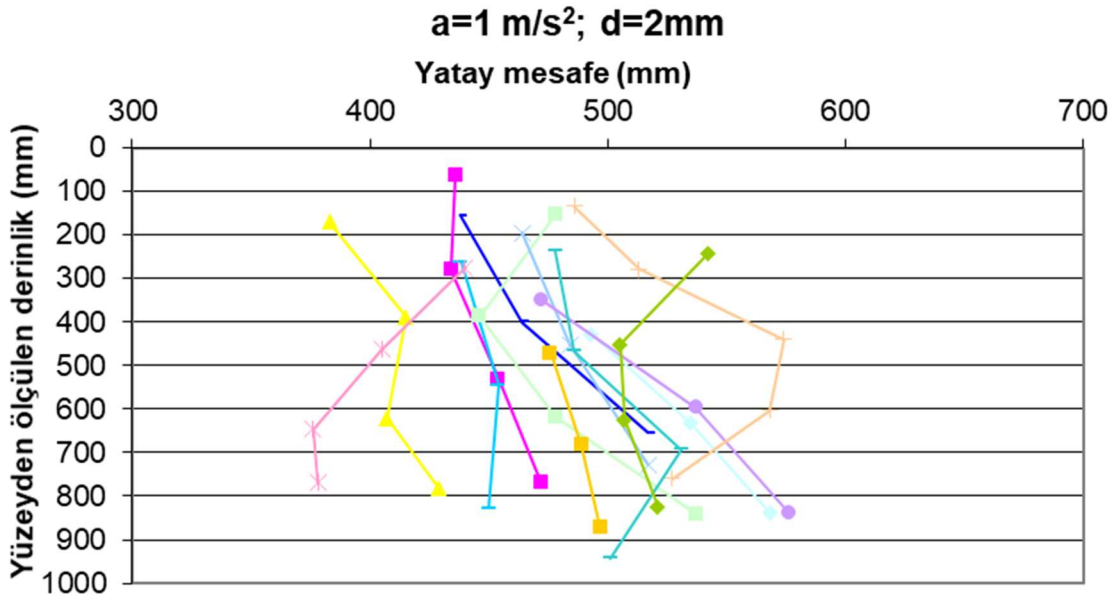
## 2.2 Deneyde İzlenen Adımlar

Deneyler elek setlerinden geçirilerek (Şekil 7) dane boyutu belirlenmiş ve deneyler farklı boyuttaki parçacıklarla (  $d=0,8, 1, 1,5, 2, 3,5, 4$  mm) gerçekleştirilmiştir. Farklı ivmeler verilerek çalıştırılan motorun türbülanslı akım üzerine etkisini incelemek amacıyla 2 farklı ivme ( $a= 1 \text{ m/s}^2$  ve  $a=3 \text{ m/s}^2$ ) ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Hazneye yukarıdan bırakılan ve video ile görüntülenen parçacık hareketi ile akım hızlarının eş zamanlı ölçülebilmesi amacıyla hazne tabanından 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerde noktasal ölçümler yapılarak, parçacığın bu mesafelerden geçiş anı, videolardan belirlenmiş ve o anın 2 saniye öncesi ve sonrasındaki akım özellikleri (toplamda 100 veri) türbülanslı akımın özelliklerini belirlemek amacıyla analiz edilmek üzere seçilmiştir. Her parçacık boyutu, her ivme ve her mesafe için en az 6 parçacık bırakılarak bu parçacıklardan görüntü işleme yapılabilen deneylerde parçacık çökme hızları ve akım özellikleri analiz edilmiştir. Şekil 8 , örnek olarak  $d=2$  mm olan parçacıkların  $a=1\text{m/s}^2$  ivme koşullarında videolardan elde edilen ve görüntü işleyerek elde edilen yörüngelerini göstermektedir. Veri analizlerinde her koşul için (5 dane boyutu, 2 ivme, 4 seviye) 3'er adet veri kullanılarak ortalama değerlerle çalışılmıştır.





Şekil 7. Deneylerde kullanılan elek seti



Şekil 8. Dane boyutu  $d=2 \text{ mm}$  olan ve  $1 \text{ m/s}^2$  ivme ile elde edilen akım altında bırakılan parçacıkların görüntü işleme ile elde edilen yörüngeleri.

### 2.3 Görüntü işleme

Video ile çekimi yapılan deneylerin görüntü işleme ve analizi bu işlem için yazılan Matlab kodu ile yapılmıştır. Bu amaçla ilk etapta video dosyası okunarak video özellikleri belirlenmiştir. Kamera her saniyede 50 görüntü almaya ayarlandığından, her 25 görüntüde bir, yani her yarım saniyede görüntülerin seçilmesi ve analize hazır olacak şekilde depolanması sağlanmıştır. Bu depolanan resimler 'imread' fonksiyonu ile okunarak ekrana getirilmektedir. Burada resimlerde parçacık yerleri analizi yapan kişi tarafında işaretlenerek koordinatları

kaydedilmekte, ve bu sayede parçacıkların çökme hızlarının hesaplanması yapılabilmektedir. Bu amaçla yazılan Matlab kodu ekte sunulmuştur (Ek-1).

Çalışma esnasında yapılan toplam 330 deneyde, akım ölçümü yapılan noktadan parçacığın geçtiği andaki çökme hızları bulunmuş ve akımın o andaki türbülans kinetik enerjisi ile ilişkilendirilmiştir. Parçacığın akım ölçer cihazın yanından geçtiği an videolardan belirlenerek, 2 saniye öncesi ve 2 saniye sonrasında kaydedilen akım verileri ve bu verilerin ortalaması analizde kullanılmıştır. Ek video dosyaları olarak bu çekimlerden bazıları sisteme yüklenmiştir. Analizlerde türbülans kinetik enerjisi ve türbülans şiddeti aşağıdaki formüllerde sunulduğu şekliyle kullanılmıştır.

$$u' = u - \bar{u} \quad (9)$$

Burada  $u'$  çalkantı hızını,  $u$  ; saniyenin 25'te birinde kaydedilen hızı,  $\bar{u}$  anlık hızın 2 saniye önce ve 2 saniye sonrasındaki ortalamasını ifade etmektedir.

$$TKE = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (10)$$

$$TI = \frac{\sqrt{\overline{w'^2}}}{w} \quad (11)$$

## 2.4 Çökme Hızının Sayısal Modellenmesi

Bu bölümde türbülanslı akım koşullarında bir tanka parçacık bırakıldığında akımın türbülans karakteristiğini parçacık çökme hızını hesaplayan sayısal modele entegre edebilmek için farklı yaklaşımlar tartışılmıştır. Bu amaçla ANSYS Fluent modeli tercih edilmiş ve modelin kullanıcı tanımlı fonksiyonları (UDF) aracılığıyla parçacığın çökme hızının her bir zaman adımında türbülans karakteristiği ile değiştirmeye yönelik Lagrangian ve Eulerian yaklaşımlar için kodlar yazılmış ve modele bu kodların nasıl entegre edilebileceği araştırılıp özetlenmiştir.

### 2.4.1 Fluent Sayısal Modeli

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), bilgisayar sistemleri vasıtasıyla kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen ve kütle, momentum ve enerji korunumunu sağlayan denklemleri çözümlene yöntemidir. Matematiksel model kısmi diferansiyel denklemleri, sayısal yöntem ayrıklaştırma ve çözüm tekniklerini, yazılım ise çözücü, işlem öncesi ve sonrası adımları kapsar. Akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde çeşitli avantajları sayesinde oldukça başvurulan ve sonlu hacimler yöntemini kullanan bir HAD yazılımı olan Fluent, endüstrinin pek çok çeşitli alanına katkı sağlamaktadır. Fluent'in modelleme yetenekleri arasında:

- 2 boyutlu düzlemsel, 2 boyutlu aksenal simetrik, 2 boyutlu döngülü aksenal simetrik (dönel simetrik) ve 3 boyutlu akımlar
- Sabit rejim veya geçici rejim akımları
- Bütün hız rejimleri (düşük subsonik, transonik, süpersonik ve hipersonik akışlar)
- Laminer, geçiş veya **türbülanslı** akımlar
- Newtonyan ve newtonyan olmayan akımlar
- Gaz-sıvı, gaz-katı ve sıvı-katı akışlar için serbest yüzey ve çok fazlı akım modelleri ve diğer bir çok akım türünün modellenmesi sayılabilir (Fluent).

Hareketi tanımlayan Navier Stokes denklemleri (Denklem 12) anlık hızları içermektedir. Navier Stokes denklemleri zamana göre ortalaması alınarak yazıldığında Reynolds gerilmeleri olarak da bilinen ek bir terim ( $\overline{u'_i u'_j}$ ) gelmektedir (Denklem 12).

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial (u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u}{\partial x_j} \right) \quad (12)$$

$$U_j \frac{\partial (U_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial U}{\partial x_j} \right) + \underbrace{\frac{\partial (-\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j}}_{\text{ek .terim}} \quad (13)$$

Bu ek terim, hareket denklemlerinin türbülans hızlarının akımın tanımlanabilen ortalama büyüklükleri tarafından ifade edildiği türbülans modelleri ile birlikte çözülmesini gerektirmektedir. Kullanıcı tarafından bu ek terimi hesaplayabilmek adına Fluent sayısal modelinde bir çok türbülans modeli seçimi sunulmaktadır. Bu modeller

- Spalart-Allmaras (Tek Denklemliler)
- k- ε Modelleri (İki Denklemliler) ;
  - Standart
  - Renormalization-Group (RNG)
  - Realizable
- k- w Modelleri (İki Denklemliler) ;
  - Standart
  - Shear-Stress Transport (SST)
- V<sup>2</sup>-f Model
- Reynold Stress Model (RSM) (Beş Denklemliler)
- Large Eddy Simulation Model (LES) olarak özetlenebilir.

Daha önce yaptığımız çalışmalar (Elçi ve Ekmekçi, 2016) sayısal modelde farklı türbülans modelleri kullanılmasının hız değerlerine bir etkisi olmasa bile, türbülans kinetik enerjisinin simülasyonunda etkin olduğunu göstermiş ve duvara kadar taşınım denklemlerini çözen k-omega modelinin ya da denge durumunda olmayan (nonequilibrium) duvar fonksiyonlu k-epsilon modelinin kullanılmasının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sebeple özellikle su tankındaki akımın ve parçacık hareketinin modellenmesi bu iki türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### 2.4.1.1 Standard k-ε Türbülans Modeli

Standard k-ε türbülans modeli, türbülanslı akış koşulları için ortalama akış karakteristiklerini simüle etmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde kullanılan en yaygın modeldir. Standard k-ε türbülans modeli iki taşınım denklemi ile genel bir türbülans açıklaması verir. Standard k-ε modelinin orijinal ivme, orta uzunlukta ve yüksek karmaşıklıkta akışlarda türbülanslı uzunluk ölçeklerinin cebirsel olarak ifadesine bir alternatif bulmanın yanı sıra, karıştırma-uzunluk modelini geliştirmektir. Ayrıca bu modelde Reynolds gerilimi ile ortalama deformasyon oranı arasındaki oranın her yönden aynıdır. İlk taşınan değişken türbülanstaki enerjiyi belirler ve türbülanslı kinetik enerji (k) olarak adlandırılır. İkinci taşınan değişken, türbülanslı kinetik enerjinin yayılma hızını belirleyen türbülanslı dağılımdır (ε).

Bu türbülans modelinde türbülans viskozitesi ( $\mu_t$ ), türbülans kinetik enerjisi (k) ve onun kayıp oranına (ε) bağlı olarak şöyle ifade edilir:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (14)$$

denklemindeki  $C_\mu$  boyutsuz model sabiti olmakla birlikte k ve ε değerlerinin elde edilebilmesi için aşağıdaki denklemlerin çözülmesi gerekmektedir.

Türbülans kinetik enerji için :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\sigma_k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (15)$$

Türbülans dağılımı için :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\sigma_\varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (16)$$

denklemlerindeki

$u_i$  ilişkilendirilen yöndeki hız bileşenini

$E_{ij}$  deformasyon oranının bileşenini

$\mu_{ij}$  türbülans viskozitesini temsil eder.

Denklemlerde bulunan diğer değerler aşağıdaki gibi kabul edilebilir :

$$C_\varepsilon = 1.3 \quad ; \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad ; \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad ; \quad C_\mu = 0.09 \quad ; \quad C_k = 1.0$$

### 2.4.1.2 K- w Türbülans Modeli

K-omega modeli en yaygın kullanılan türbülans modellerinden biridir ve iki denklem modelidir. Yani, akışın türbülans özelliklerini temsil etmek için iki ekstra taşıma denklemi içerir. Kullanılan bu iki denklem sayesinde türbülanslı enerjinin konveksiyonu ve yayılımı gibi etkilerinin hesaba katılması mümkün kılınır.

Taşınan ilk değişken türbülanslı kinetik enerjidir(k) ve türbülanstaki enerjiyi belirler. İkinci değişken spesifik dağılımdır(w) ve türbülansın ölçeğini belirler. Fluent programında k-w türbülans modeli için iki farklı seçenek mevcuttur ;

- ✓ Standard k-w türbülans modeli
- ✓ Shear-stress transport (STT) k-w türbülans modeli

Bu iki model k ve w taşınım denklemleri olarak ortak noktalara sahiptir. STT k- w modeli standart modelden ayıran özelliklerden ise kısaca şöyle bahsedilebilir :

- ✓ Sınır tabakasının iç bölgesinde, standart k- w modelinden, sınır tabakasının dış kısmındaki k-ε modelin yüksek Reynolds sayılı versiyonuna kademeli değişim
- ✓ Temel türbülans kesme gerilmesinin taşıma etkilerini hesaba katan modifiye türbülanslı viskozite formülasyonu

### 2.4.1.3 Lagrangian Dağınık Faz Modeli (DPM)

Fluent sürekli faz için taşıma denklemlerini çözmenin yanı sıra Lagrangian referans çerçevesinde ayrı bir ikinci fazı modellemeye de olanak sağlar. Bu ikinci faz, sürekli fazda dağılmış parçacıklardan oluşur. FLUENT, bu ayrık faz varlıklarının yörüngelerini ve bunlara ısı ve kütle aktarımını hesaplar. Fazlar ve fazların hem ayrık faz yörüngeleri hem de sürekli faz akışı arasındaki bağlantı da incelenebilir. Fluent ile Lagrangian dağınık faz modelinde akışkan faz, Navier-Stokes denklemleri çözülerek bir süreklilik olarak elde edilir ve dağılmış faz, hesaplanan akış alanı boyunca çok sayıda parçacık, kabarcık veya damlacık izlenerek çözülür. Dağınık faz, akış fazı ile momentum, kütle ve enerji alışverişi yapabilir.

Bu modelde yapılan temel varsayım kullanılan dağınık fazın hacimsel olarak sürekli fazdan daha az bir yeri işgal etmesidir. Parçacık veya damlacık yörüngeleri, sıvı fazı hesaplaması sırasında belirli aralıklarla tek tek hesaplanır. Bu şekilde model, sprey kurutucu, kömür ve sıvı yakıt yakma modellemesi ve bazı parçacık yüklü akışlar için uygun hale gelmektedir, ancak sıvı-sıvı karışımlarının, akışkan yatakların uygulamalarının modellenmesi bu modelle gerçekleştirilememektedir.

Fluent, dağınık faz modeli için aşağıdaki seçeneklere sahiptir :

- Sürekli ve süreksiz akımlar için dağınık faz ataleti, hidrodinamik sürüklenme ve yerçekimi kuvvetlerini içeren Lagrangian dağınık faz yörüngesinin hesaplanması
- Türbülansın sürekli fazda bulunan türbülanslı girdaplardan dolayı partikül dağılımına etkilerinin tahmin edilmesi

- Dağınık faz için ısıtma/soğutma
- Sıvı damlacıklarının buharlaşması ve kaynatılması
- Parçacıkların yanması
- Damlacıkların kırılması ve birleşmesi

Bu modelleme yetenekleri ile birlikte Fluent, partikül ayırma ve sınıflandırma, sprej, aerosol dispersiyonu, sıvıların kabarcık karıştırması, sıvı yakıt yakımı ve kömür yanması gibi modellemeler de dahil olmak üzere çeşitli dağınık faz simülasyonlarına olanak sağlar.

ANSYS FLUENT modeline dağınık partiküllerin başlangıç pozisyonu, hızı, büyüklüğü ve sıcaklığı tanımlanır. Bu başlangıç koşulları, dağınık fazın fiziksel özelliklerini tanımlayan girişlerle birlikte, yörünge ve ısı / kütle aktarım hesaplamalarını başlatmak için kullanılır. Yörünge ve ısı / kütle aktarım hesaplamaları, parçacık üzerindeki kuvvet dengesine ve partikülden akışkanın hareket ettiği yerel sürekli faz koşullarını kullanarak partikülden konvektif / ışınımsal ısı ve kütle aktarımına dayanmaktadır. Tahmin edilen yörüngeler ve ilişkili ısı ve kütle transferi grafiksel ve / veya alfanümerik olarak görüntülenebilir.

