



**SU ALMA AĞZI AKIMI ETKİSİNDEKİ TABAN SEDİMENTİ TANESİNİN
HAREKETE BAŞLAMA KOŞULLARININ VE AĞIZ MEMBASINDAKİ
HIZ DAĞILIMININ İNCELENMESİ**

Efe BARBAROS

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Efe BARBAROS

22/12/2025

SU ALMA AĞZI AKIMI ETKİSİNDEKİ TABAN SEDİMENTİ TANESİNİN
HAREKETE BAŞLAMA KOŞULLARININ VE AĞIZ MEMBASINDAKİ HIZ
DAĞILIMININ İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Efe BARBAROS

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2025

ÖZET

Bu çalışmada, dikdörtgen bir kanaldaki ölüson duvarından yatay olarak su alan bir su alma ağız akımı etkisi altında, kanal tabanında bulunan küresel bir sediment tanesinin harekete başlama koşulları deneysel ve teorik yöntemlerle araştırılmıştır. Su alma ağzının ölüson duvarına ve kanal tabanına olan mesafeleri ile densimetrik Froude sayısının tane hareketinin başlangıcına etkileri ortaya konulmuştur. Tanenin akıma dik net izdüşüm alanının yüzdesi olan yerleşim katsayısının, tanenin harekete başlamasında belirleyici bir etkiye sahip olduğu; benzer yüzey alan katsayılarına sahip tanelerin, farklı çaplarda olsalar dahi benzer davranış sergilediği belirlenmiştir. Su alma ağzının tabandan uzaklaştırılmasının, özellikle ağza yakın bölgelerde tane hareketi için gerekli debiyi önemli ölçüde artırdığı, ancak bu etkinin ağızdan uzak konumlarda giderek azaldığı görülmüştür. Benzer şekilde, ağız ile ölüson duvarı arasındaki mesafenin artmasının da gerekli debiyi artırdığı; ancak bu etkinin, söz konusu mesafenin yaklaşık olarak bir ağız iç çapı mertebesini aşmasının ardından belirgin biçimde azaldığı tespit edilmiştir. Tane hareketinin teorik incelemesinde, taneye etki eden sürüklenme, kaldırma ve ağırlık kuvvetleri ile bu kuvvetleri belirleyen parametreler ve akımın türbülanslık derecesi değerlendirilmiştir. Su alma ağzının kanal tabanına olan mesafesi arttıkça veya tanenin ağza göre daha uzak konumlarda yer alması durumunda, türbülansın tane hareketi üzerindeki etkisinin azaldığı görülmüştür. Tane hareketinde hız gradyanına, Magnus etkisine ve su alma ağzının düşey hız bileşenine bağlı üç kaldırma kuvveti bileşeni değerlendirilmiş; bunlar arasında dönme kaynaklı Magnus kuvvetinin en baskın etkiye sahip olduğu ve hareket başlangıcında belirleyici rol oynadığı belirlenmiştir. Ayrıca, su alma ağızı membasındaki hız dağılımları ve bu dağılımlar üzerindeki sınır etkileri hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Ağzın tabana olan düşey mesafesindeki değişim, merkez çizgisindeki hızı yaklaşık %38; ölü son duvarına olan yatay mesafesindeki değişim ise yaklaşık %23 oranında etkilemiştir. Boyuna ve yatay hız bileşenleri genel olarak simetrik bir dağılım sergilerken, ağızdan uzaklaştıkça sınır etkileri zayıflamış ve farklı deney düzeneklerinin hız profilleri birbirine yaklaşmıştır. Sınır etkilerinin en belirgin gözlemlendiği bileşen düşey hızdır. Hız profilleri için geliştirilen ampirik eşitliklerin, belirtilen kullanım aralıklarında akım sınır şartlarını da kapsayacak biçimde profillerin davranışını güvenilir şekilde yansıttığı ve FLOW-3D HYDRO sayısal sonuçlarının deneysel verilerle yüksek uyum gösterdiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 91101

Anahtar Kelimeler : Akım sınırları, harekete başlama, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, sediment, su alma ağız

Sayfa Adedi : 191

Danışman : Prof. Dr. Kerem TAŞTAN

INVESTIGATION OF INCIPIENT MOTION OF A BED-SEDIMENT PARTICLE AND UPSTREAM VELOCITY DISTRIBUTION UNDER THE EFFECT OF AN INTAKE FLOW

(Ph. D. Thesis)

Efe BARBAROS

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2025

ABSTRACT

In this study, the initiation of motion of a spherical sediment particle resting on the channel bed under the influence of a horizontal intake flow located in a dead-end channel was investigated through experimental and theoretical approaches. The effects of the intake's vertical distance from the bed, its horizontal distance from the dead-end wall, and the densimetric Froude number on the onset of particle motion were examined. The placement coefficient, defined as the percentage of the particle's projected area normal to the flow, was found to have a decisive role in incipient motion, showing that particles with similar coefficients exhibited similar initiation characteristics even when having different diameters. Increasing the intake's vertical distance from the bed considerably raised the discharge required to initiate motion, particularly near the intake, while this influence diminished farther along the channel. Similarly, enlarging the horizontal distance between the intake and the dead-end wall also increased the required discharge, but this effect became negligible once the distance exceeded approximately one intake diameter. In the theoretical analysis, the drag, lift, and submerged weight forces acting on the particle, together with the parameters governing these forces and the influence of turbulence, were evaluated. As the intake was elevated or the particle positioned farther away, the effect of turbulence on motion decreased. Among the lift components examined—those due to velocity gradient, Magnus effect, and vertical velocity—the Magnus force was dominant and played a key role in motion initiation. Furthermore, velocity distributions upstream of the intake and the influence of flow boundaries were analyzed experimentally and numerically. Variations in the intake's vertical position relative to the bed altered the centerline velocity by up to 38%, while changes in horizontal distance from the wall affected it by about 23%. The longitudinal and transverse velocity components are symmetric, and boundary effects diminish with distance from the intake, causing the velocity profiles of different experimental configurations to converge. Although the vertical velocity component exhibited lower magnitudes than the other components, it was the one most strongly influenced by boundary proximity. Empirical equations developed for velocity profiles successfully represented flow behavior, and FLOW-3D HYDRO simulations showed strong agreement with experimental data, confirming the model's accuracy in capturing key flow characteristics and boundary effects.

Science Code : 91101

Key Words : Flow boundaries, incipient motion, computational fluid dynamics, sediment, intake

Page Number : 191

Supervisor : Prof. Dr. Kerem TAŞTAN

TEŞEKKÜR

Öncelikle, her zaman yanımda olan ve tecrübesiyle bana yol gösteren danışman hocam, değerli Prof. Dr. Kerem TAŞTAN'a teşekkür ederim. İş ahlakı, çalışkanlığı ve sahip olduğu bilgiyi paylaşmadaki cömertliğiyle, akademik yaşamım boyunca kendisini her zaman örnek alacağım. Öğrencisi olmak benim için daima bir gurur kaynağı olacaktır.

Değerli önerileri ve yapıcı eleştirileriyle tezime önemli katkılar sunan jüri üyelerim Prof. Dr. Mete Köken, Prof. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT, Prof. Dr. Serhat KÜÇÜKALİ ve Doç. Dr. Nihat EROĞLU'na; çalışmamın hız ölçümleri aşamasında tecrübelerini benimle paylaşan ve her aşamada destek olan Dr. Öğr. Üyesi Önder KOÇYİĞİT'e teşekkür ederim.

Floransa Üniversitesi'nde araştırma yapmamı mümkün kılan TÜBİTAK'a, 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu kapsamında sağladığı destek için teşekkür ederim. İtalya'da geçirdiğim süre boyunca tecrübesi ve misafirperverliğiyle yanımda olan Prof. Dr. Luca SOLARI'ye şükranlarımı sunarım.

Değerli Gözde MUMCU'ya, bu yolculuk boyunca verdiği destek dolayısıyla özellikle teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, sevgileriyle bana kendimi değerli hissettiren meslektaşım babam Erdoğan BARBAROS'a, annem Müjgan BARBAROS'a ve kardeşlerim Ayşegül BARBAROS ile Yasemin BARBAROS KOÇAK'a teşekkür ederim.

En büyük teşekkürü ise hayat arkadaşım Hazal SARAL BARBAROS hak ediyor. Kendisi en büyük şansım ve destekçim. Sevgisi ve ilgisi olmadan bu çalışmanın tamamlanması mümkün olmazdı. Hayat onunla birlikte anlamlı.

Son teşekkürüm ise canım Leyla ve Bizu'ya. Bu tezi, dünyamı güzelleştiren ve sınırsız kılan kızlarıma ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
2.1. Sediment Hareketinin İncelendiği Çalışmalar	5
2.2. Su Alma Ağzlarının İncelendiği Çalışmalar	14
2.3. Su Alma Ağzından Kaynaklı Hız Dağılımlarının İncelendiği Sayısal Çalışmalar.....	18
2.4. Mevcut Çalışmanın Literatürdeki Yeri	21
3. SU ALMA AĞZI AKIMI ETKİSİNDE TABAN SEDİMENTİNİN HAREKETE BAŞLAMA KOŞULLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ	23
3.1. Boyut Analizi	23
3.2. Deneysel Yöntem.....	25
3.3. Deney Sonuçları.....	31
3.3.1. Ağız akımı etkisi altında tanenin harekete başlaması.....	32
3.3.2. Su alma ağzının tabana olan mesafesinin tane hareketine etkisi.....	37
3.3.3. Su alma ağzının ölüson duvarına olan mesafesinin tane hareketine etkisi.....	42

4. SU ALMA AĞZI AKIMI ETKİSİNDEKİ TABAN SEDİMENTİNİN HAREKETE BAŞLAMASININ TEORİK OLARAK İNCELENMESİ	49
4.1. Taneye Etki Eden Kuvvetler.....	49
4.2. Yatay ve Düşey Kuvvet Kollarının Belirlenmesi	52
4.3. Taneye Etki Eden Ortalama Hızın Belirlenmesi.....	55
4.4. Yatay ve Düşey Kuvvet Kollarının Belirlenmesi	56
4.5. Taneye Etki Eden Ortalama Hızın Belirlenmesi.....	59
4.6. Teorik Sonuçların Deneysel Verilerle Karşılaştırılması.....	61
5. SU ALMA AĞZI MEMBASINDAKİ HIZ DAĞILIMININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ	77
5.1. Deneysel Yöntem.....	77
5.2. Hazırlık Deneyleri.....	80
5.3. Deney Sonuçları.....	85
5.3.1. Ağız merkez çizgisindeki hızın (V_c) kanal boyunca değişimi.....	86
5.3.2. Ağız merkezi yüksekliğindeki V_x hızının kanal boyunca yatayda değişimi	92
5.3.3. Ağız merkezi yüksekliğindeki V_y hızının kanal boyunca yatayda değişimi	99
5.3.4. Ağız merkez eksenindeki V_x hızının kanal boyunca derinlikle değişimi	106
5.3.5. Ağız merkez eksenindeki V_z hızının kanal boyunca derinlikle değişimi	116
5.3.6. Türbülans parametrelerinin değişimi	120
6. SAYISAL ÇALIŞMADA KULLANILAN YAZILIMIN TANITIMI ..	129
6.1. Çözülen Temel Denklemler.....	130
6.1.1. Kütle ve momentumun korunumu denklemleri.....	130

	Sayfa
6.1.2. Türbülans modelleri.....	131
6.1.3. Kütle-momentum kaynağı.....	133
6.2. Program Arayüzü.....	133
6.2.1. Simülasyon yöneticisi.....	133
6.2.2. Model kurulumu	134
6.2.3. Analiz	136
6.2.4. Görüntü.....	137
7. SU ALMA AĞIZLARI MEMBASINDAKİ HIZ DAĞILIMININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ.....	139
7.1. Kanalin Fiziksel Özelliklerinin ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi	140
7.2. Su Alma Ağızının Modellenmesi.....	142
7.3. Çözüm Ağı Aralığına Karar Verilmesi	144
7.4. Simülasyon Süresine Karar Verilmesi	146
7.5. Türbülans Modeline Karar Verilmesi	146
7.6. Kanal Tabanının Modellenmesi	147
7.7. Hız Dağılımı Verilerinin Elde Edilmesi.....	150
7.8. Sayısal Sonuçların İncelenmesi.....	151
7.8.1. V_c hızının x eksenı boyunca değışiminin karşılaştırılması	152
7.8.2. Ağız merkez eksenindeki V_x hızının kanal boyunca derinlikle değışiminin karşılaştırılması	154
7.8.3. Düşey hızın (V_z) x eksenı üzerinde derinlikle değışiminin incelenmesi ($y = 0$)	159
7.8.4. Ağız merkezi yüksekliğindeki V_x hızının kanal boyunca yatayda değışiminin karşılaştırılması	163
7.8.5. V_y hızının kanal boyunca yatayda değışiminin karşılaştırılması	167
8. SONUÇLAR	175

Sayfa

KAYNAKLAR	181
ÖZGEÇMİŞ	189



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Tane yerleşim düzenlemeleri	30
Çizelge 3.2. Deney parametreleri.....	31
Çizelge 3.3. Farklı H/D değerleri için tane hareketinin karşılaştırılması.....	32
Çizelge 3.4. Farklı c/D ve l/D değerleri için hareket konumlarını birleştiren doğru denklemleri	37
Çizelge 3.5. Farklı c/D değerleri için hareket konumlarını birleştiren doğru denklemleri	38
Çizelge 3.6. c/D değişiminin farklı konumlarda tane hareketine etkisi	39
Çizelge 3.7. Farklı l/D değerleri için hareket konumlarını birleştiren doğru denklemleri	43
Çizelge 3.8. l/D değişiminin farklı konumlarda tane hareketine etkisi.....	44
Çizelge 4.1. $c/D=1$, $l/D=0$ düzeneği Çift tane yerleşimi için n katsayısı aralıkları	62
Çizelge 4.2. $c/D = 0,5, 1$ ve $1,5$ ($l/D = 0$) düzeneği için n katsayısı aralıkları.....	64
Çizelge 4.3. $l/D = 0, 1$ ve 2 ($c/D = 1$) düzeneği için n katsayısı aralıkları.....	65
Çizelge 4.4. Tüm deney düzenekleri için kanal boyunca konuma bağlı n_{ort} değerleri	67
Çizelge 4.5. Kaldırma kuvveti bileşenlerinin Eş. 4.5'i değiştirme kapasiteleri.....	70
Çizelge 4.6. F_{LM} olmadığı takdirde tane hareketini gerçekleştirecek n katsayıları.....	70
Çizelge 4.7. F_{LI} 'nin konuma bağlı Eş. 4.5'i değiştirme kapasitesi	72
Çizelge 4.8. Farklı c/D ve l/D düzenekleri için sürüklenme katsayısı denklemlerinin karşılaştırılması	74
Çizelge 5.1. Deney düzenekleri	78
Çizelge 5.2. $c/D=1$ düzeneği için ölçüm noktaları	79
Çizelge 5.3. Ağzı yerleşiminin V_c hızına olan etkisi (%).....	89
Çizelge 5.4. Ağzı yerleşiminin V_x hızına olan etkisi (%).....	96

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.5. Ağız yerleşiminin V_{ym} hızına olan etkisi (%).....	104
Çizelge 5.6. Ağız yerleşiminin V_{xm} hızına olan etkisi (%).....	113
Çizelge 5.7. Ağız yerleşiminin V_{zm} hızına olan etkisi (%).....	120
Çizelge 7.1. Sayısal modelde kullanılan deney düzenekleri	139



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sediment taşınımının şematik gösterimi (Dey, 2014: 262)	5
Şekil 2.2. Küresel bir sediment tanesine etkiyen kuvvetler	7
Şekil 2.3. Sediment tanesi harekete başlama şekilleri: a) Dönme, b) Kayma, c) Sıçrama (Dey ve Ali, 2018)	7
Şekil 2.4. Sediment tanesinin tabandaki diğer tanelere göre hareketi (a) Sıçrama (b) Dönme (Valyrakis ve diğerleri, 2010)	9
Şekil 2.5. Su alma ağzına hava girişi (a) Hava girişi yok (b) Serbest yüzey çevrintisi ağza ulaşıyor (kritik durum); (c) Hava girişi var (Taştan ve Yıldırım, 2018).....	15
Şekil 2.6. Şekil 2.6. Su alma ağzı membasında oluşan oyulma çukuru geometrisine bir örnek (Powell ve Khan, 2012).....	15
Şekil 3.1. Deneysel çalışma parametreleri	23
Şekil 3.2. Deney düzeneği (ölçeksiz).....	26
Şekil 3.3. Hareketli tanenin sabit tanelere göre yerleşimi (a) 3 boyutlu gösterim (b) 2 boyutlu gösterim.....	29
Şekil 3.4. $c/D=1$, $l/D=0$ düzeneği için tane hareketi	34
Şekil 3.5. Farklı deney düzenekleri için tane hareketi (a) $c/D=1$, $l/D=2$ (b) $c/D=0,5$, $l/D=2$	35
Şekil 3.6. $c/D=1$, $l/D=0$ düzeneği için $\zeta=0,97$ ve $0,98$ parametresinde tane hareketi	37
Şekil 3.7. Tane hareketine c/D etkisi	38
Şekil 3.8. Farklı c/D düzeneklerinde hareketli tanenin ağza girme oranları.....	40
Şekil 3.9. Farklı c/D düzeneklerinde taneye etki eden x yönündeki hız dağılımı (a) $x/D=0,70$, (b) $x/D=3,76$	41
Şekil 3.10. Farklı akım sınırları için oluşacak radyal hızlar	42
Şekil 3.11. Tane hareketine l/D etkisi	43
Şekil 3.12. Farklı l/D düzeneklerinde taneye etki eden x yönündeki hız dağılımı (a) $x/D=0,70$, (b) $x/D=3,76$	45

Şekil	Sayfa
Şekil 3.13. Farklı l/D düzeneklerinde hareketli tanenin ağza girme oranları	46
Şekil 3.14. Deneysel veriler ve Eş. 3.6 karşılaştırması (a) c/D (b) l/D değişimi	47
Şekil 3.15. Deney sonuçlarının Eş. 3.6 ile uygunluğunun incelenmesi	48
Şekil 4.1. Sediment tanesine etki eden kuvvetler	49
Şekil 4.2. Tane yerleşiminin geometrik gösterimi (Dey, 1999).....	52
Şekil 4.3. $O_1O_2O_3$ üçgeni	53
Şekil 4.4. Hareketli taneye etki eden hız dağılımı	55
Şekil 4.5. Değişen t uzunluğu hesaplaması.....	56
Şekil 4.6. Farklı C_D eşitliklerinin karşılaştırılması	58
Şekil 4.7. $c/D = 1$, $l/D = 0$ için tane merkezinde gerçekleştirilen hız ölçümü örneği.....	60
Şekil 4.8. $c/D=1$, $l/D=0$ deney düzeneği için Çift tane yerleşiminde deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması	61
Şekil 4.9. $c/D=1$, $l/D=0$ deney düzeneği Çift tane yerleşiminde n_{ort} değerleri için deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması	63
Şekil 4.10. $c/D=0,5$; 1 ve 1,5 deney düzeneklerinde n_{ort} değerleri ve Eş. 4.5 sonuçları.....	64
Şekil 4.11. $l/D=0$, 1 ve 2 deney düzeneklerinde n_{ort} değerleri ve Eş. 4.5 sonuçları	66
Şekil 4.12. Tüm deney düzeneklerinde konuma bağlı n_{ort} değerleri için deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması (a) c/D değişimi ($l/D=0$) (b) l/D değişimi ($c/D=1$)	67
Şekil 4.13. n_{ort} ve konuma bağlı n_{ort} değerlerinden elde edilen ortalama Eş. 4.5 karşılaştırılması	69
Şekil 4.14. Tane hareketinde F_{LM} etkisi.....	71
Şekil 4.15. Tüm deney düzenekleri için C_D 'nin sonuçlara etkisi.....	72
Şekil 4.16. C_L %10 azaltıldığı takdirde tane hareketinde meydana gelen değişim.....	75
Şekil 5.1. Hız ölçüm konumları	78
Şekil 5.2. SonTek 16 MHz MicroADV (Sontek, 2017)	79

Şekil	Sayfa
Şekil 5.3. (a) x yönündeki zamansal ortalama hız bileşeninin, (b) z yönündeki zamansal ortalama hız bileşeninin farklı örneklem frekans ve sürelerindeki değişimleri	80
Şekil 5.4. Hız çalkantı bileşenleri kök ortalama kare değerlerinin farklı örneklem frekans ve sürelerindeki değişimleri: (a) x yönünde (b) z yönünde.....	82
Şekil 5.5. Hız ölçüm süreci akış şeması.....	84
Şekil 5.6. V_x hızının farklı x/D ve debi değerleri için derinlikle değişimi ($c/D=1$, $l/D=0$)	85
Şekil 5.7. V_z hızının farklı x/D ve debi değerleri için derinlikle değişimi ($c/D=1$, $l/D=0$)	86
Şekil 5.8. V_c hızının kanal boyunca değişimi ($c/D=1$, $l/D=0$).....	86
Şekil 5.9. Su alma ağzı konumunun V_c hızının kanal boyunca değişimine olan etkileri: (a) c/D etkisi ($l/D=0$), (b) l/D etkisi ($c/D=1$)	87
Şekil 5.10. Ağız yerleşiminin V_c hızına olan etkisi: (a) c/D değişimi ($l/D=0$), (b) l/D değişimi ($c/D=1$)	88
Şekil 5.11. Deneysel sonuçlarla Eşitlik 5.2'nin uyumunun incelenmesi.....	91
Şekil 5.12. Tüm deney düzenekleri için deneysel, sayısal ve Eş. 5.2 sonuçları	91
Şekil 5.13. $c/D=2$ için kanal boyunca ve yatayda V_x değişimi ($l/D=0$)	92
Şekil 5.14. Farklı c/D değerleri için V_x hızının yatayda değişimi ($l/D=0$) a) $x/D=0,70$, b) $x/D=0,94$, c) $x/D=1,13$, d) $x/D=1,50$, e) $x/D=1,88$, f) $x/D=2,35$, g) $x/D=2,82$, h) $x/D=3,76$	93
Şekil 5.15. Farklı l/D değerleri için V_x hızının yatayda değişimi ($c/D=1$) a) $x/D=0,70$, b) $x/D=0,94$, c) $x/D=1,13$, d) $x/D=1,50$, e) $x/D=1,88$, f) $x/D=2,35$, g) $x/D=2,82$, h) $x/D=3,76$	94
Şekil 5.16. Tüm düzenekler için boyutsuz V_x hız profilleri ile Eş. 5.3 karşılaştırması...	97
Şekil 5.17. Yatay boyutsuzlaştırma parametresinin (b_y) kanal boyunca değişimi (a) c/D 'ye göre ($l/D=0$) (b) l/D 'ye göre ($c/D=1$)	98
Şekil 5.18. $c/D=1,5$ için kanal boyunca V_y değişimi ($l/D=0$).....	99
Şekil 5.19. Farklı c/D değerleri için V_y hızının yatayda değişimi ($l/D=0$) a) $x/D=0,70$, b) $x/D=0,94$, c) $x/D=1,13$, d) $x/D=1,50$, e) $x/D=1,88$, f) $x/D=2,35$, g) $x/D=2,82$, h) $x/D=3,76$	100

Şekil	Sayfa
Şekil 5.20. Farklı l/D değerleri için V_y hızının yatayda değişimi ($c/D=1$) a) $x/D=0,70$, b) $x/D=0,94$, c) $x/D=1,13$, d) $x/D=1,50$, e) $x/D=1,88$, f) $x/D=2,35$, g) $x/D=2,82$, h) $x/D=3,76$	101
Şekil 5.21. Ağız yerleşiminin V_{ym} hızına olan etkisi: (a) c/D değişimi ($l/D=0$), (b) l/D değişimi ($c/D=1$)	103
Şekil 5.22. Tüm deney düzenekleri için boyutsuz yatay hız profilleri ve Eş. 5.4.....	105
Şekil 5.23. Konuma bağlı b_{y2} değişimi (a) c/D etkisi ($l/D=0$), (b) l/D etkisi ($c/D=1$).....	106
Şekil 5.24. V_x hızının derinlikle ve kanal boyunca değişimi (a) $c/D=2$ (b) $c/D=0,5$ ($l/D=0$)	107
Şekil 5.25. V_x hızının derinlikle ve kanal boyunca değişimine c/D etkisi ($l/D=0$)	108
Şekil 5.26. V_x hızının derinlikle ve kanal boyunca değişimine l/D etkisi ($c/D=1$)	110
Şekil 5.27. Ağız yerleşiminin V_{xm} hızına olan etkisi: (a) c/D değişimi ($l/D=0$), (b) l/D değişimi ($c/D=1$)	112
Şekil 5.28. Maksimum hızın olduğu yüksekliğin (z_m) konuma bağlı değişimi (a) c/D etkisi ($l/D=0$) (b) l/D etkisi ($c/D=1$)	114
Şekil 5.29. Tabandaki hız dağılımının değişimi (a) $c/D=0,5$, (b) $c/D=2$ ($l/D=0$)	115
Şekil 5.30. $c/D=1,5$ için kanal boyunca ve derinlikle V_z değişimi ($l/D=0$).....	116
Şekil 5.31. V_z değişimine c/D etkisi ($l/D=0$).....	117
Şekil 5.32. V_z değişimine l/D etkisi ($c/D=1$).....	118
Şekil 5.33. Ağız yerleşiminin V_{zm} hızına olan etkisi: (a) c/D değişimi ($l/D=0$), (b) l/D değişimi ($c/D=1$)	119
Şekil 5.34. $c/D=0,5$ ($l/D=0$) düzeneğinde farklı x/D değerleri için türbülans parametrelerinin derinlikle değişimi (a) $RMS V_x'$, (b) $RMS V_z'$, (c) TKE	122
Şekil 5.35. $c/D=2$ ($l/D=0$) düzeneğinde farklı x/D değerleri için türbülans parametrelerinin derinlikle değişimi (a) $RMS V_x'$, (b) $RMS V_z'$, (c) TKE	123
Şekil 5.36. $x/D = 0,70$ için türbülans parametrelerinin c/D ($l/D=0$) ile değişimi (a) $RMS V_x'$, (b) $RMS V_z'$, (c) TKE	125
Şekil 5.37. $x/D = 3,76$ için türbülans parametrelerinin c/D ($l/D=0$) ile değişimi (a) $RMS V_x'$, (b) $RMS V_z'$, (c) TKE	126

Şekil	Sayfa
Şekil 5.38. $x/D = 0,70$ için türbülans parametrelerinin l/D ($c/D=1$) ile değişimi (a) $RMS V_x'$, (b) $RMS V_z'$, (c) TKE	127
Şekil 6.1. Simülasyon yöneticisi	134
Şekil 6.2. Model kurulum ekranı	135
Şekil 6.3. Analiz ekranı.....	137
Şekil 7.1. Başlangıç HAD model örneği.....	140
Şekil 7.2. Dalga kırıcı yapılarının karşılaştırılması (a) Akışkan hacmi (b) Serbest su yüzey alanı	141
Şekil 7.3. Kanal uzunluklarının karşılaştırılması.....	142
Şekil 7.4. Farklı su alma ağzı modelleri: (a) kütle momentum kaynağı (b) ve (c) boşluk olarak tanımlanan su alma ağzı	143
Şekil 7.5. Su alma ağzı modellerinin karşılaştırılması.....	144
Şekil 7.6. Farklı çözüm ağı sıklıklarının hız dağılımları üzerinden karşılaştırılması (a) Derinlikle değişim (b) Kanal boyunca değişim	145
Şekil 7.7. Farklı simülasyon sürelerinin karşılaştırılması.....	146
Şekil 7.8. Türbülans modellerinin karşılaştırılması	147
Şekil 7.9. Taban pürüzlülüğü için oluşturulan farklı modeller (a) “Pürüzlülük 7.5 mm” Modeli (b) “Pürüzlülük 1 mm” Modeli (c) “Tane stl.” Modeli	148
Şekil 7.10. Farklı taban pürüzlülüğü modellerinin karşılaştırılması.....	149
Şekil 7.11. Nihai model örnekleri (a) $l/D = 0$ (b) $l/D > 0$	150
Şekil 7.12. Ağız eksenindeki hızın (V_c) x eksenini boyunca değişiminin karşılaştırılması (a) c/D değişimi (b) l/D değişimi	153
Şekil 7.13. Sayısal model sonuçlarının deneysel ölçümlerle uyumu (V_c)	154
Şekil 7.14. Hız dağılımının (V_x) x eksenini üzerinde derinlikle değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 4,9951$ lt/s	155

Şekil	Sayfa
Şekil 7.15. Sayısal model sonuçlarının deneysel ölçümlerle uyumu (V_x)	158
Şekil 7.16. Hız dağılımının (V_z) x ekseninde derinlikle değişiminin incelenmesi (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 1$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 8,9469$ lt/s	159
Şekil 7.17. Sayısal model sonuçlarının deneysel ölçümlerle uyumu (V_z).....	162
Şekil 7.18. Hız dağılımının (V_x) y ekseninde değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 2,8575$ lt/s	163
Şekil 7.19. Sayısal ve deneysel sonuçların uyumu (y ekseninde boyunca V_x dağılımı)	166
Şekil 7.20. Hız dağılımının (V_y) y ekseninde değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 4,9951$ lt/s	167
Şekil 7.21. Sayısal ve deneysel sonuçların uyumu (y ekseninde boyunca V_y dağılımı)	170
Şekil 7.22. Hız değerleri ve eş hız eğrileri (a) $c/D = 0,5$, (b) $c/D = 1$, (c) $c/D = 1,5$	171
Şekil 7.23. Farklı c/D düzenekleri için akım çizgileri (a) $c/D = 0,5$ (b) $c/D = 1$ (c) $c/D = 1,5$ (d) $c/D = 2$	173
Şekil 7.24. Farklı l/D düzenekleri için akım çizgileri (a) $l/D = 0$ (b) $l/D = 1$ (c) $l/D = 2$	174

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Deney düzeneğinin 8 mm yapay taban için görünümü.....	27
Resim 3.2. Deney düzeneği fotoğrafı	28



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A_x, A_y, A_z	Oransal akış yüzey alanı
A_K	Net küresel kuyu yüzeyi alanı
A_{et}	Tanenin akıma maruz kalan net yüzey alanını
b_y	Yatayda $0,5V_c$ değerinin olduğu konum
b_{y2}	Yatayda $0,5V_{ym}$ değerinin olduğu konum
B_1	Su alma ağzının kanal sol duvarına olan mesafesi
B_2	Su alma ağzının kanal sağ duvarına olan mesafesi
c	Su alma ağzının kanal tabanına olan mesafesi
C_D	Sürüklenme katsayısı
C_L	Kaldırma katsayısı
d	Hareketli tane çapı
d_s	Tabandaki sabit tane çapı
D	Su alma ağzı iç çapı
f	Viskoz ivme terimi
F_d	Densimetrik Froude sayısı
F_D	Sürüklenme kuvveti
F_G	Tane batık ağırlığı
F_L	Kaldırma kuvveti
F_{LI}	Düşey yönlü hızdan kaynaklanan kaldırma kuvveti
F_{LM}	Magnus kaldırma kuvveti
F_{LS}	Hız gradyanından kaynaklanan kaldırma kuvveti
F_R	Sürtünme kuvveti
g	Yer çekimi ivmesi
H	Tabandaki sabit taneler üzerindeki akım yüksekliği
k	Türbülans kinetik enerjisi
k_s	Sürtünme katsayısı
l	Su alma ağzının ölüson duvarına olan mesafesi

Simgeler**Açıklamalar**

l_v	Düşey kuvvet kolu
l_h	Yatay kuvvet kolu
L_t	Türbülans karışım uzunluğu
M_D	Tane döndürme momenti
M_T	Tane dönmesine karşı gelen moment
n	$RMS V_x'$ değerini arttırıcı katsayı
n_{ort}	Ortalama n
p	Basınç değeri
R	Su alma ağzına ait Reynolds Sayısı
r_c	Tanenin konum vektörü
Re_*	Tane Reynolds sayısı
Re_t	Tane seviyesindeki akım Reynolds sayısı
$RMS V_x'$	x yönü hız çalkantısı kök ortalama kare değeri
$RMS V_z'$	z yönü hız çalkantısı kök ortalama kare değeri
R_{SOR}	Kütle kaynak terimi
$\mathcal{S}F$	Hareketli tane şekil faktörü
t	Simülasyon süresi
Q	Su alma ağzından alınan debi
U_m	Taneye etki eden ortalama hız
U_{met}	Taneye uygulanan etkili hız
U_o	Su alma ağzı içerisindeki kesit ortalama hız
U_w	Kesit alan ortalamalı yaklaşım hızı
V_K	Küresel kuyu yüzeyi üzerindeki radyal hız
V_c	Ağız merkez çizgisindeki hız
V_F	Hücreye tanımlanan hacim değeri
V_x	x yönündeki hız bileşeni
V_{xm}	x yönündeki maksimum hız
V_y	y yönündeki hız bileşeni
V_{ym}	y yönündeki maksimum hız
V_z	z yönündeki hız bileşeni
V_{zm}	z yönündeki maksimum hız
V_x', V_y', V_z'	x, y ve z yönlerindeki hız çalkantı bileşenleri

Simgeler**Açıklamalar**

w	Türbülans frekansı
z_d	Hareketli tane üst kotu
z_m	x yönündeki maksimum hızın yüksekliği
z_0	Taban sabit tanesi üst kotu
Θ_c	Shields parametresi
ν	Akışkan kinematik viskozitesi
ζ	Tane yerleşim katsayısı
ρ_s	Hareketli tane yoğunluğu
ρ_w	Akışkan yoğunluğu
ε	Türbülans sönümlenme oranı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ADV	Akustik Doppler hız ölçüm cihazı
CDU	Renkli Doppler ultrasonografi
COR	Korelasyon
DSİ	Devlet Su İşleri
FAVOR	Kesirli alan-hacim engel temsili
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
KKY	Küresel kuyu yüzeyi
LDV	Lazer Doppler Hızölçeri
LES	Large eddy simulation
PIV	Parçacık görüntülemeli hız ölçümü
POM	Polioksimetilen
RANS	Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri
RNG	Renormalize grup
RMS	Root mean square (Kök ortalama kare)
RMSE	Root mean square error (Kök ortalama kare hata)
SNR	Sinyal-gürültü oranı
TKE	Türbülans kinetik enerjisi
VOF	Volume of fluid (Akışkan Hacmi)

1. GİRİŞ

Sediment taşınımı, gerek sedimentin gerekse sediment tanelerinin içerisinde bulundukları akışkan ve akışın dinamik özelliklerine bağlı olarak gerçekleşen bir olaydır. Taşınım; nehir, göl, deniz gibi ortamlarda su akımından, yamaç ve tepe gibi ortamlarda hava akımından veya buzullardaki büyük miktardaki donmuş su kütlelerinin hareketinden kaynaklı olabilir. Dolayısıyla araştırmalar, inşaat mühendisliğinin olduğu kadar, jeoloji, çevre, hidroloji ve coğrafya gibi farklı dalların da ilgi alanı içerisinde. İnşaat mühendisliği açısından ise bu konudaki bilgi birikiminin artması; taşkın ve rüsubat kontrolü, oyulmalar, rezervuarların işletme ömrünü etkileyen siltasyon, hidrolik yapı elemanlarının güvenli bir şekilde tasarlanması gibi pek çok konu için gerekli olmaktadır.