#### 2.4.1.4 Parçacık için Hareket Denklemi

FLUENT, parçacık üzerindeki kuvvet dengesini entegre ederek dağınık faz parçacığının yörüngesini bir Lagrangian referans çerçevesinde tahmin eder. Bu kuvvet dengesi, parçacık ataletini, parçacık üzerinde etkili olan kuvvetlerle eşit tutar ve bu denklik x ekseninde şu şekilde yazılabilir :

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (17)$$

$F_x$  : ek ivme (kuvvet/birim parçacık kütlesi)

$F_D(u-u_p)$  : sürüklenme kuvveti (kuvvet / birim parçacık kütlesi)

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (18)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (19)$$

$u$  : akışkan faz hızı

$u_p$  : parçacık hızı

$\mu$  : akışkan viskozitesi

$\rho$  : akışkan özkütlesi

$\rho_p$  : parçacık özkütlesi

$d_p$  : parçacık çapı

$Re$  : bağıl Reynolds sayısı

$C_d$ : itki katsayısı

Bu çalışmada itki katsayısı ve bağıl Reynolds sayısını yazılan kullanıcı tanımlı fonksiyon (udf) yardımıyla değiştirilebildiği ve bu sayede çökme hızının hesabında türbülans etkisinin hesaba katılabildiği görülmüştür. İtki katsayısı sabit alınmak yerine her zaman adımında akımın türbülans özelliklerine bağlı olarak değiştirilmesi yoluyla parçacık çökme hızının hesaplanması düşünülmüştür.

#### **2.4.1.5 Sayısal Modellerin Oluşturulması**

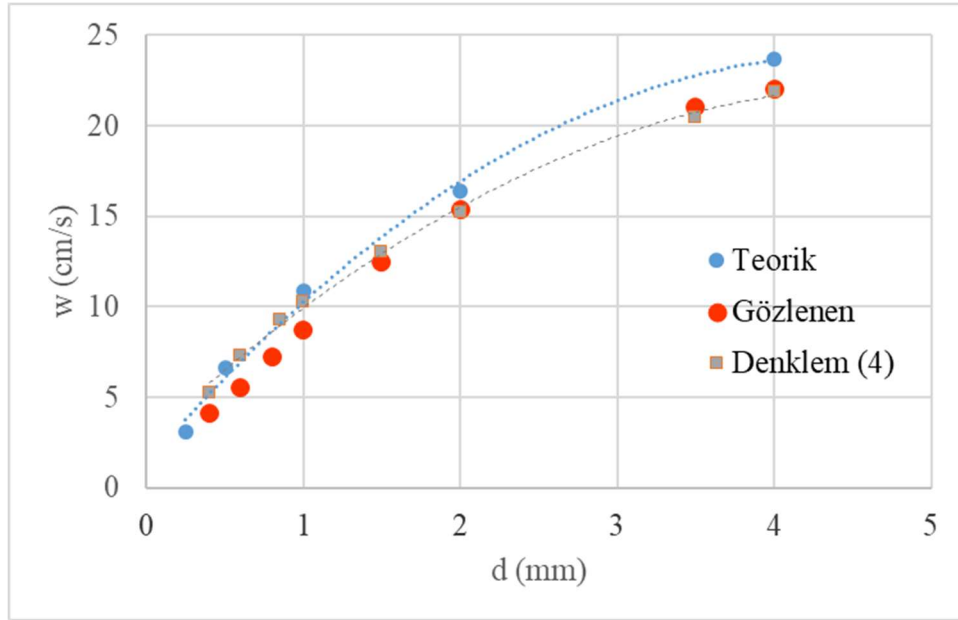
Fluent programında modelleme yapabilmek için takip edilen basamaklar aşağıda özetlenmiştir:

- 1- Geometrinin oluşturulması: Bu kısımda incelenmek istenilen kontrol hacmi oluşturulur. Yapılacak nümerik modellemede kontrol hacmine 1\*1\*1 m<sup>3</sup>lük kübik bir tank karar verilmiştir.
- 2- Sayısal ağın (mesh) oluşturulması: Sayısal ağ oluşturmak Fluent ile nümerik modellemede önemli bir adımdır. Bu süreçte kontrol hacmi çok daha küçük "nodes" adını verdiğimiz parçalara ayrılır. Ayrılan her bir parça için Fluent verilen koşulları göz önüne alarak istenilen değerleri hesaplar. Çözülen modelin doğruluğu yansıtması ve kesinliğe yakınlığı açısından sayısal ağların olabilecek birbirine en yakın boyutlarda ve küçük parçalara ayrılarak oluşturulması önemlidir lakin oluşturulan sayısal ağ incelidikçe yani "nodes" sayısı arttıkça bu çözüm sürecini uzatacaktır. Burada önemli olan şey şudur ki sayısal ağ oluştururken çok az ya da çok fazladan ziyade optimum sayısal ağ sayısına ulaşmaktır.
- 3- Kurulum (setup) : Modellemenin kurulum kısmında, modelin özellikleri programa tanıtılır. Bu özelliklerden bazıları akım ağı, sürekli ya da süreksiz akım, sınır şartları, yer çekimi etkisi, malzemelerdir. Oluşturulan model için kullanılan özellikler ilerleyen kısımlarda daha ayrıntılı anlatılacaktır.
- 4- Denklemlerin çözümü ( solver) : Modellemenin bu kısmında çözüm için kullanılacak methodlar, yakınsaklık derecesi , süreksiz akımlar için zaman adımları, iterasyon sayısı gibi girdiler programa tanıtılır.
- 5- Sonuçların görsel hale getirilmesi: Fluent verilen iterasyon sayısı sonunda çözümü tamamladıktan sonra istenilen sonuçlar bu kısımdan elde edilir.

### 3. BULGULAR

#### 3.1 Deneilerin sonuçları

Literatürde laminar akım için verilen ve dane boyutuna bağlı hesaplanan çökme hızları (Julien (1995)), video ile kaydedilen ve görüntü işleme tekniğiyle analiz edilen çökme hızları ile önce durgun suda (laminar akım) ve sonrasında iki farklı ivme ile hareket ettirilerek yaratılan (türbülanslı akım) koşullar için karşılaştırılmıştır. Bu grafikte gözlenen değerler her dane boyutu için tekrarlanan 3 deneyin ortalama sonuçlarını ifade etmektedir. Şekil 9 laminar akım koşullarında elde edilen veriler için karşılaştırma grafiğini sunmaktadır. Bu grafikte gözlenen değerler her dane boyutu için tekrarlanan 3 deneyin ortalama sonuçlarını ifade etmektedir. Denklem (4) ile hesaplanan değerlerin deney sonuçları sonucu elde edilen değerlere daha yakın olduğunu göstermiştir.

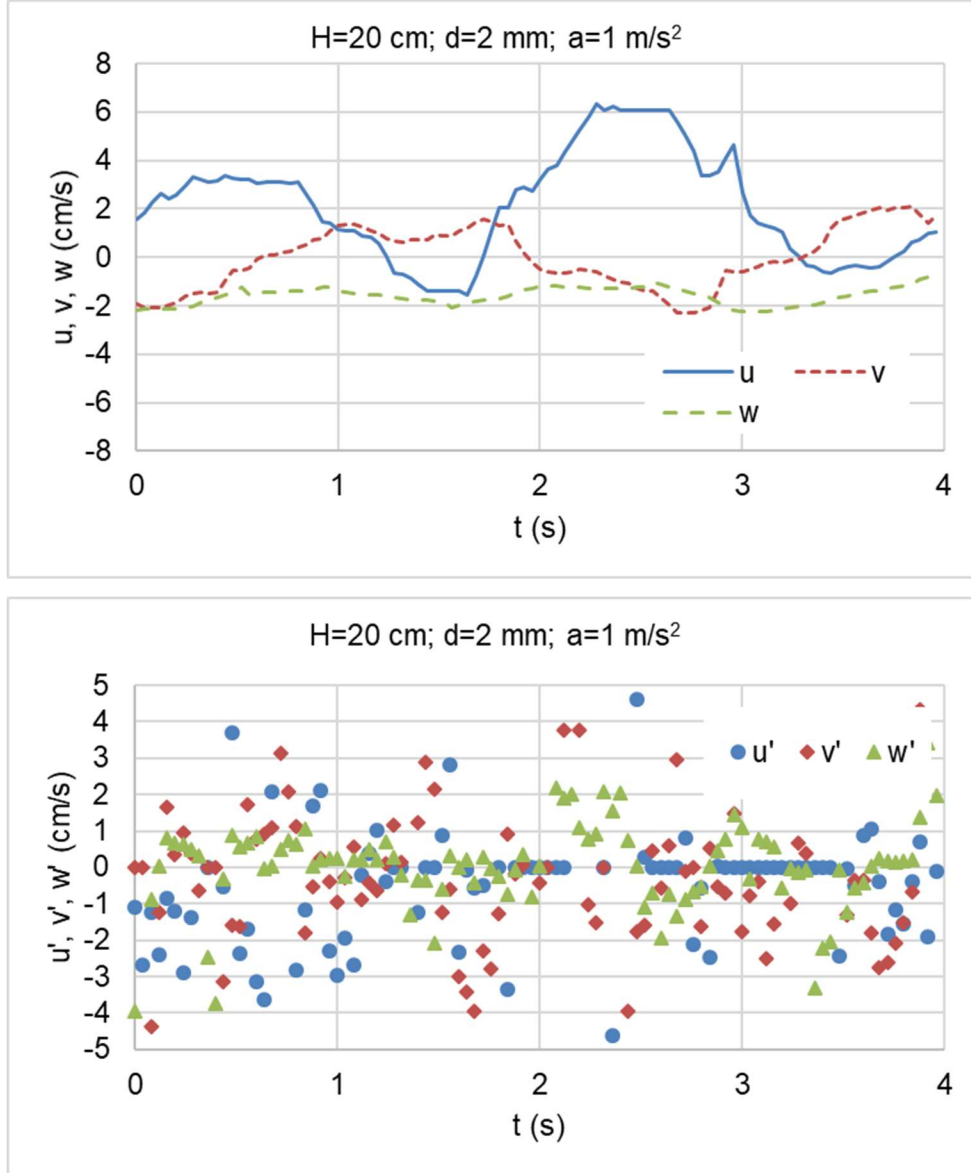


Şekil 9. Laminar akımda gözlenen çökme hızlarının Julien (1995) tarafından tabloda sunulan teorik değerler ve Denklem (4) ile hesaplanan değerler ile karşılaştırılması

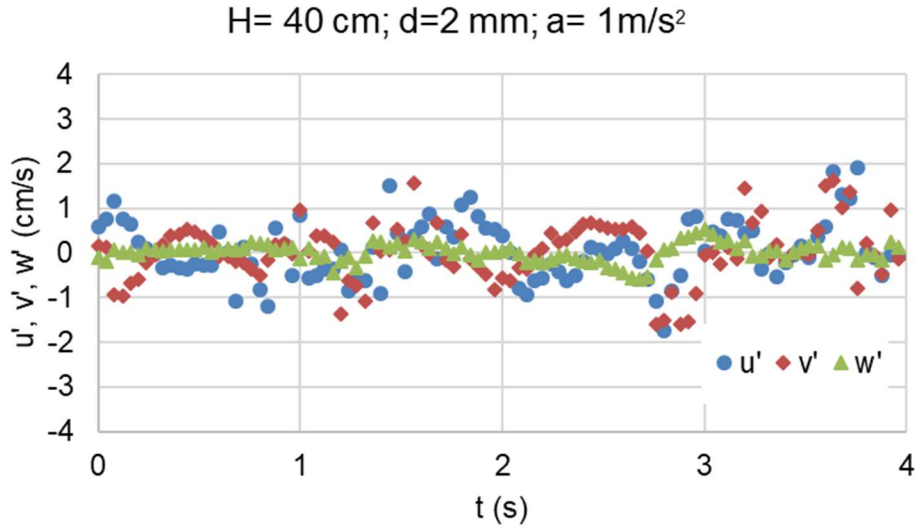
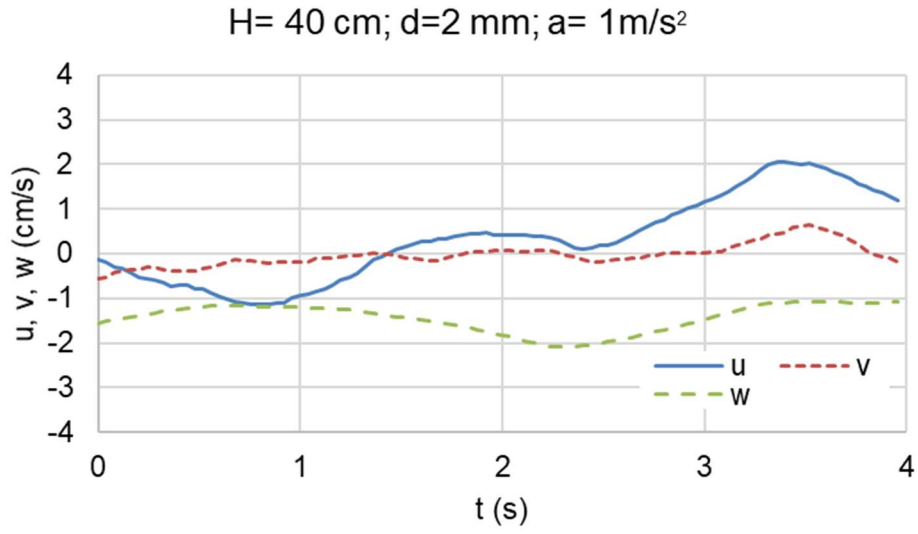
Türbülanslı akımın etkisini incelemek amacıyla güç kaynağından motora verilen akımın sabitlenmesi yoluyla motorun devir hızı ve ivmesi kontrol edilmiş ve motor iki farklı ivmeyle ( $a=1 \text{ m/s}^2$  ve  $a=3 \text{ m/s}^2$ ) çalıştırılmıştır. Hazneye yukarıdan bırakılan ve video ile görüntülenen parçacık hareketi ile akım hızlarının eş zamanlı ölçülebilmesi amacıyla hazne tabanından 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerde noktasal ölçümler yapılarak, parçacığın bu mesafelerden geçiş anı, videolardan belirlenmiş ve o anın 2 saniye öncesi ve sonrasındaki akım özellikleri (toplamda 100 veri) türbülanslı akımın özelliklerini belirlemek amacıyla analiz edilmek üzere seçilmiştir. Şekil 10, 11, 12, 13; 2 mm dane boyutunda olan parçacık için ve  $1 \text{ m/s}^2$  lik ivme ile yaratılan türbülanslı akım koşullarında hazne tabanından sırasıyla 20, 40, 60 ve 80 cm



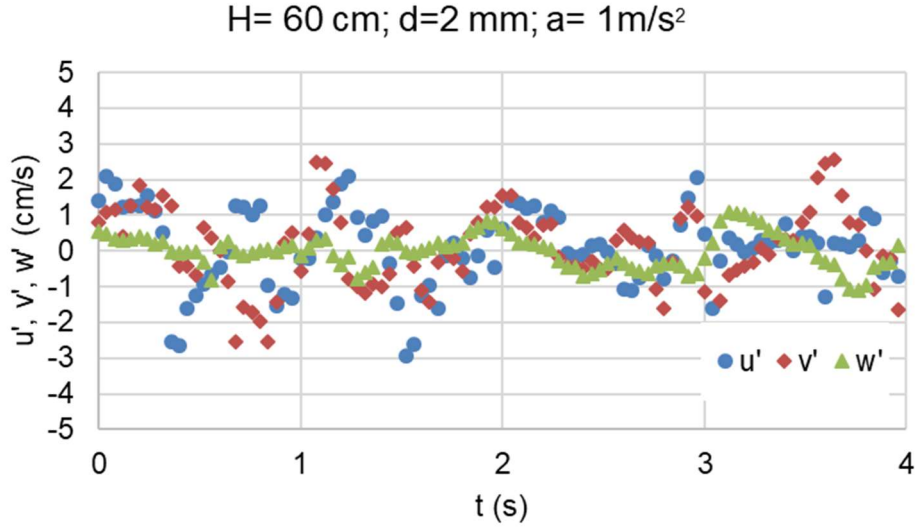
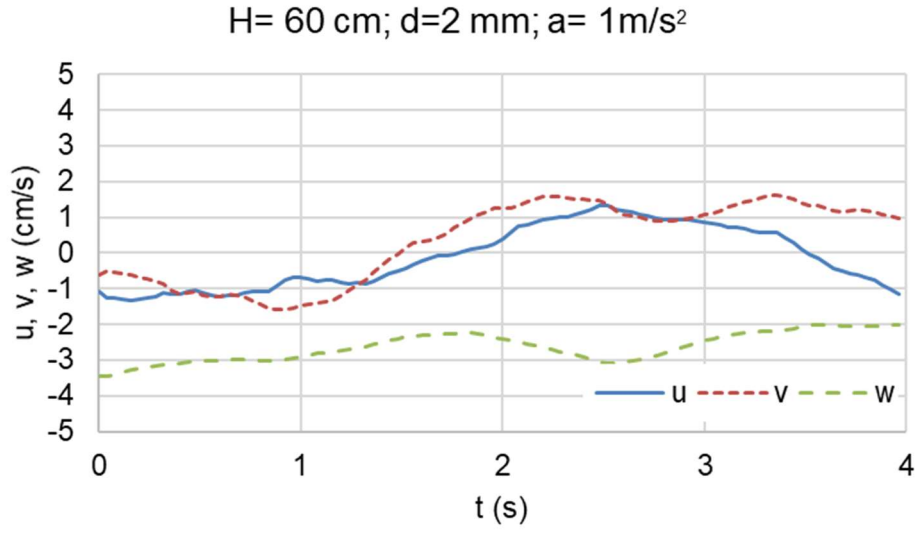
mesafelerden geçişi esnasında 10 MHz ADV ile saniyede 25 veri alınarak ölçülen 3 boyutlu akım hızlarının geçiş anının 2 saniye öncesi ve sonrası için değerlerini ve bu değerlerin ortalaması alınarak elde edilen sapınç hızlarının (Denklem 9) değişim grafiklerini vermektedir.



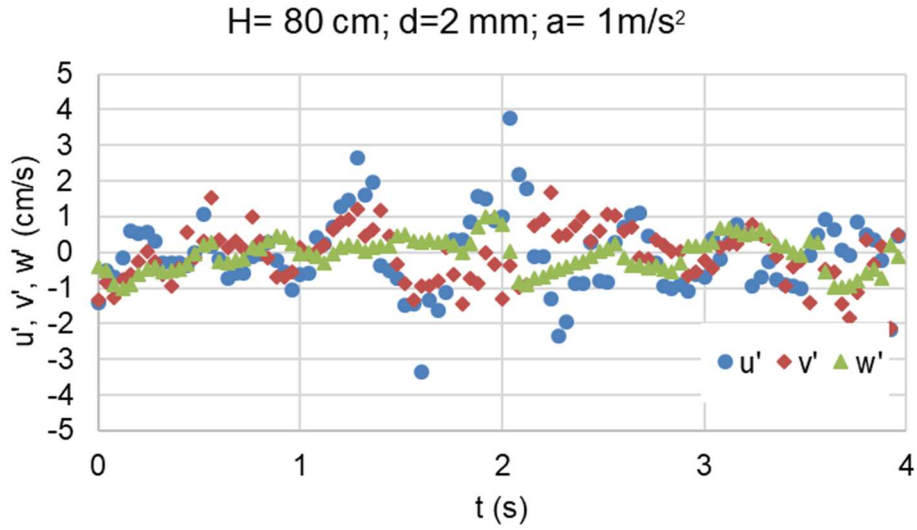
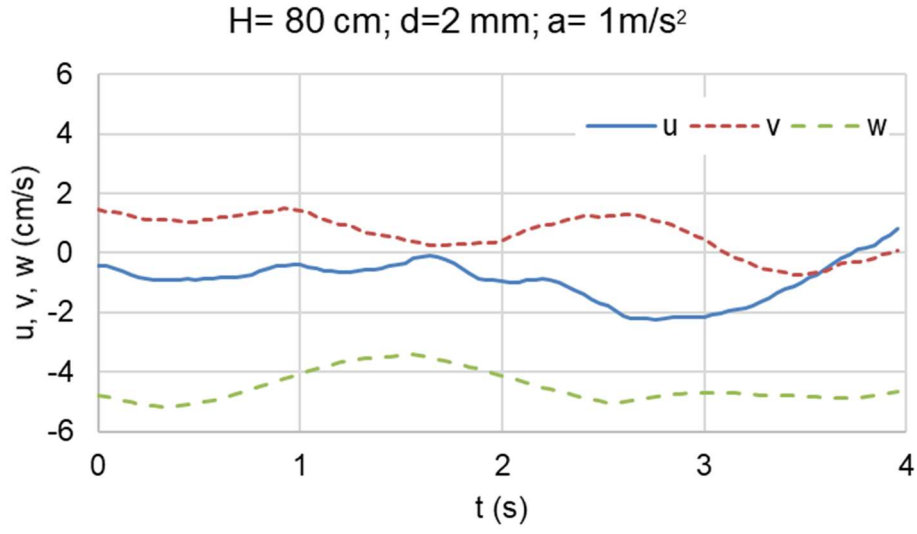
Şekil 10. Türbülanslı akım koşullarında ( $a=1 \text{ m/s}^2$ ), 2 mm dane boyutlu parçacığın, tabandan 20 cm mesafeden geçtiği anın 2 saniye öncesi ve sonrasında akım hız ölçer ile kaydedilen akım hızı ve sapınç hızı değerleri.



Şekil 11. Türbülanslı akım koşullarında ( $a=1 \text{ m/s}^2$ ), 2 mm dane boyutlu parçacığın, tabandan 40 cm mesafeden geçtiği anın 2 saniye öncesi ve sonrasında akım hız ölçer ile kaydedilen akım hızı ve sapınç hızı değerleri.



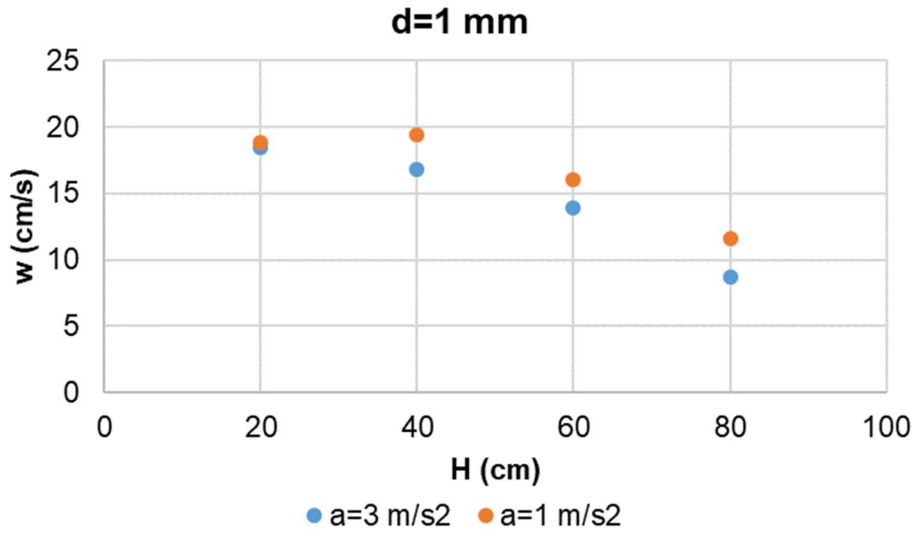
Şekil 12. Türbülanslı akım koşullarında ( $a=1 \text{ m/s}^2$ ), 2 mm dane boyutlu parçacığın, tabandan 60 cm mesafeden geçtiği anın 2 saniye öncesi ve sonrasında akım hız ölçer ile kaydedilen akım hızı ve sapınç hızı değerleri.



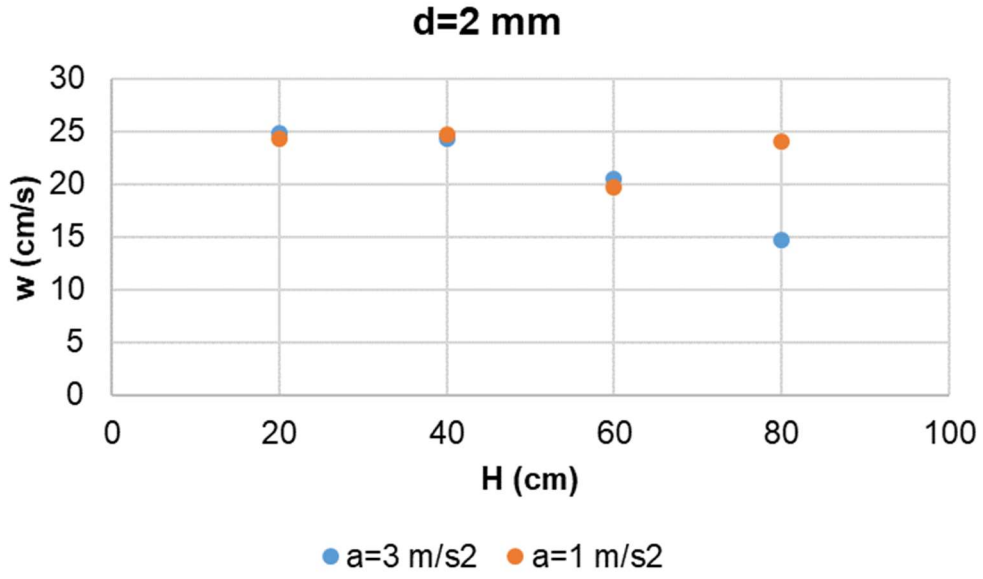
Şekil 13. Türbülanslı akım koşullarında ( $a=1 \text{ m/s}^2$ ), 2 mm dane boyutlu parçacığın, tabandan 80 cm mesafeden geçtiği anın 2 saniye öncesi ve sonrasında akım hız ölçer ile kaydedilen akım hızı ve sapınç hızı değerleri.

Türbülanslı koşullarda gerçekleştirilen 330 deneyin videoları görüntü işleme tekniğiyle analiz edilmiş ve hazne tabanından 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerinden geçişi esnasındaki çökme hızları belirlenmiştir. Tüm grafiklerde sunulan gözlenen değerler her dane boyutu için tekrarlanan 3 deneyin ortalama sonuçlarını ifade etmektedir. Şekil 14, 1 mm dane boyutundaki parçacığın görüntü işleme analizi sonucunda bu 4 mesafede elde edilen çökme hızlarının iki farklı ivme için karşılaştırmasını vermektedir. Analiz sonucunda devir hızı düşük olduğunda ( $a=1 \text{ m/s}^2$ ) çökme hızının  $d=1 \text{ mm}$  için her mesafede daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Şekil 15, 2 mm dane boyutundaki parçacığın görüntü işleme analizi sonucunda bu 4 mesafede elde

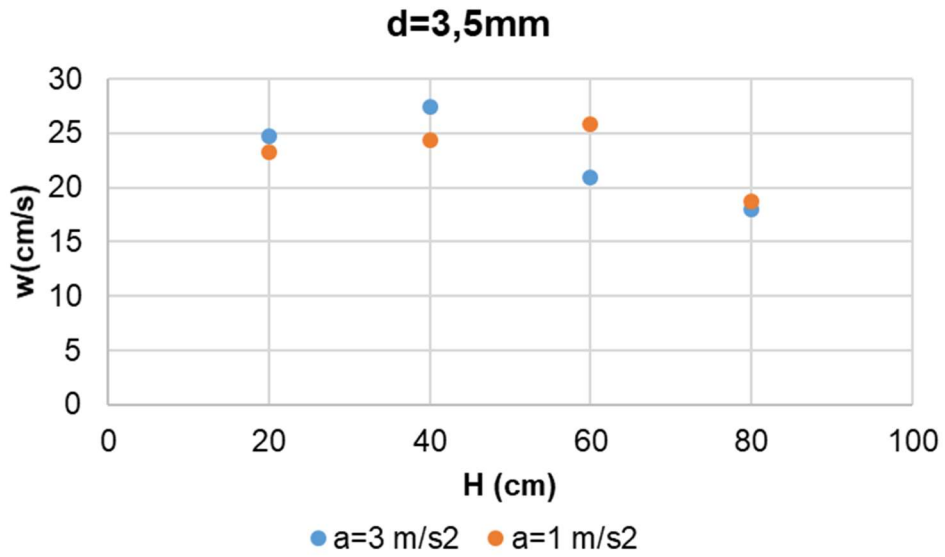
edilen çökme hızlarının iki farklı ivme için karşılaştırmasını vermektedir. Tabandan 20, 40 ve 60 cm mesafelerde iki ivme için benzer çökme hızları gözlenmiş, sadece 80 cm mesafede  $d=1$  mm için gözlenen şekilde ivme azaldıkça çökme hızında artış olduğu gözlenmiştir. Şekil 16 ve 17, 3,5 mm ve 4 mm dane boyutlarındaki parçacığın görüntü işleme analizi sonucunda bu 4 mesafede elde edilen çökme hızlarının iki farklı ivme için karşılaştırmasını vermektedir. İki şekilde de farklı mesafelerde türbülanslı akımın etkisinin karışık olduğu gözlenmiş ve bariz bir etki belirlenememiştir.



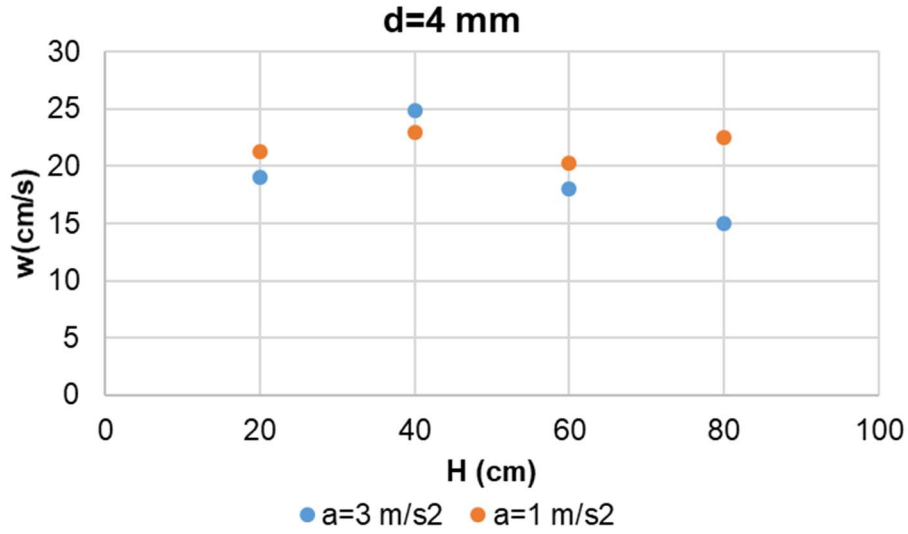
Şekil 14. 1 mm dane boyutundaki parçacığın görüntü işleme analizi sonucunda hazne tabanından 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerde elde edilen çökme hızlarının iki farklı ivme için karşılaştırması



Şekil 15. 2 mm dane boyutundaki parçacığın görüntü işleme analizi sonucunda hazne tabanından 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerde elde edilen çökeltme hızlarının iki farklı ivme için karşılaştırması

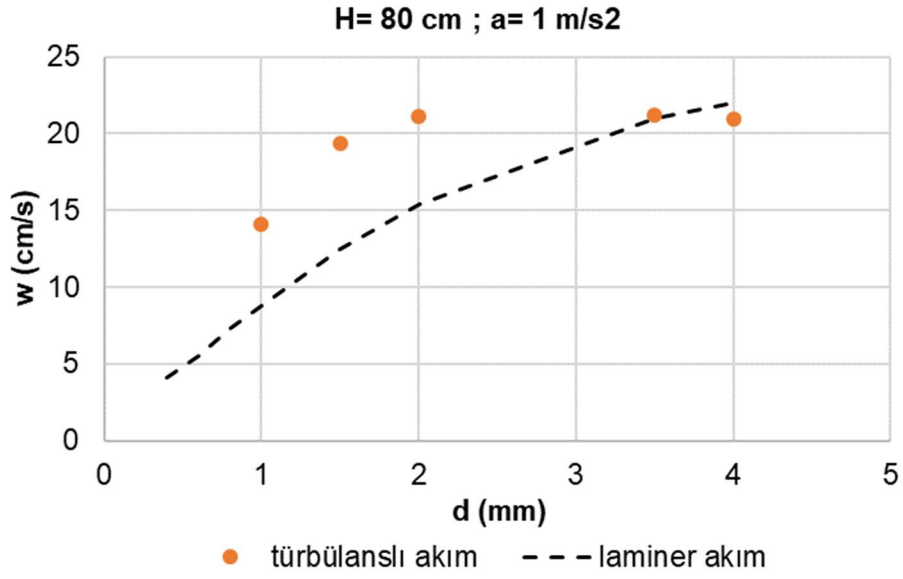


Şekil 16. 3,5 mm dane boyutundaki parçacığın görüntü işleme analizi sonucunda hazne tabanından 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerde elde edilen çökeltme hızlarının iki farklı ivme için karşılaştırması