Su alma yapıları, suyu istenilen kaynaktan temin etmek amacıyla kullanılan hidrolik yapılardan biridir. Tarih öncesi dönemlerden itibaren suyun kaynağından hedeflenen konuma güvenli ve sürekli bir şekilde taşınması, insan yaşamı için temel bir ihtiyaç olmuştur. İlk tarım toplumlarında sulama ve içme suyu temini amacıyla basit düzeneklerden ibaret olan su alma yapıları, günümüzde enerji üretimi, endüstriyel kullanım, nükleer tesislerin soğutma suyu ihtiyacı, tarımsal sulama ve içme suyu temini gibi geniş bir yelpazede yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Su alma yapıları; akarsu ve kanal gibi hareketli akım ortamlarından ya da göl, rezervuar veya regülatör gibi durağan su ortamlarından suyun kontrollü biçimde alınarak iletim hatlarına aktarılmasını sağlamaktadır. Yapıların giriş kısımları ise su alma ağzı veya orifis olarak adlandırılmaktadır.

Su alma ağzlarının tasarımında dikkat edilmesi gereken temel unsurların başında, yapıya hava ve sediment girişinin önlenmesi gelir. Ağza çeşitli sebeplerle giren hava (örneğin yüzeyde oluşan hava girişli çevrintiler), akış kesitini daraltarak alınan debiyi azaltır; ayrıca iletim sisteminde bulunan türbin ve pompa gibi elemanlarda kavitasyon ve titreşim sonucu hasarlara yol açabilir. Sediment girişi ise başka bir mühendislik problemi oluşturmaktadır. Akım içerisinde askıda taşınan veya sıçrama ve sürüntü hareketi ile ilerleyen katı parçacıklar, müsaade edilen miktarın üzerinde ağza girdiklerinde iletim hattının verimliliğini azaltır ve pompa ve türbinlerde erken aşınmalara sebep olarak sistemin ekonomik ömrünü kısaltırlar.

Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminin gittikçe önemini arttırdığı günümüzde, su alma yapılarının güvenli ve verimli çalışması daha da kritik bir hale gelmektedir. Örneğin 2024 yılı itibarıyla Türkiye’de tarımsal su kullanımında kapalı/basınçlı sulama sistemlerinin payı %35 seviyesindedir (Devlet Su İşleri, DSİ, 2024). Dolayısıyla açık kanallardan küçük ölçekli su alma ağızları aracılığıyla temin edilen sulara istenmeyen boyutta ve miktarlarda katı madde varlığı, toprak yapısı ve arazi verimliliği üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu durum, sediment taşınımının yalnızca hidrolik yapılara değil, aynı zamanda çevresel ve tarımsal verimliliğe de doğrudan etki etme potansiyeli olduğunu göstermektedir. Bu sebeple su alma ağızı etkisi altındaki sediment hareketinin bilinmeyen yönlerinin keşfedilmesi büyük önem kazanmaktadır. Ayrıca, ağız membasındaki akım alanının incelenmesi de hidrolik sistemlere hava girişi, sediment taşınımı ve balık geçişi gibi temel süreçlerin anlaşılması ya da deniz suyu kullanan soğutma ve tuz giderme sistemleri için etkili tasarım ve işletme rehberlerinin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Özetle su alma ağzının konumu, debisi, akım ortamındaki sedimentin boyutu ve yoğunluğu, tane hareketinin karakterini belirleyen temel parametrelerdir ve aralarındaki ilişkinin ortaya konulması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, su alma ağızı akımı etkisi altında kanal tabanında bulunan küresel bir sediment tanesinin harekete başlama koşulları deneysel ve teorik yöntemlerle araştırılmıştır. Literatür özetinde sunulacağı üzere, üniform veya kesme akımı (shear flow) etkisi altında sediment tanesinin harekete başlama koşullarının incelendiği pek çok çalışma mevcuttur. Ancak tanenin, bir kanalın sonunda bulunan duvardan yatay olarak su alan bir su alma ağızı akımının etkisiyle, üniform olmayan ve giderek hızlanan bir akım ortamındaki hareketi daha önce araştırılmamıştır. Su alma ağızı yerleşimi ile sedimentin fiziksel özellikleri ve akım içerisindeki konumları arasındaki ilişkiyi inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmayla birlikte ayrıca, kanal tabanına dik olarak yerleştirilen ölü son duvarından geçirilen dairesel kesitli su alma ağzının akım ortamında oluşturduğu hız dağılımı hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Bu çalışma, literatürde ilk kez, su alma ağzının tabana ve ölü son duvarına olan mesafelerinin sediment hareketi ve ağız membasındaki hız dağılımı üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak incelemiştir. Sayısal çalışma, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımlarından biri olan FLOW-3D kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yazılımın, ağız membasındaki akım koşullarını modellemedeki başarısını belirleyen kriterler ortaya konulmuştur.

Bu tez kapsamında 2. Bölümde, sediment tanesinin hareket başlangıcı ve su alma ağız akımından kaynaklı hız dağılımları üzerine gerçekleştirilmiş önceki araştırmalar özetlenmiştir. 3. ve 4. bölümlerde, sırasıyla su alma ağız akımı etkisindeki taban sedimentinin harekete başlama koşulları deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. 5. bölümde su alma ağız membasındaki hız dağılımı deneysel olarak araştırılmıştır. 6. Bölümde kullanılan HAD yazılımı kısaca tanıtılmış, 7. bölümde ise hız dağılımının sayısal analizi aktarılmıştır. Son bölümde ise sonuçlar ve bunlara dayalı öneriler sunulmuştur.



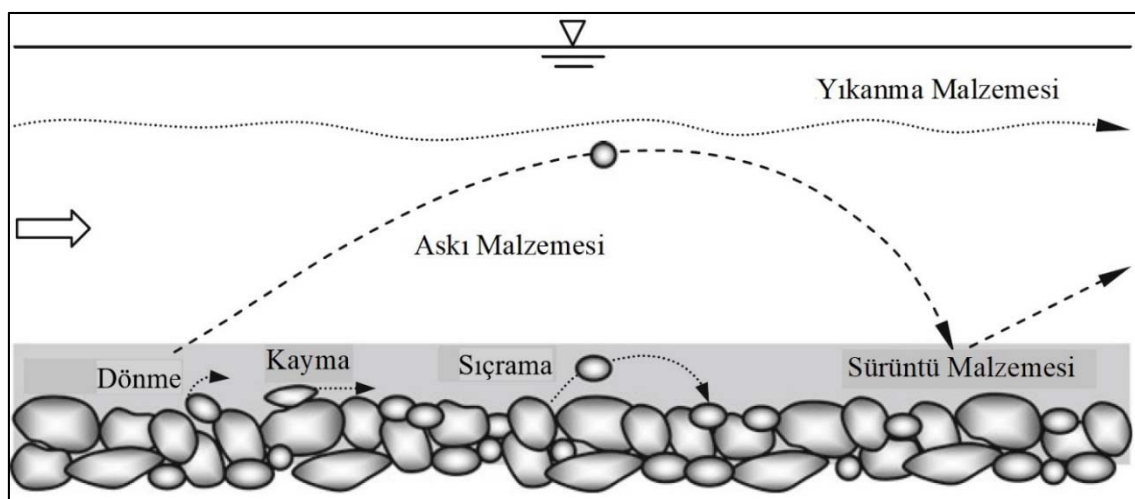


2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu başlık altında, tez çalışması kapsamına giren araştırmalar incelenmiştir. Öncelikle sediment hareketi ele alınmış ve bu hareketin fiziksel süreçleri ile temel mekanizmaları hakkında genel bir bilgi sunulmuştur. Sonrasında, çalışmanın temelini oluşturan araştırmalar, anlatım içerisinde ilgili kısımlarda ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Ardından, su alma ağızları üzerine gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Bu bağlamda, su alma ağızı akımıyla ilgili literatür, önce konu başlıkları açısından sınıflandırılmış ve ardından her başlık altında ilgili çalışmalar sunulmuştur.

2.1. Sediment Hareketinin İncelendiği Çalışmalar

Sediment akarsu içerisinde yıkanma (wash load), askı (suspended load) ve taban yükü (bed load) şeklinde taşınmaktadır. Taban yükü, akım hızının belirli bir değere ulaşması sonucu tabana yakın, görece daha kaba sediment parçacıklarının kayma, dönme ve sıçrama hareketlerinden oluşmaktayken, askı yükü akımla beraber taşınan daha ince parçacıklardan meydana gelmektedir. Oldukça ince malzemeden oluşan yıkanma yükü ise akımın serbest yüzeyine yakın konumda ve yatak tabakası ile temas etmeden taşınır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Sediment taşınımının şematik gösterimi (Dey, 2014: 262)

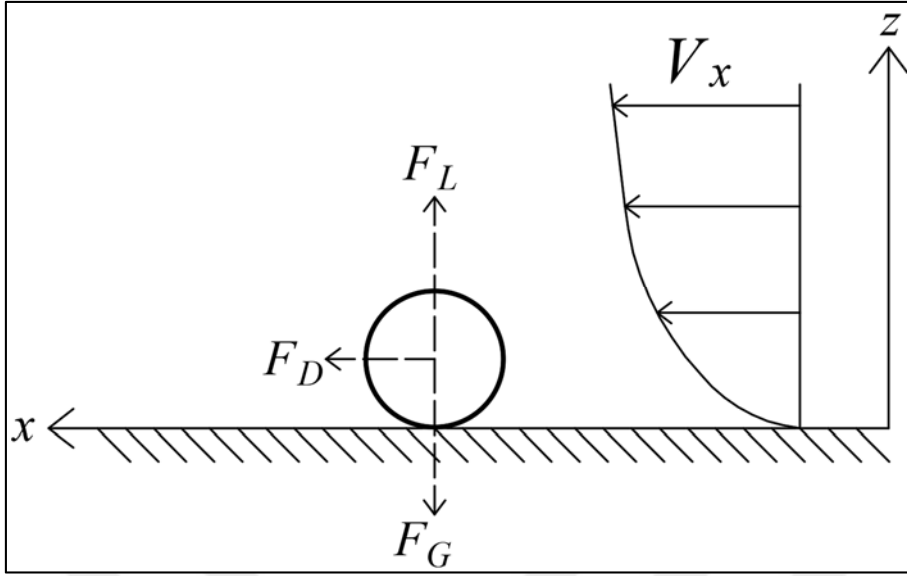
Akarsu hızının artışı ile tabandaki kayma gerilmesinin kritik sürüklenme gerilmesini aştığında, tabandaki parçacıklar kayma ve dönme hareketi yapmaya başlar. Sürüntü hareketi olarak da adlandırılabilen bu süreçte parçacıkların ağırlıkları akarsu tabanı

tarafından karşılanır. Akımın türbülanslık derecesine bağlı olarak kimi taneler kısa süreli sıçrama hareketi yapar, akımla sürüklenir ve tekrar tabana düşerler. Sıçrama (saltation) olarak isimlendirilen bu hareket, tane üzerindeki basıncın düşmesi sonucu kaldırma kuvvetinin tane ağırlığını aşmasından ve taneler arası çarpışmalardan etkilenmektedir.

Taban yükü olarak taşınan nispeten daha küçük taneler, akımdaki türbülans neticesinde tabandan ayrılıp akım içerisinde taşındığı takdirde askı hareketini meydana getirirler. Askı yükünü oluşturan taneler taban yükünü oluşturan tanelere göre nispeten küçük çaplarda olsalar da net bir ayırım söz konusu değildir. Sediment taşınımı akım ve tane özelliklerine bağlı olduğu için bir konumda askıda bulunan sediment, akım içerisinde başka bir konumda tabanda bulunabilir.

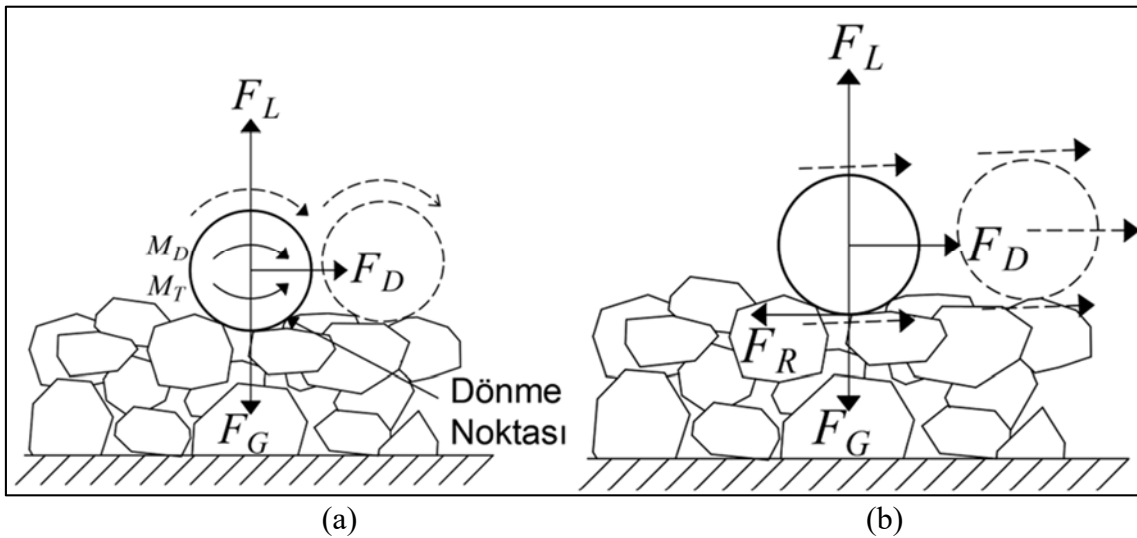
Yıkanma malzemesi ise akım özelliklerinden ziyade akarsu havzasının topoğrafya, büyüklük, bitki örtüsü, yağış süresi ve şiddeti gibi özelliklerine bağlıdır. Bu ince malzemelerin düşük çökme hızlarına sahip olduğu ve akımın yarattığı türbülans neticesinde akım yüzeyinde hareket ettiği bilinmektedir. Akımın hidrolik özellikleri taban ve askı yükünü, havzanın hidrolojik özellikleri ise yıkanma yükünü etkilemektedir.

Sediment tanesinin tabanda harekete başlamak üzere olduğu an ise, kritik - eşik durum veya yatakta hareketin başlaması (incipient motion) olarak isimlendirilmektedir. Bu durum, sediment tanesini harekete geçirmeye çalışan hidrodinamik kuvvetlerin (sürüklenme, F_D ve kaldırma, F_L), tanenin hareketine karşı gelmeye çalışan su altındaki batık ağırlık kuvveti (F_G) arasındaki dengesi ile açıklanmaktadır (Şekil 2.2). Sürüklenme kuvveti (drag force) parçacığa akım yönünde etki ederken, kaldırma kuvveti (lift force) ise akım yönüne dik olarak etki etmektedir.

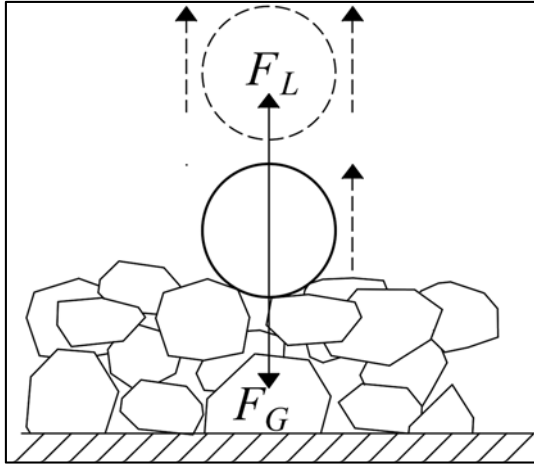


Şekil 2.2. Küresel bir sediment tanesine etkiyen kuvvetler

Tabanda bulunan bir sediment tanesinin hareketi dönme, kayma ve/veya sıçrama şeklinde olabilmektedir. Taneyi belirli bir nokta etrafında döndürmeye çalışan moment (M_D), taneyi yerinde tutmaya çalışan momentini (M_T) geçtiği takdirde tane dönmeye, sürüklenme kuvveti (F_D) tane hareketine karşı gelmeye çalışan sürtünme kuvvetini (F_R) geçtiği takdirde ise tane kaymaya başlayacaktır. Kaldırma kuvvetinin (F_L) tane batık ağırlığını (F_G) geçmesi ise tanenin havalanmasına sebep olacaktır (Şekil 2.3). Halow (1973)'a göre türbülanslı akımlarda küresel taneler dönme ve yuvarlanma, köşeli taneler ise kayma hareketi göstermektedir. Eş. 2.1 tane hareketini tanımlayan ilişkileri ifade etmektedir.



Şekil 2.3. Sediment tanesi harekete başlama şekilleri: a) Dönme, b) Kayma, c) Sıçrama (Dey ve Ali, 2018)



(c)

Şekil 2.3. (devam) Sediment tanesi harekete başlama şekilleri: a) Dönme, b) Kayma, c) Sıçrama (Dey ve Ali, 2018)

$$\text{Dönme: } M_D \geq M_T \rightarrow F_D l_v + F_L l_h \geq F_G l_h \quad (2.1a)$$

$$\text{Kayma: } F_D \geq F_R \rightarrow F_D \geq k_s (F_G - F_L) \quad (2.1b)$$

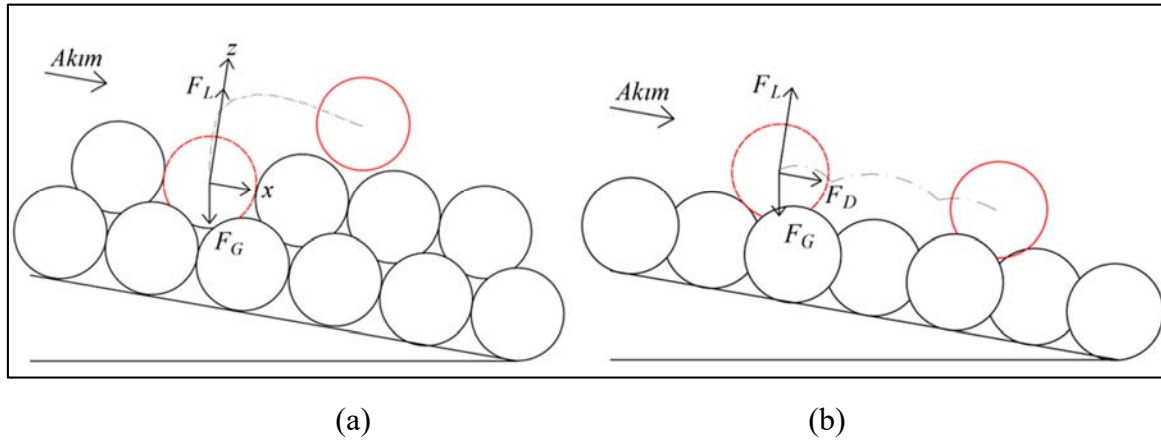
$$\text{Sıçrama: } F_L - F_G \quad (2.1c)$$

Eş. 2.1 içerisinde l_v ve l_h dönme noktasına göre sırasıyla düşey ve yatay mesafeleri, k_s ise sürtünme katsayısını ifade etmektedir.

Sediment taşınımının anlaşılabilmesi, sediment tanelerinin harekete başlama koşullarının açıklanabilmesiyle mümkün olmaktadır. Literatür incelendiğinde, araştırmacıların bu koşulları tanımlayabilmek için deterministik ve stokastik yaklaşımlardan faydalandıkları görülmektedir. Stokastik yaklaşımda hareket başlangıcını tanımlayacak kritik bir değer yerine türbülanslı akımın ve sediment taşınımının rastlantısal doğası gereği olasılıksal değerlendirmeler dikkate alınmaktadır (Habersack, 2000). Kuvvet dengesi ve itki kavramları (impulse) alt başlıklarına ayrılabilen bu yaklaşımda öncü araştırmacı olan Einstein (1950), Gauss dağılımına sahip anlık kaldırma kuvvetinin, tane batık ağırlığını aştığı noktada tanenin tabandan ayrılacağını belirtmiştir. Grass (1970) ise akımın meydana getirdiği anlık taban kayma gerilmesinin olasılık dağılımıyla, tane hareketi için gerekli anlık kayma gerilmesinin olasılık dağılımının örtüştüğü noktada, en küçük taban kayma gerilmesi eşiğine sahip parçacıkların hareket etmeye başlayacağını ifade etmiştir. İtki kavramına göre ise taneyi hareket ettirmeye çalışan kuvvetlerin büyüklükleri kadar etki süreleri de önem kazanmaktadır (Celik, Diplas, Dancey ve Valyrakis, 2010). Örneğin

Diplas ve diğerleri (2008), türbülanslı akış koşullarında sediment hareketinin başlangıcını açıklamak üzere klasik ortalama kesme gerilmesine dayalı Shields kriterinin yetersiz kaldığını belirtmiştir. Laboratuvar deneylerinde, teflon ve çelik küreler üzerinde uygulanan farklı sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin süre ve genliği değiştirilmiş; tanelerin ancak belirli bir itki eşiği aşıldığında hareket ettiği gözlemlenmiştir. Sonuçları, moment kapasitesi yüksek ancak kısa süreli türbülans kuvvetlerinin hareketi başlatmakta yetersiz kaldığını, buna karşın kuvvet ve sürenin çarpımıyla tanımlanan itkinin, hareket eşiğini doğru şekilde tanımlayabildiğini göstermektedir.

Valyrakis, Diplas, Dancey, Greer ve Celik (2010) de gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada tanelerin yerleşimi ve uygulanan kuvvetlerin etki sürelerinin tane hareketine olan etkilerini araştırmıştır. Bir sediment tanesinin diğer taneler tarafından çevrelendiği ve kaldırma kuvvetinin büyüklüğü ile etki süresinin hareket için yeterli olduğu durumda, tanenin sıçrama hareketi yapacağını belirtmişlerdir (Şekil 2.4 (a)). Öte yandan tanenin diğerleri tarafından çevrelenmediği durumda hem sürüklenme hem de kaldırma kuvvetlerinin büyüklük ve sürelerinin etkisinin tanenin dönme hareketine başlamasına sebep olacağını belirtmişlerdir (Şekil 2.4 (b)).



Şekil 2.4. Sediment tanesinin tabandaki diğer tanelere göre hareketi (a) Sıçrama (b) Dönme (Valyrakis ve diğerleri, 2010)

Daha klasik olarak değerlendirilebilecek deterministik yaklaşımda ise, taneyi harekete geçirmeye çalışan kuvvetlerle, buna karşı gelen kuvvetler arasında bir ilişki kurularak tane hareketini tanımlayacak kritik bir değer bulunmaya çalışılır. Ancak türbülans konusundaki gelişmeler, deterministik yöntemlerin olasılıksal yaklaşımlardan faydalanmasını gerekli

kılmaktadır (Dey, 2014: 190). Deterministik yaklaşım altında kritik hız, kaldırma kuvveti ve kritik taban kayma gerilmesi kavramları öne çıkmaktadır (Dey ve Ali, 2018).

Kritik hız yaklaşımında araştırmacılar, sedimentin harekete başlayacağı hız değerini ifade eden ilişkiler ortaya koymaya çalışmıştır. Örneğin Yang (1973) çalışmasında, duvar kesme akımı (wall-shear flow) etkisindeki yatay bir tabanda bulunan sediment tanesinin hareketi için gerekli olan ortalama kritik hızı, tane Reynolds (Re_*) sayısı ve tane çökme hızı kullanarak elde eden bir ifade geliştirmiştir. Novak ve Nalluri (1975) ise sabit ve pürüzsüz kanallarda tanenin harekete başlama koşullarını hareketli taban koşullarıyla karşılaştırmış ve pürüzsüz dikdörtgen kesitli kanallarda gerekli kritik hızın dairesel kesitli kanallara göre daha yüksek olduğunu belirtmiştir.

Kaldırma kuvveti kavramı incelendiğinde ise araştırmacıların sediment tanesinin harekete başlamasında kaldırma kuvvetinin etkisini ön plana aldığı görülmektedir. Ling (1995) tabanda yer alan bir parçacığa etkiyen toplam hidrodinamik kaldırma kuvvetini Saffman kaldırma kuvveti, Magnus kaldırma kuvveti ve merkezkaç kuvvetinden kaynaklanan kaldırma kuvveti olarak tanımlamaktadır. Ali ve Dey (2016) ise çalışmasında toplam hidrodinamik kaldırma kuvvetine, türbülans kaldırma kuvvetinin de etkisinin olduğunu belirtmiştir. Saffman kaldırma kuvveti sediment tanelerine etki eden hız gradyanından, Magnus kaldırma kuvveti tanenin dönme hareketinden, merkezkaç kuvvetinden kaynaklanan kaldırma kuvveti tanenin tabandaki diğer taneler üzerinde yuvarlanmasından, türbülans kaldırma kuvveti ise advectif düşey ivmeden kaynaklanmaktadır (Ali ve Dey, 2016).

Saffman (1965) çalışmasında, viskoz akış içerisinde bulunan bir küreye hız gradyanından kaynaklı kaldırma kuvvetini, taneye etki eden ortalama hız, tanenin içerisinde bulunduğu akışkanın yoğunluğu ve viskozitesi, kaldırma katsayısı ve tanenin çapı parametrelerine bağlı olarak ifade etmiştir. Saffman çalışmasında kaldırma katsayısının 20,3 olduğunu belirtse de bu katsayı daha sonra 1,615 olarak düzeltilmiştir (Saffman, 1968).

Benzer şekilde Rubinow ve Keller (1961) uniform akım içerisinde belirli bir açısal hız ile dönmekte olan taneye etki eden magnus kaldırma kuvvetini, Ling (1995) merkezkaç kuvvetinden kaynaklanan kaldırma kuvvetini, Ali ve Dey (2016) ise taneye düşey yönde

etki eden ivme bileşeni ile ilişkilendirdikleri türbülans kaldırma kuvvetini ifade eden eşitlikler sunmuştur.

Deterministik yaklaşımlar içerisinde yer alan kritik taban kayma gerilmesi kavramı ise tanenin harekete geçmesini tanımlamada oldukça yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Yöntem, deneysel veya analitik çalışmalar üzerine kurulabiliyor olsa da, oluşturulan bağlantılardaki katsayılar deneysel çalışmalardan elde edilebildiği için, analitik modeller yarı teorik olmaktadır (Dey, 2014: 198).

Bu bağlamda, Shields (1936) tarafından geliştirilen çalışma, sediment hareketi araştırmalarında temel bir öneme sahiptir. Shields gerçekleştirdiği deneyler sonucunda, sedimentin akım etkisiyle harekete geçmeye başladığı eşiği belirlemek için kritik taban kayma gerilmesini boyutsuz biçimde tanımlamış ve bu doğrultuda Shields sayısı olarak bilinen parametreyi ortaya koymuştur. Shields diyagramı, tane Reynolds sayısı (Re_*) ile boyutsuz kayma gerilmesi (Shields parametresi, Θ_c) arasındaki ilişkiyi ortaya koymakta ve yaklaşık yüz yıldır araştırmalarda rehber olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, diyagramın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır: Örneğin, kaldırma kuvvetinin ihmal edilmesi ve pürüzsüz ile pürüzlü akım rejimlerindeki deneysel verilerle tam uyum göstermemesi gibi hususlar, Shields yaklaşımının sonraki araştırmacılar tarafından eleştirilmesine ve çeşitli düzeltmelerin önerilmesine yol açmıştır (Yalın ve Karahan, 1979; Buffington, 1999; Dey ve Papanicolaou, 2008). Bu kapsamda, White (1940), Iwagaki (1956), Egiazaroff (1965), Yalın ve Karahan (1979), Wiberg ve Smith (1987) ve Ling (1995) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar kritik taban kayma gerilmesi kavramı kullanımına ve Shields yaklaşımının geliştirilmesine örnek olarak gösterilebilmektedir.

Cao, Pender ve Meng (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Shields diyagramı yeniden ele alınarak sedimentin harekete geçme koşullarının belirlenmesine yönelik doğrudan uygulanabilir bir formülasyon geliştirilmiştir. Çalışmada, kritik Shields parametresi ile tane Reynolds sayısı arasındaki ilişki açık biçimde ifade edilmiş ve Shields diyagramında yer alan kapalı (implicit) ilişkinin neden olduğu deneme-yanılma gereksinimi ortadan kaldırılmıştır.

Safari, Aksoy, Ünal ve Mohammadi (2017), rijit sınırlara sahip açık kanallarda sedimentin harekete geçme koşullarını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, trapez, dikdörtgen,

dairesel, U ve V kesitli kanallarda dört farklı tane boyutuna sahip sediment örneği kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler, kayma gerilmesi ve hız yaklaşımlarıyla değerlendirilmiş; kayma gerilmesi yaklaşımında Shields (1936) yöntemi, hız yaklaşımında ise Novak ve Nalluri (1975) formülasyonu kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, sedimentin harekete başlaması için gerekli kritik kayma gerilmesi ve hız değerlerinin kanal kesit şekline bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, Shields eğrisinin rijit sınır koşullarında kayma gerilmesini olduğundan yüksek tahmin ettiği ve kanal şeklinin sediment hareketi üzerindeki etkisinin belirleyici olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Dey (1999), yatay bir tabanda üniform ve üniform olmayan sediment tanelerinin harekete başlaması için gerekli kritik taban kayma gerilmesini belirlemeye yönelik analitik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu amaçla, yatak üzerindeki tekil bir sediment tanesine etki eden kuvvetlerin dengesi esas alınmış ve geliştirilen model deneysel verilerle kalibre edilmiştir. Araştırmada, önceki teorik modellerin deneysel bulgularla tam uyum göstermediği vurgulanmış; bu nedenle taneciklerin üç boyutlu yapısı ile Magnus kaldırma kuvveti modele dahil edilmiştir. Önerilen modelin üniform ve üniform olmayan sedimentler için geçerli olduğu, elde edilen sonuçların Yalın ve Karahan (1979) tarafından geliştirilen genişletilmiş Shields diyagramı ile uyum sağladığı belirtilmiştir. Aynı yazar 2003 yılında gerçekleştirdiği çalışmada kanal tabanının enine ve boyuna eğimli olması durumunda sediment tanesinin harekete geçme koşullarını araştırmış ve yatay ve eğimli taban için kritik kayma gerilmesi oranının; taban enine ve boyuna eğimine, kaldırma-sürüklenme oranlarına ve sediment içsel sürtünme açısına bağlı bir fonksiyon olduğunu ortaya koymuştur (Dey, 2003).