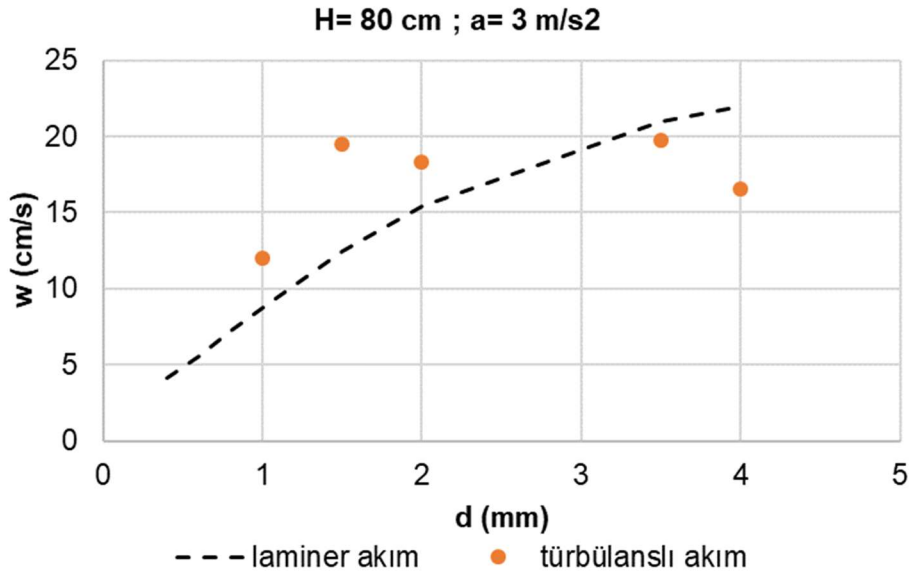


Şekil 17. 4 mm dane boyutundaki parçacığın görüntü işleme analizi sonucunda hazne tabanından 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerde elde edilen çökeltme hızlarının iki farklı ivme için karşılaştırması

Bir sonraki analiz tabandan belli bir mesafede gözlenen çökeltme hızlarının her ivme için farklı dane boyutu için, teorik olarak hesaplanan laminar akım değerleriyle karşılaştırılmasını kapsamaktadır. Örnek olarak tabandan 80 cm mesafede motor düşük devir hızıyla çalıştırıldığında ( $a=1 \text{ m/s}^2$ ) iken dane boyutu 2'den küçük ( $d=1 \text{ mm}$ ,  $1,5 \text{ mm}$  ve  $2 \text{ mm}$ ) ve 2'den büyük ( $d=3,5 \text{ mm}$  ve  $4 \text{ mm}$ ) olma durumuna göre çökeltme hızının laminar akıma göre farklı davranış gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 18). Düşük motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım ( $a=1 \text{ m/s}^2$ ), dane boyutu  $2 \text{ mm}$ 'den küçük parçacıklara laminar akımda gözlenen çökeltme hızlarını ortalama %49 arttırarak etki ederken, daha büyük parçacıklara arttırıcı etkisi olmadığı ve çökeltme hızlarının laminar akımda gözlenen çökeltme hızlarına benzer olduğu gözlenmiştir. Yine tabandan 80 cm mesafede motor bu sefer yüksek devir hızıyla çalıştırıldığında ( $a=3 \text{ m/s}^2$ ), dane boyutu  $2 \text{ mm}$ 'den küçük parçacıklara çökeltme hızının ortalama %36 arttırarak etki ettiği, ama daha büyük parçacıklarda çökeltme hızını azaltıcı bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir (Şekil 19).



Şekil 18. Gözlenen çökme hızları değerlerinin düşük motor devriyle yaratılan türbülanslı akım koşullarında tabandan 80 cm mesafede teorik olarak hesaplanan laminer akım çökme hızı değerleriyle karşılaştırılması.

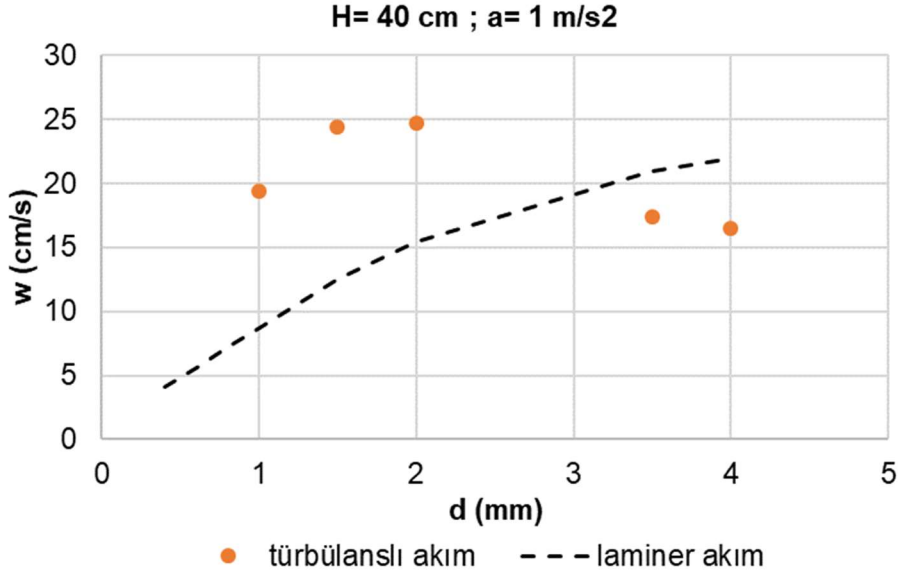


Şekil 19. Gözlenen çökme hızları değerlerinin yüksek motor devriyle yaratılan türbülanslı akım koşullarında tabandan 80 cm mesafede teorik olarak hesaplanan laminer akım çökme hızı değerleriyle karşılaştırılması.

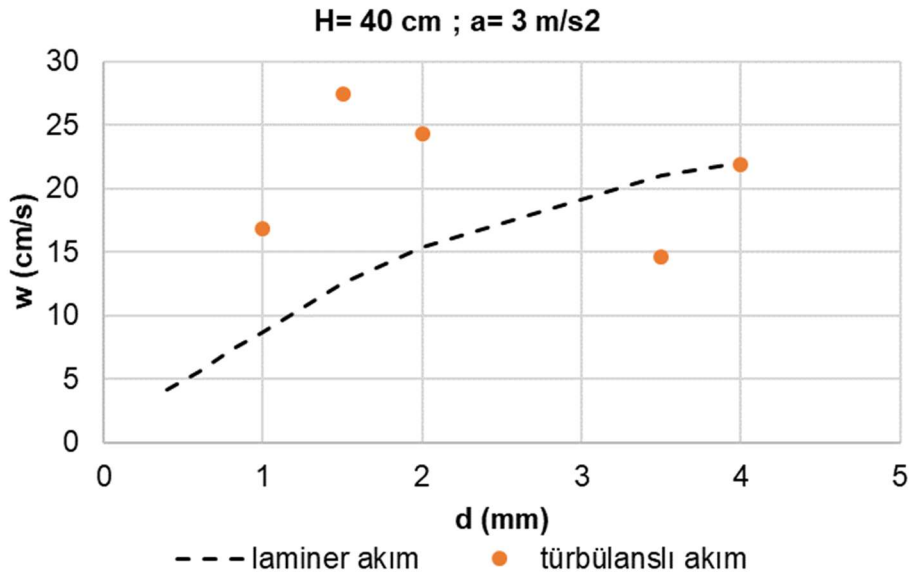
Benzer şekilde tabandan 40 cm mesafede motor düşük devir hızıyla çalıştırıldığında ( $a=1 \text{ m/s}^2$ ) dane boyutu 2'den küçük ( $d=1 \text{ mm}$ ,  $1,5 \text{ mm}$  ve  $2 \text{ mm}$ ) ve 2'den büyük ( $d=3,5 \text{ mm}$  ve  $4 \text{ mm}$ ) olma durumuna göre çökme hızının laminer akıma göre farklı davranış gösterdiği



gözlenmiştir. Her iki motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım koşullarında dane boyutu 2 mm'den küçük parçacıklara türbülans etkisi laminer akımda gözlenen çökeltme hızlarının ortalama %87 artması şeklinde etki ederken, daha büyük parçacıklarda türbülanslı akımın laminer akıma kıyasla gözlenen çökeltme hızlarını azalttığı gözlenmiştir. (Şekil 20 ve 21).



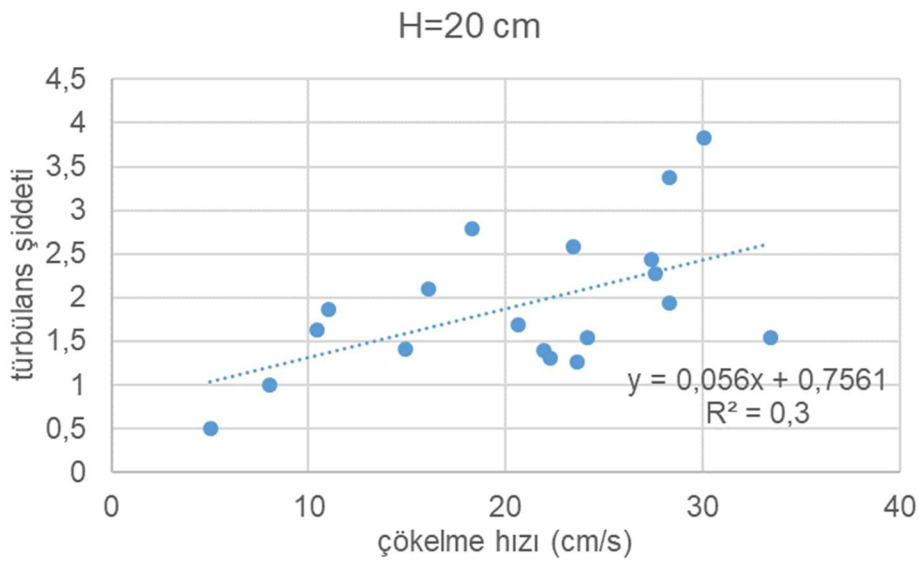
Şekil 20. Gözlenen çökeltme hızları değerlerinin düşük motor devriyle yaratılan türbülanslı akım koşullarında tabandan 40 cm mesafede teorik olarak hesaplanan laminer akım çökeltme hızı değerleriyle karşılaştırılması.



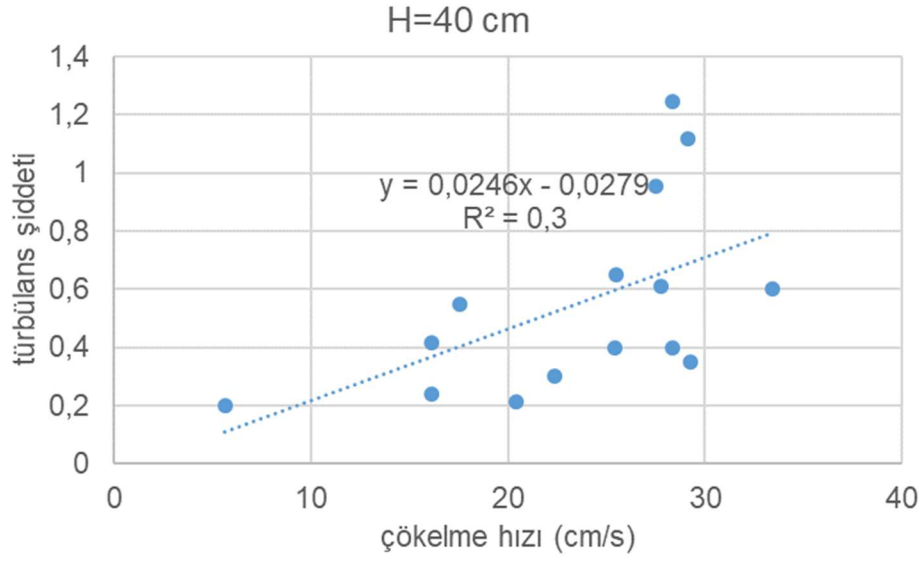
Şekil 21. Gözlenen çökeltme hızları değerlerinin yüksek motor devriyle yaratılan türbülanslı akım koşullarında tabandan 40 cm mesafede teorik olarak hesaplanan laminer akım çökeltme hızı değerleriyle karşılaştırılması.

Bu analizleri takiben, tek bir dane boyutu için farklı derinliklerde ve farklı türbülans koşullarında gözlenen çökme hızları ve deneyler esnasında yapılan hız ölçümlerinden elde edilen türbülans kinetik enerjileri karşılaştırıldı. Örnek olarak 1 mm dane boyutu için tabandan 40 cm mesafede düşük motor devriyle yaratılan türbülans koşullarında ( $1 \text{ m/s}^2$ ) gözlenen çökme hızı ( $w=19,3 \text{ cm/s}$ ) ve yüksek motor devriyle yaratılan türbülans koşullarında ( $3 \text{ m/s}^2$ ) gözlenen çökme hızı ( $w=16,8 \text{ cm/s}$ ) arasındaki oran hız ölçümlerinden elde edilen türbülans kinetik enerjileri (1,8 ve 1,5) arasındaki oranla uyumlu bulundu. Benzer şekilde aynı analiz 4 mm dane boyutunun özellikle tabandan 40 cm ve 80 cm mesafede düşük ve yüksek ivmelerde gözlenen çökme hızları (16,5 cm/s ve 24,9 cm/s) arasındaki farklılıkların fazla olduğu görüldü. Türbülans kinetik enerji etkisi burada da oransal olarak etkili oldu. Hız ölçümlerinden elde edilen türbülans kinetik enerjileri (1,4 ve 2,4) arasındaki oranla uyumlu bulundu. Ancak türbülans kinetik enerjileri ve akım hızları arasında oransal bir ilişki olduğunu diğer mesafeler ve dane boyutları için genelleştirebilmek bu şekilde bir analizle mümkün olmamıştır.

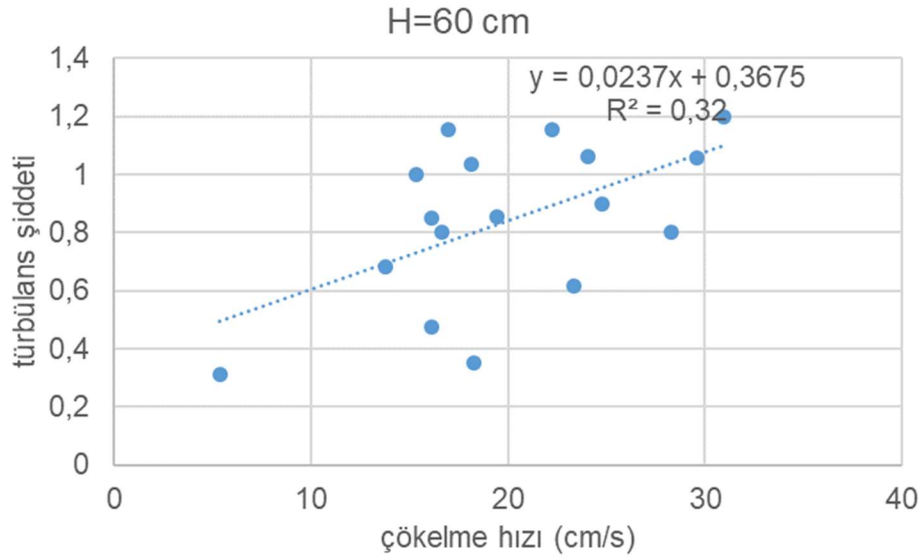
Bunun üzerine tüm sonuçlar toplu olarak değerlendirilerek çökme hızları ve türbülans şiddeti arasında regresyon analizi aracılığıyla tabandan ölçülen farklı mesafelerde bir ilişki kurulmaya çalışıldı. Bu analizlerde, her iki motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım koşullarında farklı dane boyutları için elde edilen veriler birlikte değerlendirildi. Tabandan 20, 40 ve 60 cm mesafelerde regresyon belirleme katsayısı  $R^2$  değeri oldukça düşük de olsa benzer bir trend olduğu gözlemlendi (Şekil 22, 23 ve 24). türbülans şiddetinin ivme ve dane boyutundan bağımsız olarak artışı ile çökme hızı bu derinliklerde artış gösterdi. Tabandan 80 cm mesafede ölçülen değerler karşılaştırıldığında ise veriler arasında anlamlı bir ilişki gözlenemedi.



Şekil 22. Tabandan 20 cm mesafede her iki motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım koşullarında farklı dane boyutları için gözlenen çökme hızları ve türbülans şiddeti değerleri.



Şekil 23. Tabandan 40 cm mesafede her iki motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım koşullarında farklı dane boyutları için gözlenen çökeltme hızları ve türbülans şiddeti değerleri.



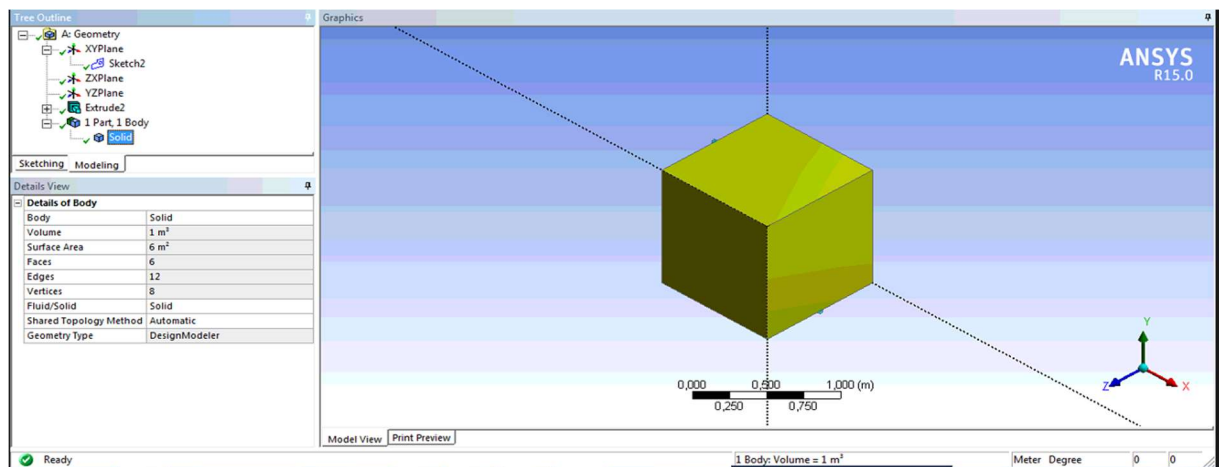
Şekil 24. Tabandan 60 cm mesafede her iki motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım koşullarında farklı dane boyutları için gözlenen çökeltme hızları ve türbülans şiddeti değerleri.

## 3.2 Sayısal Modelin Sonuçları

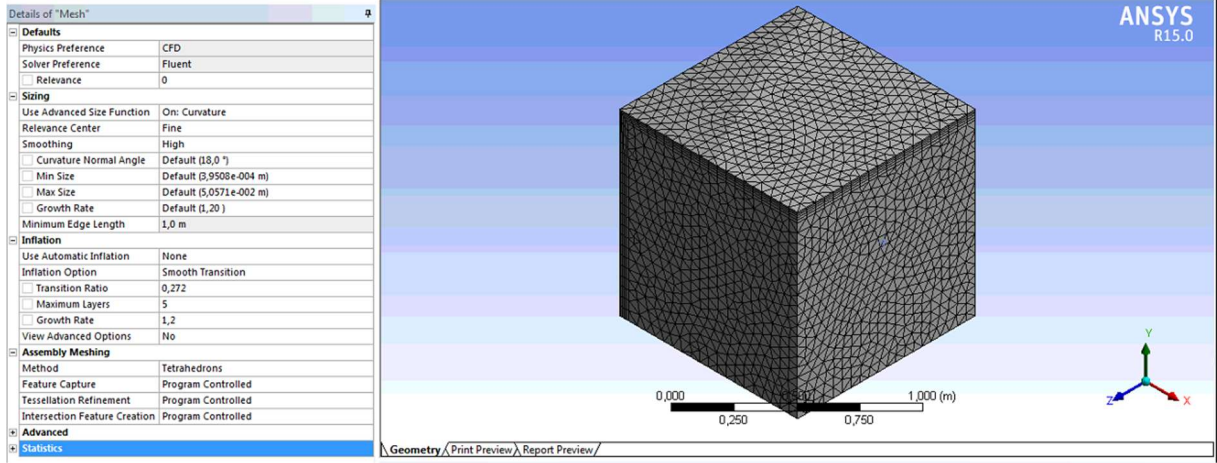
### 3.2.1 Sayısal Modelin Kurulumu

Çalışmanın sayısal modelleme kısmında parçacığın laminar ve türbülanslı akımda bırakıldıktan sonraki hareketi modellenmiştir. Bunun için ilk etapta geometri oluşturulmuştur. Deney sonuçları ile benzeşim sağlamak amacıyla 1 m x 1 m x 1 m boyutlarında bir tank ANSYS Workbench'in içinde bulunan "Design Modeler" ile oluşturulmuştur. Bu amaçla önce XY düzleminde bir dikdörtgen çizilmiştir. Bu aşamada düzlem seçilip 'Sketching' kısmından 'Rectangle' seçilir. Ölçülendirme işlemi şekil oluşturulduktan sonra yapılmıştır. Dikdörtgen elde edildikten sonra ölçülendirilmesi için 'Dimensions' menüsünden 'Length/Distance' seçilerek tank boyutlandırması yapılmıştır. Daha sonra 3 boyutlu bir geometri elde etmek için, 'Extrude' komutu kullanılmıştır. Dikdörtgen Z ekseninde simetrik olarak 0.5 m genişletilmiş ve 'Generate' komutu yardımıyla 1m<sup>3</sup>lük kübik tank elde edilmiştir. Son olarak elde edilen kontrol hacmi Şekil 25'teki gibidir. Bu şekilde sayısal modellemenin geometri oluşturma kısmı tamamlanıp sayısal ağ oluşturmaya geçilmiştir.

Sayısal ağ oluşturmak için oluşturulan geometriye 'Component System' bölümünden 'Mesh' bağlanmış ve parametreler tanımlanmıştır (Şekil 26). Bu bölümde sayısal ağın kalitesinin kontrolü iki parametrenin kontrolü ile yapılmaktadır. Bu parametreler : çarpıklığı ifade eden 'Skewness' ve vektörlerin birbirini dik kesmesinin kalitesini kontrol eden 'Orthogonal Quality' parametreleridir. Bu iki değere istatistiki veriler 'Statistics' kısmından ulaşılır. Ortalama 'Orthogonal Quality' değeri 0 ile 1 arasında değişir ve değer 1'e ne kadar yakın olursa oluşturulan sayısal ağın o kadar kabul edilebilir olduğu belirtilmektedir. Çarpıklığı ifade eden 'Skewness' değeri için ise sınıflandırma tam tersi verilmektedir, bu değer 0 'a yaklaştıkça oluşturulan ağ kalitesi mükemmelere yaklaşmaktadır.



Şekil 25. Model kurulurken oluşturulan kontrol hacmi.



Şekil 26. Model kurulurken oluşturulan sayısal ağ.

Oluşturulan model için sayısal ağın kalitesini belirten istatistik verileri Şekil 27’de sunulmuştur.

Statistics		Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	15680	<input type="checkbox"/> Nodes	15680
<input type="checkbox"/> Elements	69085	<input type="checkbox"/> Elements	69085
Mesh Metric	Skewness	Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	1,14260214603079E-03	<input type="checkbox"/> Min	0,29776192917577
<input type="checkbox"/> Max	0,764210539408351	<input type="checkbox"/> Max	0,999489470995442
<input type="checkbox"/> Average	0,216765830398986	<input type="checkbox"/> Average	0,868056847006875
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,118648341253852	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	8,86524778329993E-02

Şekil 27. Sayısal ağın kalitesini belirten istatistik verileri

Sayısal ağ oluşturma işlemi tamamlandıktan sonra ‘Setup’ kısmına geçilmiştir. ANSYS Workbench ile modelin kurma aşamalarını tamamlamak üzere model bileşenleri ‘Components Systems’ kısmından ‘Fluent’ seçilmiş ve tamamlanan önceki aşamaya bağlanarak ve çift tıklanarak model kurulumu başlatılmıştır. Kurulum aşaması raporda yer alan modellemelere göre değişmektedir ve bu kısımda kullanılan/değiştirilen alt modeller 1) Genel (General) 2) Modeller (Models) 3) Hücre Özellikleri (Cell Zone Conditions) 4) Sınır Şartları (Boundary Conditions) şeklindedir. Akımın ve bırakılan parçacığın zamana bağlı modellenmesi için ‘Transient’ model seçilmiştir. Modelde akım özelliklerine göre laminer ya da türbülanslı olarak model ‘Viscous’ bölümünde tanımlanmış ve alt model olarak parçacığın geometri içine bırakılıp takip edilmesini sağlayan Lagrangian Dağınık Faz Modeli olan ‘Discrete Phase’ alt modeli seçilmiştir. Discrete Phase Model aktifleştirilip gerekli parametreler girildikten sonra parçacık özelliklerini modele tanıtabilmek için bir ‘Injection’ tanımlanması gerekir. Aynı modelleme içerisinde birden fazla enjeksiyon tanımlı yapılabilir. Bu çalışma kapsamında çalıştırılan bütün modellerde her modelleme içerisinde ‘Injection-0’ isimli bir tanımlama ile su dolu tankın üst-

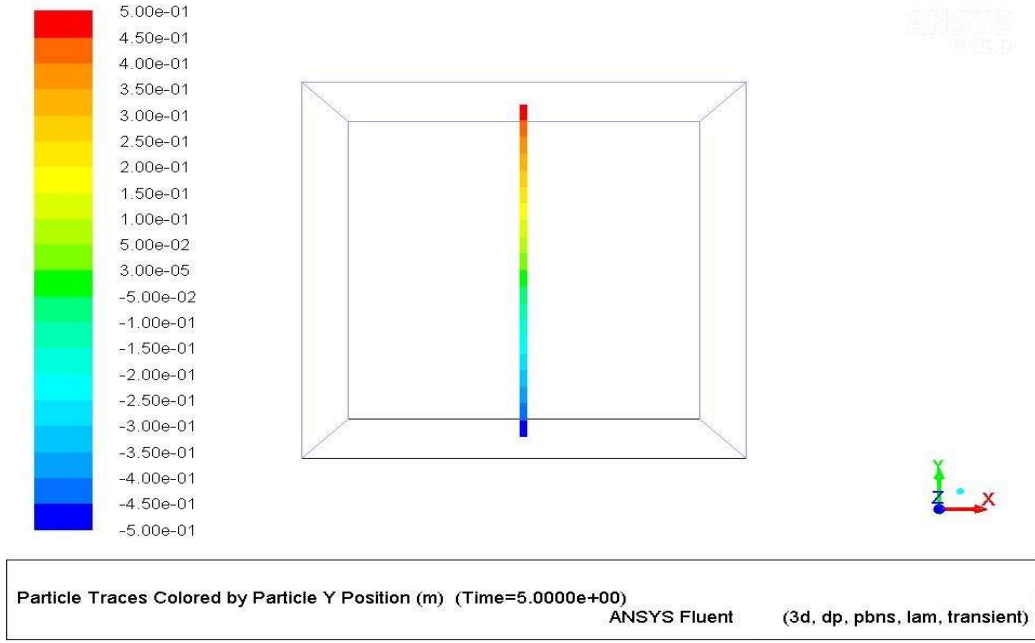
orta noktasından tek bir parçacık bırakılma durumu modellenmiştir. Su dolu tankın en üst ( $y=0.5\text{m}$ ); x ve z eksenlerinde orta noktası ( $x=0\text{ m}$ ;  $z=0\text{ m}$ ) seçilmiş, parçacık başlangıç hız değerleri her ekseninde 0 olarak tanımlanmıştır. Tanka bırakılan parçacığın özkütlesi  $1550\text{ kg/m}^3$  ve dane boyutu 2 mm olarak tanımlanmıştır. İzlenmek istenilen parçacığın takibi için denklemler Runge-Kutta methodu ile çözülmüştür. Modellenen  $1*1*1\text{ m}^3$ lük tankın başlangıçta su ile dolu olduğunu modele tanımlayabilmek amacıyla '*Cell Zone Conditions*' kısmından gerekli düzenlemeler yapılmıştır.

Sınır şartlarının doğru tanımlanması her modelleme çalışmasında olduğu gibi bu çalışmada da önemlidir. Bu amaçla geometri ve sayısal ağ oluşturma kısımlarında model bölümlere ayrılarak tanımlanmıştır. Sınır şartlarının tanımlandığı '*Boundary Conditions*' kısmında ise farklı isimlendirilen her eleman için öncelikle tip belirtilmiştir. Giriş ve çıkış akımlarının tanımlandığı inlet ve outlet; '*Velocity-inlet*' olarak, duvarlar '*Wall*' olarak, Sediment girişi '*Pressure inlet*' ve tankın iç kısmı '*Interior*' olarak tanımlanarak modele girilmiştir. Giriş ve çıkış elemanları için yapılan her simülasyonda farklı hız değerleri kullanılmıştır.

Modelin kurulumunda son aşama çözücü (Solver) özelliklerinin belirtilmesidir. Her model için ayrı tanımlanmakla beraber, genel olarak zaman adımı '*Time Step Size*' saniyenin yüzde biri (0.01) olarak seçilmiş ve modeller 5 saniye için çalıştırılmıştır.

### **3.3.3 Laminer Akımda Lagrangian Dağınık Faz Modellemesi**

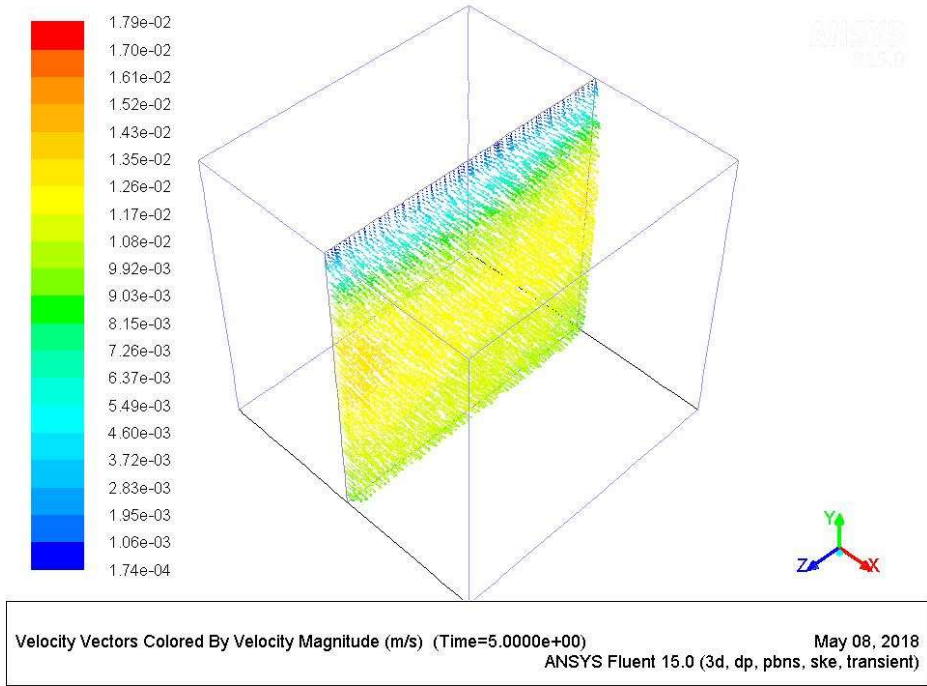
Oluşturulan ve çözülen bu ilk modelde amaç tankın içi su ile doluyken laminer akım koşullarında bırakılan parçacığın yörüngesinin modellenmesidir. Şekil 28'de görüldüğü gibi bırakılan 2 mm boyutundaki parçacık düzgün bir şekilde durgun suda tabana inmiştir. Son hızı olan  $w=14,71\text{ cm/s}$  hıza 3 cm sonunda gelmiş ve aynı hızla düşmeye devam etmiştir. Bu değer deneylerde laminer akım için gözlenen ve teorik olarak Denklem 4 ile hesaplanan değerle uyumludur.