Dey ve Zanke (2004) tabandaki sediment için kritik kayma gerilmesinin, yukarı yönlü sızıntı olması durumunda nasıl etkilendiğini araştırmıştır. Çalışmada, sızmanın sediment tanesi üzerindeki kaldırma kuvvetini artırarak tanelerin batık ağırlığını azalttığı ve dolayısıyla kritik taban kayma gerilmesinin düşmesine neden olduğu belirlenmiştir. Geliştirilen analitik model, literatürdeki deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve sonuçlar arasında yüksek bir uyum elde edilmiştir.

Dey, Sarkar ve Solari (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, açık kanal akımlarında yatak yakınındaki türbülans davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Araştırmada, Akustik

Doppler Hız Ölçüm Cihazı (ADV) kullanılarak üç boyutlu hız bileşenleri ölçülmüş ve bu verilerden Reynolds gerilmeleri, hız çalkantı bileşenlerinin kök ortalama kare değerleri (Root Mean Square–*RMS*) ile türbülans kinetik enerjisi (*TKE-k*) hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, taban pürüzlülüğü ile türbülans yapısı arasındaki etkileşimin, sediment taneleri üzerindeki kuvvet dengesini belirleyen temel faktörlerden biri olduğunu ortaya koymuştur.

Sediment tanesinin harekete başlama eşiğinin veya kritik durumun nasıl tanımlanacağı konusunda da farklı yaklaşımlar söz konusudur. Dey'e (2014: 190) göre bu tanımlama sediment akısı veya taban tanelerinin hareketi göz önüne alınarak ikiye ayrılabilir. İlk yöntemde, taban yükü taşınım oranının sıfır veya sıfıra yakın bir değere ekstrapolasyonundan elde edilen referans değeriyle ilişkili kritik taban kayma gerilmesi tanımlanmaktadır. İkinci yöntemde örnek olarak ise Kramer'in (1935) tanımlaması verilebilir. Ona göre; az sayıda görece küçük tanelerin harekete geçmesi zayıf hareket, ortalama boyuttaki tanelerin harekete geçmesi ortalama hareket, tanelerin tamamının hareket halinde olması ise genel hareket olarak isimlendirilebilir.

Armanini ve Gregoretti (2005), yüksek eğimli açık kanallarda kohezyonsuz tanelerin harekete başlama koşullarını deterministik bir yaklaşımla incelemiştir. Çalışmada, tanelerin akıma maruz kalma derecesi (degree of exposure) parametresi tanımlanarak yüksek eğimli yataklarda düşük gömülülük koşulları altında kuvvet dengesi analitik olarak değerlendirilmiştir. Modelde kaldırma, sürüklenme, ağırlık, yüzdürme ve sızma kuvvetleriyle birlikte taneler arası sürtünme de dikkate alınmıştır. Teorik modelin deneysel verilerle karşılaştırılması sonucunda, tanelerin akıma maruz kalma derecesinin artmasının hidrodinamik kuvvetleri belirgin şekilde artırdığı ve dolayısıyla sedimentin harekete geçme eşiğinin düşmesine neden olduğu belirlenmiştir.

Vollmer ve Kleinhans (2007), türbülanslı akım koşullarında sediment hareketinin başlamasını öngörmek için geliştirdikleri modelde, sediment tanelerinin yatağa gömülme durumunun (embedment) kritik bir parametre olduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışmada, gömülme derinliğinin artmasıyla tane üzerine etki eden akım kuvvetlerinin azaldığı ve çevredeki parçacıkların oluşturduğu mekanik kilitlenme etkisi nedeniyle hareket eşiğinin belirgin şekilde yükseldiği belirtilmiştir. Ayrıca, gömülmüş taneler üzerinde meydana gelen türbülans kaynaklı basınç çalkantılarının sönümlendiği ve bu durumun da kaldırma

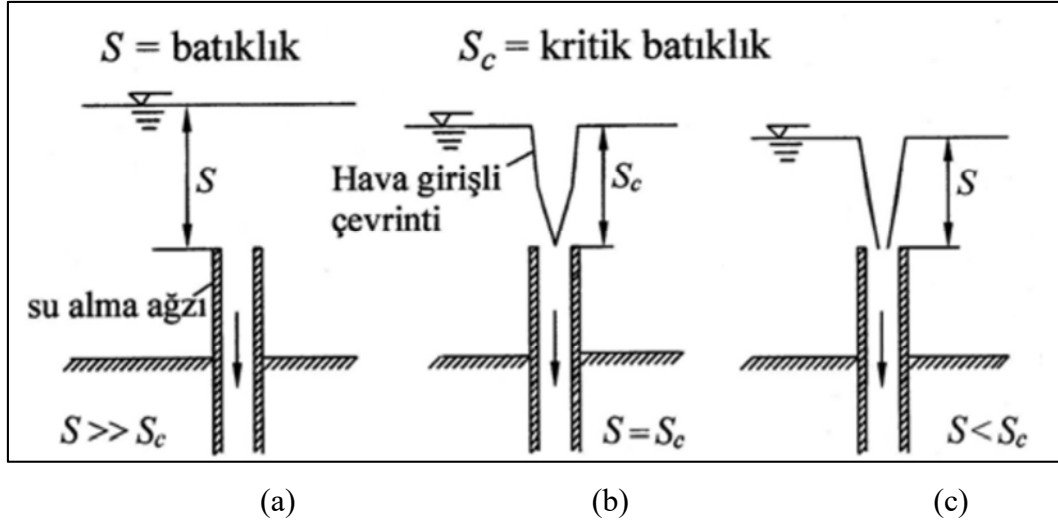
kuvvetini zayıflattığı ifade edilmiştir. Çalışma sonuçları, sedimentin yatağa gömülme derecesinin, tanenin akımla etkileşimini ve dolayısıyla hareket eşiğini belirleyen en önemli geometrik faktörlerden biri olduğunu göstermektedir.

Dwivedi, Melville, Shamseldin ve Guha (2010), türbülanslı akımlarda tanelerin harekete başlamasında etkili olan akım yapıları ve hidrodinamik kuvvetleri deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, küresel tanelerden oluşturulmuş yataklar kullanılmış ve bazı taneler tamamen akıma açık, bazıları ise çevresindeki taneler tarafından kısmen örtülmüş şekilde yerleştirilmiştir. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) yöntemiyle yapılan ölçümler, türbülanslı akımlarda görülen, yüksek hızlı akışın aşağı yönlü hareket ederek yatağa çarpmasıyla oluşan ve süpürme olayı (sweep event) olarak adlandırılan akım yapısının hareket başlangıcında belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu etkinin, özellikle açıkta kalan tanelerde büyük sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri oluşturduğu aktarılmıştır. Çalışma ayrıca, tane hareketinin yalnızca kuvvetin büyüklüğüne değil, bu kuvvetin etki süresine de bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışmasının kapsamında sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin bileşenleri olan sürüklenme (C_D) ve kaldırma (C_L) katsayıları üzerine gerçekleştirilen araştırmalar ve tane hareketi açısından akımın türbülanslık derecesinin incelenmesine yönelik çalışmalar da değerlendirilmiştir. Ancak bu iki konuya ilişkin ayrıntılar, çalışmanın anlatımını güçlendirmek amacıyla tane hareketinin teorik analizini içeren Bölüm 4'te detaylı olarak sunulmuştur.

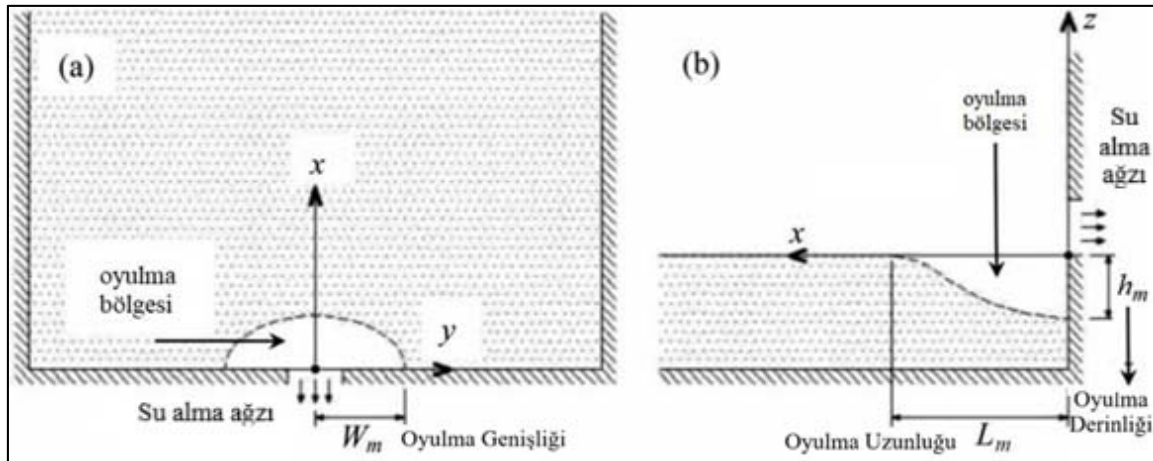
2.2. Su Alma Ağzlarının İncelendiği Çalışmalar

Bu çalışma kapsamında su alma ağzı akımı etkisi altında tanenin harekete başlaması araştırıldığı için su alma ağzlarıyla ilgili araştırmalardan da bahsetmek gerekmektedir. Literatürde, su alma ağzlarına su yüzeyinde oluşan serbest yüzey çevrintisi yoluyla hava girişi için kritik koşulları inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır (Yıldırım ve Taştan, 2009; Sarkardeh, Zarrati ve Roshan, 2010; Yang, Liu, Bottacin-Busolin ve Lin, 2014; Taştan, 2018; Taştan ve Yıldırım, 2018). Şekil 2.5 su alma ağzlarına hava girişi için kritik batıklık derinliğinin tanımlamasını göstermektedir.



Şekil 2.5. Su alma ağzına hava girişi (a) Hava girişi yok (b) Serbest yüzey çevrirtisi ağza ulaşıyor (kritik durum); (c) Hava girişi var (Taştan ve Yıldırım, 2018)

Ayrıca, ağız membasındaki taban sedimenti hareketi neticesinde oluşan oyulma çukuru özelliklerine odaklanan çalışmalar da mevcuttur (Powell ve Khan, 2012; Khanarmuei, Rahimzadeh, Kakuei ve Sarkardeh, 2016; Karmacharya, Ruther, Aberle, Shrestha, ve Bishwakarma, 2021; Keshavarzi, Mohammadi ve Hamidifar, 2022; Taştan, Erat, Barbaros ve Eroğlu, 2023; Erat, Barbaros ve Taştan, 2024). Şekil 2.6 su alma ağzı membasında oluşan oyulma çukuru geometrisine bir örnek teşkil etmektedir.



Şekil 2.6. Su alma ağzı membasında oluşan oyulma çukuru geometrisine bir örnek (Powell ve Khan, 2012)

Ağza sediment veya hava girişini etkileyen en önemli parametre olan su alma ağzı akımı etkisi neticesinde akım alanındaki hız dağılımları üzerine ise deneysel, teorik ve az sayıda da olsa sayısal yaklaşımlar kullanıldığı görülmektedir.

Çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar, ağız membasındaki hız dağılımına, akım sınır etkilerinden (su yüzeyi, kanal yan duvarları veya tabanı vb.) izole şekilde odaklanmaktadır. Örneğin, Anayiotos ve diğerleri (1995) bir su alma ağzı çevresindeki hızlanma bölgesinin akım özelliklerini hem sayısal hem de deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, farklı debiler ve ağız çapları için hız dağılımı renkli Doppler ultrason (CDU) ve Lazer Doppler Hızölçeri (LDV) kullanılarak belirlenmiş, ayrıca sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Deneysel ve sayısal veriler arasında yüksek düzeyde uyum elde edildiği belirtilmiş, ağız yakınında eş hız eğrilerinin yarı-eliptik bir geometriye sahip olduğu gösterilmiştir.

Chanson, Aoki ve Maruyama (2002), zamana bağımlı akım koşulları altında, bir dairesel tankın tabanında bulunan dikdörtgen orifisin membasındaki hız dağılımını incelemiştir. Elde edilen hız dağılımları potansiyel akım çözümleriyle uyumlu bulunmuştur.

Shammaa, Zhu ve Rajaratnam (2005), ölü son duvarı üzerindeki bir su alma ağzı önündeki akım alanını potansiyel akım yaklaşımı ile incelemiştir. Tek bir noktasal kuyu yaklaşımının su alma ağzı yakınında hız dağılımını doğru biçimde tahmin edemediğini belirten araştırmacılar, bu eksikliği gidermek amacıyla su alma ağzı alanı boyunca eşit şekilde dağıtılmış noktasal kuyular kullanarak mevcut yöntemi geliştirmiştir. Böylece, su alma ağzı çevresinde fiziksel olarak daha gerçekçi hız değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada, eş hız eğrilerinin ağız yakınında yarı-eliptik bir geometri sergilediği ve ağızdan uzaklaştıkça kademeli olarak yarı-küresel bir şekle dönüştüğü gösterilmiştir. Ayrıca, su alma ağzı geometrisinin ve boyutunun ağızdan belirli bir mesafeden sonra hız dağılımı üzerinde etkisinin kalmadığı belirtilmiştir.

Bryant, Khan ve Aziz (2008), su alma ağızlarının membasındaki akım yapısını hem deneysel hem de teorik olarak incelemiş; çalışmada birbirine yakın çoklu ağızlar, serbest yüzeye yakın tek bir ağız ve basınç gradyanının ihmal edilemeyecek kadar büyük olduğu geniş ağız durumlarını ele almışlardır. Shammaa ve diğerleri (2005) tarafından önerilen yöntem geliştirilerek basınç gradyanlarının etkileri ve çoklu ağızların süperpozisyonu dikkate alınmıştır. Önerilen yöntemin, özellikle ağza yakın bölgelerdeki hız profillerini daha doğru biçimde tahmin ettiği belirtilmiştir. Basınç düzeltmeli yeni çözümün, geniş ağızlarda basınç dağılımını dikkate alarak akım yapısını başarıyla temsil ettiği ve klasik potansiyel akım çözümüne kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Sonuçlar,

özellikle büyük ölçekli su alma yapıları gibi yüksek basınç gradyanına sahip durumlar için potansiyel akım yaklaşımının kullanılabilirliğini arttırmıştır.

Islam ve Zhu (2011), iki boyutlu dikdörtgen su alma ağızlarının membasındaki akım yapısını incelemiş ve akım hızlanma bölgesinin özelliklerini belirlemeye odaklanmıştır. Çalışma, farklı boyut, konum ve şekillere sahip su alma ağızlarında akım davranışını analiz ederek, bu yapıların özellikle balık hareketi açısından önemine dikkat çekmiştir.

Yıldırım ve Kocabaş (1995) tarafından ortaya konan çalışma ise akım sınır etkileri ile akım alanındaki hızlar arasındaki bağlantıyı teorik olarak ortaya koymuştur. Yazarlara göre su alma ağzının akım sınırlarına olan konumu, ağız çevresinde oluşan hayali küresel kuyu yüzeyleri üzerinden geçen debiyi ve hız dağılımını doğrudan etkilemektedir. Akım sınırlarına yaklaşan ağızlar, küresel kuyu yüzeyi alanının azalmasına ve buna bağlı olarak akım alanında artan hızlara neden olmaktadır. Bahsedilen teorik ilişkiye dair detaylar Bölüm 3 içerisinde etraflıca aktarılmıştır.

Akım sınır etkilerini dikkate alan az sayıda çalışmadan biri olan Powell ve Khan (2015) araştırması, ağız akımının etkisi altındaki sabit ve hareketli yataklar üzerindeki hız dağılımlarını, üç farklı sabit su seviyesi koşulunda deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sonuçlar, sabit ve hareketli yatak koşullarında akım yapısının farklılaştığını, özellikle hareketli yatakta oyulmanın hız dağılımı üzerinde belirgin etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Çalışmada, sayısal sonuçların her iki durum için deneysel verilerle uyumlu olduğu ve dolayısıyla farklı geometrilere sahip su alma yapıları için de uygulanabileceği vurgulanmıştır.

Das, Ahmad ve Sharma (2024), üniform akım koşulları altındaki açık kanallarda yan duvarlara yerleştirilmiş dikdörtgen su alma ağızlarının debi katsayısını incelemiştir. Çalışmada, akımın Froude sayısı, ağız yüksekliği ve ağzın en-boy oranı gibi parametrelerin debi katsayısı üzerindeki etkileri değerlendirilmiş, ayrıca boya izleyici kullanılarak akım desenleri gözlemlenmiştir. Sonuçlar, ağzın en-boy oranı arttıkça debi katsayısının azaldığını ve Froude sayısı ile ağız geometrisinin bu katsayı üzerinde en belirleyici faktörler olduğunu göstermiştir.

Yıldırım ve Taştan (2024), dairesel ve kare kesitli su alma ağızlarının membasındaki radyal hızın tahmini için pratik bir yöntem geliştirmiştir. Literatürdeki önceki çalışmaların çoğu, atmosfere açılan ağızlar için kapalı-integral biçiminde tanımlanan karmaşık çözümlere dayandığından ve bu yöntemler borulu su alma ağızları için geçerli olmadığından, bu sınırlamayı aşmak amacıyla tek bir küresel kuyu yüzeyi kavramına dayanan yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Geliştirilen yarı ampirik yöntem, atmosfere açılmayan veya ortama boru şeklinde uzanan ağızlarda hem deneysel hem de sayısal sonuçlarla yüksek uyum göstermiştir.

2.3. Su Alma Ağızından Kaynaklı Hız Dağılımlarının İncelendiği Sayısal Çalışmalar

Khan, Wicklein, Rashid, Ebner ve Richards (2004), türbin girişinin yukarısına yerleştirilen bir ızgara yapısının akım özellikleri ve balık göçü üzerindeki potansiyel etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Sayısal model sonuçları, fiziksel model verileriyle doğrulanmış ve iyi bir uyum göstermiştir. Sonuçlar, ızgara yapısının akım alanında durağan bölgeler yarattığını ve girdap oluşumlarını etkileyerek türbin su alma sistemlerinin hidrolik performansını değiştirdiğini göstermiştir.

Tokuy ve Constantinescu (2006), pompa girişlerinde meydana gelen karmaşık akım yapısı ile girdap oluşumlarını doğru biçimde tahmin edebilen bir sayısal model geliştirmiştir. Bu kapsamda kullanılan Large Eddy Simulation (LES) türbülans modeli sonuçları, PIV yöntemiyle elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmış ve sayısal modelin, akım alanı ile türbülans özelliklerini yüksek doğrulukla temsil ettiği belirlenmiştir.

Nakayama ve Hisasue (2010), küçük ölçekli bir hidroelektrik santralının giriş kanalında meydana gelen zamana bağlı akımı, LES modelinin kullanıldığı 3 boyutlu sayısal modelle incelemiştir. Çalışmada, serbest yüzeyli akımların modellenmesi için basitleştirilmiş “Marker ve Cell” yöntemine dayanan bir sayısal yaklaşım kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, serbest yüzeyde oluşan girdap yapılarının ve bunların zaman içindeki gelişiminin başarılı bir şekilde yansıtıldığını göstermiştir.

Sarkardeh, Zarrati, Jabbari ve Marosi (2014), güçlü girdapların etkisi altında bir rezervuar içerisindeki akım davranışını incelemek amacıyla üç boyutlu sayısal analizler

gerçekleştirmiştir. LES türbülans modeli, FLOW-3D kullanılarak uygulanmış ve sayısal veriler ADV ölçümleriyle doğrulanmıştır. Sonuçlar, rezervuar içerisinde su alma ağzına doğru yönelen huni biçimli akım yapısının ve vorteks etrafında gelişen spiral akım çizgilerinin belirgin biçimde izlenebildiğini göstermiştir. Çalışma, yazılımın rezervuar içi akım alanlarının ve vorteks dinamiklerinin simülasyonunda etkili bir araç olabileceğini ortaya koymuştur.

Tataroğlu (2014), yatay su alma ağızlarında hava girişli vorteks oluşumunu FLOW-3D ile üç boyutlu sayısal olarak incelemiştir. Farklı hidrolik koşullarda kritik batıklık derinlikleri belirlenmiş, sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmış ve anti-vorteks plakalarının etkisi değerlendirilmiştir. Türbülansın etkisini incelemek amacıyla kullanılan LES model sonuçlarının laminar çözümlere göre deneysel bulgularla daha iyi uyum sağladığı belirtilmiştir. Araştırmaya göre, laminar çözümler duvar yakınındaki türbülans kaynaklı dönme hareketlerini yakalayamadığından akımın ayrıntılı yapısını temsil etmede yetersiz kalmıştır. Çalışmada, yazılımın su alma ağzı bölgesinde hava girişli vorteks oluşumunun modellenmesinde güvenilir sonuçlar sunduğu belirtilmiştir.

Langford, Zhu ve Leake (2016), akarsu tipi hidroelektrik santrallerde balıkların su alma yapısına kapılma riskini değerlendirmek amacıyla saha ölçümleriyle birlikte akım alanını sayısal olarak Ansys CFX yazılımıyla incelemiştir. Çalışmada, su alma yapısı çevresinde yüksek hızlar sonucu oluşan oyulma çukurunun, yüksek riskli bölgeye çekici bir etki yaratarak tesis girişlerine yakın bölgelerde balık yoğunluğunu önemli ölçüde artırdığı belirtilmiştir.

Sungur (2018), asimetrik yatay su alma yapılarında vorteks oluşumunu FLOW-3D ile üç boyutlu sayısal analizler üzerinden incelemiştir. Farklı akım koşulları için kritik batıklık derinlikleri belirlenmiş, türbülansın temsili için LES modeli kullanılmıştır. Sonuçları, yerçekimiyle harekete geçen akımlarda hava girişli vorteksin tam bir hava çekirdekli yapı olarak görselleştirilemediğini; buna karşılık pompalı sistemlerde vorteks oluşumunun sayısal ortamda daha belirgin izlenebildiğini göstermiştir.

Lee ve Wahab (2019), açık deniz su alma yapısı etrafındaki akım özelliklerini tahmin etmede farklı türbülans modellerinin performansını karşılaştırmak için ağza yakın bölgede 3, uzak bölgede ise 2 boyutlu sayısal modelleri birleştiren bir yaklaşımdan yararlanmıştır.

Çalışmada $k-\varepsilon$, $k-\omega$, $k-\varepsilon$ renormalize grup (RNG) ve LES türbülans modelleri kullanılmış; bu modellerle elde edilen su seviyesi ve akım hızı değerleri, mevcut açık deniz su alma yapısından elde edilen ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bulgular, tüm modellerin genel eğilim açısından ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğunu; ancak RNG modelinin su seviyesi ve akım hızı tahmininde daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. LES modelinin doğruluk düzeyi nispeten düşük olmakla birlikte, bu durumun daha ince ağ yapısı ve yüksek hesaplama maliyeti gereksiniminden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Aghajani, Karami, Sarkardeh ve Mousavi (2021), bir rezervuar içerisindeki yatay su alma yapısında ızgara kullanımının akım özellikleri üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada farklı açıklıklara sahip iki ızgara kullanılmıştır. Akım hızı ve vorteks şiddeti PIV yöntemiyle ölçülmüş, ayrıca FLOW-3D kullanılarak yapılan sayısal analizlerle Reynolds sayısı, enerji kaybı ve ağza giren hava hacmi hesaplanmıştır. Sonuçlar, ızgara kullanımının yüzeydeki vorteks şiddetini ve akım hızını azalttığını, enerji kaybını ise artırdığını göstermiştir. Genel olarak, deneysel ve sayısal sonuçlar birbiriyle uyumlu bulunmuştur.

Taştan, Yıldırım ve Barbaros (2022), su alma yapılarında farklı ağız geometrilerinin hız dağılımı üzerindeki etkilerini hem teorik hem de sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, kanal tabanı ve yan duvarlarının sınır etkileri dikkate alınan ve alınmayan durumlar için analizler yapılmıştır. FLOW-3D kullanılarak yürütülen sayısal analizlerde, daire, kare, dikdörtgen ve üçgen kesitli su alma ağızlarının, ağız membasındaki akım alanı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, ağız geometrisinin etkisinin su alma ağzına yakın bölgede belirgin olduğunu, ancak mesafe arttıkça bu etkinin azaldığını göstermiştir. Genel olarak, teorik ve sayısal sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu ve potansiyel akım varsayımının su alma ağzı çevresindeki hız dağılımlarını kabul edilebilir doğrulukta temsil ettiği belirtilmiştir.

Aykan (2024), tekli ve çoklu simetrik yatay su alma yapılarında vorteks oluşumu ve kritik batıklık derinliğini incelemek amacıyla FLOW-3D kullanarak üç boyutlu sayısal analizler gerçekleştirmiştir. Çalışmada LES modeli kullanılmış ve elde edilen sayısal sonuçlar, vorteks çekirdeklerinin oluşumu ile kritik batıklık derinliğinin belirlenmesinde deneysel verilerle uyum göstermiştir. FLOW-3D yazılımının simetrik su alma yapılarındaki

karmaşık akım davranışlarını ve batıklık koşullarını güvenilir biçimde öngörebildiği belirtilmiştir.

2.4. Mevcut Çalışmanın Literatürdeki Yeri

Literatür özetinde sunulan önceki çalışmalarda görüldüğü üzere, sediment tanesinin harekete başlaması için kritik koşullar, farklı akım şartları ve kanal geometrileri altında gerek deneysel gerekse teorik yöntemlerle incelenmiştir. Ancak, tanenin üniform olmayan ve giderek hızlanan su alma ağzı akımı ortamında harekete başlama koşullarını araştıran herhangi bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Su alma ağzının akım sınırlarına olan konumu ile sediment tanesinin fiziksel özellikleri, ağza olan uzaklığı ve diğer tanelere göre konumu arasındaki ilişkiler, tanenin hareket başlangıcı açısından henüz ortaya konulamamıştır.

Öte yandan, bu fiziksel olay incelenirken harekete yol açan su alma ağzı akımına bağlı hız dağılımları üzerine gerçekleştirilen çalışmalar da değerlendirilmiştir. Literatürde, su alma ağzı membasındaki hız dağılımlarını inceleyen çeşitli teorik, deneysel ve sayısal araştırmalar bulunmaktadır. Ancak, su alma ağzının akım sınırlarına olan mesafe değişiminin hız dağılımını nasıl etkilediğini inceleyen bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Oysaki, su alma ağzı konumunun akım sınırlarından bağımsız olmadığı durumlarda, ağız membasındaki hız dağılımının önemli ölçüde değiştiği bilinmektedir.

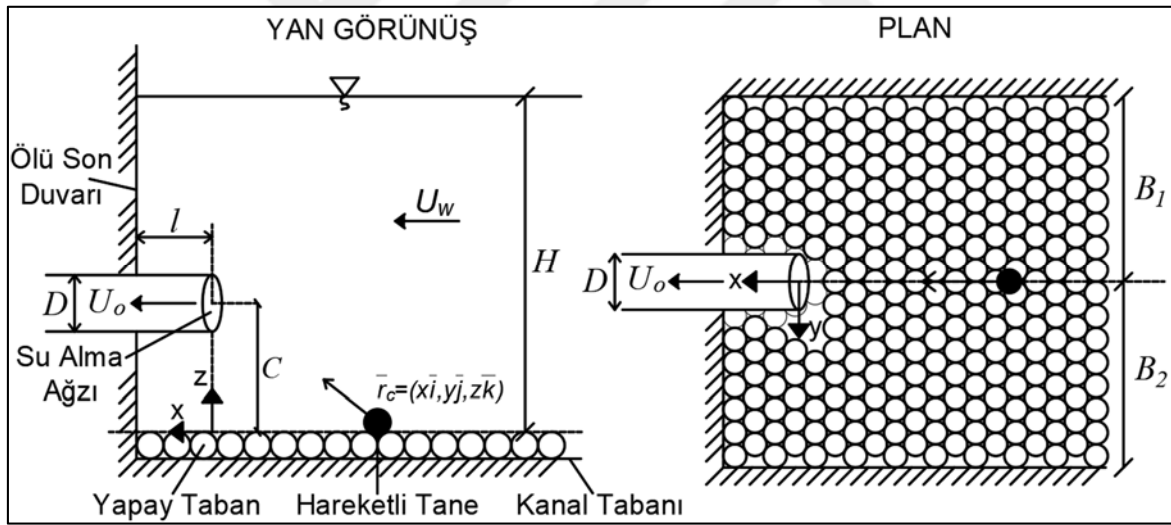
Bu çalışma ile literatürde ilk kez, ölü son duvarı içerisine yatay olarak yerleştirilmiş dairesel bir su alma ağzından kaynaklanan akım etkisi altında, tabanda serbest halde bulunan küresel bir sediment tanesinin harekete başlama koşulları deneysel olarak araştırılmıştır. Su alma ağzının kanal tabanına ve ölü son duvarına olan mesafelerinin, sediment tanesinin hareketine olan etkileri ile hareket eden sediment tanesinin ağza girme oranları incelenmiştir. Ayrıca, serbest sediment tanesinin tabandaki sabit tanelere göre farklı yerleşimleri incelenmiş ve bu sayede tanenin akıma maruz kalma oranının hareket başlangıcına etkisi araştırılmıştır. Tane hareketinin teorik olarak ifade edilebilmesi amacıyla, literatürde yaygın olarak kullanılan deterministik yaklaşımdan yararlanılmış; ancak, su alma ağzı konumunun yarattığı türbülans etkileri olasılıksal bir yaklaşımla hesaplamalara dahil edilmiştir. Sediment tanesine etki eden kuvvetler ve bu kuvvetlerin bileşenleri ayrıntılı biçimde ele alınarak, tane hareketinin teorik olarak nasıl ifade edilebileceği araştırılmıştır. Öte yandan, su alma ağzı membasındaki hız dağılımı kanal

boyunca, enine yönde ve derinlik boyunca deneysel olarak ölçülerek akım yapısı detaylı biçimde ortaya konulmuştur. Su alma ağzının kanal tabanına ve ölü son duvarına olan mesafelerinin, akım alanına etkileri ve hız dağılımında yarattığı değişim miktarları belirlenmiştir. Hız dağılımlarına ilişkin literatürde bulunan eşitlikler, akım sınır etkilerini de kapsayacak şekilde geliştirilmiş veya ilk kez ortaya konulmuştur. Son olarak, su alma ağzı membasındaki akım alanı, HAD yazılımlarından biri olan FLOW-3D Hydro kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir. Deneysel verilerle kalibre edilen sayısal modeller aracılığıyla, su alma ağzının akım sınırlarına olan mesafelerinin akım yapısında yarattığı değişimlerin özellikleri ortaya konulmuştur.



3. SU ALMA AĞZI AKIMI ETKİSİNDE TABAN SEDİMENTİNİN HAREKETE BAŞLAMA KOŞULLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada, su alma ağzı akımı etkisi altında kanal tabanında bulunan küresel bir sediment tanesinin harekete başlama koşulları ve su alma ağzı membasında oluşan hız dağılımı incelenmiştir. Bu amaçla kanal tabanına dik olarak yerleştirilen ölü son duvarından, kanal boyuna eksenini doğrultusunda yatay olarak geçirilen dairesel kesitli su alma ağzının tabana (c) ve ölü son duvarına (l) olan mesafelerinin tane hareketi ve hız dağılımına olan etkileri araştırılmıştır (Şekil 3.1). Deney düzeneklerinde referans noktası, ağız merkezinin tabanda bulunan sabit tane üzerindeki izdüşüm noktası olarak alınmış, kanal boyuna eksenini x yönü, kanal genişliği boyunca olan eksen y yönü, kanal derinliği boyunca olan düşey eksen ise z yönü olarak adlandırılmıştır. Oluşturulan tüm şekillerde x/D mutlak değer olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışma parametreleri

3.1. Boyut Analizi

Dikdörtgen bir kanalda, ölü son duvarından yatay olarak su alan bir dairesel su alma ağzı akımı etkisi altında, tabanda tek sıra halinde dizilmiş sabit küresel sediment tanelerinin üzerinde konumlanmış serbest bir sediment tanesinin, harekete başlama koşullarını deneysel olarak inceleyebilmek ve sediment tanesinin harekete başlamasını etkileyen boyutsuz parametreleri elde etmek için öncelikle boyut analizi yapılmıştır. Bağımlı

değişken olarak harekete başlayacak tanenin konum vektörü (r_c) seçilmiştir. Harekete başlama koşulları incelenen tanenin, konum vektörünü etkileyeceği düşünülen bağımsız parametreler Eş. 3.1 ile gösterilmiştir.

$$\vec{r}_c = f(\rho_w, \nu, U_o, H, c, l, B_1, B_2, g, \zeta, \rho_s - \rho_w, d, \zeta F, D, U_w) \quad (3.1)$$

Eş. 3.1’de r_c hareketi incelenecek tanenin konum vektörünü, ν akışkan kinematik viskozitesini, U_o su alma ağzı içerisindeki kesit ortalama hızı, H kanal tabanındaki sabit taneler üzerindeki akım yüksekliğini, c ve l sırasıyla su alma ağzının tabandaki sabit tanelere ve ölü son duvarına olan mesafelerini, B_1 ve B_2 su alma ağzının kanal duvarlarına olan mesafelerini, g yer çekimi ivmesini, ζ hareketli tanenin diğer tanelere göre yerleşimini yansıtan katsayıyı, ρ_s ve ρ_w sırasıyla hareketli tane ve akışkan yoğunluğunu, d hareketli tane çapını, ζF hareketli tane şekil faktörünü, D su alma ağzı iç çapını, U_w ise kanaldaki kesit alan ortalamalı yaklaşım hızını ifade etmektedir. Bahsi geçen değişkenlere boyut analizi uygulandığında Eş. 3.2 elde edilmektedir.

$$\frac{\vec{r}_c}{D} = f\left(\frac{U_o}{\sqrt{g\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right)d}}, \frac{U_o D}{\nu}, \frac{c}{D}, \frac{l}{D}, \frac{B_1}{D}, \frac{B_2}{D}, \frac{H}{D}, \frac{U_w}{U_o}, \zeta F, \zeta\right) \quad (3.2)$$

Eş. 3.2’de;

$$F_d = \frac{U_o}{\sqrt{g\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right)d}} = \text{Densimetrik Froude Sayısı} \quad (3.3a)$$

$$R = \frac{U_o D}{\nu} = \text{Su alma ağzına ait Reynolds Sayısı} \quad (3.3b)$$

Farklı çap ve yoğunluklardaki tanelerin hareketinin incelenmesinde, tane ve akım özelliklerinin birlikte değerlendirilmesi densimetrik Froude sayısı aracılığıyla sağlanmıştır. Deneylerde 5,32 cm iç çapa sahip ağızdan 1,1 lt/s debi alınması durumunda ağız içerisindeki minimum Reynolds sayısı 23930 olmaktadır. Rajaratnam ve Manzurek (2002), Köse ve Yanmaz (2010) ve Fathi-Moghadam, Emamgholizadeh, Bina ve Ghomeshi (2010) çalışmalarında Reynolds sayısının 2000’den büyük olması durumunda etkisinin ihmal

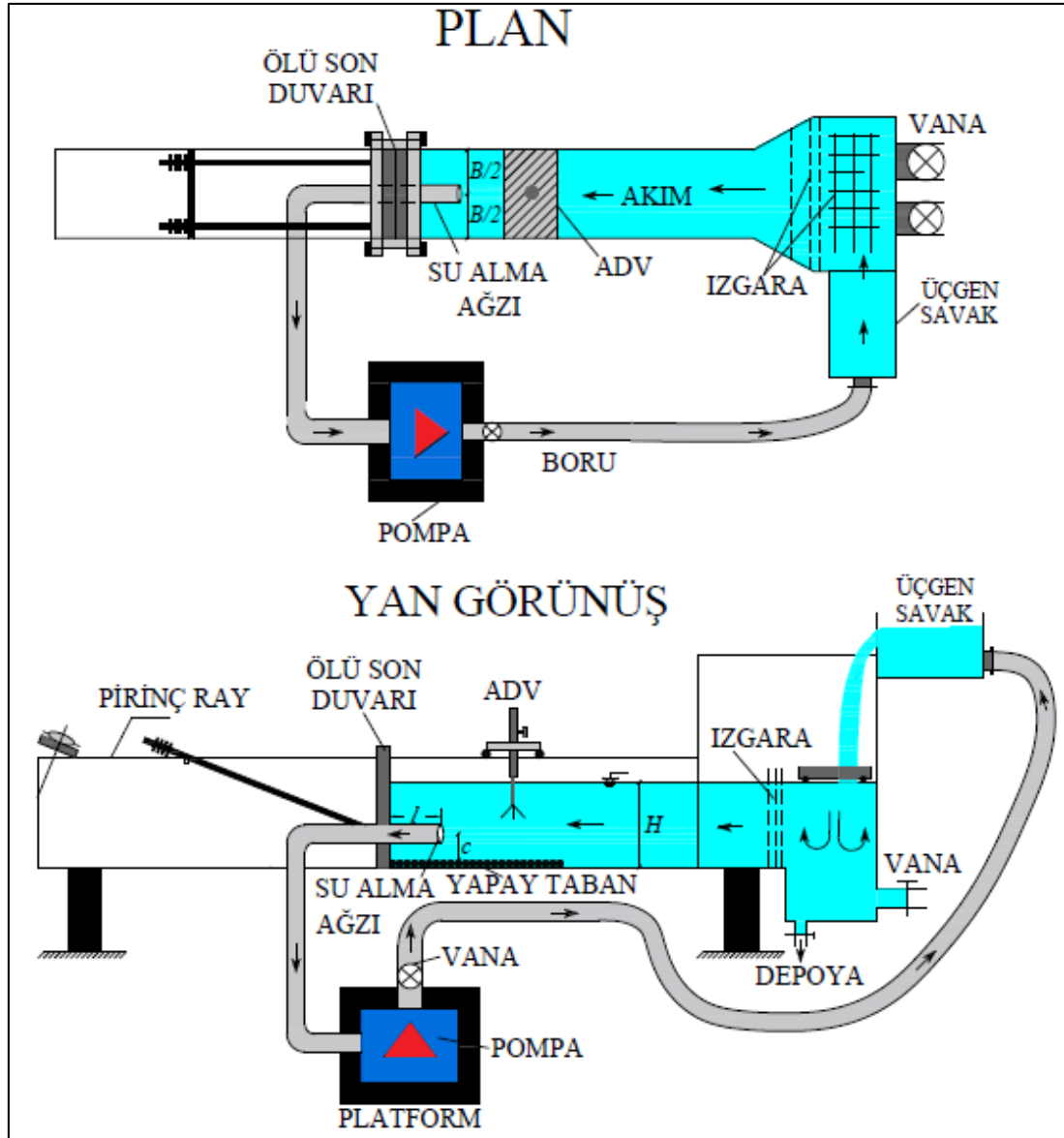
edilebileceği belirtilmiştir. Kanal yan duvarlarından kaynaklı engel etkilerinin ihmal edilebilmesi için kanal merkezine yerleştirilen ağzın, yan duvarlara olan mesafesi $B_1/D = B_2/D = 4,70$ olarak sabit tutulmuştur. Deneyler esnasında ağızdan alınan debi kanal membasına iletiildiğinden ve kanal akımına ilave bir debi girişi olmadığından U_o/U_w değerinin etkisi de sabit olmaktadır ($U_o/U_w = (4Q/\pi D^2)/(Q/BH) = 4BH/\pi D^2 = \text{sabit}$). Bu çalışma kapsamında ağız konumunun sediment hareketinin başlangıcına olan etkileri araştırıldığı için kanal içerisindeki su yüksekliği $H/D = 4,5$ olarak sabit tutulmuştur. Son olarak sediment tanesini temsil etmesi için küresel taneler kullanılacağı için $\zeta F = 1$ olmaktadır. Bu kabuller altında Eş. 3.2 aşağıdaki halini almaktadır.

$$\frac{\bar{r}_c}{D} = f(F_d, \frac{c}{D}, \frac{l}{D}, \zeta) \quad (3.4)$$

Eş. 3.4'te sunulan boyutsuz büyüklüklerin sediment tanesinin harekete başlama koşullarına olan etkisini incelemek için Bölüm 3.2'de sunulan deneyler gerçekleştirilmiştir.

3.2. Deneysel Yöntem

Deneyler için 7,5 m kullanılabilir uzunluğa, 50 cm genişlik ve yüksekliğe sahip, taban ve yan duvarları camdan, dikdörtgen kesitli yatay bir kanal kullanılmıştır. Deneylerde, kanal tabanına dik olarak yerleştirilen ve plastik malzemeden meydana gelen ölü son duvarı merkezinden yatay olarak geçirilen dairesel kesitli metal boru, su alma ağzı olarak kullanılmıştır. 5,32 cm iç çapa sahip (D) su alma ağzı taşınabilir merkezkaç pompasına bağlanmış, pompa üzerinde bulunan sürgülü vana aracılığıyla istenilen miktarda debinin ağızdan çekilmesi sağlanmıştır. Pompa basma hattı kanal başında bulunan üçgen savağa monte edilmiş, savak yardımıyla debi ölçümü gerçekleştirilmiştir (ölçüm hassasiyeti $\pm\%2$). Savaktan ölçümü yapılan akım kanal membasına iletilmiş, burada bulunan ızgaralar yardımıyla enerjisi kırılarak sakin bir akış sağlanmıştır. Deneyler başlamadan önce kanal, şehir şebekesi yardımıyla su ile doldurularak istenilen seviyeye getirilmiş, sonrasında kanal içerisindeki su devridaim yapılmıştır. Merkezkaç pompası aracılığıyla 1,1 – 11,1 lt/s aralığında debi ağızdan çekilebilmiştir. Şekil 3.2 ölçeksiz olarak deney düzeneğini göstermektedir.



Şekil 3.2. Deney düzeneği (ölçeksiz)

Deneylerde sediment tanesini temsil etmesi için farklı çaplarda, yoğunluğu $1,374 \text{ kg/m}^3$ olan polioksümetilen (POM) ve yoğunluğu $2,50 \text{ kg/m}^3$ olan cam bilyeler kullanılmıştır. POM bilyelerin çapları (d) 4, 5, 6,35 ve 8 mm iken cam bilyelerin çapları (d) 5, 6 ve 8 mm'dir. Sediment tanelerinin pürüzsüz ve düz bir yüzey yerine, doğada olduğu gibi diğer taneler üzerinden hareket etmelerinin modellenenebilmesi için, sabit ve iç içe geçmiş POM tanelerinden oluşan yapay tabanlar oluşturulmuştur. 50 cm genişliğinde ve 1 m uzunluğunda pleksi levha üzerine yapıştırılan 4, 5, 6,35 ve 8 mm taneler sayesinde dört ayrı yapay taban imal edilmiştir. Tanelerin üzerine yapıştırıldığı plaka kalınlığı tane çapına göre değiştirilmiş, bu sayede sabit tane üst kotu ile ağız merkezi arasındaki mesafe her bir taban için aynı tutulmuştur (Örneğin 8 mm tane için 3 mm, 5 mm tane için 6 mm

kalınlığında pleksi levha kullanılmıştır). Resim 3.1 yapay taban yerleşiminin bir örneğini göstermektedir.



Resim 3.1. Deney düzeneğinin 8 mm yapay taban için görünümü

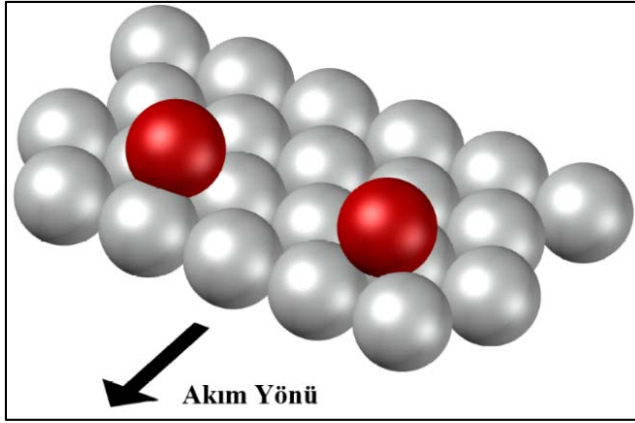
Ağız membasındaki hız dağılımının ve hareketli taneye etki eden hızların ölçülmesi SonTek 16 MHz MicroADV kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ADV, kanal üzerinde bulunan raylarda hareket edebilecek tekerlekli bir düzeneğe yerleştirilmiştir. Bu sayede ADV'nin, kanal içerisinde üç farklı yönde de hareket etmesi sağlanmış ve istenilen noktada hız ölçümü gerçekleştirilebilmiştir. ADV tarafından elde edilen veriler kablo aracılığıyla işlemci modülüne ve oradan da bilgisayara aktararak kaydedilmiştir. Hız ölçümlerinin gerçekleştirilmesi, veri toplama aşamaları ve kullanılan veri işleme yöntemleri detaylı olarak Bölüm 5'te anlatılmıştır. Deney düzeneğinin görünümü Resim 3.2'de sunulmuştur.

Boyut analizi başlığında sunulduğu üzere su alma ağzının tabana (c) ve ölü son duvarına (l) olan mesafeleri tane hareketini etkileyen iki önemli değişkendir. Bu etkileri araştırmak için farklı düzeneklerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle ağzın ölü son duvarına olan mesafesi sabit tutularak ($l/D = 0$), $c/D=0,5$; 1; 1,5 ve 2 olmak üzere dört farklı mesafe incelenmiştir. Sonrasında ise ağzın tabana olan mesafesi sabit tutularak ($c/D = 1$), $l/D = 0$, 1, 2 olmak üzere 3 farklı mesafe araştırılmıştır.

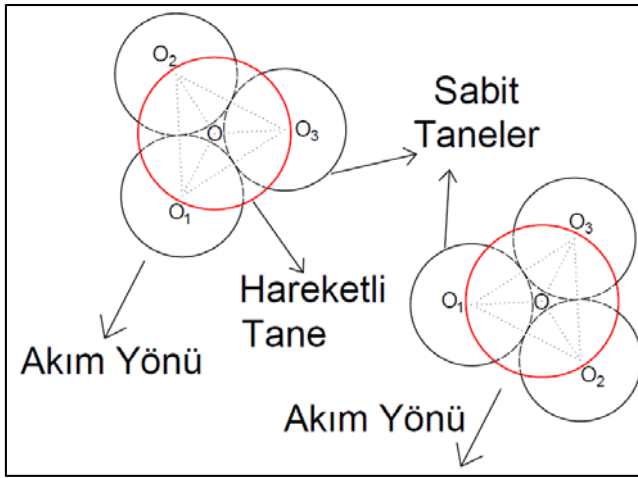


Resim 3.2. Deney düzeneği fotoğrafı

Öte yandan tanenin yerleşimi de tane hareketinde etkili olan bir diğer parametredir ve deneyler esnasında etkisi araştırılmıştır. Tane boyutlarından bağımsız olarak, hareketli tanenin sabit tanelere göre yerleşimi iki ayrı şekilde olabilmektedir. Bu yerleşimler hareketli tane önünde bir veya iki tanenin olmasına göre sırasıyla “Tek (T)” veya “Çift (Ç)” olarak isimlendirilmiştir. Bu amaçla Şekil 3.3’te gösterilen bu iki ayrı yerleşimin harekete olan etkisi, $c/D = 1$, $l/D = 0$ parametresi için incelenmiştir. Bu durum incelenirken aynı çaplara sahip yapay taban ve hareketli tane kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.3. Hareketli tanenin sabit tanelere göre yerleşimi (a) 3 boyutlu gösterim (b) 2 boyutlu gösterim

Ayrıca farklı çaplardaki yapay taban ve hareketli tane kombinasyonları sayesinde tane yerleşiminin hareket başlangıcına olan etkisi de araştırılmıştır. Tanenin, aynı ya da farklı çaptaki diğer tanelere göre konumlanması yatak geometrisini değiştirmekte; bu durum, tanenin akışa maruz kaldığı alanı etkileyerek hareketin başlangıcında önemli bir rol oynamaktadır (Fenton ve Abbott, 1977; Dwivedi ve diğerleri, 2010). Bu değişkenler ise hareketli tanenin önünde tek bir sabit tane olduğu koşul olan “Tek (T)” altında incelenmiştir. Hareketli tanenin yerleşiminin değişmesi temelde, hem tanenin akım hızlarına dolayısıyla da sürüklenme kuvvetine maruz kalacağı yüzey alanını, hem de tanenin dönme noktasının yüksekliğini değiştirmektedir. Bu farklılıkları yansıtan tane yerleşim katsayısı (ζ), hareketli tanenin akıma maruz kalan akıma dik net izdüşüm alanının, akıma dik toplam izdüşüm alanına olan oranını ifade etmektedir. ζ katsayısı ne kadar yüksek olursa, taneyi harekete geçirmeye çalışan sürüklenme kuvveti de o kadar yüksek olmaktadır.

Tane hareketinin teorik analizinin gerçekleştirildiği Bölüm 4 içerisinde, farklı yerleşimler için dönme noktası yüksekliği ve ζ katsayısı hesaplaması detaylarıyla anlatılmıştır. Yerleşim düzenlemelerinin isimlendirmesinde öncelikle tanenin malzeme özelliği, sonrasında sırasıyla hareketli ve sabit tane çapları, ardından da yerleşimin tek veya çift olma durumu belirtilmiştir. Örneğin 5 mm çapında POM hareketli tanenin, 4 mm yapay taban üzerinde, tek tane yerleşimine sahip olduğu durum “P54T” olarak isimlendirilmiştir. Çizelge 3.1 farklı yerleşim düzenlemelerini ve isimlendirmelerini göstermektedir.

Çizelge 3.1. Tane yerleşim düzenlemeleri

Hareketli Tane (mm)	Taban (mm)	Yerleşim	Malzeme	ζ	İsimlendirme
4	4	Tek	POM	0,91	P 4 4 T
4	4	Çift	POM	0,98	P 4 4 Ç
5	4	Tek	POM	0,95	P 5 4 T
6,35	4	Tek	POM	0,97	P 6.35 4 T
8	4	Tek	POM	0,99	P 8 4 T
5	5	Tek	POM ve Cam	0,91	P 5 5 T C 5 5 T
5	5	Çift	POM ve Cam	0,98	P 5 5 Ç C 5 5 Ç
6,35	5	Tek	POM	0,95	P 6.35 5 T
8	5	Tek	POM	0,97	P 8 5 T
6	6,35	Tek	Cam	0,89	C 6 6.35 T
6	6,35	Çift	Cam	0,98	C 6 6.35 Ç
6,35	6,35	Tek	POM	0,91	P 6.35 6.35 T
6,35	6,35	Çift	POM	0,98	P 6.35 6.35 Ç
8	6,35	Tek	POM	0,95	P 8 6.35 T
8	8	Tek	POM ve Cam	0,91	P 8 8 T C 8 8 T
8	8	Çift	POM ve Cam	0,98	P 8 8 Ç C 8 8 Ç

Deneylerde kanal $H/D = 4,5$ seviyesine kadar su ile doldurulduktan sonra, hareketi incelenecek tane istenilen noktaya konulmuş, pompa çalıştırılarak ağızdan debi çekilmesine başlanmıştır. Pompa üzerinde yer alan sürgülü vana küçük bir miktarda açılıp en az bir dakika beklenmiş, hareket gözlemlenene kadar işlem tekrarlanmıştır. Tane hareketi hem telefon kamerası aracılığıyla kaydedilmiş hem de gözlemle takip edilmiştir. Gözlemi kolaylaştırması açısından kanal yan camına şeffaf kareli ölçü kağıdı yerleştirilmiştir. İlgili konumda taneyi harekete geçiren debi, savaktan ölçülerek not

alınmıştır. Hata miktarını en aza indirmek için aynı konumda deneyler en az 3 kere tekrarlanmış, ölçülen debiler arası oranın 0,95-1,05 arasında olması teyit edildikten sonra bu üç debinin ortalaması, taneyi hareket ettiren debi olarak kaydedilmiştir. Hareketli tane öncelikle ağza yakın bir konuma yerleştirilmiş, ardından gittikçe ağızdan daha uzağa yerleştirilecek şekilde deneyler devam etmiştir. Başlangıç deneylerinde pompa yardımıyla ağızdan 11,1 lt/s debi alınabilmiş olsa da ilerleyen aşamalarda pompanın performansında düşüş gözlenmiş ve bu nedenle 10,5 lt/s tane hareketi açısından doğal üst sınır oluşturmuştur.

Deneylerde kullanılan tüm parametreler Çizelge 3.2’de sunulmuştur. Gerçekleştirilen çalışma, aşağıda belirtilen parametreleri içeren 585 adet tane hareketi deney verisinden oluşmaktadır.

Çizelge 3.2. Deney parametreleri

c/D ($l/D=0$)	l/D ($c/D=1$)	Tane Çapı (mm)	F_d	H/D	ζ
0,5; 1; 1,5; 2	0, 1, 2	POM: 4; 5; 6,35; 8 Cam: 5; 6; 8	4 -41	4,5	0,89-0,99

3.3. Deney Sonuçları

Ağız akımı etkisi altında sediment tanesinin harekete başlamasının densimetrik Froude sayısına (F_d), su alma ağzının tabana (c) ve ölü son duvarına (l) olan mesafelerine ve tane yerleşimine (ζ) bağlı olduğu boyut analizi bölümünde aktarılmıştı. Bu bölümde bahsi geçen parametrelerin tane hareketine olan etkileri üzerine gerçekleştirilen deney sonuçları sunulmaktadır. Gerçekleştirilen deneylerin tamamında hareketli tane, ağız merkez ekseninde ($y/D = 0$) yer almaktadır.

Öncelikle seçilen akım yüksekliğinin tane hareketinin başlangıcına etkisinin ihmal edilebilir olduğundan emin olunabilmesi için kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla $c/D = 1$, $l/D = 0$ deney düzeneğinde 8 mm yapay taban ve 8 mm POM hareketli tane için farklı akım yükseklikleri altında aynı konumdaki tanenin hareketi incelenmiştir. $x/D = 1,77$ ve 1,35 konumlarında $H/D = 3,5$; 4,5; 5,5 ve 6,5 akım yükseklikleri karşılaştırılmıştır. Daha önce anlatıldığı üzere, tane hareketi için üç ayrı deneme yapılmış,

taneyi harekete geçiren ortalama debiden elde edilen F_d değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 3.3, $H/D = 4,5$ değerlerinin referans alındığı durumda, taneyi harekete geçiren F_d değerlerinin farklı H/D değerleri için en fazla % 3,7 aralığında değiştiğini göstermektedir. H/D değerinin 3,5 altına düşürülmesi, ağız serbest su yüzeyine yaklaştıracak ve sınır etkileri dolayısıyla oluşacak hız dağılımını arttıracak için uygulanmamıştır. $H/D = 4,5$ değerinin düzenli arttırılmasının ise farkların değişiminde pozitif veya negatif bir eğilime yol açmadığı görülmektedir. Ağızın akım sınırlarından uzakta olduğu, dolayısıyla serbest su seviyesinin ağızdan kaynaklı hız dağılımı üzerine etkisinin ortadan kalktığı ancak türbülansın kaotik yapısının % 3,7 altında farklar yarattığı düşünülmektedir. Akım sınırlarının hız dağılıma olan etkileri Bölüm 5'te detaylı olarak tartışılmıştır.

Çizelge 3.3. Farklı H/D değerleri için tane hareketinin karşılaştırılması

x/D	H/D	Deneme 1	Deneme 2	Deneme 3	Ortalama	F_d	Fark (%)
		Q (lt/s)	Q (lt/s)	Q (lt/s)	Q (lt/s)		
1,77	3,5	4,92	4,98	4,88	4,93	12,9	0,8
1,77	4,5	4,87	4,98	5,05	4,97	13,0	-
1,77	5,5	5,16	5,11	5,01	5,09	13,4	-2,6
1,77	6,5	5,11	5,09	5,19	5,13	13,5	-3,3
1,35	3,5	3,91	3,95	3,87	3,91	10,3	-3,7
1,35	4,5	3,86	3,73	3,72	3,77	9,9	-
1,35	5,5	3,74	3,88	3,91	3,84	10,1	-1,9
1,35	6,5	3,68	3,73	3,62	3,68	9,7	2,5

Bu açıklamalar ışığında çalışmanın ilerleyen aşamalarında deneyler, $H/D = 4,5$ su yüksekliğinde gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Ağız akımı etkisi altında tanenin harekete başlaması

Bu başlık altında tanenin ağız akımı etkisi altında harekete başlaması deneylerinin sonuçları ve elde edilen gözlemler aktarılmaktadır. Ağızın akım sınırlarına olan mesafesinin hareket başlangıcına olan etkisi ayrı başlıklar altında değerlendirilmiştir.

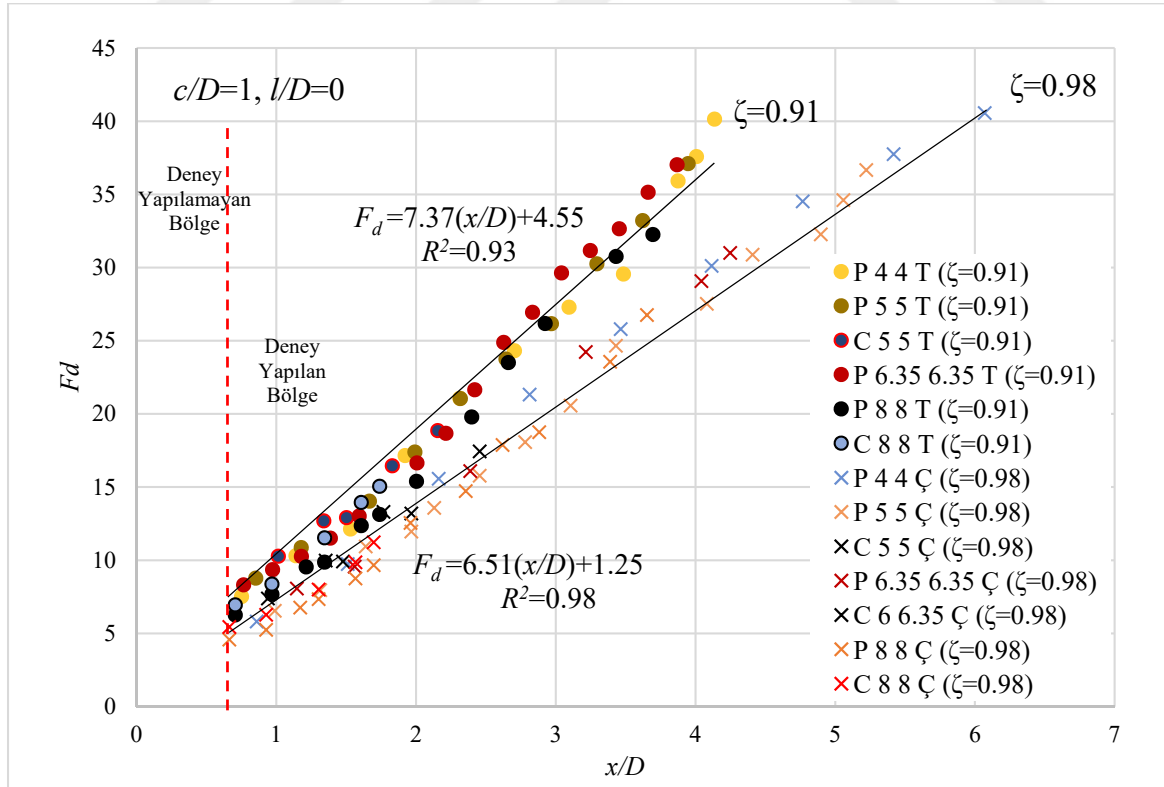
Gerçekleştirilen deneylerde hareketli tanenin, önünde bulunan sabit taneler üzerinden dönerek konumunu değiştirdiği an, tane hareketi başlangıcı olarak tanımlanmaktadır. Tanelerin hareket ettikten sonra izlediği yörünge bu çalışma kapsamında araştırılmamış olsa

da yapılan gözlemlere yer verilmiştir. Tüm deneyler için tanenin hareketine başladıktan sonra durmadan ağza doğru ilerlediği görülmüştür. Su alma ağzından kaynaklı akımların üniform olmayan, ağza doğru gittikçe hızlanan bir akım türü olduğu düşünüldüğünde tanenin hareket ettikten sonra herhangi bir konumda durmaması beklenen bir durumdur.

Deneyler esnasında yapılan gözlemler tanenin hareketinden önce iki farklı davranışta bulunabildiğini ortaya koymuştur. İlk durum tanenin konumunu değiştirmeden bulunduğu yerde dönme hareketi gerçekleştirmesidir. Bu gözlem bir sonraki başlık olan tane hareketinin teorik analizi kısmında detayları aktarılan, tanenin dönmesinden kaynaklı kaldırma kuvveti bileşenin etkili olabileceğini göstermektedir. İkinci durum ise tanenin konumunu değiştirmeden ve az önce bahsedildiği gibi kendi eksenini etrafında bir dönme hareketinde bulunmadan salınma veya titreşim olarak tarif edilebilecek davranıştır. Bu iki durum da gözlemlendiği takdirde en az 120 saniye ağızdan alınan debi değiştirilmeden sabit tutulmuş, hareketin başlaması beklenilmiştir. Hareket gerçekleşmediği takdirde debi artırılarak (yaklaşık %1-2) önceden bahsedilen adımlar tekrarlanmıştır.

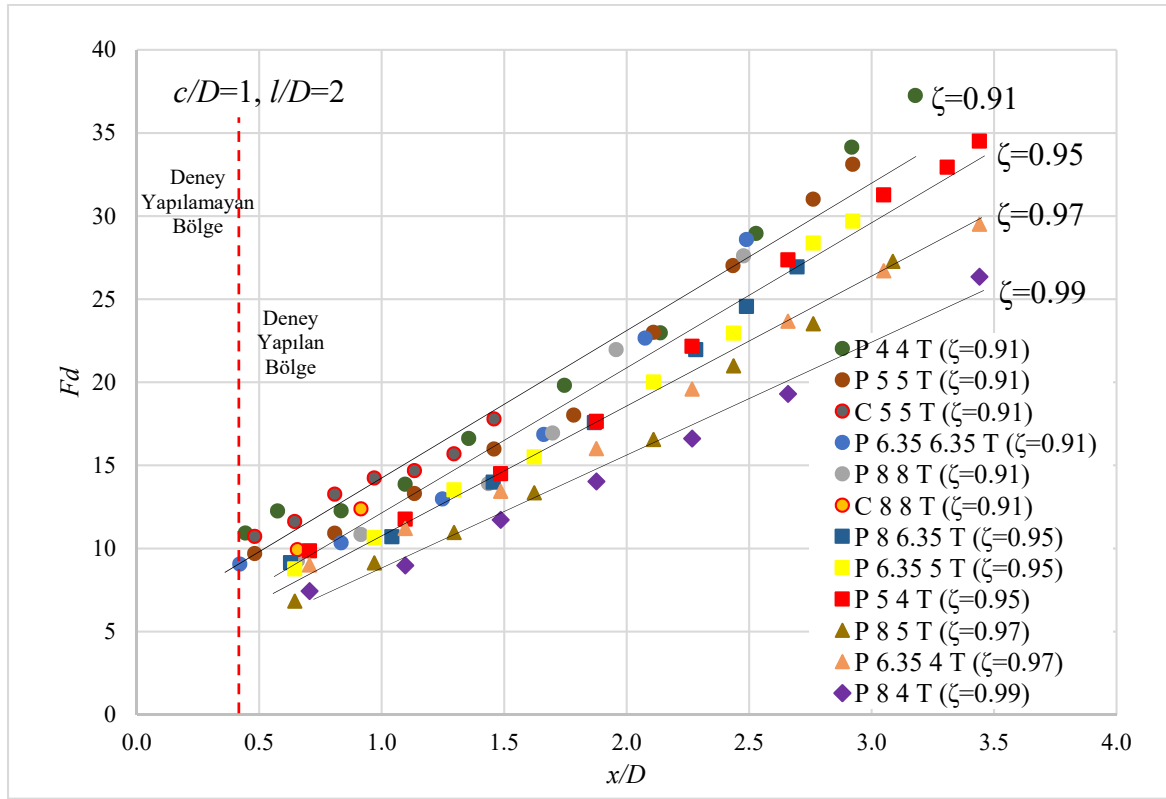
Gerçekleştirilen deneylerin tamamında ağzın tabana veya ölü son duvarına olan mesafelerinden bağımsız, hareketli tanenin önündeki sabit tane üzerinden dönerek ve onu aşarak harekete başladığı gözlemlenmiştir. Taneye kaldırma kuvveti de etki etmekle birlikte, bu kuvvetin tanenin olduğu yerden havalanarak akım içerisinde süzülme hareketi yapmasına yetecek büyüklükte olmadığı gözlemlenmiştir. Hareketli tane önündeki sabit taneyi aştıktan sonra hızlanarak ağza doğru ilerlemekte, bu esnada tabandaki diğer tanelerle girdiği sekme veya çarpma gibi rastlantısal ilişkiler ve F_d değerinin büyüklüğüne bağlı olarak ağza yakın bölgelerde havalanabilmekte ve yüksek olasılıkla ağza giriş yapmaktadır. Hareket eden tane akım içerisinde süzülme hareketi gerçekleştirmeden sabit taneler üzerinde yuvarlanarak hareket ettiği durumda ise ağız altına ($x/D = 0$) ulaşmaktadır. Bu noktada tanenin ağza girip girmemesinde, ağız altında gözlemlenen yüzey altı çevrintilerin şiddeti belirleyici olmaktadır. Çevrintilerin kuvveti tane ağırlığı yenebilecek düzeyde olduğu takdirde tane sarmal bir yörünge takip ederek ağza girmektedir. Öte yandan tanenin hareketi boyunca ağız merkez eksenini üzerinde ilerlediği gözlemlenmiştir. Hareket eden tanenin ağza girme oranı da farklı c/D ve l/D parametreleri için ilerleyen başlıklarda sunulmuştur.