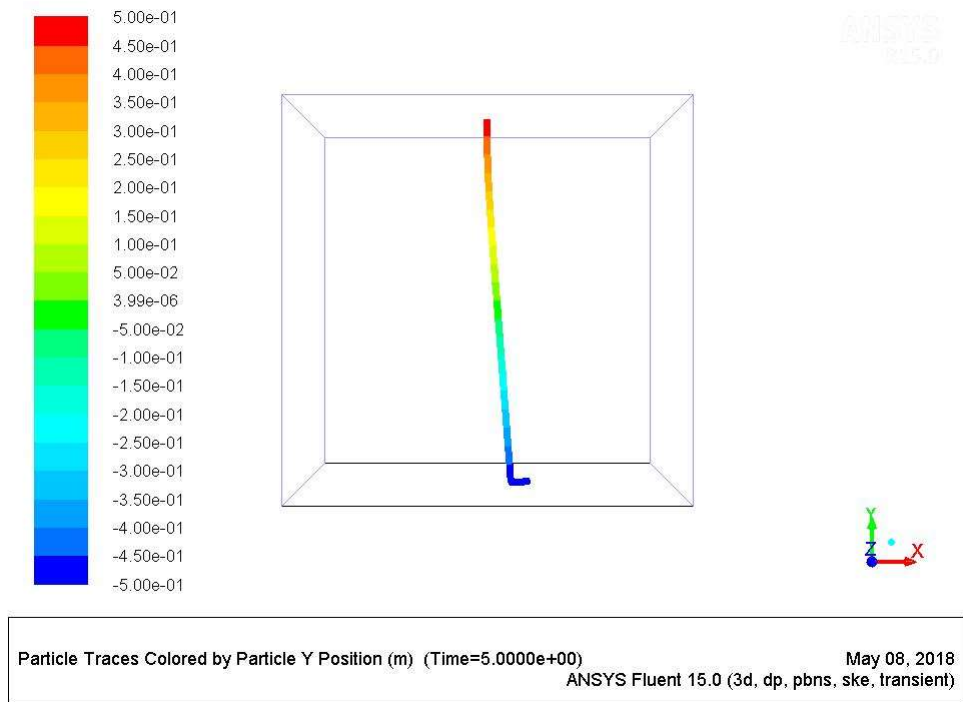
Şekil 28. 2 mm dane boyutuna sahip parçacığın laminar akım koşullarında koşullarında modellenen yörüngesi.

### 3.3.4 Türbülanslı Akımda (Sabit hızlar) Lagrangian Dağınık Faz Modellemesi

Bu kısımda 2 mm boyuta sahip parçacığın bırakıldığı tankın giriş ve çıkışlarına sabit bir hız ( $u=0,05$  m/s,  $v=0,025$  m/s ve  $w =0,00125$  m/s) olacak şekilde sınır şartları hız giriş ve çıkışı (velocity inlet/outlet) tanımlanmıştır. Bu şekilde tankta türbülans yaratılmış ve parçacığın çökme hızlarının değişimine bakılmıştır. Türbülans modeli olarak k-epsilon modeli seçilmiştir. Parçacığın bırakıldığı orta noktada alınan düzlemsel bir kesit üzerinde modellenen akım hızları Şekil 29’da verilmiştir. Parçacığın tank tabanına inerken izlediği yörünge ise Şekil 30’da görülebilmektedir. Yine orta noktada alınan düzlemsel kesitte gözlenen türbülans şiddeti ise Şekil 31’de verilmiştir.

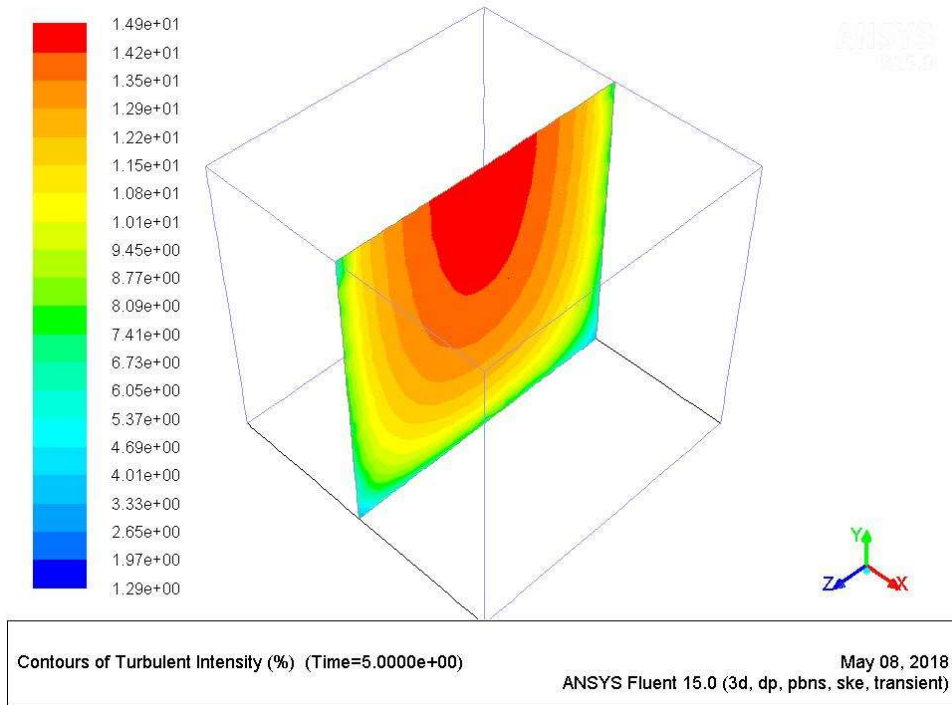


Şekil 29. Türbülanslı koşullarda parçacığın bırakıldığı orta noktada alınan düzlemsel bir kesit üzerinde modellenen akım hızları.



Şekil 30. 2 mm dane boyutuna sahip parçacığın türbülanslı akım koşullarında koşullarında modellenen yörüngesi.

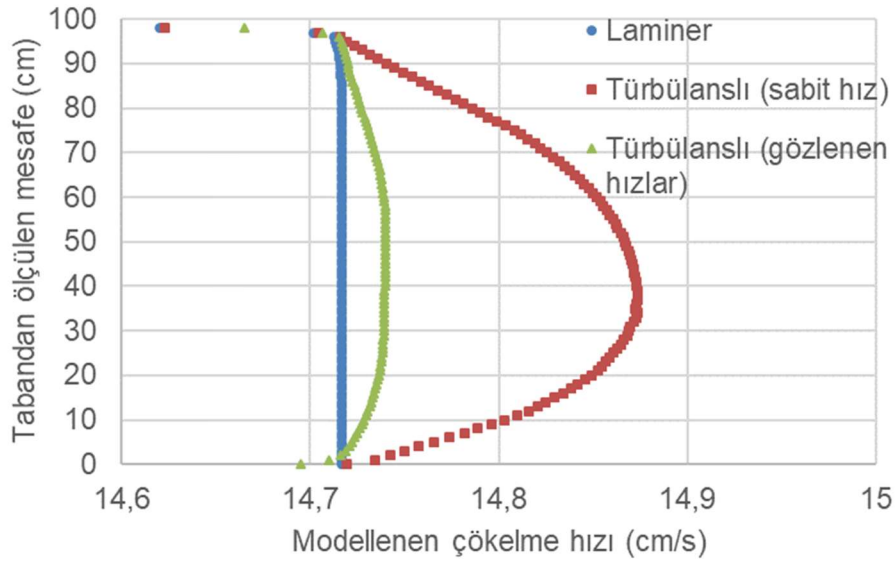




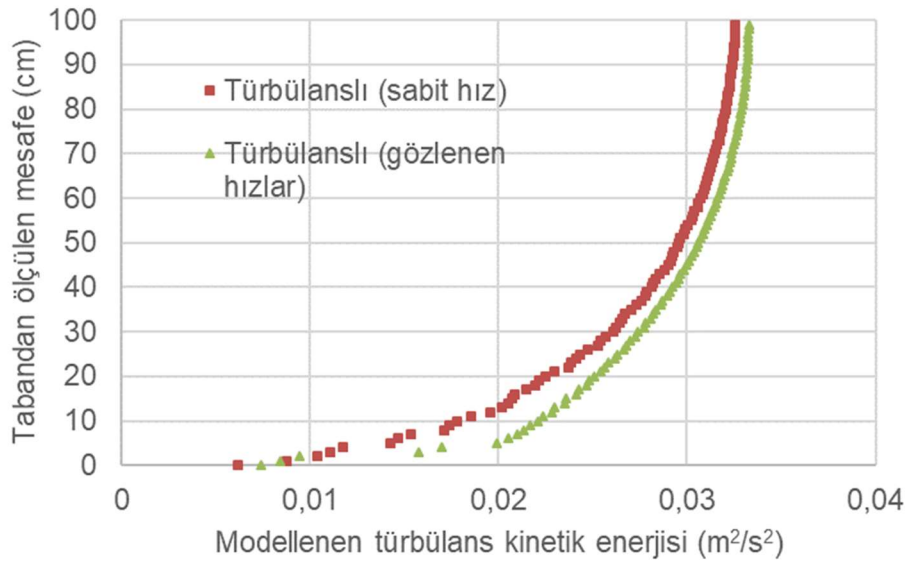
Şekil 31. Türbülanslı koşullarda parçacığın bırakıldığı orta noktada alınan düzlemsel bir kesit üzerinde modellenen türbülans şiddeti.

### 3.3.5 Türbülanslı Akımda (Deneyde Gözlenen Hızlar) Lagrangian Dağınık Faz Modellemesi

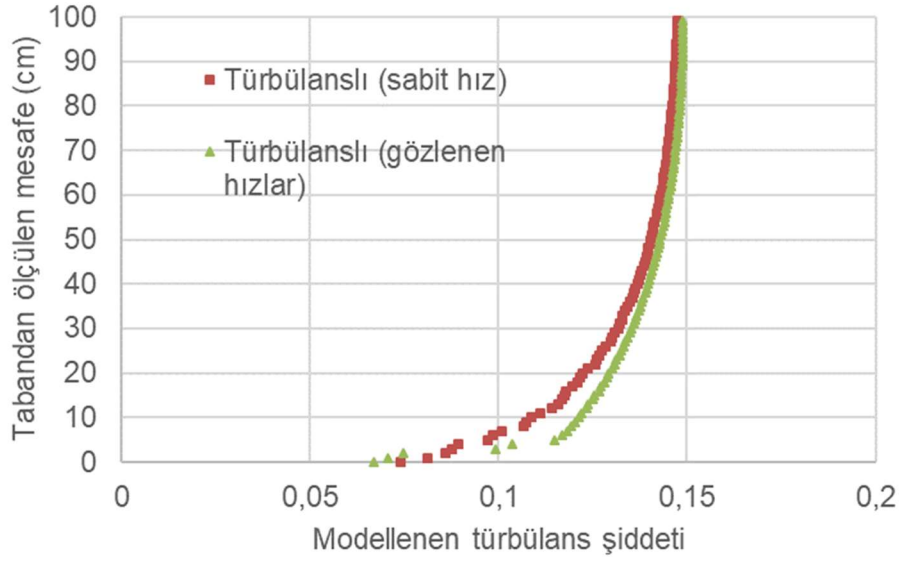
Bu bölümde tankın sınır şartlarını hız giriş ve çıkışı (velocity inlet/outlet) tanımlamak yerine tabandan 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerde deneylerde gözlenen ve raporda daha önce Şekil 10, 11, 12 ve 13 olarak sunulan akım hızları zamana bağlı olarak tanımlanmıştır. Daha sonra alınan sonuçlar laminer akım koşullarında ve sabit hızlar tanımlanarak elde edilen türbülanslı akım koşullarında elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Modellenen çökeltme hızının bu üç durum için karşılaştırılması Şekil 31'de verilmiştir. Buna göre gözlenen hızlarla hesaplanan çökeltme hızı laminer akıma göre farklılık gösterse de bu deneylerde gözlenen çökeltme hızındaki artışı temsil edememektedir. Modelde kullanılan çökeltme hızı formülü Reynolds sayısı ve itki katsayısına bağlı olarak hesaplanırsa da türbülans kinetik enerjide meydana gelen değişimleri hesaba katmadığından bu beklenen bir sonuçtur. Model tarafından 2 mm parçacığın düşüşü anında hesaplanmış türbülans kinetik enerji ve türbülans şiddeti değerlerinin sabit hızlarla ve gözlenen hızlarla çalıştırılan iki model için karşılaştırılması Şekil 32 ve Şekil 33'de sunulmuştur.



Şekil 32. Fluent modeliyle hesaplanan parçacık çökeltme hızları değerlerinin laminer akım ve türbülanslı akım koşullarında karşılaştırılması



Şekil 33. Fluent modeliyle hesaplanan türbülans kinetik enerjisi değerlerinin iki farklı türbülanslı akım koşullarında karşılaştırılması

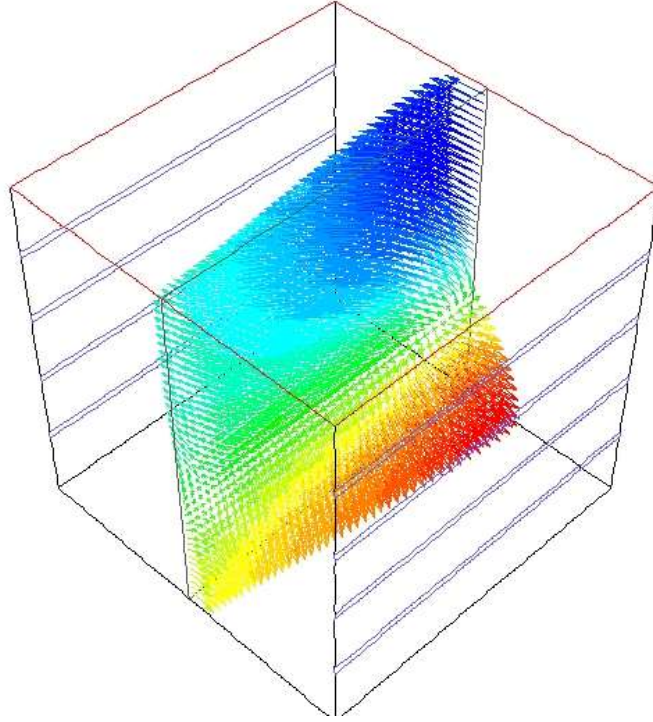
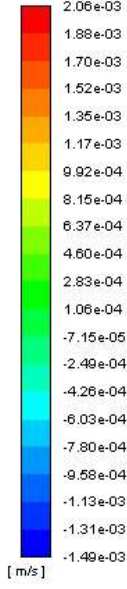


Şekil 34. Fluent modeliyle hesaplanan türbülans şiddeti değerlerinin iki farklı türbülanslı akım koşullarında karşılaştırılması

### 3.3.5 Çökme Hızının Hesabında Türbülans Şiddetinin Etkisinin Modellenmesi

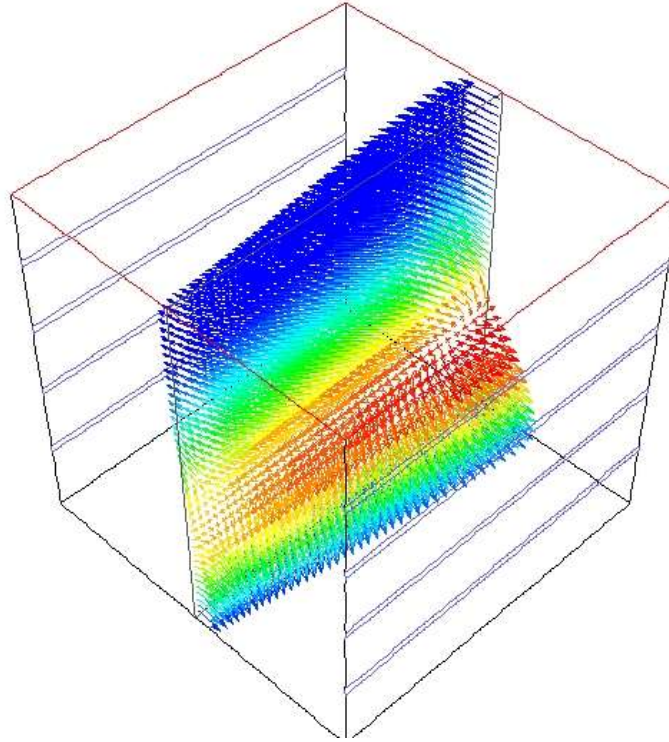
Çökme hızına türbülans şiddetinin etkisinin modellenmesi iki farklı yaklaşımla ele alınmıştır. İlk bölümde 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerde deneylerde ölçülen hız zaman serileri (Şekil 10, 11, 12 ve 13' e bakınız) modele girdi olarak verilmiş ve farklı türbülans yoğunluklarında sonuçlara etkisi irdelenmiştir. Türbülans şiddeti, Fluent modelinde çalkantı hızlarının ortalama hıza oranı olarak tanımlanmakta ve %1'den küçük olduğunda düşük, %10'dan yüksek olduğunda yüksek olarak kabul edilmektedir. Çalışmada 3 farklı türbülans şiddeti (%5, %7 ve %10) modelde tanımlanarak akım hızlarına ve çökme hızlarına etkisi araştırılmıştır. Şekil 35, 36 ve 37 türbülans şiddeti %5 iken x, y ve z yönlerinde modellenen hızları ayrı ayrı ve Şekil 38 ise modellenen bileşke hızı göstermektedir. Sadece düşey yöndeki hızlar karşılaştırıldığında farklı türbülans yoğunluğunda akımın düşey hızına etkisi Şekil 39'da verilmiştir. Aynı türbülans şiddetlerinde  $d=2$  mm için hesaplanan parçacık çökme hızına türbülans yoğunluğunun değiştirilmesinin ise belirgin bir etkisi model sonuçlarına göre gözlenememiştir.

u (m/s)