Şekil 3.4, $c/D = 1$, $l/D = 0$ düzeneği için aynı çap, farklı malzeme ve yerleşimlerdeki tanelerin harekete başladıkları konumları ve ilgili F_d değerlerini göstermektedir. Şekil 3.4 içerisinde farklı renklerde (●) simgesi ile Tek tane yerleşimi, farklı renklerdeki (x) simgesi ile Çift tane yerleşimi görülmektedir. Şekil 3.4 incelendiğinde aynı F_d değerinde Çift yerleşime sahip tanelerin ağza göre daha uzak x/D mesafelerinden veya aynı x/D konumunda daha düşük F_d değerlerinde harekete başlayabildiği görülmektedir. Çift yerleşimdeki tanelerin akıma maruz kalan yüzey alanlarının tek yerleşimdekilere kıyasla daha yüksek olması bu durumun ana sebebi olmaktadır. Aynı sabit taban ve hareketli tane çapına sahip Tek yerleşimlerinde, ζ katsayısı 0,91 iken, Çift yerleşimlerde bu katsayı 0,98 olmaktadır (Çizelge 3.1). Tane yerleşim katsayısının (ζ), hareketli tanenin akıma maruz kalan dik net izdüşüm alanının, akıma dik toplam izdüşüm alanına olan oranını ifade ettiği unutulmamalıdır. Tek ve Çift yerleşimdeki farklı yoğunluklara sahip POM veya Cam tanelerin uygulanan boyutsuzlaştırma ile aynı doğru üzerine oturduğu ve benzer bir davranış içerisinde olduğu görülmektedir. Öte yandan, deneylerde kullanılan pompa ve sürgülü vana hassasiyeti sebebiyle ağızdan en az 1,1 lt/s miktarında debi alınabilmektedir. Bu sebeple ağza en yakın, $x/D=0,6-0,7$ konumlarında tane deneyleri gerçekleştirilebilmiştir.



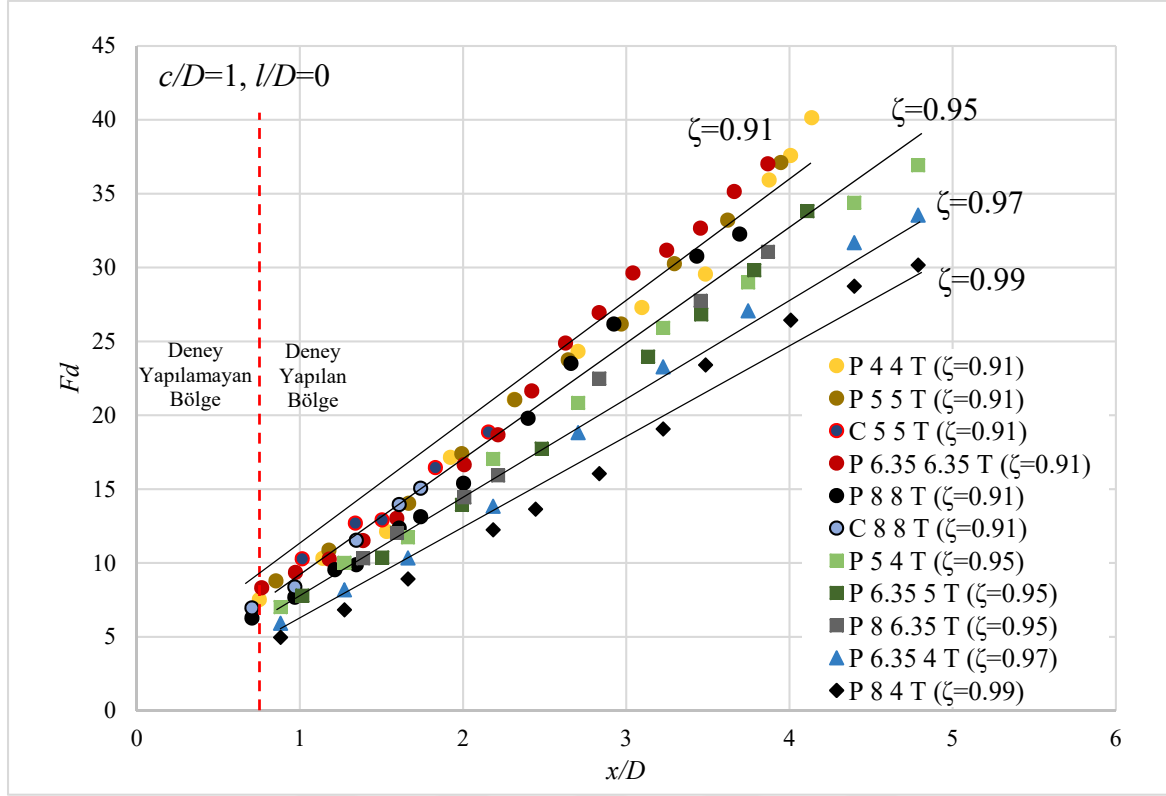
Şekil 3.4. $c/D=1$, $l/D=0$ düzeneği için tane hareketi

Şekil 3.5 ise Tek yerleşime sahip ve tabandaki sabit tanelerle aynı veya farklı çaplardaki tanelerin hareket durumlarını (a) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$) deney düzenekleri için göstermektedir. Şekil 3.5 incelendiğinde sunulan farklı yerleşimlerin aslında dört farklı doğru meydana getirdiği görülmektedir. Bu doğruları meydana getiren (●) simgesi için $\zeta=0,91$, (■) simgesi için $\zeta=0,95$, (▲) simgesi için $\zeta=0,97$ ve (◆) simgesi için $\zeta=0,99$ olmaktadır.



(a)

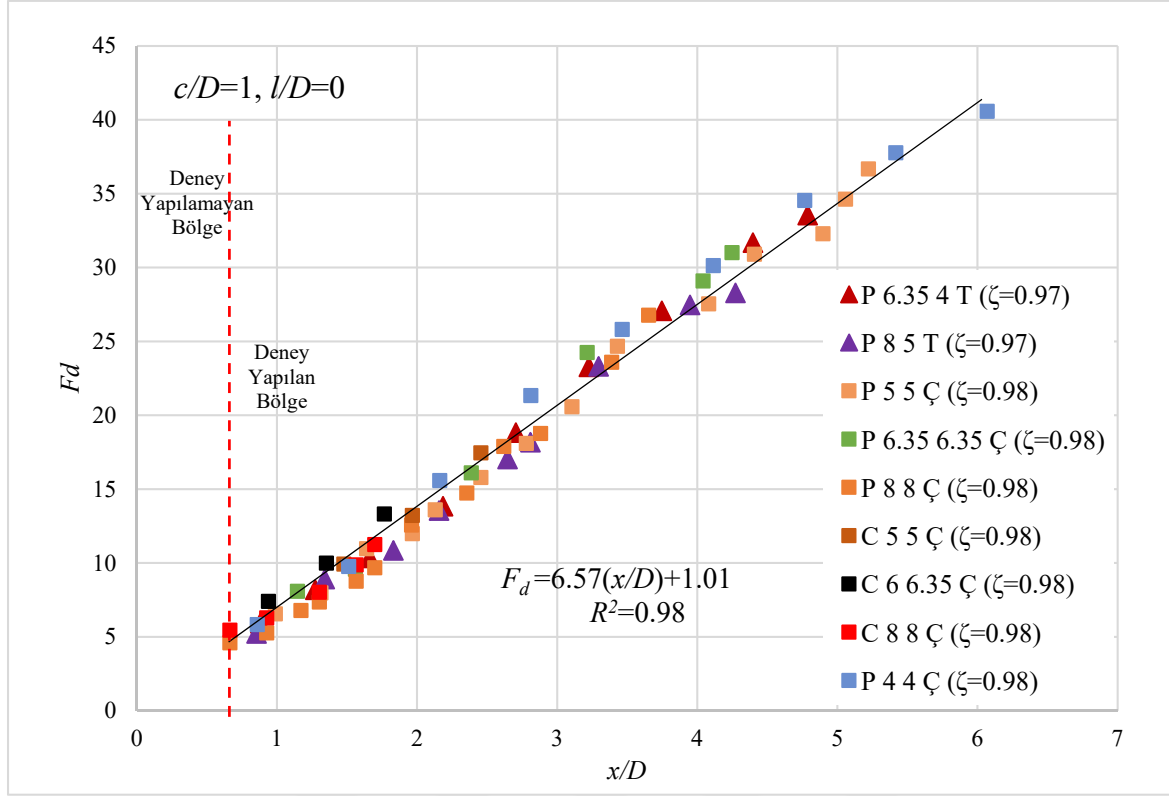
Şekil 3.5. Farklı deney düzenekleri için tane hareketi (a) $c/D=1, l/D=2$ (b) $c/D=1, l/D=0$



(b)

Şekil 3.5. (devam) Farklı deney düzenekleri için tane hareketi (a) $c/D=1$, $l/D=2$ (b) $c/D=1$, $l/D=0$

Şekil 3.4 ve 3.5 birlikte incelendiğinde ağız akımı altında tanenin harekete başlamasında, tanenin akıma maruz kaldığı yüzey alanının en büyük öneme sahip olduğu görülmektedir (su alma ağız konumu ve densimetrik Froude sayısı sabit olduğunda). Sunulan yerleşimlerin hepsinde, hareketli tanenin merkeziyle dönme noktası arasındaki mesafe (kuvvet kolu) birbirinden farklı olmaktadır. Ancak benzer yüzey alan katsayısına sahip tanelerin farklı çaplarda dahi olsa aynı eğriyle (hatta doğruyla) ifade edilebildiği ve tanenin harekete başlamasının, tanenin ağızdan olan mesafesiyle doğrusal değiştiği görülmektedir. Şekil 3.6 üzerinden sunulan veriler de bu bulguyu desteklemektedir. $c/D = 1$, $l/D = 0$ düzeneği için farklı çaplardaki Tek veya Çift yerleşimde olan ancak benzer ζ değerine sahip tanelerin benzer bir eğilime sahip olduğu görülmektedir. Çizelge 3.4, Şekil 3.5'te sunulan farklı düzenekler için doğru denklemleri ve R^2 değerlerini göstermektedir.



Şekil 3.6. $c/D=1, l/D=0$ düzeneği için $\zeta=0,97$ ve $0,98$ parametresinde tane hareketi

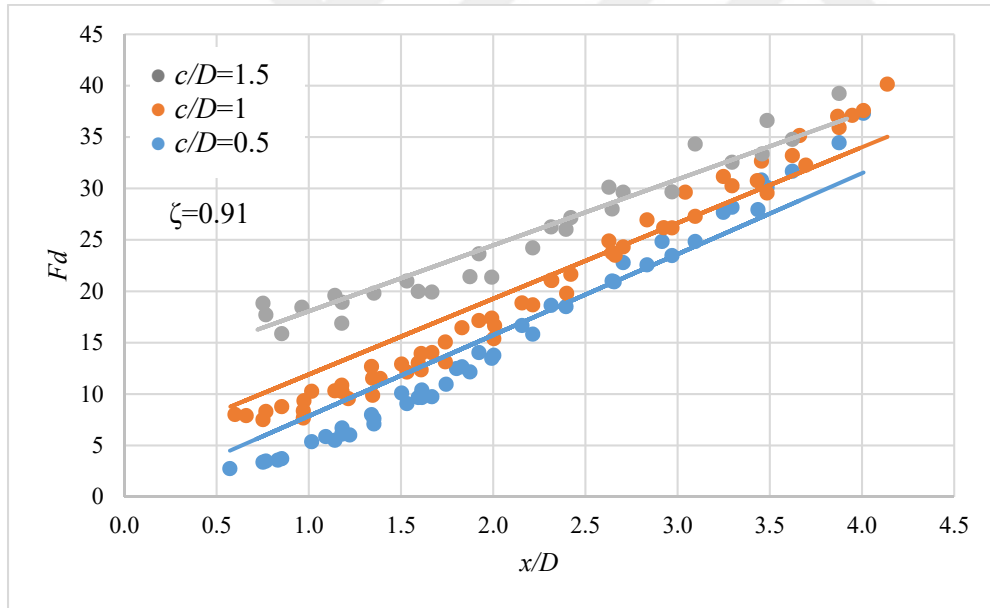
Çizelge 3.4. Farklı c/D ve l/D değerleri için hareket konumlarını birleştiren doğru denklemleri

$c/D=1, l/D=2$				$c/D=1, l/D=0$			
Simge	ζ	Doğru Denklemi	R^2	Simge	ζ	Doğru Denklemi	R^2
●	0,91	$F_d=8.27(x/D)+5.63$	0,94	●	0,91	$F_d=7.37(x/D)+4.55$	0,93
■	0,95	$F_d=9.37(x/D)+1.46$	0,98	■	0,95	$F_d=7.05(x/D)+1.83$	0,98
▲	0,97	$F_d=8.07(x/D)+1.47$	0,98	▲	0,97	$F_d=6.57(x/D)+1.01$	0,98
◆	0,99	$F_d=6.82(x/D)+1.71$	0,99	◆	0,99	$F_d=6.21(x/D)+0.10$	0,98

3.3.2. Su alma ağzının tabana olan mesafesinin tane hareketine etkisi

Bu başlık altında su alma ağzının tabana olan mesafesinin (c/D) tane hareket başlangıcına olan etkisi incelenmektedir. Ağzın ölü son duvarına olan mesafesi sabit tutularak ($l/D = 0$), $c/D = 0,5; 1; 1,5; 2$ düzeneğinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Ancak $c/D = 2$ deney düzeneğinde incelenen debi aralığında ağza en yakın konumlarda dahi tane hareketi gözlemlenmemiştir.

Şekil 3.7 farklı c/D düzenekleri için tane hareketinin gerçekleştiği konum ve F_d bilgilerini sunmaktadır. c/D etkisinin tek başına incelenebilmesi için deneylerde yerleşim katsayısı $\zeta=0,91$ olarak sabit tutulmuştur. Şekil 3.7 su alma ağzının tabana olan mesafesinin artmasının, tanenin harekete geçmesi için ağızdan çekilmesi gereken debinin de artması gerektiğini göstermektedir. Ancak bu artış miktarı ağza yakın konumlarda daha yüksek olmakla birlikte ağızdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Ağızdan kanal boyunca uzaklaştıkça taneyi harekete geçirmeye çalışan debi, farklı c/D değerleri için birbirine yakın sonuçlar vermeye başlamaktadır. Hareket konumlarını birleştiren doğruların eğimleri incelendiğinde de bu sonuç görülmektedir. Çizelge 3.5 farklı c/D değerleri için doğru denklemleri ve R^2 değerlerini göstermektedir. Şekil 3.7 incelendiği takdirde de $x/D < 1$ bölgesinde deneysel verilerin, sunulan doğru denklemleri sonuçlarından daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bahsedilen sebeple doğru denklemlerinin $x/D < 1$ bölgesinde daha yüksek hata barındırabileceği görülmektedir.



Şekil 3.7. Tane hareketine c/D etkisi

Çizelge 3.5. Farklı c/D değerleri için hareket konumlarını birleştiren doğru denklemleri

Düzenek	Doğru Denklemi	R^2	Geçerlilik Aralığı
$c/D=0,5$	$F_d=7.88(x/D)$	0,93	$0,60 < x/D < 4,01$; $2,7 < F_d < 37,3$
$c/D=1$	$F_d=7.37(x/D)+4.55$	0,93	$0,60 < x/D < 4,14$; $7,9 < F_d < 40,1$
$c/D=1,5$	$F_d=6.42(x/D)+11.65$	0,94	$0,75 < x/D < 3,88$; $15,9 < F_d < 39,2$

Çizelge 3.6 ise c/D değişiminin farklı konumlardaki tane hareketine etkisini nicel olarak ortaya koymaktadır. $x/D = 1$ gibi ağza yakın konumlarda $c/D = 0,5$ için $F_d = 5,4$ iken, $c/D = 1,5$ için bu değer 18,4'e çıkmakta ve tanenin harekete geçmesi için gerekli olan F_d değerini yaklaşık 3,4 kat artırmaktadır. Bu durum, su alma ağzının tabandan uzaklaştırılmasının, ağza yakın bölgelerde akımın taneyi harekete geçirme kapasitesini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Ancak, x/D mesafesi büyüdükçe c/D etkisi giderek zayıflamakta; örneğin $x/D = 3$ konumunda F_d değerleri 23,5 ($c/D = 0,5$), 26,2 ($c/D = 1$) ve 29,7 ($c/D = 1,5$) olup birbirine oldukça yakın seyretmektedir. Dolayısıyla, ağız ve kanal tabanı arasındaki mesafe özellikle ağza yakın konumlarda belirleyici olurken, uzak mesafelerde bu etkinin büyük ölçüde azaldığı görülebilmektedir.

Çizelge 3.6. c/D değişiminin farklı konumlarda tane hareketine etkisi

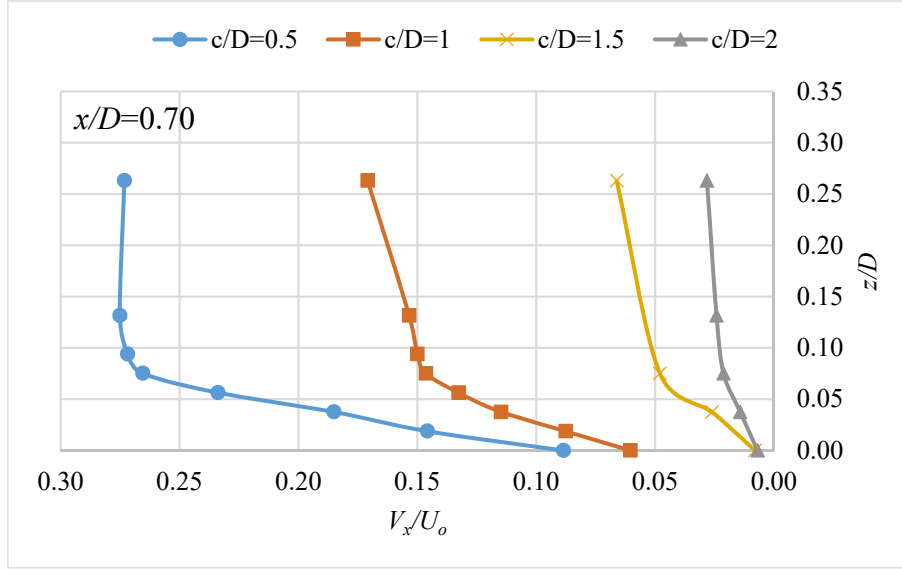
$c/D=0,5$		$c/D = 1$		$c/D = 1,5$	
x/D	F_d	x/D	F_d	x/D	F_d
1	5,4	1	9,4	1	18,4
2	13,8	2	16,6	2	21,4
3	23,5	3	26,2	3	29,7
3,4	27,9	3,5	29,5	3,3	32,5

Deneyler esnasında incelenen bir diğer durum ise tanenin harekete başladıktan sonra ağza girip girmemesi olmuştur. Ağzın tabanda yer aldığı $c/D = 0,5$ düzeneğinde harekete başlayan tanelerin tamamı ağız tarafından çekilmiştir. $c/D = 1$ düzeneği için ise hareket eden tanelerin %12'si ağza girmeden ölü son duvarına bitişik bir halde kalmıştır. Bu taneler için $F_d = 5-8$ aralığında olmaktadır. Ağzın tabana olan mesafesi $c/D = 1,5$ mertebesine getirildiğinde ise hareket eden tanelerin %20'sinin ağza girişi gerçekleşmemiştir. Bu taneler için $F_d = 15-26$ aralığında olmaktadır. Ancak belirtilen F_d değerlerinin tanenin ağza girip girmemesi açısından kesinlik barındırmadığı unutulmamalıdır. Örneğin taban ve hareketli tane çapının aynı olduğu bir deney düzeneğinde $F_d = 18$ değeri için ağza giriş yaşanırken, $F_d = 21$ değerine ulaşılmasına rağmen ağza girişin olmayışı da gözlemlenmiştir. Bu durum, hareketli tanenin önündeki sabit tane üzerinden dönerek harekete başlaması sonrasında yaşanabilecek çarpma ve zıplama gibi rastgele etkilerden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.8 farklı c/D düzeneği için ağza girme oranlarını özetlemektedir.

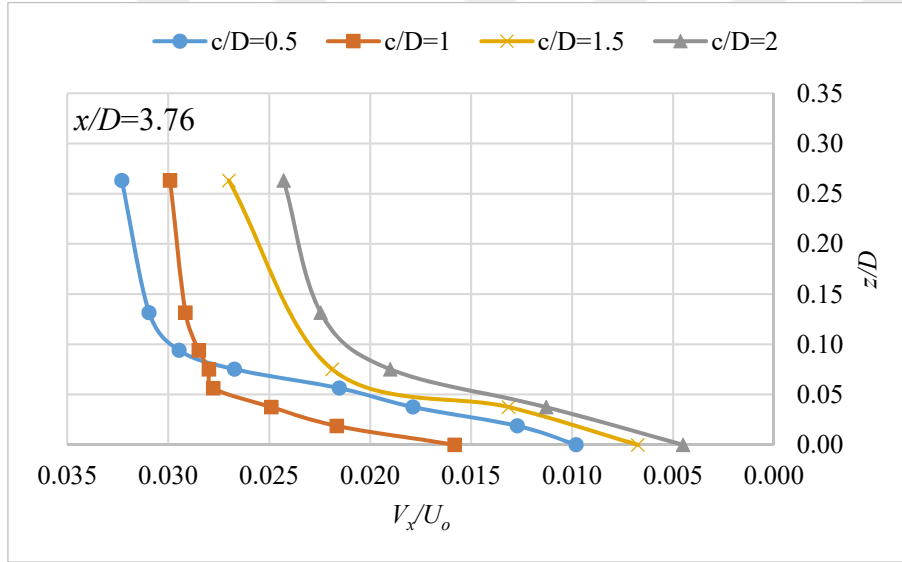


Şekil 3.8. Farklı c/D düzeneklerinde hareketli tanenin ağza girme oranları

Öte yandan tanenin ağza olan mesafesinin $x/D = 3$ değerini aşmasıyla beraber, tane hareketinde c/D etkisinin ortadan kalkmaya başladığı görülmektedir. Bu noktada ağız akımından kaynaklanan, tabana yakın bölgede taneye etki eden hız dağılımı önem kazanmaktadır. Şekil 3.9 (a) ağza yakın konum olan $x/D=0,70$, (b) ise taneye uzak konum olan $x/D=3,76$ için $z/D=0-0,30$ aralığında x yönündeki hız dağılımını (V_x) farklı c/D düzenekleri için ortaya koymaktadır. Şekilden görüldüğü üzere ağzın tabana en yakın yerleşimi olan $c/D=0,5$ için akım sınır etkileri dolayısıyla yüksek hızlar görülmektedir. Ağzın tabana olan mesafesi arttırılıp akım sınır etkilerinin etkisi azaldıkça ise oluşan hızlar da azalmaktadır. Ancak kanal boyunca ağızdan uzaklaşıldığı takdirde oluşan hızların c/D etkisinden bağımsız olarak benzer profiller oluşturmaya başladığı görülmektedir. Bu durum da az önce bahsedilen tane hareketinde c/D etkisinin ortadan kalkmaya başlaması durumunun sebebini yansıtmaktadır.



(a)



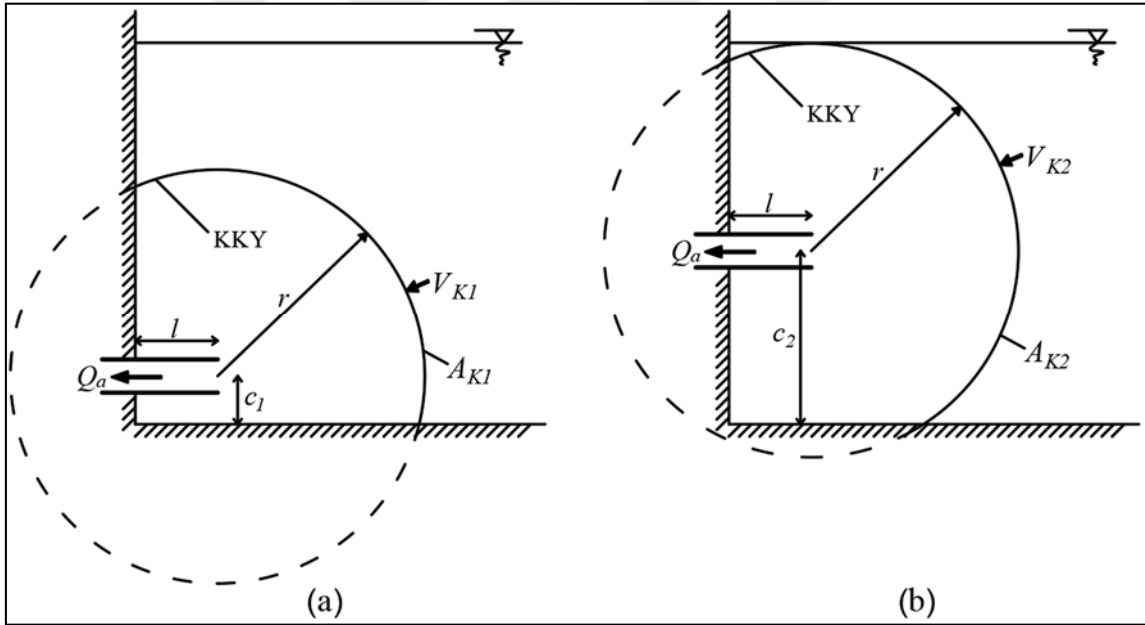
(b)

Şekil 3.9. Farklı c/D düzeneklerinde taneye etki eden x yönündeki hız dağılımı (a) $x/D=0,70$, (b) $x/D=3,76$

Bu aşamada akım sınırlarının su alma ağzlarından kaynaklı hız dağılımına olan etkilerinden bahsetmek gerekmektedir. Su alma ağzı dolayısıyla akım içerisinde, potansiyel akım yaklaşımı gereğince hayali küresel kuyu yüzeyleri (KKY) oluşacağı kabul edilmektedir (Yıldırım ve Kocabaş, 1995). Merkezi ağız merkeziyle aynı olan KKY üzerinden geçen debi kütlenin korunumu kanunu dolayısıyla ağızdan geçen debiye eşit olmaktadır. Dolayısıyla ağızdan geçen debi (Q_a) Eş. 3.5 ile ifade edilebilmektedir.

$$Q_a = A_K V_K \quad (3.5)$$

Eş. 3.5'te A_K net KKY alanını, V_K ise KKY üzerinde meydana gelen radyal hızı göstermektedir. A_K hesaplanırken akım sınırları dolayısıyla dışarıda kalan alan, toplam KKY alanından çıkarılmaktadır. Şekil 3.10(a) üzerinden gösterilen yerleşimde, ağzın tabana olan mesafesi (c_1), Şekil 3.10(b)'de gösterilen yerleşime göre (c_2) daha az olmaktadır. Bu sebeple $A_{K1} < A_{K2}$ dolayısıyla da oluşan hızlar $V_{K1} > V_{K2}$ olmaktadır. Özetle ağzın akım sınırlarına olan mesafesinin azalması, sınır etkilerini ve dolayısıyla oluşacak hızları arttırmaktadır. Tanenin ağız akımı etkisi altında hareketi söz konusu olduğunda ise, ağız akım sınırlarından uzaklaştıkça (örneğin kanal tabanından) aynı konumdaki tanenin harekete geçmesi için ihtiyaç duyulan debi miktarı artmaktadır. Bu noktada yapılan açıklamalar ağzın ölü son duvarıyla olan mesafesi açısından da geçerli olmaktadır.

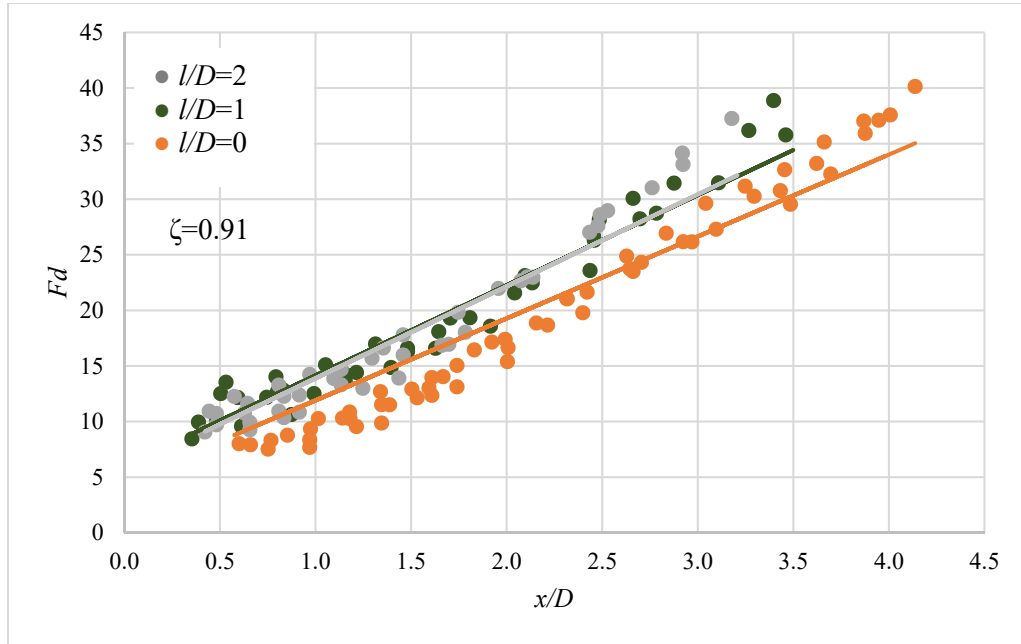


Şekil 3.10. Farklı akım sınırları için oluşacak radyal hızlar

3.3.3. Su alma ağzının ölü son duvarına olan mesafesinin tane hareketine etkisi

Bu başlık altında ise su alma ağzının ölü son duvarına olan mesafesinin (l/D) tane hareket başlangıcına olan etkisi incelenmektedir. Ağızın tabana olan mesafesi sabit tutularak ($c/D = 1$), $l/D = 0, 1, 2$ düzeneklerinde deneyler gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.11 farklı l/D düzenekleri için tane hareketinin gerçekleştiği konum ve F_d bilgilerini sunmaktadır. l/D etkisinin tek başına incelenebilmesi için deneylerde yerleşim katsayısı $\zeta = 0,91$ olarak sabit tutulmuştur. Su alma ağzının ölü son duvarına olan mesafesinin artması c/D değişimindekine benzer şekilde, tanenin harekete geçmesi için ağızdan çekilmesi gereken debinin de artması gerektiğini göstermektedir. Ancak Şekil 3.11’de $l/D = 1$ ve $l/D = 2$ sonuçları incelendiğinde, ağız merkezinin ölü son duvarına olan mesafesinin $l = 1D$ artışından sonra tane hareketini anlamlı bir boyutta etkilemediği görülmektedir. Hareket konumlarını birleştiren doğrular incelendiğinde de bu sonuç görülmektedir. Çizelge 3.7 farklı l/D değerleri için doğru denklemleri ve R^2 değerlerini göstermektedir.



Şekil 3.11. Tane hareketine l/D etkisi

Çizelge 3.7. Farklı l/D değerleri için hareket konumlarını birleştiren doğru denklemleri

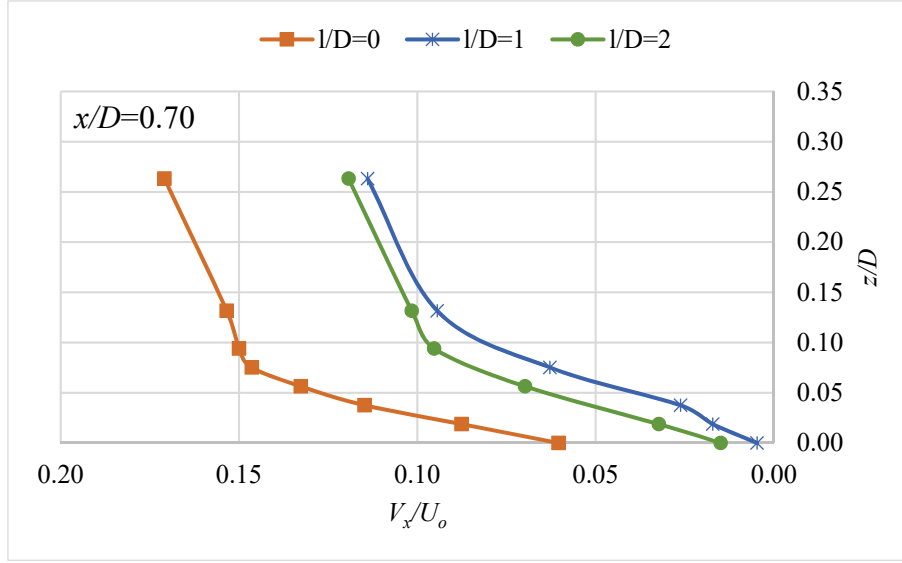
Düzenek	Doğru Denklemi	R^2	Geçerlilik Aralığı
$l/D=0$	$F_d=7.37(x/D)+4.55$	0,93	$0,60 < x/D < 4,14$; $7,9 < F_d < 40,1$
$l/D=1$	$F_d=8.11(x/D)+6.05$	0,95	$0,35 < x/D < 3,46$; $8,4 < F_d < 38,9$
$l/D=2$	$F_d=8.27(x/D)+5.63$	0,94	$0,42 < x/D < 3,18$; $9,1 < F_d < 37,3$

Çizelge 3.8, l/D değişiminin farklı konumlardaki tane hareketine etkisini nicel olarak ortaya koymaktadır. $l/D = 0$ düzeneğinde $x/D = 1$ konumunda tane hareketi için gerekli F_d değeri 9,4 iken, $l/D = 1$ ve $l/D = 2$ için bu değerler yaklaşık %30 daha yüksektir. Benzer şekilde x/D mesafesi arttıkça $l/D = 1$ ve $l/D = 2$ için F_d değerlerinin $l/D = 0$ 'a göre sürekli daha yüksek kaldığı görülmektedir; örneğin $x/D = 3,5$ konumunda $l/D = 0$ için $F_d = 29,5$ iken, $l/D = 1$ ve $l/D = 2$ durumlarında F_d 'nin yine yaklaşık %30 daha yüksek değerlere ulaştığı anlaşılmaktadır. Farklı l/D oranları için $F_d - x/D$ eğiminin büyük ölçüde benzer olması, ölüsön duvarına olan mesafe arttıkça taneyi harekete geçirme eşiğinin yükseldiğini, ancak $l/D = 1$ ve $l/D = 2$ için bu etkinin x/D boyunca yaklaşık sabit bir oranla korunduğunu göstermektedir.

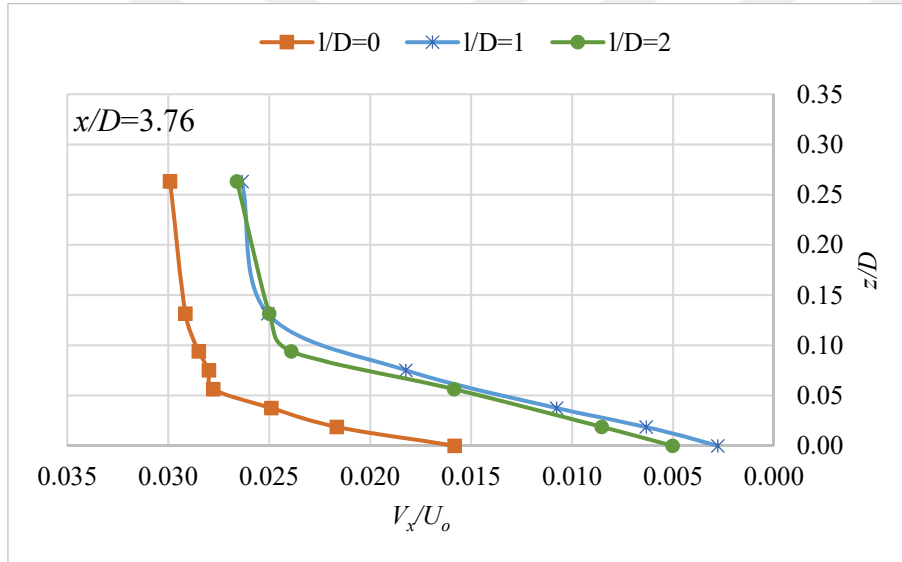
Çizelge 3.8. l/D değişiminin farklı konumlarda tane hareketine etkisi

$l/D=0$		$l/D=1$		$l/D=2$	
x/D	F_d	x/D	F_d	x/D	F_d
1	9,4	1,1	12,5	0,9	12,4
2	16,6	2	21,6	2,1	22,7
3	26,2	3,1	31,9	2,9	34,2
3,5	29,5	3,4	38,9	3,2	37,3

Şekil 3.12(a) ağza yakın konum olan $x/D=0,70$, (b) ise taneye uzak konum olan $x/D = 3,76$ için $z/D = 0-0,30$ aralığında x yönündeki hız dağılımını farklı l/D düzenekleri için ortaya koymaktadır. Akım sınır etkilerinin en fazla olduğu $l/D = 0$ düzeneğinde en yüksek hızlar görülürken, sınır etkilerinin azaldığı $l/D = 1$ ve 2 için daha düşük hızlar oluşmaktadır. Ancak Şekil 3.12 incelendiği takdirde $l/D = 1$ ve 2 için taneye etki eden hız dağılımının kanal boyunca konumdan bağımsız olarak benzerlik gösterdiği görülmektedir. Tane hareketi açısından görülen benzer davranışın sebebinin, sunulan hız dağılımı olduğu görülmektedir.



(a)

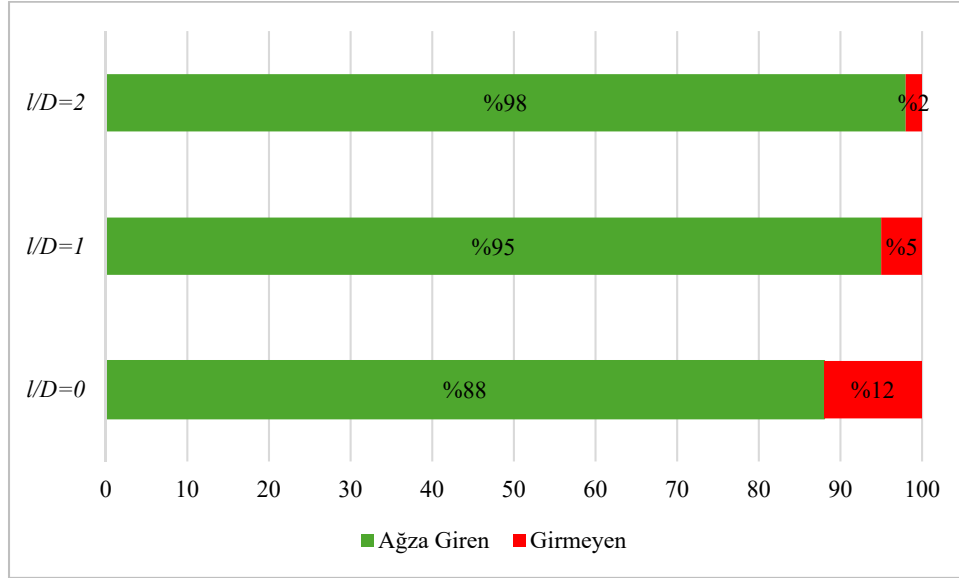


(b)

Şekil 3.12. Farklı l/D düzeneklerinde taneye etki eden x yönündeki hız dağılımı (a) $x/D=0,70$, (b) $x/D=3,76$

$l/D = 0$ düzeneği için hareket eden tanelerin %12'si hareket edip ağza girmeden durmuştur. Bu taneler için $F_d = 5-8$ aralığında olmaktadır. $l/D = 1$ düzeneği için ise hareket ağza girmeme oranı %5'tir. Bu taneler için $F_d = 7-9$ aralığında olmaktadır. $l/D = 2$ düzeneği için ise bu oran %2 olmaktadır ve $F_d = 8-10$ aralığındadır. Şekil 3.13'ten de görüldüğü üzere, ağız ölü son duvarı üzerinde yer aldığı durumdan ($l/D=0$), duvarla arasında mesafe olan konumuna getirildiğinde ($l/D = 1$) daha çok tanenin ağza girdiği gözlemlenmiştir. Bu durum ölü son duvarından kaynaklı sürtünme etkilerinin oluşan yüzey altı çevrintilerinin gücünü azaltmasından kaynaklanmaktadır. Literatürdeki ağız akımından kaynaklı oyulma

ve ağza hava girişi çalışmalarında ortaya konulan sonuçlar, deneylerde gözlemlenen bu durumu desteklemektedir (Yıldırım, Eroğlu ve Taştan, 2012; Taştan, 2017; Taştan ve diğerleri, 2023).

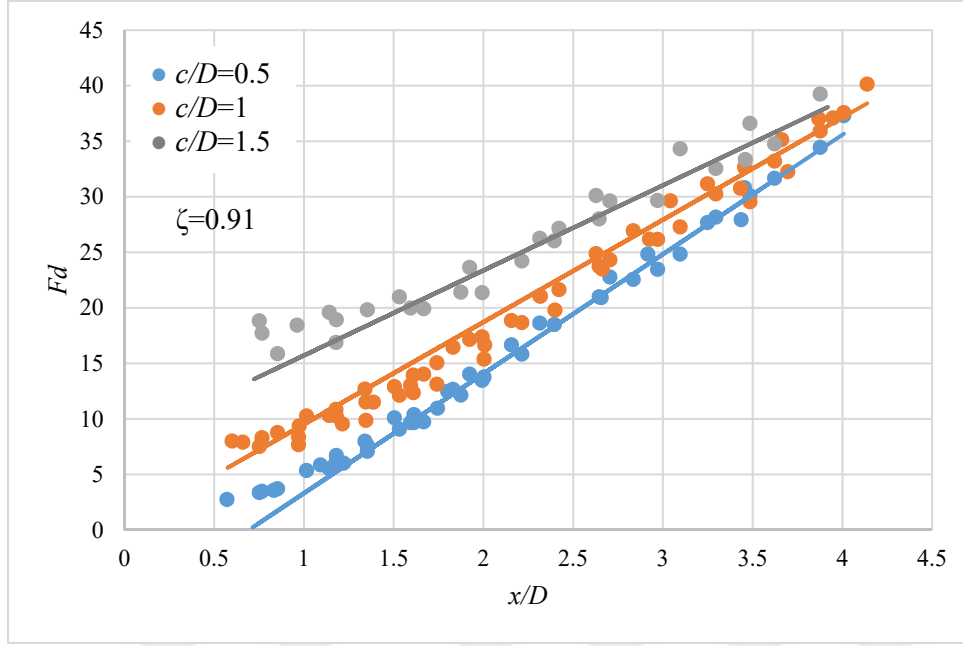


Şekil 3.13. Farklı l/D düzeneklerinde hareketli tanenin ağza girme oranları

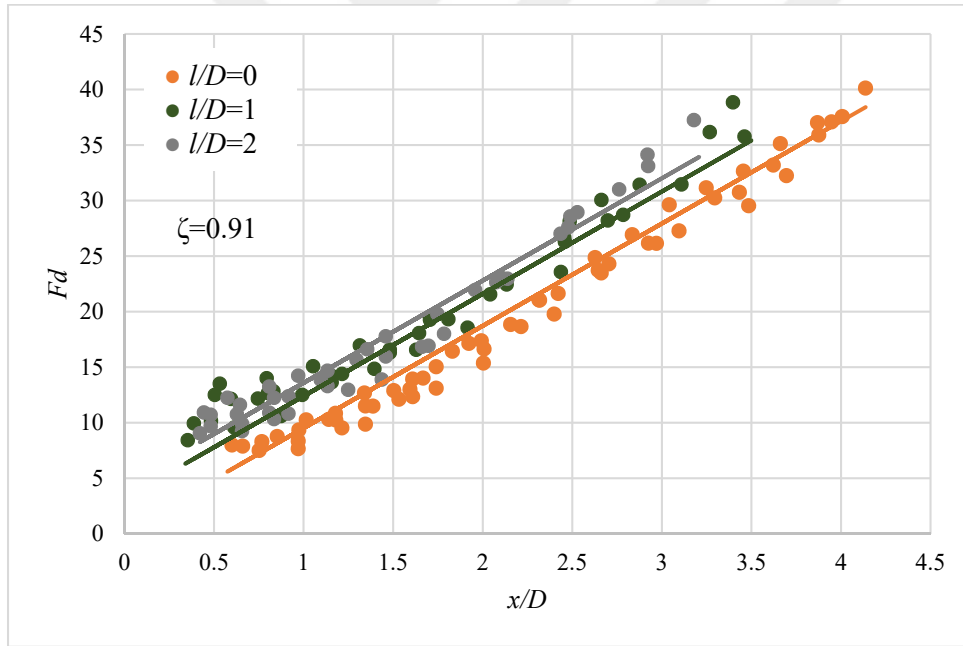
Eş. 3.6 ise tüm deneysel verilerin SPSS yazılımı kullanılarak çoklu regresyon analizi neticesinde elde edilen ampirik denklemi göstermektedir. Eşitlik ile su alma ağzının akım sınırlarına olan tüm mesafeleri için sediment tanesinin harekete başlama koşulu tanımlanmaktadır.

$$F_d = \beta_0 + \beta_1(c/D) + \beta_2\sqrt{(l/D)} + [\beta_3 + \beta_4(c/D)](x/D) \quad (3.6)$$

Eş. 3.6 içerisinde $\beta_0 = -15,712$; $\beta_1 = 15,486$; $\beta_2 = 2,889$; $\beta_3 = -12,303$; $\beta_4 = -3,094$ değerlerini almakta ve $R^2 = 0,97$ olmaktadır. Şekil 3.14 ise deneysel veriler ve Eş. 3.6 karşılaştırmasını (a) c/D (b) l/D değişimi için göstermektedir. Eş. 3.6'nın geçerlilik aralığının $0,35 < x/D < 4,14$ ve $2,7 < F_d < 40,1$ olduğu ve $\zeta = 0,91$ seçildiği unutulmamalıdır.



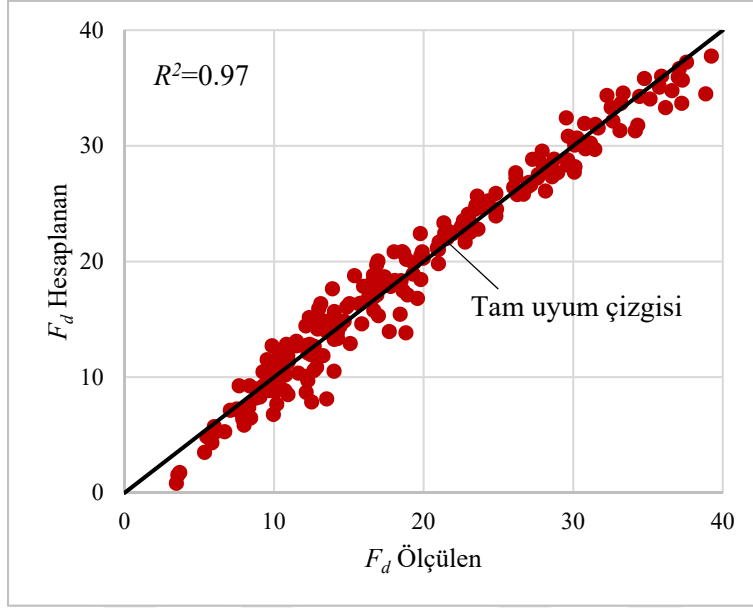
(a)



(b)

Şekil 3.14. Deneysel veriler ve Eş. 3.6 karşılaştırması (a) c/D (b) l/D değişimi

Şekil 3.15 oluşturulan ampirik denklemden elde edilen sonuçlarla deneylerde ölçülen verilerin uyumunu araştırmaktadır. Değerler arasındaki uyumu ifade eden R^2 değerinin 0,97 olarak bulunması Eş. 3.6'nın su alma ağzı akımı etkisi altında sediment tanesinin hareketini, belirtilen sınırlar içerisinde, akım sınır etkilerini dahil edecek şekilde ifade etmekte kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 3.15. Deney sonuçlarının Eş. 3.6 ile uygunluğunun incelenmesi

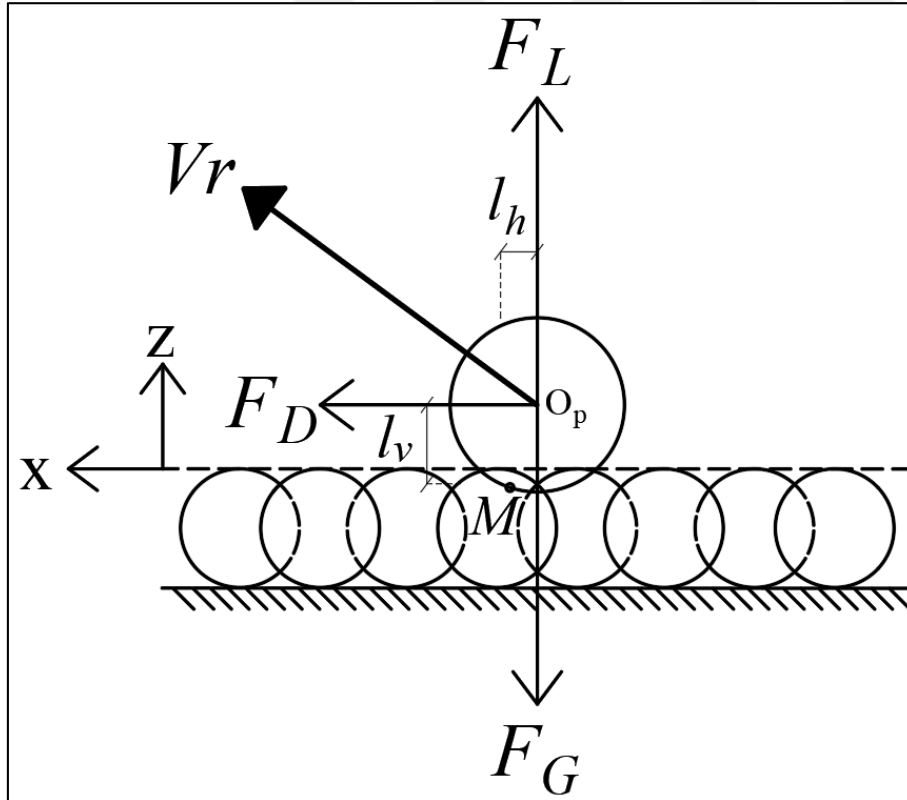
Yukarıda sunulan veriler, su alma ağzı akımı etkisi altında sediment tanesinin harekete başlama koşullarını etkileyen parametreleri deneysel çalışmalar sonucunda ortaya koymuştur. İzleyen bölümde, bu deneysel verilerin altında yatan fiziksel mekanizmaların daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla gerçekleştirilen teorik analizler sunulmuş, elde edilen bulgular deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir

4. SU ALMA AĞZI AKIMI ETKİSİNDEKİ TABAN SEDİMENTİNİN HAREKETE BAŞLAMASININ TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Bu başlık içerisinde su alma ağzı akımı etkisi altında, kanal tabanındaki sabit taneler üzerinde serbest olarak bulunan küresel bir tanenin harekete başlama koşullarının teorik olarak incelenmesi aktarılmıştır. Taneye etki eden kuvvetler ortaya konarak tanenin harekete başlama koşulu, bu kuvvetlerin oluşturduğu eşitlikler yardımıyla ifade edilmiş ve Bölüm 3’te sunulan deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

4.1. Taneye Etki Eden Kuvvetler

Su alma ağzı akımı etkisi altında, kanal tabanındaki sabit taneler üzerinde serbest halde bulunan küresel sediment tanesine etkiyen kuvvetler Şekil 4.1’de ve Eş. 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Sediment tanesine etki eden kuvvetler

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D U_m^2 A_{et} = C_D \frac{\pi}{8} d^2 \rho_w U_m^2 \zeta \quad (4.1a)$$

$$F_L = F_{LS} + F_{Lm} + F_{LI} \quad (4.1b)$$

$$F_G = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^3 (\rho_s - \rho_w) g = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho_w) g \quad (4.1c)$$

Şekil 4.1’de V_r ağız akımından kaynaklanan ve ağız merkezine doğru yönelen, taneye etki eden radyal hızı, Eş. 4.1’de F_D ve F_L sırasıyla taneyi harekete geçirmeye çalışan sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerini, F_G ise harekete karşı gelmeye çalışan su altındaki batık ağırlık kuvvetini ifade etmektedir. Eş. 4.1 içerisinde C_D sürüklenme katsayısını, A_{et} tanenin akıma dik ve maruz kalan net yüzey alanını, U_m ise tanenin net yüzey alanına etki eden ortalama akım hızını göstermektedir. Bölüm 3’te anlatıldığı üzere ζ ise tanenin akıma maruz kalan net yüzey alanının, tanenin akıma dik toplam yüzey alanına bölünmesiyle elde edilen tane yerleşim katsayısını ifade etmektedir. Tüm tane yerleşimleri için ζ değerleri Autodesk AutoCAD yardımıyla çizim yapılarak hesaplanmıştır (bakınız Çizelge 3.1).

Taneye etkileyen toplam hidrodinamik kaldırma kuvveti (F_L), akımdaki hız gradyanı nedeniyle oluşan kaldırma kuvveti (F_{LS}), tanenin dönme hareketinden kaynaklı Magnus kaldırma kuvveti (F_{LM}) ve ağız akımın oluşturduğu düşey yukarı yönlü hız bileşeninden kaynaklanan kaldırma kuvvetinin (F_{LI}) toplamı olarak ifade edilebilmektedir. Saffman (1965) çalışmasında, viskoz akış içerisinde bulunan bir küreye, hız gradyanından ($\partial V_x / \partial z$) kaynaklı kaldırma kuvvetini Eş. 4.2 ile ifade etmiştir:

$$F_{LS} = C_L \rho_w d^2 U_m \left(v \frac{\partial V_x}{\partial z} \right)^{0.5} \quad (4.2)$$

Saffman çalışmasında, kaldırma katsayısının (C_L) 20,3 olduğunu ve tanenin kendi ekseninde etrafında dönmelerinden kaynaklı meydana gelen kaldırma kuvvetinin, kayma gerilmesi kaldırma kuvvetine göre on kat mertebesinde daha düşük olduğu için ihmal edilebilir olduğunu belirtmiştir (Saffman, 1965). Ancak daha sonra bu katsayı 1,615 olarak düzeltilmiştir (Saffman, 1968). Bu düzeltmenin, dönmeden kaynaklı kaldırma kuvvetini kayma gerilmesi kaldırma kuvveti ile aynı mertebeye getirdiği için etkili olabileceği belirtilmektedir (Ling, 1995). Tanenin üst noktasına etki eden hidrodinamik kuvvetin tane

alt kısımlarındakine kıyasla önemli ölçüde büyük olması, tanenin yeterince yuvarlak olduğu durumlarda dönme hareketinde bulunmasına sebep olabilmektedir (Dey ve Zanke, 2004). Nitekim Bölüm 3'te aktarıldığı üzere gerçekleştirilen deneylerde tanenin kimi durumlarda bu hareketi gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Halow (1973) çalışmasında da türbülanslı akımlarda küresel tanelerin dönme ve yuvarlanma, köşeli tanelerin ise kayma hareketi gösterdiğini belirtmiştir. Üniform akım içerisinde ω açısal hızıyla dönmekte olan bir taneye etki eden kaldırma kuvveti, Magnus etkisinden kaynaklı kaldırma kuvveti (F_{LM}) olarak isimlendirilebilir ve Rubinow ve Keller (1961) tarafından Eş. 4.3a'da ifade edilmiştir:

$$F_{Lm} = C_L \rho_w d^3 U_m \omega \quad (4.3a)$$

Saffman (1965), taneye etki eden maksimum açısal hızın $0.5(\partial V_x / \partial z)$ olduğunu belirtmiştir. Bu sebeple Eş. 4.3a aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$F_{Lm} = 0.5 C_L \rho_w d^3 U_m \frac{\partial V_x}{\partial z} \quad (4.3b)$$

Taneyi etkileyen ağız akımının meydana getirdiği hız yatay ve düşey doğrultuda bileşenlerine ayrılabilir. Dolayısıyla düşey yönlü hız bileşeninden (V_z) kaynaklanan kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvvetine benzer şekilde ifade edilebilmektedir (Eş. 4.4).

$$F_{LI} = C_D \frac{\pi}{8} d^2 \rho_w V_z^2 \zeta \quad (4.4)$$

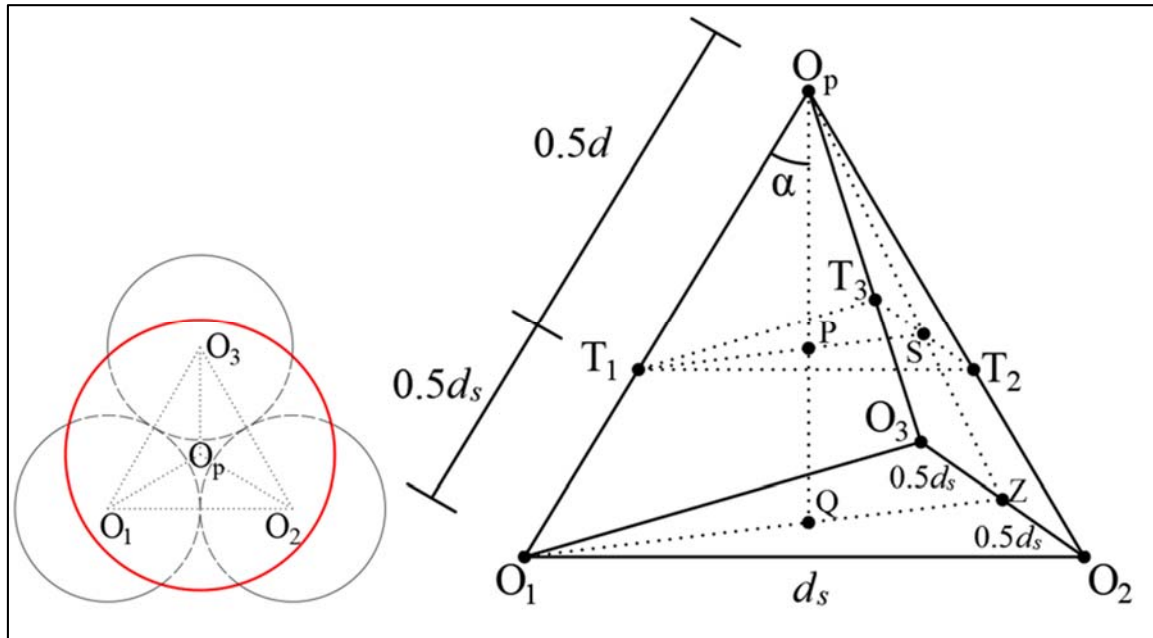
Tanenin harekete başlayacağı kritik durum iki farklı şekilde tanımlanabilir. Tane ya önündeki sabit tanelerle temas ettiği M noktası üzerinden dönerek hareketine başlayacak ya da kaldırma kuvvetinin etkisi dolayısıyla bulunduğu yerden direk havalandırarak akıma karışacaktır (Şekil 4.1). Bölüm 3'te aktarıldığı üzere gerçekleştirilen deneylerin tamamında tanenin dönerek harekete başladığı gözlemlenmiştir. Su alma ağzından kaynaklı oluşan radyal hızların, tanenin direk havalandırarak akıma karışması yerine dönerek hareket etmesine sebep olduğu görülmektedir. Dolayısıyla tanenin M noktasından dönmeye başlayacağı an kritik durum olarak kabul edildiği takdirde Eş. 4.5 yazılabilmektedir:

$$\frac{F_D l_v}{(F_G - F_L) l_h} \geq 1 \quad (4.5)$$

Eş. 4.5 içerisinde l_v dönme noktasına olan düşey, l_h ise dönme noktasına olan yatay kuvvet kolunu göstermektedir (Şekil 4.1).

4.2. Yatay ve Düşey Kuvvet Kollarının Belirlenmesi

Kendisiyle aynı veya farklı çaptaki sabit taneler üzerinde serbest olarak bulunan küresel bir tanenin yerleşimi Şekil 4.2’de gösterilmektedir (Dey, 1999). O_p merkezli serbest tane T_1 , T_2 ve T_3 noktalarından sabit tanelere (O_1 , O_2 ve O_3 merkezli) temas etmekte ve şekilde gösterildiği gibi bir üçgen piramit meydana gelmektedir. Sabit tanelerin çapı d_s ile gösterilmektedir. Dönme eksenini, serbest tanenin tek bir sabit tane arkasına gelecek şekilde yerleştirildiği durumda T_1 noktasında, iki sabit tane arkasına gelecek şekilde yerleştirildiği durumda ise $[T_2 T_3]$ üzerinde bulunur. Bu durumda yatay kuvvet kolu (l_h) sırasıyla $|T_1 P|$ veya $|PS|$ olmaktadır.

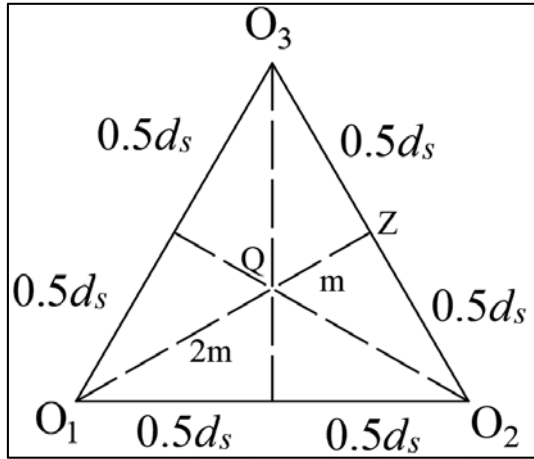


Şekil 4.2. Tane yerleşiminin geometrik gösterimi (Dey, 1999)

Şekil 4.2'den görülebildiği üzere $|T_1P|$ Eş 4.6 ile ifade edilebilir.

$$\sin \alpha = \frac{|T_1P|}{0.5d} = \frac{|O_1Q|}{0.5d + 0.5d_s} \quad (4.6)$$

Şekil 4.3'te gösterilen $O_1O_2O_3$ üçgeni içerisindeki benzerlikten faydalanıldığı takdirde $|O_1Q|$ Eş. 4.7 ile ifade edilebilmektedir.