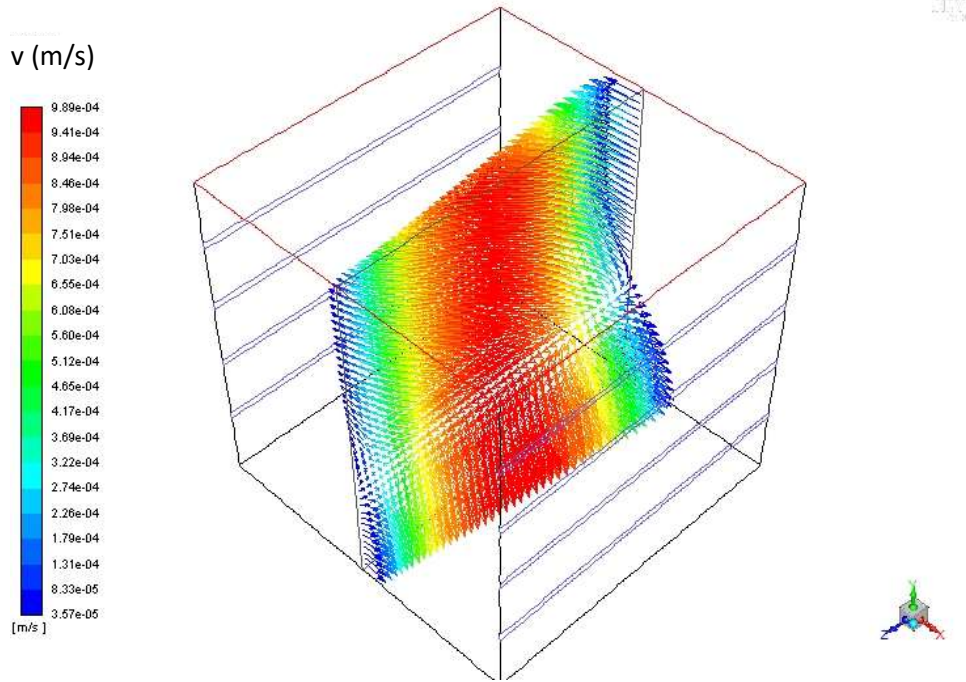


Şekil 35. Türbülans şiddeti %5 iken Fluent modeliyle hesaplanan x yönündeki akım hızları

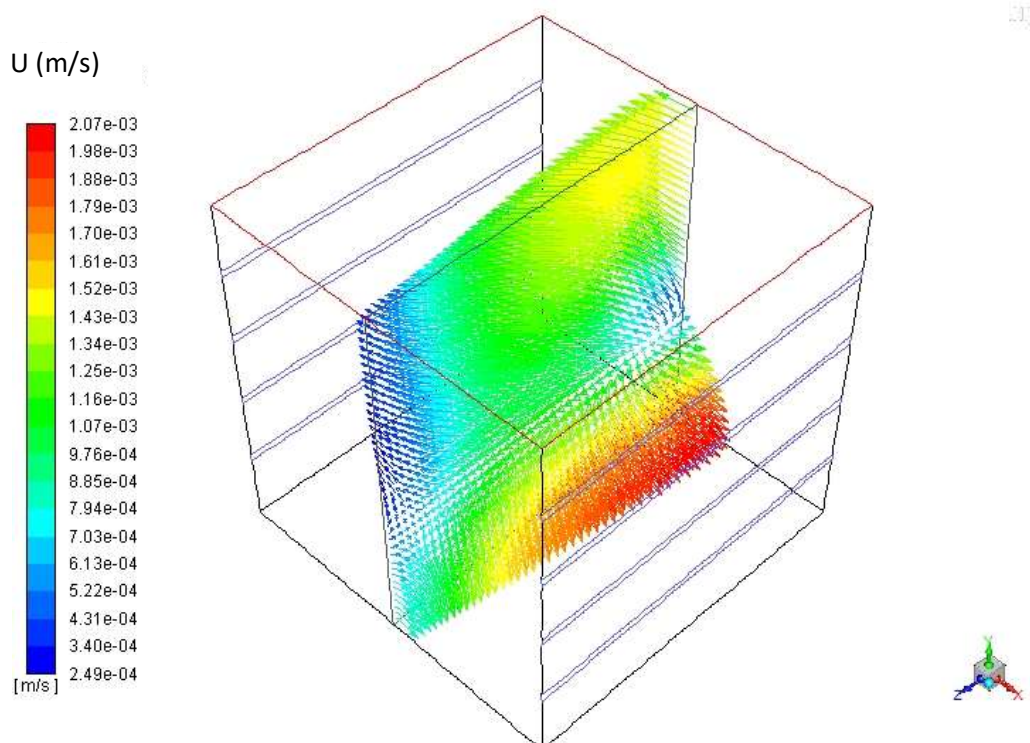
w (m/s)



Şekil 36. Türbülans şiddeti %5 iken Fluent modeliyle hesaplanan düşey (y) yönündeki akım hızları

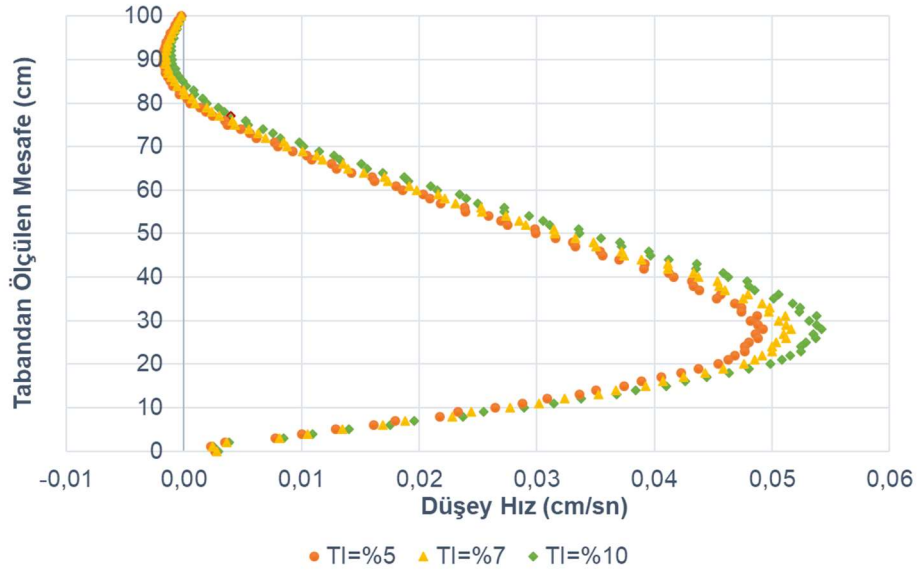


Şekil 37. Türbülans şiddeti %5 iken Fluent modeliyle hesaplanan z yönündeki akım hızları



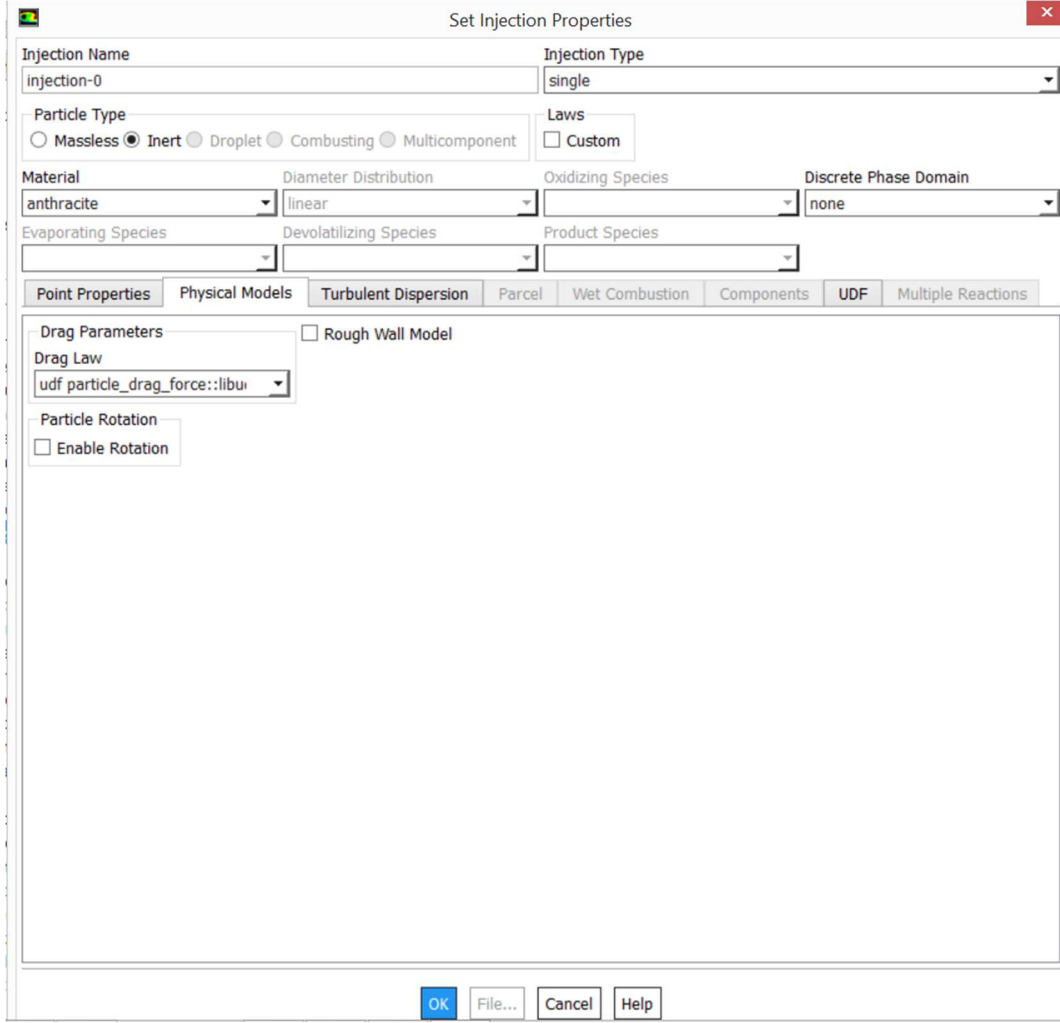
Şekil 38. Türbülans şiddeti %5 iken Fluent modeliyle hesaplanan bileşke akım hızları





Şekil 39. Farklı türbülans yoğunluklarında parçacığın bırakıldığı düşey düzlemde y yönündeki akım hızının mesafeye göre değişimi.

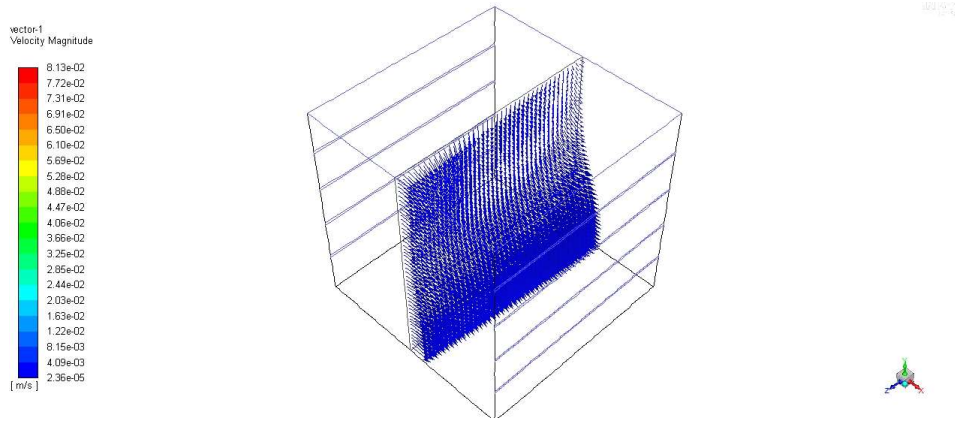
Bunun üzerine çökme hızının hesabında modele müdahale etme yoluyla türbülansın çökme hızının hesabında direk kullanılmasına çalışılmıştır. Bu kısımda yine modelde sınır şartları olarak tabandan 20, 40, 60 ve 80 cm mesafelerde deneylerde gözlenen akım hızları (Şekil 10, 11, 12 ve 13' e bakınız) zamana bağlı olarak modelde tanımlanmıştır. Parçacığın yörüngesi boyunca etkiyen türbülans şiddetinin çökme hızına etkisinin modellenmesi amacıyla modelde çökme hızının hesaplandığı bölüm kullanıcı tanımlı fonksiyon yazılarak (udf) model tekrar çalıştırılmış ve sonuçlar bir önceki bölümden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Kullanıcı tanımlı fonksiyon, enjeksiyon özelliklerinin girildiği yerden modele giriş dosyası olarak tanımlanmış (Şekil 40) ve Ek-2'te kullanılan fonksiyonların detayları verilmiştir.



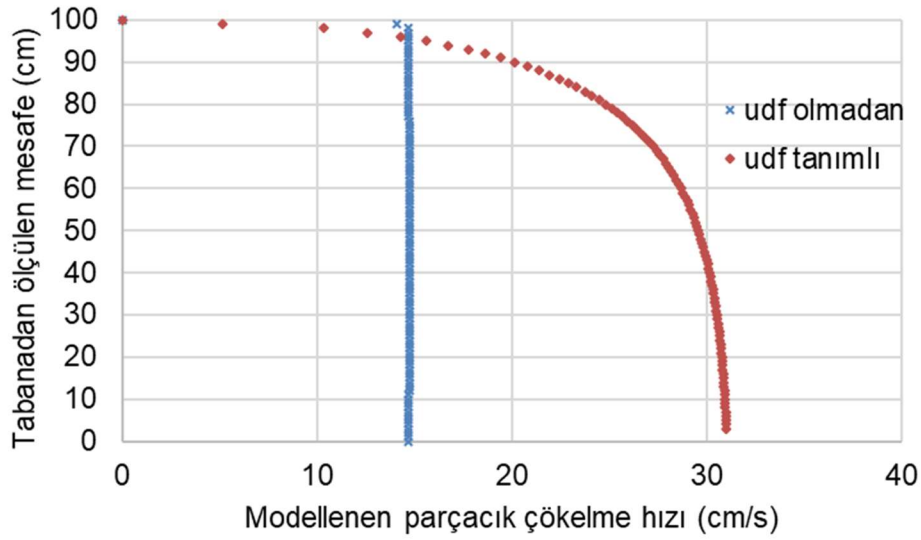
Şekil 40. Enjeksiyon özellikleri sekmesinden kullanıcı tanımlı fonksiyonun modele tanımlanması

Yazılan kullanıcı tanımlı fonksiyonda; koda verilen isim; ve modelde her adımda hesaplanarak fonksiyona aktarılan parçacık Reynolds sayısı ( $Re$ ) ve izlenen parçacığın bilgilerine işaret eden parametre ( $p$ ) en önemli parametrelerdir. Kullanıcı tanımlı fonksiyon ile hesaplanan ve çökme hızına entegre edilen değer boyutsuz olmalı ve modelde Denklem 18'de verilen ve  $18 \cdot Cd \cdot Re / 24$  ile tanımlanan parametreye eşdeğer olmalıdır. Ek-2'de görüldüğü gibi izlenen yol itki kuvvetini türbülans şiddetinin bir fonksiyonu kadar azaltılması ve çökme hızının bu şekilde hesaplanmasıdır. Aynı akım koşullarında bırakılan 2 mm boyutundaki parçacığın düşey su kolonu boyunca çökme hızı, türbülans şiddeti hesaba katılarak ve katılmadan modellenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 41 model tarafından hesaplanan akım hızlarını, Şekil 42, çökme hızlarının kullanıcı tanımlı fonksiyon modele dahil edilmeden ve edildikten sonraki hesaplanan değerlerini göstermektedir. Fonksiyon çökme hızlarını türbülans etkisini hesaba katarak hesaplama yapabilse de, hesaplanan

çökme hızları şu aşamada kesin doğru sonuçlar olarak nitelendirilmemelidir, sadece bu yaklaşımla çökme hızlarının türbülans şiddetine bağlı olarak hesaplanabildiğinin bir göstergesi olarak bu sonuçlar sunulmuştur.