Şekil 4.3. $O_1O_2O_3$ üçgeni

$$(3m)^2 + (0.5d_s)^2 = d_s^2 \rightarrow |O_1Q| = 2m = \frac{d_s}{\sqrt{3}} \quad (4.7)$$

Tabandaki sabit tanenin çapı (d_s) ile ifade edilebilen $|O_1Q|$ Eş. 4.6 içerisinde yerleştirildiği takdirde, hareketli tanenin önünde tek tane bulunduğu durum için kuvvet kolu ($|T_1P|$) Eş. 4.8 ile gösterilmektedir.

$$l_h = |T_1P| = \sin \alpha \cdot 0.5d = \frac{d_s}{\sqrt{3}} \frac{1}{0.5d + 0.5d_s} \cdot 0.5d = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{dd_s}{d_s + d} \quad (4.8)$$

Şekil 4.2'de gösterilen O_pQZ üçgeni içerisinde kurulan benzerlik ile $|PS|$, Eş. 4.9 ile ifade edilebilmektedir.

$$\frac{|O_pP|}{|O_pQ|} = \frac{|PS|}{|QZ|} \quad (4.9)$$

Eş. 4.9 içerisindeki $|QZ|$, $|O_pQ|$ ve $|O_pP|$ uzunlukları ise Eş. 4.10 ile bulunabilir.

$$|QZ| = m = \frac{d_s}{2\sqrt{3}} \quad (4.10a)$$

$$|O_pQ| = \sqrt{(0.5d_s + 0.5d)^2 - \frac{d_s^2}{3}} \quad (4.10b)$$

$$|O_pP| = \sqrt{(0.5d)^2 - \frac{1}{3} \frac{d_s^2 d^2}{(d_s + d)^2}} \quad (4.10c)$$

Eş. 4.10, Eş. 4.9 içerisine yerleştirilip düzenlenildiği takdirde, hareketli tanenin önünde çift tane bulunduğu durum için kuvvet kolu ($|PS|$) Eş. 4.11 ile gösterilmektedir.

$$l_h = |PS| = \frac{dd_s}{2\sqrt{3}} \frac{1}{(d_s + d)} \quad (4.11)$$

Şekil 4.2’de gösterildiği üzere düşey kuvvet kolu (l_v) ise tanenin yerleşiminden bağımsız olarak $|O_pP|$ olmaktadır (Eş. 4.12).

$$|O_pT_1|^2 = |O_pP|^2 + |T_1P|^2 \quad (4.12)$$

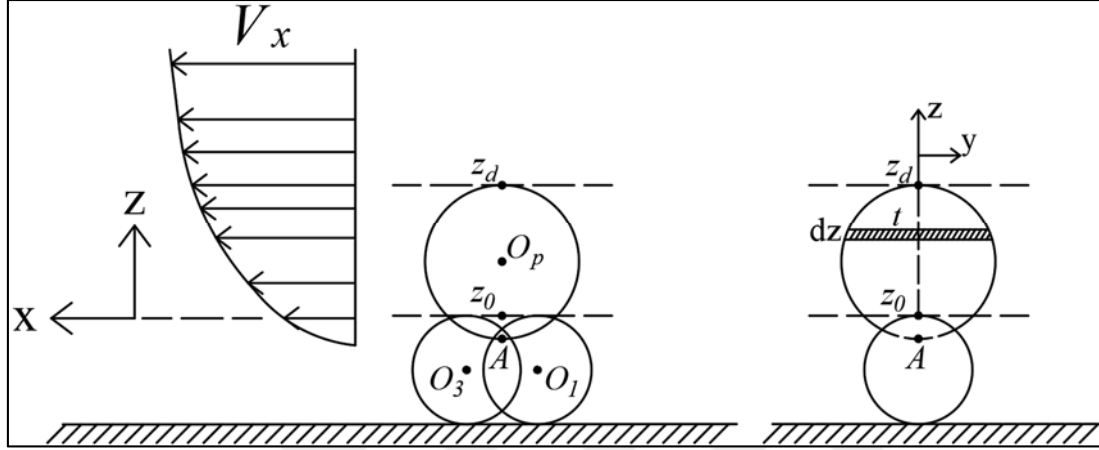
Eş. 4.8, Eş. 4.12 içerisine yerleştirilip düzenlenildiği takdirde, l_v Eş. 4.13 ile son halini almaktadır.

$$l_v = |O_pP| = \frac{d}{2\sqrt{3}(d_s + d)} \sqrt{3d^2 + 6dd_s - d_s^2} \quad (4.13)$$

Eş. 4.8, 4.11 ve 4.13 yardımıyla Bölüm 3, Çizelge 3.1’de verilen tüm tane yerleşimleri için kuvvet kollarının hesaplanması mümkün olmaktadır.

4.3. Taneye Etki Eden Ortalama Hızın Belirlenmesi

Eş. 4.5 ile gösterilen hareket başlangıcı için kritik durumun çözülebilmesi, taneye etki eden hız gradyanının ve ortalama hızın hesaplanmasını gerektirmektedir. Şekil 4.4 ve Eş. 4.14 hareketli taneye etki eden hız dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.4. Hareketli taneye etki eden hız dağılımı

$$U_m = \frac{1}{A_{et}} \int_{z_0}^{z_d} V_x t dz \quad (4.14)$$

Eş. 4.14'ün çözülebilmesi için gereken z_d yüksekliği ise Eş. 4.15 ile gösterilmektedir.

$$|O_p Q| - 0.5d_s - 0.5d = -|z_0 A| \quad (4.15a)$$

$$O_p = z_0 - |z_0 A| + 0.5d \quad (4.15b)$$

$$z_d = O_p + 0.5d \quad (4.15c)$$

Deneyler esnasında ADV aracılığıyla hız ölçümleri, hareketli tanenin önündeki sabit tanenin merkezi hizasında, z_0 ve z_d yükseklikleri arasında 1 mm aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen noktasal hız değerlerinin zamansal ortalamaları, Eş. 4.14'ün sayısal integrasyonu içerisine yerleştirilerek taneye etki eden ortalama hız değerleri (U_m) elde edilmiştir. t , tanenin belirli bir yüksekliğinde alınan kesitin akım

yaygın bir biçimde kullanılması sebebiyle Morsi ve Alexander (1972) tarafından ortaya konan C_D eşitliği, bu aşamadan sonra metin boyunca standart C_D değerleri olarak ifade edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde akım türü ve türbülanslık derecesi ile akım sınırlarının C_D üzerine önemli etkileri olduğu görülmektedir. Örneğin, kararlı olmayan akım durumlarında sürüklenme katsayısının, standart değerlere göre oldukça farklı değerler aldığı belirtilmektedir (Jourdan ve diğerleri, 2007; Selberg ve Nicholls, 1968; Kalman ve Portnikov, 2023; Igra ve Takayama, 1993). Benzer şekilde akımın türbülanslık derecesinin, sürüklenme katsayısı değerini önemli ölçüde değiştirebildiği çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur. Torobin ve Gauvin (1961) tane Reynolds sayılarına bağlı olarak düşük türbülans yoğunluğunun sürüklenme katsayısını arttırıcı, yüksek türbülans yoğunluğunun ise azaltıcı etkileri olabildiğini belirtmiştir. Brucato, Grisafi ve Montante (1998) deneysel çalışmalarında tane çapı ve akımın türbülanslık yoğunluğuna bağlı olarak C_D 'nin standart değerlerine göre 40 kata kadar artabildiğini ortaya koymuştur. Kim ve Balachandar (2012) ise türbülans yoğunluğunun düşük olduğu durumlarda C_D 'nin standart değerine göre değişiminin göz ardı edilebilir olduğunu ancak türbülans yoğunluğunun arttığı durumlarda C_D 'nin standart değerine göre ihmal edilemeyecek ölçüde yüksek veya az olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmalardan görüldüğü üzere, türbülans yoğunluğunun standart C_D değerini değiştirici etkisi ortaya konulsa da bu etkinin hangi durumlarda arttırıcı hangi durumlarda azaltıcı yönde olduğuna dair bir fikir birliği bulunmamaktadır.

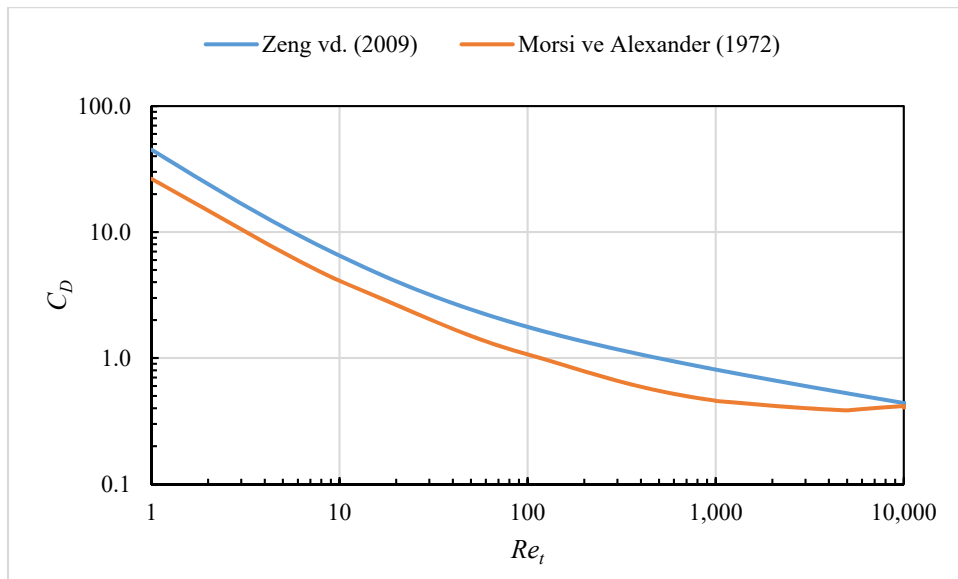
Öte yandan hareket edecek tanenin akım sınırlarına yakın olduğu durumda, C_D 'nin standart değerlerine göre yüksek olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur. Goldman, Cox ve Brenner (1967) çalışmalarında viskoz akış içerisindeki küresel tanenin pürüzsüz tabanda olduğu durumda C_D değerinin, tanenin serbest düşüşünden elde edilen C_D değerine göre %70 oranında arttığını göstermiştir. Schmeeckle, Nelson ve Shreve (2007) tane Reynolds sayısının 4 750 - 13 250 aralığında olduğu, tabanda bulunan 1,9 cm çapındaki küresel tane için sürüklenme katsayısı değerini standart C_D eğrisi ortalama değeri olan 0,4'ten farklı bir şekilde 0,76 olarak ölçmüştür. Chara, Dolansky ve Kysela (2017) tabana yakın konumlanmış 25,4 mm çapında küresel taneler için gerçekleştirdikleri sayısal çalışmalarında, tane ve taban arasındaki mesafe azaldıkça C_D değerinin arttığını göstermişlerdir. Lee ve Balachandar (2012) standart sürüklenme katsayısı eğrisinin, tüm Reynolds sayılarında taban etkisi dolayısıyla olması gerekenden daha düşük değerler

verdiğini ortaya koymuştur. Gerçekleştirdikleri sayısal çalışmalarında, ortaya koydukları sürüklenme katsayısı eşitliği ile tane Reynolds sayısının yaklaşık 900 ve üzeri değerlerinde C_D değerinin sabit 0,54 olduğunu belirtmişlerdir. Zeng, Najjar, Balachandar ve Fischer (2009) ise çalışmalarında C_D değerini veren, ilki tanenin tabanda olduğu ve lineer kayma akımına maruz kaldığı durumu ifade eden, ikincisi ise tanenin üniform hıza maruz kaldığı ve taban ile arasındaki mesafenin de bir parametre olduğu iki ayrı eşitlik geliştirmiştir. Her iki eşitlikleri de tabanda bulunan küresel bir tane için sürüklenme katsayısının standart C_D eğrisinden elde edilen değerlere göre daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Yukarıda bahsedilen sebeplerle bu çalışmada, Zeng ve diğerleri (2009) tarafından yatay bir düzlemde tabana oturan ve lineer kayma akımı etkisindeki küresel taneye etkiyen sürüklenme katsayısı eşitliği kullanılmıştır (Eş. 4.18).

$$C_D = \frac{40.81}{Re_t} (1 + 0.104 Re_t^{0.753}) \quad (4.18)$$

Eş. 4.18 içerisinde Re_t ile tane seviyesindeki akım Reynolds sayısı ($Re_t = U_{md}/\nu$) ifade edilmektedir. Şekil 4.6, Morsi ve Alexander (1972) ile Zeng ve diğerleri (2009) tarafından ortaya konulan C_D eşitliklerini kıyaslamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneylerde tane seviyesinde oluşan akım Reynolds sayısı ise 250-2700 aralığında değişmektedir.



Şekil 4.6. Farklı C_D eşitliklerinin karşılaştırılması

Kaldırma katsayısı (C_L) üzerine pek çok deneysel çalışma bulunmasına rağmen, bu parametrenin Reynolds sayısı veya tanenin akım sınırlarına olan mesafesi ile davranışı konusunda literatürde genel bir uzlaşma mevcut değildir (Wiberg ve Smith, 1987). Chepil (1958), yarıçapları 0,16–5,08 cm arasında değişen yarım küreler üzerinde yaptığı deneylerde, tane Reynolds sayısı (Re^*) ≤ 2500 için kaldırma katsayısının sürüklenme katsayısına oranını ortalama 0,85 olarak hesaplamış ve ortalama kaldırma katsayısını $C_L = 0,2$ olarak rapor etmiştir. Benzer şekilde, Bagnold (1973), küreler için kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranını $Re^* = 300$ için 0,1, $Re^* = 800$ için ise 0,5 olarak belirlemiştir. Öte yandan, literatürde akım sınır etkisinin C_L üzerinde de oldukça güçlü olduğu ve serbest akıştaki değerine kıyasla C_L 'yi önemli ölçüde artırabildiğini belirten çalışmalar da mevcuttur (Zeng ve diğerleri, 2009; Lee ve Balachandar, 2010). Ayrıca, sediment hareketinin incelendiği çalışmalarda, kaldırma katsayısının hareket eşitliklerinde kalibrasyon parametresi olarak kullanılabildiği de görülmektedir (Grass, 1970; Mantz, 1977; Yalın ve Karahan, 1979; Van Rijn, 1985). Bu çalışmada ise, C_D katsayısının sınır etkilerini dikkate alan Eş. 4.18 ile hesaplanması ve literatürde yaygın kullanımı dikkate alınarak, kaldırma katsayısı 0,85 C_D olarak alınmıştır (Chepil, 1958; Dey ve Zanke, 2004; Ali ve Dey, 2016).

4.5. Akım Türbülans Özelliklerinin Hareket Başlangıcına Etkisi

Shields (1936) tarafından tanenin hareket başlangıcı için önerilen taban kayma gerilmesine dayalı kriter yaklaşık yüz yıldır kullanılmaktadır. Ancak, zaman ortalamalı taban kayma gerilmesine dayalı Shields kriterinin, türbülanslı akış süreçlerini ve bu süreçlerin değişken doğasını yeterince yansıtmadığı ifade edilmektedir (Diplas ve diğerleri, 2008). Bu yaklaşımın sınırlılıklarını gidermek amacıyla birçok araştırmacı, türbülansın ani hız bileşenlerinin ve bunların oluşturduğu hidrodinamik kuvvetlerin tanelerin yerinden ayrılmasındaki etkisini incelemiştir (Einstein ve El-Samni, 1949; Grass, 1970; Heathershaw ve Thorne, 1985; Sumer, Chua, Cheng ve Fredsøe, 2003; Zanke, 2003; Vollmer ve Kleinhans, 2007). Örneğin Zanke (2003), türbülanslı akımlarda tanenin harekete geçmesine yol açan efektif kritik kayma gerilmesinin (veya taneye etkiyen hızın), zaman ortalaması değerinden daha büyük olduğunu ortaya koymuştur.

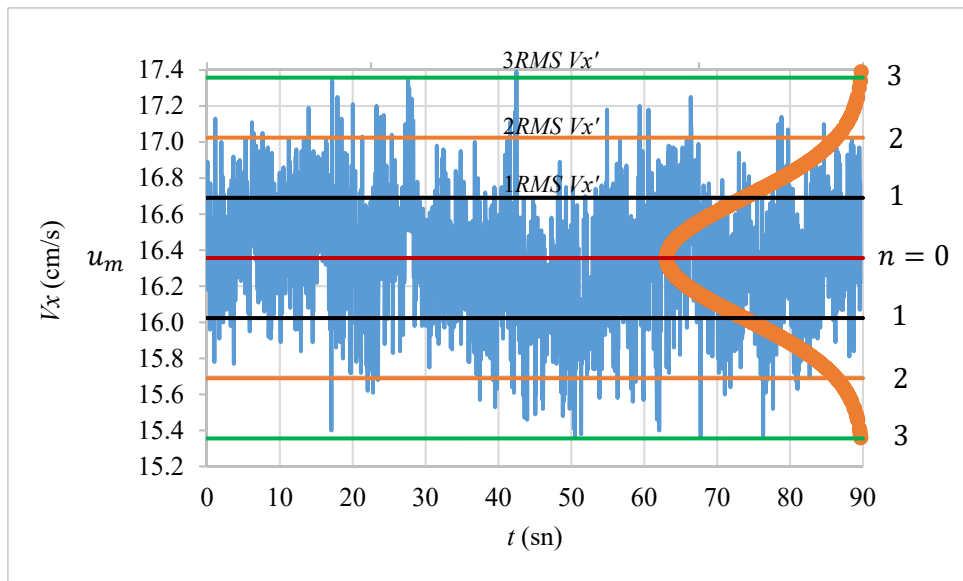
Bu sebeple türbülansın, ağız akımı etkisi altındaki tanenin hareket başlangıcına etkisini incelemek amacıyla, Zanke (2003) tarafından geliştirilen yöntem bu çalışmada uygulanmış

ve taneye etki eden hız Eş. 4.19 ile tanımlanmıştır. Türbülansın yalnızca büyüklüğü değil, etki süresi de tanenin harekete başlamasında önemli olmakla birlikte, bu çalışma kapsamında taneye etki eden türbülans süresi dikkate alınmamıştır (Diplas ve diğerleri, 2008).

$$U_{met} = U_m + n(RMS V_x') \quad (4.19)$$

Eş. 4.19 içerisinde U_{met} ağız akımının taneye uyguladığı etkili hız, U_m ADV aracılığıyla elde edilen zaman ortalamalı hız, $RMS V_x'$ türbülans yoğunluğu olarak da ifade edilebilen hız çalkantılarının kök ortalama kare değeri, n ise $RMS V_x'$ değerini arttırıcı bir katsayı olarak tanımlanmaktadır. Literatürde hız çalkantılarının dağılımının Gauss eğrisi ile ifade edilebileceği belirtilmektedir (Zanke, 2003).

Şekil 4.7 $c/D = 1$, $l/D = 0$ düzeneğinde, $x/D = 0.71$ konumu için 8 mm tanenin harekete başladığı akım koşullarında, tane merkezinde gerçekleştirilen hız ölçümünün sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.4 incelendiğinde $RMS V_x'$ dağılımının Gauss eğrisi biçiminde geliştiği ve dolayısıyla n değerinin $0 < n < 3$ aralığında almanın mümkün olduğu görülmektedir. Farklı deney düzenekleri için yapılan incelemeler Şekil 4.7 ile benzerlik taşıdığı için tek bir örneğe yer verilmiştir.

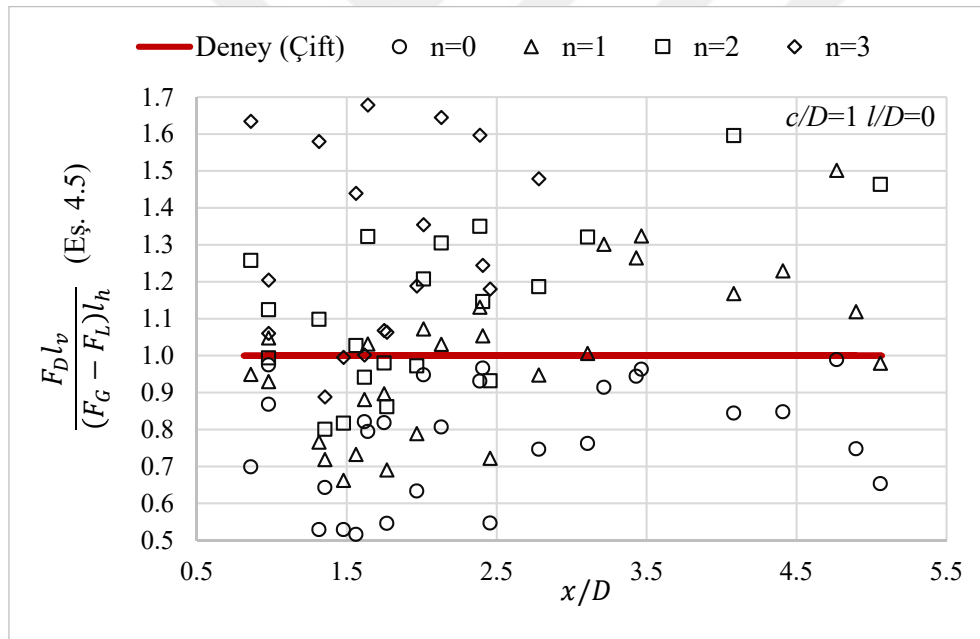


Şekil 4.7. $c/D = 1$, $l/D = 0$ için tane merkezinde gerçekleştirilen hız ölçümü örneği

4.6. Teorik Sonuçların Deneysel Verilerle Karşılaştırılması

Bölüm 3'te sunulan 585 deney verisi içerisinde her deney düzeneği için rastgele olarak toplam 212 adet hareketli tane hız ölçümü gerçekleştirilmiş ve aktarılan hesaplama yöntemleri kullanılarak teorik sonuçlar ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.8 $c/D=1$, $l/D=0$ deney düzeneği için Çift tane durumunda deneysel verilerle Eş. 4.5'ten elde edilen teorik sonuçların karşılaştırılmasını sunmaktadır. Şekil içerisinde deneysel veriler, Eş. 4.5 ile gösterilen tane hareketi için kritik anın 1'e eşit olduğu durum olarak ifade edilmiştir ($(F_D l_v / (F_G - F_L) l_h) = 1$). Akımın türbülans karakteristiğini yansıtan n katsayısı ise 0, 1, 2 ve 3 değerleri için sırasıyla ($\circ$), (Δ), ($\square$) ve ($\diamond$) sembolleriyle gösterilmiştir.



Şekil 4.8. $c/D = 1$, $l/D = 0$ deney düzeneği için Çift tane yerleşiminde deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması

Şekil 4.8 incelendiğinde, sunulan kabuller ışığında, tane hareketini teorik olarak ortaya koyan Eş. 4.5 ile deneysel verilerin açıklanmasının mümkün olabilmesi için n değerinin uygun seçilmesinin gerektiği görülmektedir. Ortalama hız değerini artırıcı katsayı olan n değerinin 0-3 aralığında alınmasıyla, $c/D = 1$, $l/D = 0$ deney düzeneği ve Çift tane yerleşimi için Eş. 4.5 aralığı çok büyük oranda 0,5-1,7 olmaktadır. Dolayısıyla n katsayısının aktarılan kabuller altında 0-3 aralığı içerisinde alacağı değerler ile tane

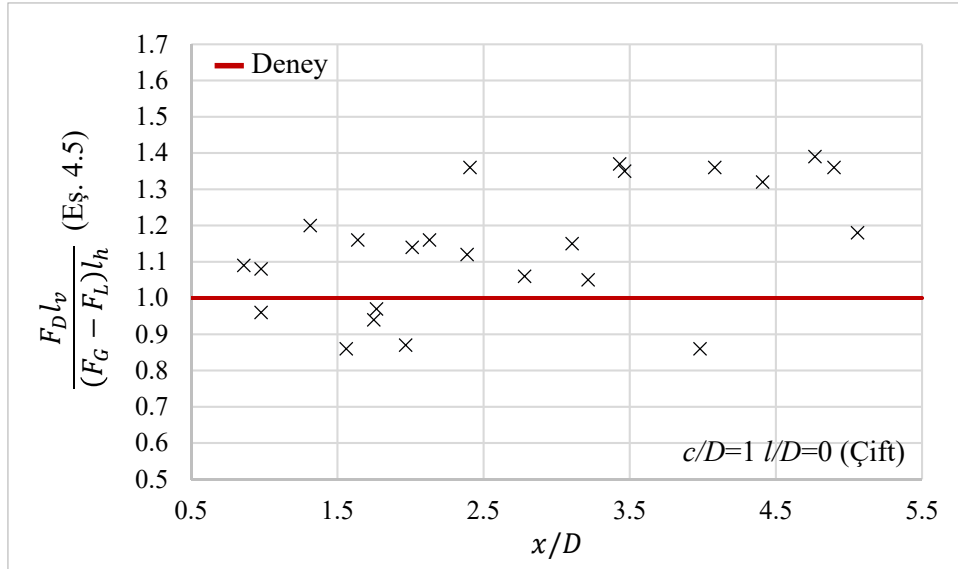
hareketinin teorik olarak açıklanması mümkün olmaktadır. Diğer deney düzenekleri ve Tek tane yerleşimleri Şekil 4.8'e benzer olduğundan yalnızca Şekil 4.8 sunulmuştur.

Çizelge 4.1 her bir n değeri için Eş. 4.5'in sonuç aralıkları ile o aralıktaki ortalama değerini ve her bir analiz için Eş. 4.5'i 1'e eşitleyen n değerlerinin ortalamasını (n_{ort}) göstermektedir. Örneğin n değeri 2 alındığında ($U_{met} = U_m + 2 \text{ RMS } V_x'$) tane hareketini ifade eden Eş 4.5 en düşük 0,80 en yüksek ise 1,95 değerini almakta, $n=2$ için tüm sonuçların ortalaması ise 1,29 olmaktadır. Bahsi geçen deney düzeneği için n_{ort} değeri ise 1,48 olmaktadır.

Çizelge 4.1. $c/D=1$, $l/D=0$ düzeneği Çift tane yerleşimi için n katsayısı aralıkları

$c/D=1$, $l/D=0$ Çift Tane Yerleşimi		
n	Eş. 4.5 Aralığı	Eş. 4.5 Ortalaması
0	0,52-0,97	0,78
1	0,66-1,30	1,01
2	0,80-1,95	1,29
3	0,89-3,48	1,51
$n_{ort}=1,48$		

Öte yandan $c/D=1$, $l/D=0$ deney düzeneği ve Çift tane yerleşimi için $n_{ort} = 1,48$ değeri her bir analiz içerisine yerleştirildiğinde Eş. 4.5 ortalaması 1,16 olmaktadır. Bir başka değişle taneyi harekete geçirecek etkili hız $U_{met} = U_m + 1,48 \text{ RMS } V_x'$ olarak hesaplandığında, taneye etki eden akım kuvvetlerinin kritik sınırı yaklaşık %16 oranında aştığını ve tanenin hareket edecek konuma ulaştığını göstermektedir. Şekil 4.9 ise bahsi geçen düzenek için $n_{ort} = 1,48$ değeri sonucu elde edilen her bir Eş. 4.5 sonucunu göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere Eş. 4.5 aralığı çok büyük oranda 0,8-1,4 olmakta ve Şekil 4.8'e göre deneysel sonuçlara daha da yaklaşmaktadır.



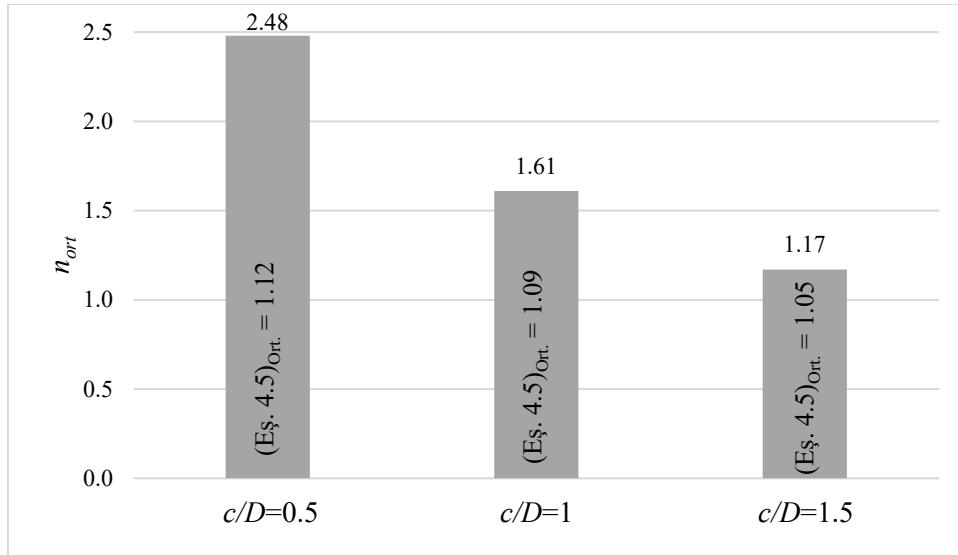
Şekil 4.9. $c/D = 1$, $l/D = 0$ deney düzeneği Çift tane yerleşiminde n_{ort} değerleri için deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması

Çizelge 4.2 ise $c/D = 0,5$, 1 ve $1,5$ deney düzenekleri için ($l/D = 0$) deneysel verilerle Eş. 4.5 karşılaştırmasını ve bu düzenekler için n değerlerini sunmaktadır. Çizelge 4.2 itibariyle tüm şekil ve çizelgelerde Tek tane yerleşimi gösterilmektedir. Çizelge 4.2 incelendiğinde ağzın tabana olan mesafesi arttıkça ortalama hız değerini arttıran n katsayısının, tane hareketindeki etkisinin azaldığı görülmektedir. $c/D = 0,5$ için $n = 2$ değerinde Eş. 4.5 ortalaması $0,98$ olurken, $c/D = 1,5$ için ise $n = 1$ değerinde Eş. 4.5 ortalaması $0,97$ olmaktadır. Benzer şekilde $c/D = 0,5$ için $n_{ort} = 2,48$ olurken tabandan uzaklaşıldıkça $c/D = 1$ ve $1,5$ için sırasıyla $1,61$ ve $1,17$ 'ye düşmektedir. Başka bir ifade ile ağzın tabandan uzaklaştırılması tane hareketinde türbülans etkisini azaltmaktadır. $c/D = 0,5$ gibi ağzın tabanda veya tabana yakın olduğu durumlarda, akım içerisindeki hız çalkantılarının tanenin harekete başlamasındaki payı daha yüksek olmaktadır. Bu durum ağız akımından kaynaklı hız dağılımının incelendiği Bölüm 5 içerisinde daha detaylı anlatılacaktır (Bir sonraki bölümde sunulacak olan Şekil 5.36, ağzın tabana olan mesafesinin artmasının $RMS V_x'$ değerini diğer bir ifadeyle türbülans yoğunluğunu azalttığını farklı c/D düzenekleri için göstermektedir). Ayrıca Çizelge 4.1 ve 4.2 birlikte incelenip $c/D = 1$ $l/D = 0$ düzeneği için Tek ve Çift tane yerleşimlerinin sonuçları karşılaştırıldığında, n değerleri arasında ciddi farklar gözlemlenmemesi, yerleşimin tane hareketinde türbülans karakteri üzerine önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

Çizelge 4.2. $c/D = 0,5$, 1 ve 1,5 ($l/D = 0$) düzeneği için n katsayısı aralıkları

$c/D=0,5$			$c/D=1$			$c/D=1,5$		
n	Eş. 4.5 Aralığı	Eş. 4.5 Ort.	n	Eş. 4.5 Aralığı	Eş. 4.5 Ort.	n	Eş. 4.5 Aralığı	Eş. 4.5 Ort.
0	0,40-0,87	0,62	0	0,49-0,99	0,75	0	0,48-0,99	0,72
1	0,52-1,03	0,78	1	0,68-1,37	0,94	1	0,71-1,28	0,97
2	0,62-1,24	0,98	2	0,83-2,35	1,21	2	0,95-1,77	1,30
3	0,70-2,49	1,28	3	0,88-3,90	1,69	3	1,12-2,53	1,81
$n_{ort}=2,48$			$n_{ort}=1,61$			$n_{ort}=1,17$		

Şekil 4.10 ise Çizelge 4.2’de sunulan değerleri ve her bir düzeneğe için hesaplanan n_{ort} değeri kullanıldığı takdirde elde edilen Eş. 4.5 ortalamasını göstermektedir. Hesaplanan n_{ort} değerleri sırasıyla $c/D = 0,5$ için 2,48, $c/D = 1$ için 1,61 ve $c/D = 1,5$ için 1,17 olmaktadır. Hesaplanan n_{ort} değerleri kullanıldığında, Eş. 4.5’in ortalama sonuçları $c/D = 0,5$ için 1,12, $c/D = 1$ için 1,09 ve $c/D = 1,5$ için 1,05 olarak elde edilmiştir. Bu değerler, teorik kritik sınır olan 1 değerinin yalnızca %5 ila %12 aralığında aşıldığını göstermektedir.