Şekil 41. Kullanıcı tanımlı fonksiyon modele dahil edilmeden ve edilerek modellenen parçacık çökme hızlarının karşılaştırılması



Şekil 42. Kullanıcı tanımlı fonksiyon modele dahil edilmeden ve edilerek modellenen parçacık çökme hızlarının karşılaştırılması



#### 4.TARTIŞMA/SONUÇ

Bu çalışma literatürde mevcut parçacık çökme hızlarının hesabında akım türbülans özelliklerinin hesaba katılmadığı ve bunun özellikle modelleme çalışmalarında sonuçları değiştirerek yanlış değerler hesaplanmasına neden olduğu düşünülerek kurgulanmıştır. Literatür özetinde sunulduğu gibi mevcut denklemler **türbülanslı akımın özelliklerini ve etkisini** hesaba katmadan parçacık çökme hızını tahmine yöneliktir, o yüzden de eksik kaldığı düşünülmektedir. Bu eksikliği gidermek üzere deneysel bir düzenek tasarlanmış, ve farklı dane boyutlu parçacıklar bir tanka bırakılarak parçacığın çökme hareketi video ile kaydedilerek sonrasında görüntü işleme tekniği ile çökme hızları farklı dane boyutları için, farklı akım koşullarında ve farklı derinliklerde belirlenmiştir. Laboratuvarda yapılan türbülans çalışmaları için uygun olan ve saniyede 100 veri kaydedebilen 10 MHz akustik Doppler akım ölçer (ADV) temin edilerek parçacık hareketi esnasında tabandan belli mesafelerde akım ölçümleri yapılmış ve akım verileri analiz edilerek akımın türbülans karakteristik bilgileri hesaplanmıştır. Parçacığın akım ölçer probunun yanından geçtiği andaki an ve o anın 2 saniye öncesi ve sonrası türbülans karakterizasyonunda kullanılmıştır. Sonraki aşamada türbülans şiddeti, parçacık çökme hızı ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır.

İki farklı motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım koşullarında dane boyutu 2'den küçük ( $d=1$  mm, 1,5 mm ve 2 mm) ve 2'den büyük ( $d=3,5$  mm ve 4 mm) olma durumuna göre çökme hızının laminar akıma göre farklı davranış gösterdiği gözlenmiştir. Düşük motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım ( $a=1$  m/s<sup>2</sup>), dane boyutu 2 mm'den küçük parçacıklara laminar akımda gözlenen çökme hızlarını ortalama %49 arttırarak etki ederken, daha büyük parçacıklara arttırıcı etkisi olmadığı ve çökme hızlarının laminar akımda gözlenen çökme hızlarına benzer olduğu gözlenmiştir. Motor yüksek devir hızıyla çalıştırıldığında ise ( $a=3$  m/s<sup>2</sup>), dane boyutu 2 mm'den küçük parçacıklara çökme hızının ortalama %36 arttırarak etki ettiği, ama daha büyük parçacıklarda çökme hızını azaltıcı bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.

Deneysel çalışmalar, tek bir dane boyutu için farklı derinliklerde ve farklı türbülans koşullarında gözlenen çökme hızları ve deneyler esnasında yapılan hız ölçümlerinden elde edilen türbülans kinetik enerjilerinde bazı mesafe ve dane boyutları için benzer oranlar olduğunu gösterdi. Ancak türbülans kinetik enerjileri ve akım hızları arasında oransal bir ilişki olduğunu tüm ölçümlerde gözlemek mümkün olmadığından genel bir ilişki kurulamamıştır. Deneyler sonucunda elde edilen tüm sonuçlar toplu olarak değerlendirilerek çökme hızları ve türbülans şiddeti arasında regresyon analizi aracılığıyla tabandan ölçülen farklı mesafelerde bir ilişki kurulmaya çalışıldı. Bu analizlerde, her iki motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım koşullarında farklı dane boyutları için elde edilen veriler birlikte değerlendirildi. Tabandan 20, 40 ve 60 cm mesafelerde regresyon belirleme katsayısı R<sup>2</sup> değeri oldukça düşük

de olsa benzer bir trend olduğu gözlenmiş, türbülans şiddetinin ivme ve dane boyutundan bağımsız olarak artışı ile çökme hızı bu derinliklerde artış göstermiştir. Tabandan 80 cm mesafede ölçülen değerler karşılaştırıldığında ise veriler arasında anlamlı bir ilişki gözlenemedi.

Deneyleri takiben sayısal model ile parçacık çökme hızının laminar akımda ve farklı türbülanslı akım koşullarında simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Fluent modelinde Lagrangian dağınık faz alt modeli uygulanmıştır. Laminar akım için deneysel ve sayısal modellerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak türbülanslı akım koşullarında parçacık çökme hızı modellendiğinde, deneylerde gözlenen çökme hızındaki artışın modellenen çökme hızı değerlerinde gözlenemediği görülmüştür. Modelde kullanılan çökme hızı formülü Reynolds sayısı ve itki katsayısına bağlı olarak hesaplanırsa da türbülans kinetik enerjide meydana gelen değişimleri hesaba katmadığından bu beklenen bir sonuçtur.

Bu gözlemler doğrultusunda Fluent modelinde parçacık çökme hızının hesaplandığı formlerde kullanıcı tanımlı fonksiyon yazılarak, türbülans şiddetinin çökme hızının hesabında kullanılması sağlanmıştır. Sonuç olarak deneysel sonuçlarla birebir örtüşen çökme hızı değerleri hesaplanamamışsa da bu yaklaşımın türbülanslı akım koşullarında daha gerçekçi sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Sayısal modele kullanıcı tanımlı fonksiyon ile müdahale edildiğinde, her zaman adımında parametrelerin yenilenmesi nedeniyle simülasyonların çok uzun sürmekte (günler mertebesinde) olduğu gözlenmiş, ve proje süresince bu aşamaya kadar ilerleme kaydedilebilmiştir. Sayısal modelde kullanılan çökme hızı fonksiyonlarına müdahale edilerek deneysel sonuçlarla örtüşen sonuçlar elde edilebileceği ve halen sürmekte olan modelleme çalışmalarının sonuçlarının yakın gelecekte makale olarak sunulması planlanmaktadır.

Özellikle erozyon etkisiyle askıda katı madde miktarının fazla olduğu baraj göllerinde su alma yapısının askıdaki katı maddeyi dışarıda bırakacak şekilde yeniden tasarımı ve nehirlerde köprü ayakları için koruma yapılarının tasarımı için kullanılan modelleme yaklaşımlarının akım türbülans karakteristiğini içerecek şekilde yeniden yapılandırılması daha iyi sonuçlar verecektir.

## KAYNAKLAR LİSTESİ

Elçi, Ş. and Ekmekçi, B.2016. "Observational and Numerical Methods for Quantifying and Modeling of Turbulence in a Stratified Reservoir", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 9(4),1603-1614.

Etemad-Shahidi, A. ve Imberger, J. 2001. "Anatomy of turbulence in thermally stratified lakes", *Limnology Oceanography*, 46 (5), 1158-1165.

Fluent 6.3, 2006. User's Manual.

[https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/main\\_pre.htm](https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/main_pre.htm)

Son erişim tarihi: 12.05.2018.

Geyer, W.R., Scully, M.E. ve Ralston D.K. 2008. "Quantifying vertical mixing in estuaries", *Environmental Fluid Mechanics*, 8:495-509.

Graf, W.H.1984. *Hydraulics of Sediment Transport*, Water Resources Publications.

Ivey, G.N., Winters, K.B. ve Koseff, J.R. 2008. " Destratify stratification, Turbulence, but How Much Mixing? ", *Annu.Rev.Fluid Mechanics*, 40:169-184.

Julien, Y. P. 1995. *Erosion and sedimentation*. Cambridge University Press, Cambridge,U.K.

Kawanisi K. and Shiozaki R. 2008. "Turbulent Effects on the Settling Velocity of Suspended Sediment", *J. Of Hydraulic Engineering, ASCE* . 134:2.

Rubey, W. W. 1933. "Settling velocities of gravels, sand and silt particles", *Am. J. Sci.*, 25, 325–338.

Sadat-Helbar, S.M ve Amiri-Tokaldany, E. 2009. "Fall velocity of sediment particles". *Proceedings of the 4th IASME / WSEAS Int. Conference on water resources, hydraulics & hydrology*, 39-45.

Saggio, A. ve Imberger, J. 2001. "Mixing and turbulent fluxes in the metalimnion of a stratified lake", *Limnology and Oceanography*, 46(2): 392-409.

Stokes, G. G. 1851. "On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulum", *Trans. Camb. Phil. soc.*, 9(2), 8-106.

Van Rijn. 1989. *Handbook Sediment Transport by Currents and Waves*, Waterloopkundig Laboratorium (Delft, Netherlands).

Wu, W., ve Wang, S. S. Y. 2006. "Formulas for sediment porosity and settling velocity", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132(8), 858-862.

Yalin, M.S. 1977. "Mechanics of sediment transport", Pergamon Press, Oxford, pp. 80–87.

Zhang, R.J.1989. *Sediment Dynamics in Rivers*. Water Resources Press, Beijing.

## EKLER

**Ek-1:** Görüntü işleme analizi için Matlab'de yazılan program

```
v= VideoReader('00016.MTS');  
b=v.Duration*50;
```

```
for k = 1:25:b %fill in the appropriate number
```

```
    this_frame = read(v, k);  
    thisfig = figure(k);  
    thisax = axes('Parent', thisfig);  
    image(this_frame, 'Parent', thisax);  
    title(thisax, sprintf('Frame #%d', k));
```

```
end
```

```
for k = 1:25:b
```

```
    this_frame1 = read(v, k);  
    thisfile = sprintf('frame_%d.jpg',k);  
    imwrite( this_frame1, thisfile );
```

```
end
```

```
i1=imread('frame_551.jpg');  
i2=imread('frame_576.jpg');  
i3=imread('frame_201.jpg');"
```

```
figure;  
imshow(i1);  
hold on;
```

```
figure;  
imshow(i2);  
hold on;
```

```
figure;  
imshow(i3);  
hold on;
```

```
c1 = [1042,114];  
c2 = [1035,316];  
c3 = [1030,514];
```

```
distance1=sqrt((c1(1,1)-c2(1,1))^2+(c1(1,2)-c2(1,2))^2)  
distanceX1=abs(c1(1,1)-c2(1,1))  
distanceY1=abs(c1(1,2)-c2(1,2))
```

```
distance2=sqrt((c2(1,1)-c3(1,1))^2+(c2(1,2)-c3(1,2))^2)  
distanceX2=abs(c2(1,1)-c3(1,1))  
distanceY2=abs(c2(1,2)-c3(1,2))
```

```
d1c=distance1/30  
d1xc=distanceX1/30  
d1yc=distanceY1/30
```

```
d2c=distance2/30  
d2xc=distanceX2/30  
d2yc=distanceY2/30
```

```
Ws=(d1yc+d2yc)*2/2
```

**Ek-2:** Fluent programında parçacık çökme hızının türbülans şiddetine bağlı olarak değiştirilmesi için yazılan kullanıcı tanımlı fonksiyonlar

```
#include "C:\Program Files\ANSYS Inc\v190\fluent\fluent19.0.0\src\udf\udf.h"
```

```
DEFINE_DPM_DRAG(particle_drag_force, Re, p, TI)
{
    real w, drag_force;

    if (Re < 0.01)
    {
        drag_force=18.0*(1-TI);
        return (drag_force);
    }
    else if (Re < 20.0)
    {
        w = log10(Re);
        drag_force = (18.0 + 2.367*pow(Re,0.82-0.05*w) )*(1-TI);
        return (drag_force);
    }
    else
        /* Note: suggested valid range 20 < Re < 260 */
    {
        drag_force =(18.0 + 3.483*pow(Re,0.6305))*(1-TI);
        return (drag_force);
    }
}
```

```

#include "udf.h"

DEFINE_DPM_BODY_FORCE(cell_k3, p, i)
{
    real bforce=0;
    cell_t c;
    Domain *d=Get_Domain(1);
    Thread *t=Lookup_Thread(d,2); /*ID degistir*/
    begin_c_loop(c,t)
    {
        if(P_TIME(p)>=0.0)
        {
            if(i==1) /*y yonunde*/
            {
                bforce=100000*C_K(c,t);
            }
            else
            {
                bforce=0.0 ;
            }
        }
        else
            bforce=0.0 ;
    }
    end_c_loop(c,t)
    return (bforce/P_MASS(p));
}

```

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. ŞEBNEM ELÇİ
Proje No:	116M035
Proje Başlığı:	Türbülansın Askıdaki Katı Maddenin Çökelme Hızına Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/03/2017 - 15/03/2018
Onaylanan Bütçe:	24300.0
Harcanan Bütçe:	23602.85

TÜBİTAK



<p>Öz:</p>	<p>Türbülanslı akımlarda düşey yönde akı nispeten küçük olsa da, gözlenen biyolojik ve kimyasal değişimlerin açıklanmasında büyük önem taşır. Yüzeysel akımlarda hem karışım hem de askıdaki katı madde modellenmek istendiğinde türbülansın hem karışıma, hem de askıdaki katı madde çökme hızına etkisinin gerçekçi olarak tanımlanması gerekmektedir. Literatürdeki mevcut denklemler türbülanslı akımın özelliklerini ve etkisini hesaba katmadan parçacık çökme hızını tahmine yöneliktir, o yüzden de eksik kalmıştır. Bu eksikliği gidermek üzere deneysel bir düzenek tasarlanmış, ve farklı dane boyutlu parçacıklar bir tanka bırakılarak parçacığın çökme hareketi video ile kaydedilerek sonrasında görüntü işleme tekniği ile çökme hızları belirlenmiştir. Deneyler esnasında belli derinliklerde 10 MHz akustik Doppler akım ölçer ile akım ölçümleri yapılmış ve akım verileri analiz edilerek akımın türbülans karakteristik bilgileri hesaplanmıştır. Parçacığın akım ölçer probunun yanından geçtiği anın 2 saniye öncesi ve sonrası türbülans karakterizasyonunda kullanılmıştır. Sonraki aşamada türbülans şiddeti, parçacık çökme hızı ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. İki farklı motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım koşullarında dane boyutu 2?den küçük ve 2?den büyük olma durumuna göre çökme hızının laminer akıma göre farklı davranış gösterdiği gözlenmiştir. Düşük motor devir hızıyla yaratılan türbülanslı akım, dane boyutu 2 mm?den küçük parçacıklara laminer akımda gözlenen çökme hızlarını ortalama %49 arttırarak etki ederken, daha büyük parçacıklara arttırıcı etkisi olmadığı ve çökme hızlarının laminer akımda gözlenen çökme hızlarına benzer olduğu gözlenmiştir. Motor yüksek devir hızıyla çalıştırıldığında ise, dane boyutu 2 mm?den küçük parçacıklara çökme hızının ortalama %36 arttırarak etki ettiği, ama daha büyük parçacıklarda çökme hızını azaltıcı bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.</p> <p>Deneysel çalışmalar, tek bir dane boyutu için farklı derinliklerde ve farklı türbülans koşullarında gözlenen çökme hızları ve deneyler esnasında yapılan hız ölçümlerinden elde edilen türbülans kinetik enerjilerinde bazı mesafe ve dane boyutları için benzer oranlar olduğunu göstermiştir. Ancak türbülans kinetik enerjileri ve akım hızları arasında oransal bir ilişki olduğunu tüm ölçümlerde gözlemek mümkün olmadığından genel bir ilişki kurulamamıştır. Deneyler sonucunda elde edilen tüm sonuçlar toplu olarak değerlendirilerek çökme hızları ve türbülans şiddeti arasında regresyon analizi aracılığıyla tabandan ölçülen farklı mesafelerde bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Analiz sonucu regresyon belirleme katsayısı R2 değeri oldukça düşük de olsa, türbülans şiddetinin ivme ve dane boyutundan bağımsız olarak artışı ile çökme hızı bu artış göstermiştir.</p> <p>Deneyleri takiben sayısal model ile parçacık çökme hızının laminer akımda ve farklı türbülanslı akım koşullarında simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Fluent modelinde Lagrangian dağılık faz alt modeli uygulanmıştır. Laminer akım için deneysel ve sayısal modellerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak türbülanslı akım koşullarında parçacık çökme hızı modellendiğinde, deneylerde gözlenen çökme hızındaki artışın modellenen çökme hızı değerlerinde gözlenemediği görülmüştür. Bu gözlemler doğrultusunda Fluent modelinde parçacık çökme hızının hesaplandığı formlerde kullanıcı tanımlı fonksiyon yazılarak, türbülans şiddetinin çökme hızının hesabında kullanılması sağlanmıştır. Sonuç olarak bu yaklaşımla türbülanslı akım koşullarında daha gerçekçi hızlar hesaplandığı düşünülmektedir.</p> <p>Özellikle erozyon etkisiyle askıda katı madde miktarının fazla olduğu baraj göllerinde su alma yapısının askıdaki katı maddeyi dışarıda bırakacak şekilde yeniden tasarımında ve nehirlerde köprü ayakları için koruma yapılarının tasarımında kullanılan modelleme yaklaşımlarının akım türbülans karakteristiğini içerecek şekilde yeniden yapılandırılması daha iyi sonuçlar verecektir.</p>
<p>Anahtar Kelimeler:</p>	<p>parçacık çökme hızı, türbülanslı akım, Fluent modeli</p>
<p>Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:</p>	<p>Hayır</p>