Şekil 4.10. $c/D = 0,5$; 1 ve 1,5 deney düzeneğinde n_{ort} değerleri ve Eş. 4.5 sonuçları

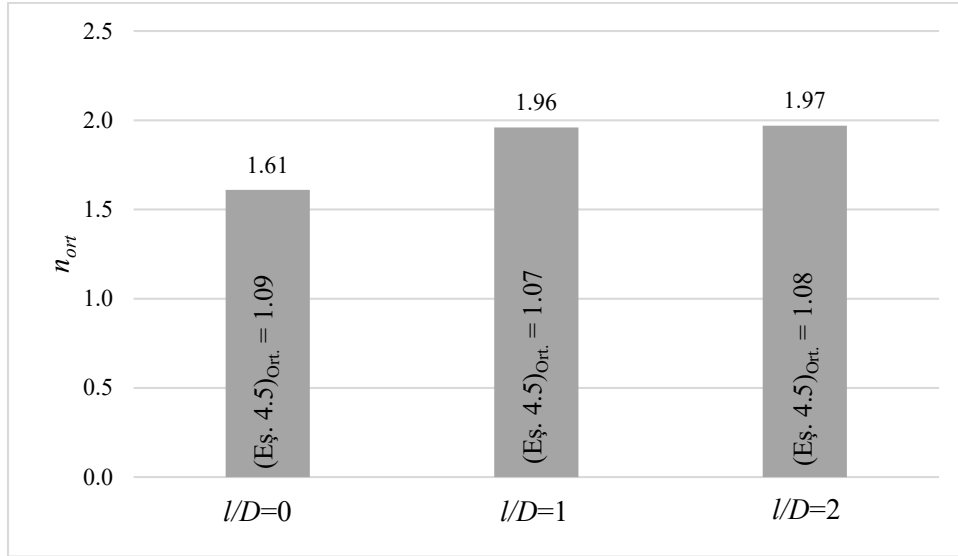
Ağzın tabana olan mesafesinin azalmasının hız çalkantılarını, dolayısıyla tane hareketindeki türbülans yoğunluğunun etkisini de arttırdığı daha önce bahsedilmiştir. Çizelge 4.3 ise tane hareketinin teorik ve deneysel sonuçlarının karşılaştırmasını, su alma

ağzının ölüson duvarına olan farklı mesafeleri için göstermektedir. Çizelge 4.3 incelendiğinde ağzın ölüson duvarına $1D$ uzaklıkta yerleştirildiği durumda ($l/D = 0$ 'dan 1 'e geldiğinde) n_{ort} değerinin bir miktar arttığı, $1D$ daha uzaklaştırıldığında ($l/D = 1$ 'den 2 'ye geldiğinde) ise n_{ort} değerinin değişmediği görülmektedir. Öte yandan tanenin yerleştirildiği benzer konum aralıklarında (x/D) hareketin teorik olarak gerçekleştiği değer l/D değişiminden etkilenmemekte ve her üç parametre için de benzer değerler almaktadır (Çizelge 4.4). Çizelge 4.3'te her bir l/D düzeneği için sunulan n değerleri incelendiğinde ise ağzın ölüson duvarı ile arasındaki uzaklığın tane hareketinde türbülans etkisini önemli ölçüde değiştirmediği anlaşılmaktadır. Bu durum ölü son duvarı etkisinin akım yapısı üzerinde ikincil düzeyde kaldığını ve türbülans şiddetinin esasen ağız–taban etkileşimiyle belirlendiğini göstermektedir. $l/D = 0$ 'dan 1 'e getirildiğinde farklı n değerlerinin aralıkları ve aldıkları ortalama değer ufak bir miktar azalmış ancak $l/D = 1$ 'den 2 'ye getirildiğinde bu değerlerde bir anlamlı değişiklik gözlemlenmemiştir (İleride Bölüm 5 içerisinde Şekil 5.38'de sunulan, x ve z yönlerindeki türbülans yoğunluğu ve kinetik enerjisi grafiklerinden de farklı l/D değerleri arasında önemli farklılıklar olmadığı görülebilmektedir).

Çizelge 4.3. $l/D = 0, 1$ ve 2 ($c/D = 1$) düzeneği için n katsayısı aralıkları

$l/D=0$			$l/D=1$			$l/D=2$		
n	Eş. 4.5 Aralığı	Eş. 4.5 Ort.	n	Eş. 4.5 Aralığı	Eş. 4.5 Ort.	n	Eş. 4.5 Aralığı	Eş. 4.5 Ort.
0	0,49-0,99	0,75	0	0,31-0,98	0,67	0	0,29-0,93	0,65
1	0,68-1,37	0,94	1	0,45-1,28	0,84	1	0,54-1,22	0,83
2	0,83-2,35	1,21	2	0,62-1,64	1,02	2	0,71-1,65	1,03
3	0,88-3,90	1,69	3	0,80-2,39	1,34	3	0,87-2,29	1,39
$n_{ort}=1,61$			$n_{ort}=1,96$			$n_{ort}=1,97$		

Şekil 4.11 ise Çizelge 4.3'de sunulan değerleri ve her bir düzeneğin için hesaplanan n_{ort} değeri kullanıldığı takdirde elde edilen Eş. 4.5 ortalamasını göstermektedir. Hesaplanan n_{ort} değerleri sırasıyla $l/D = 0$ için 1,61, $l/D = 1$ için 1,96 ve $l/D = 2$ için 1,97 olmaktadır. Hesaplanan n_{ort} değerleri kullanıldığında, Eş. 4.5'in ortalama sonuçları $l/D = 0$ için 1,09, $l/D = 1$ için 1,07 ve $l/D = 2$ için 1,08 olarak elde edilmiştir. Bu değerler, teorik kritik sınır olan 1 değerinin yalnızca %7 ila %9 aralığında aşıldığını göstermektedir. Ayrıca $l/D = 1$ ve 2 değerlerinin hemen hemen aynı olması da yine dikkat çekmektedir.



Şekil 4.11. $l/D=0, 1$ ve 2 deney düzeneklerinde n_{ort} değerleri ve Eş. 4.5 sonuçları

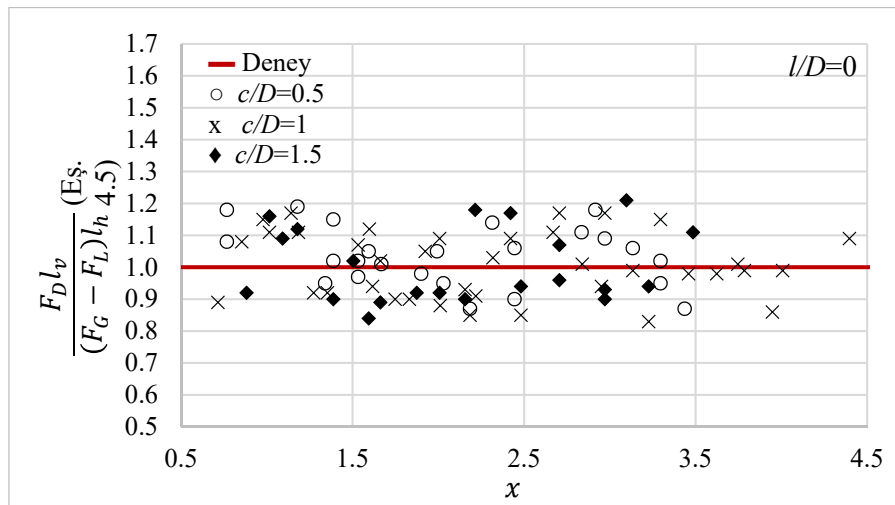
Öte yandan, harekete başlayacak tanenin ağza göre kanal boyunca konumu ile türbülans etkileri arasında da bir ilişki görülmektedir. Çizelge 4.4 deney düzeneklerinin tamamı için konuma bağlı n_{ort} değerlerini göstermektedir. Çizelgeden görüldüğü üzere ağızdan kanal boyunca uzaklaştıkça taneyi harekete geçirecek n değeri gittikçe azalmaktadır. Örneğin $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$) düzeneğinde $x/D = 0,6-2$ bölgesinde n_{ort} 2,32 değerini alırken, $x/D = 2-3$ bölgesinde 1,97'ye, $x/D = 3-4$ bölgesinde ise 1,30'a düşmektedir. Bu durumun tüm deney düzeneklerinde benzer olması, ağızdan kanal boyunca uzaklaştıkça hız çalkantılarının, bir başka değişle türbülans yoğunluğunun tane hareketindeki etkisinin azaldığını göstermektedir (İleride Bölüm 5 içerisinde sunulan Şekil 5.34'te $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$) düzeneği için türbülans yoğunluğu ve kinetik enerjisinin kanal boyunca derinlikle değişimi gösterilmiştir). Ağızın tabana en uzak olduğu $c/D = 1,5$ düzeneği için tanenin ağza en uzak konumda yer alması durumunda ($x/D = 3-4$) ise n_{ort} değerinin 1,01 olarak elde edilmesi, benzer şekilde hız çalkantılarının tane hareketi üzerindeki etkisinin büyük ölçüde azaldığını ve bu bölgede zamansal ortalama hızların belirleyici hale geldiğini göstermektedir. Ancak tüm l/D düzeneklerinde farklı konumlardaki n_{ort} değerlerinin birbirine oldukça yakın olması, ağız ile ölüson duvarı arasındaki mesafe değişiminin taneye etki eden türbülans yoğunluğu üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını göstermektedir. $l/D = 1$ ve 2 düzeneklerinde akım alanında oluşan hızların azalması ve kullanılan pompanın debi aralığı nedeniyle $x/D > 3$ sonrasında tane hareketi gözlemlenememiştir. Bu nedenle $x/D = 3-4$ aralığı için daha düşük n_{ort} değerleri elde edilememiş ve toplam n_{ort} değerleri $l/D = 1$ ve 2 düzenekleri için sırasıyla 1,96 ve 1,97

olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.3). Dolayısıyla, deneyler gerçekleştirildiği takdirde konuma bağlı n_{ort} değerlerinin azalmaya devam edeceği ve ortalamada $l/D = 0$ düzeni için elde edilen $n_{ort} = 1,61$ değerine yaklaşacağı öngörülmektedir.

Çizelge 4.4. Tüm deney düzenekleri için kanal boyunca konuma bağlı n_{ort} değerleri

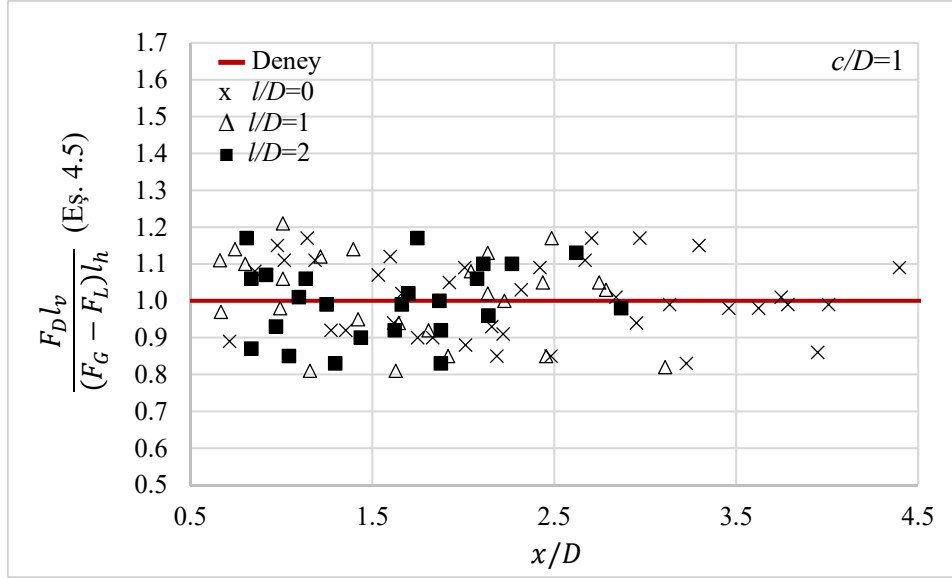
x/D	n_{ort}					
	$(l/D = 0)$			$(c/D = 1)$		
	$c/D = 0,5$	$c/D = 1$	$c/D = 1,5$	$l/D = 0$	$l/D = 1$	$l/D = 2$
0,6-2	2,32	1,73	1,29	1,73	1,78	1,78
2-3	1,97	1,62	1,20	1,62	1,62	1,54
3-4	1,30	1,13	1,01	1,13	-	-

Şekil 4.12’de ise Çizelge 4.4’te sunulan, konuma bağlı n_{ort} değerleri kullanılarak elde edilen Eş. 4.5 sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması (a) c/D (b) l/D değişimleri için verilmektedir. Tüm deney düzeneklerinde türbülans yoğunluğunun ağızdan kanal boyunca uzaklaştıkça azalması nedeniyle, farklı x/D aralıklarında değişen n_{ort} değerlerinin kullanılması deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki uyumu artırmaktadır. Şekil 4.13’ten görüldüğü üzere, tüm deney düzeneklerinde ölçüm yapılan her noktada teorik kritik sınır olan 1 değeri $\pm\%20$ aralığı içerisinde tahmin edilebilmektedir.



(a)

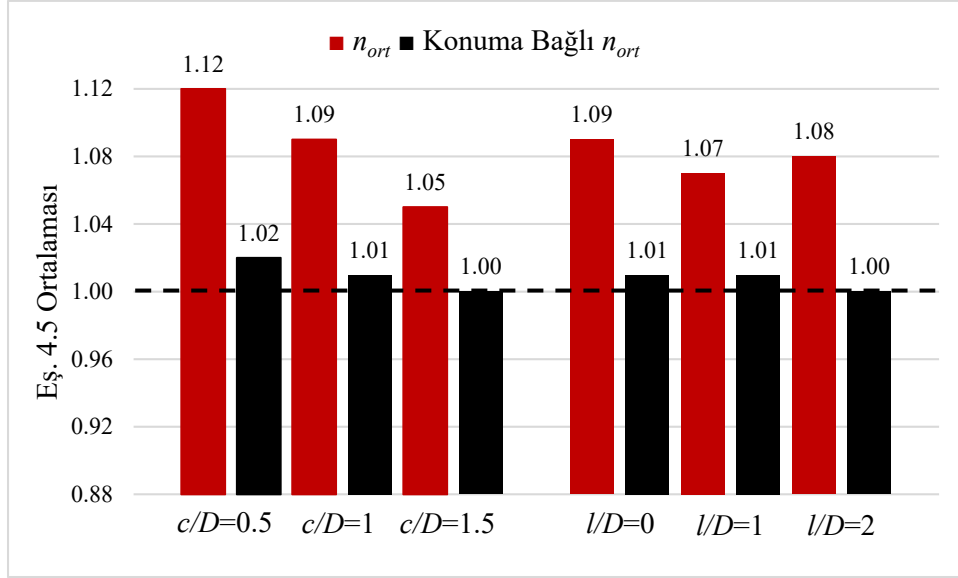
Şekil 4.12. Tüm deney düzeneklerinde konuma bağlı n_{ort} değerleri için deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması (a) c/D değişimi ($l/D = 0$) (b) l/D değişimi ($c/D = 1$)



(b)

Şekil 4.12. (devam) Tüm deney düzeneklerinde konuma bağlı n_{ort} değerleri için deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması (a) c/D değişimi ($l/D = 0$) (b) l/D değişimi ($c/D = 1$)

Şekil 4.13, tüm deney düzenekleri için n_{ort} (Çizelge 4.2 ve 4.3) ve konuma göre değişen n_{ort} değerleri (Çizelge 4.4) kullanılarak elde edilen Eş. 4.5 ortalamalarının karşılaştırmasını sunmaktadır. Sabit n_{ort} değerleri dikkate alındığında ortalama sonuçların $c/D = 0,5$ için 1,12, $c/D = 1$ için 1,09 ve $c/D = 1,5$ için 1,05; $l/D = 0$ için 1,09, $l/D = 1$ için 1,07 ve $l/D = 2$ için 1,08 olarak hesaplandığı daha önce belirtilmişti. Buna karşın, konuma bağlı n_{ort} değerlerinin kullanılmasıyla bu ortalamalar $c/D = 0,5$ için 1,02, $c/D = 1$ için 1,01, $c/D = 1,5$ için 1,00; $l/D = 0$ için 1,01, $l/D = 1$ için 1,01 ve $l/D = 2$ için 1,00 değerlerine düşmektedir. Dolayısıyla konuma bağlı n_{ort} kullanımı deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki uyumu belirgin biçimde artırmaktadır.



Şekil 4.13. n_{ort} ve konuma bağlı n_{ort} değerlerinden elde edilen ortalama Eş. 4.5 karşılaştırılması

Öte yandan sırasıyla Eş. 4.2, 4.3b ve 4.4 ile tanımlanmış olan hız gradyanından kaynaklı kaldırma kuvveti (F_{LS}), magnus etkisinden kaynaklı kaldırma kuvveti (F_{LM}) ve su alma ağzının oluşturduğu düşey yönlü hız bileşeninden kaynaklı kaldırma kuvvetinin (F_{LI}) tane hareketindeki önemleri de araştırılmıştır. Karşılaştırmalar öncelikle herhangi bir kaldırma kuvvetinin eşitlikten çıkarılması durumunda Eş. 4.5'in değişim oranı üzerinden ortaya konulmuştur. Çizelge 4.5 F_{LM} , F_{LS} veya F_{LI} parametrelerinin $n=0$ durumunda Eş. 4.5'ten çıkarılması halinde, eşitliğin azalma yüzdesini her deney düzeneği için ortaya koymaktadır. Sunulan değerler kanal boyunca hesaplama yapılan tüm konumlar için ortalama değeri yansıtmaktadır. Çizelgeden de görülebildiği gibi en büyük değişim F_{LM} kaldırıldığında yaşanmaktadır ve tüm deney düzenekleri için yaklaşık % 37-40 aralığında bir azalma gözlemlenmektedir. F_{LS} kaldırıldığında değişim % 4-5 civarında gerçekleşirken, F_{LI} kaldırıldığında ise sadece % 0,2-1,5 aralığında bir azalma görülmektedir. Ağzın tabanla olan mesafesi arttıkça (c/D büyüdükçe) tüm kaldırma kuvveti bileşenlerinin Eş. 4.5 içerisindeki etkileri ufak bir miktar artmakla birlikte, ağzın ölü son duvarıyla olan mesafe değişiminde (l/D) herhangi bir kaldırma kuvvetinin hesaplamalara dahil edilmemesi hemen hemen benzer sonuçlar doğurmaktadır.

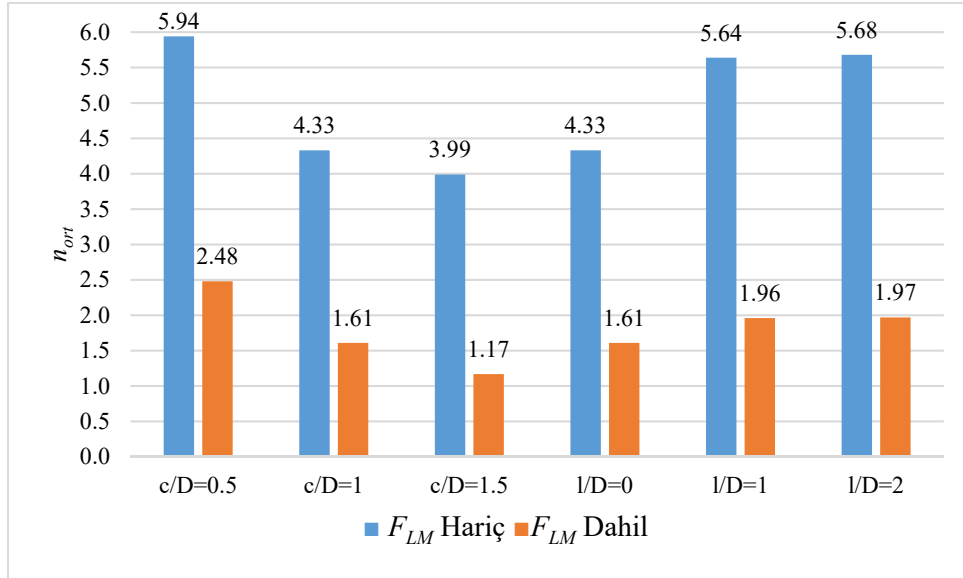
Çizelge 4.5. Kaldırma kuvveti bileşenlerinin Eş. 4.5'i değiştirme kapasiteleri

		Eş. 4.5 Değişimi Ortalaması (%)		
		F_{LM}	F_{LS}	F_{LI}
$l/D = 0$	$c/D = 0,5$	-37,4	-4,2	-0,2
	$c/D = 1$	-38,2	-4,6	-0,9
	$c/D = 1,5$	-40,0	-5,1	-1,5
$c/D = 1$	$l/D = 0$	-38,2	-4,6	-0,9
	$l/D = 1$	-39,3	-4,5	-1,4
	$l/D = 2$	-39,3	-4,7	-1,1

Diğer yandan tanenin harekete başlamasında en büyük etkiye sahip kaldırma kuvveti bileşeni olan F_{LM} 'nin hesaplamalara dahil edilmediği durumda, n katsayısının Eş. 4.5'in 1'e eşit olması için alması gereken değer de araştırılmış ve Çizelge 4.6'da sunulmuştur. Sonuçlar n değerinin c/D için 4-6, l/D için 4,3-5,7 aralığında olması gerektiğini göstermektedir. Ancak Şekil 4.7'de bir örneği sunulduğu üzere taneye etkiyen hız dağılımları incelendiğinde n katsayısının çok büyük oranda $0 < n < 3$ aralığında tanımlanabileceği görülmektedir. Bu sebeple F_{LM} Eş. 4.5 içerisinde yer almadığı takdirde, teorik olarak tane hareketinin başlayabilmesi, gerçekleşme ihtimali çok düşük n değerlerinde olabilmektedir. Dolayısıyla F_{LM} bileşeninin kaldırma kuvveti içerisinde çok belirgin bir paya ve ağız akımı etkisi altında tane hareketinin başlamasında kritik öneme sahip olduğu buradan da görülmektedir. Ayrıca Çizelge 4.2 ve 4.3'teki durumlara benzer olarak c/D değeri arttıkça n katsayısı azalmakta, l değeri ise $1D$ arttırıldığında n katsayısı da artmakta ancak sonrasında anlamlı bir miktarda değişmemektedir.

Çizelge 4.6. F_{LM} olmadığı takdirde tane hareketini gerçekleştirecek n katsayıları

$(l/D=0)$				$(c/D=1)$		
	$c/D=0,5$	$c/D=1$	$c/D=1,5$	$l/D=0$	$l/D=1$	$l/D=2$
n	5,94	4,33	3,99	4,33	5,64	5,68



Şekil 4.14. Tane hareketinde F_{LM} etkisi

Şekil 4.14, F_{LM} 'nin hesaba katıldığı ve katılmadığı durumlar için elde edilen n_{ort} değerlerini göstermektedir. F_{LM} hariç tutulduğunda n_{ort} değerleri tüm düzeneklerde önemli ölçüde artmış; bu artış oranı $c/D = 0.5$ için yaklaşık %140, $c/D = 1$ için %170, $c/D = 1.5$ için %240, $l/D = 0$ için %170, $l/D = 1$ ve $l/D = 2$ için ise %190 düzeyine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, F_{LM} bileşeninin taneye etki eden toplam momentin belirlenmesinde kritik bir rol oynadığını ve bu bileşenin hesaba katılmaması durumunda teorik olarak hareket eşiğine ulaşmak için gereken türbülans katkısının oldukça yüksek ($n > 3$) olması gerektiğini göstermektedir.

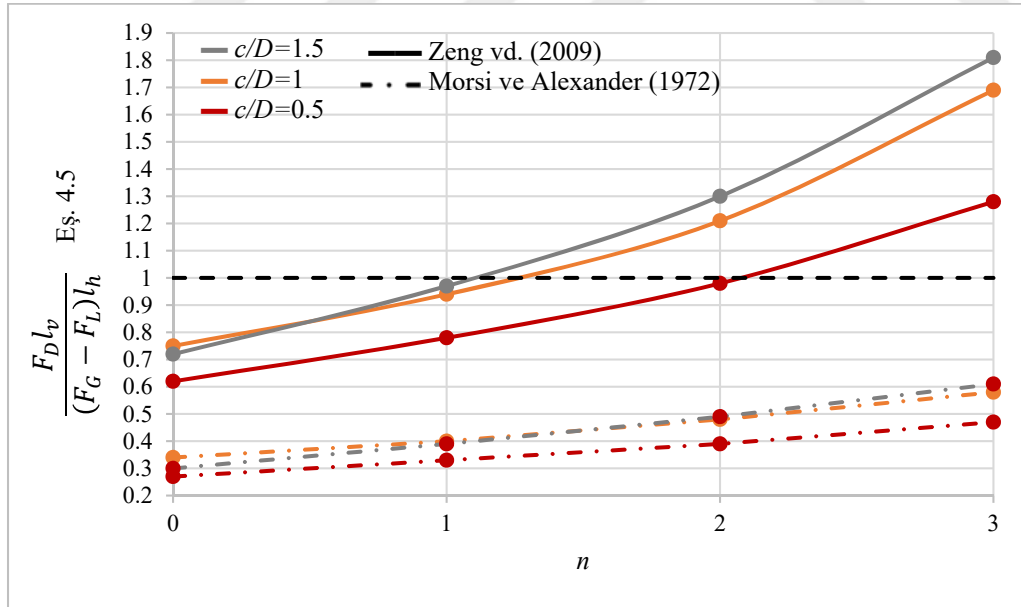
Çizelge 4.5'ten görüldüğü üzere kaldırma kuvveti bileşenleri içerisinde en düşük etkiye, su alma ağzının oluşturduğu düşey yönlü hız bileşeninden kaynaklı kaldırma kuvveti (F_{LI}) sebep olmaktadır. Ancak çizelgedeki değerler kanal boyunca tüm konumların ortalamasını yansıttığı için ayrıca konum aralıklarındaki değişim de araştırılmıştır. Çizelge 4.7 $c/D = 1$ $l/D = 0$ düzeneği için F_{LI} kuvvetinin Eş. 4.5 içerisinde çıkarıldığı takdirde meydana gelen değişim yüzdesinin, ağza göre farklı x/D konumları için göstermektedir. Diğer deney düzeneklerinde de davranış benzer olduğu için ayrıca yer verilmemiştir. Çizelge 4.7'den görüldüğü üzere F_{LI} etkisi ağza yaklaştıkça artmaktadır. Ancak bu etki ağza en yakın konum olan $x/D = 0-1$ aralığında bile sadece %3,4 azaltma yönünde olmaktadır. Bu durum ağız akımından kaynaklı düşey yönlü hız bileşeninin ancak ağza oldukça yakın konumlarda etkili olabileceğini ancak bu etkinin de sınırlı kalacağını göstermektedir (Ağız

membasında oluşan hız dağılımlarının incelendiği Bölüm 5 içerisinde farklı deney düzenekleri için üç farklı yöndeki hız bileşenlerinin özellikleri detaylı olarak aktarılmıştır).

Çizelge 4.7. F_{Li} 'nin konuma bağlı Eş. 4.5'i değiştirme kapasitesi

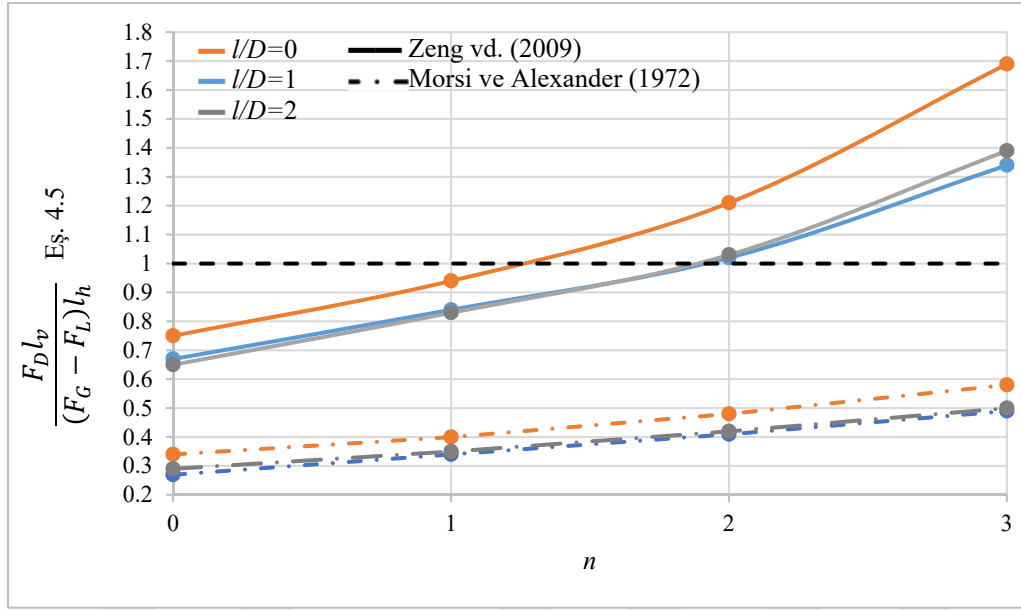
x/D	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5
Eş. 4.5 Değişimi Ortalaması (%)	-3,42	-0,73	-0,13	-0,04	-0,02

Sürüklenme katsayısının, tanenin kanal tabanına yakın konumlandığı ve akım sınırlarından etkilendiği durumlarda standart C_D değerine kıyasla daha yüksek olduğu önceki bölümlerde aktarılmıştı. Bu kapsamda, Morsi ve Alexander (1972) tarafından geliştirilen standart eşitlik ile bu çalışmada kullanılan Zeng ve diğerleri (2009) tarafından önerilen eşitlik (Eş. 4.18) kullanılarak elde edilen sonuçlar da karşılaştırılmıştır. Şekil 4.15 bu iki farklı C_D eşitliğinden elde edilen sonuçları (a) c/D (b) l/D düzenekleri için göstermektedir. Şekilde $n = 0, 1, 2$ ve 3 değerleri için Eş. 4.5'ten elde edilen tüm deney düzenekleri için bahsi geçen C_D eşitliklerini kıyaslamaktadır.



(a)

Şekil 4.15. Tüm deney düzenekleri için C_D 'nin sonuçlara etkisi



(b)

Şekil 4.15. (devam) Tüm deney düzenekleri için C_D 'nin sonuçlara etkisi

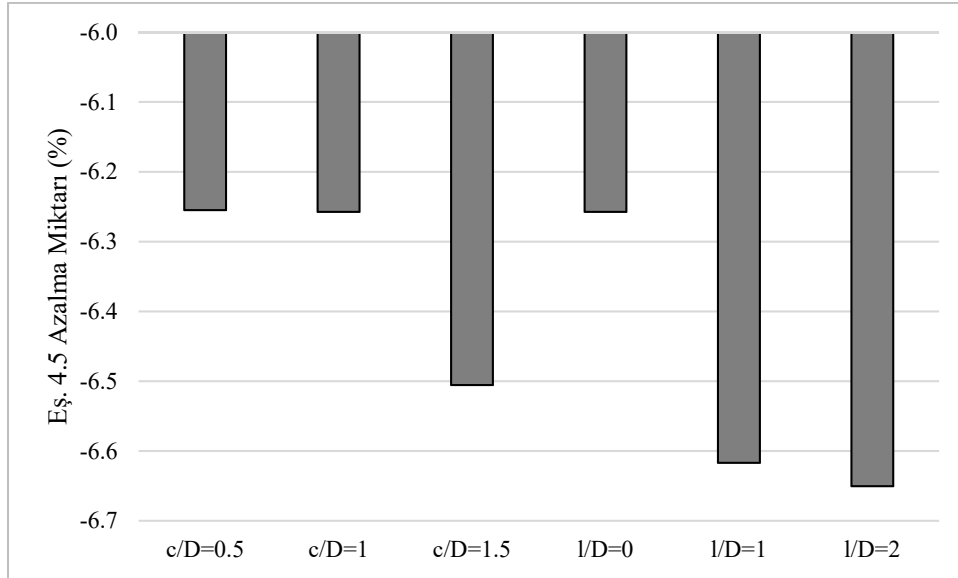
Şekil 4.15 incelendiğinde, tüm deney düzenekleri için standart C_D denklemi kullanılarak elde edilen kuvvet dengesinin, teorik olarak tanenin dönmesi için yeterli momenti oluşturmadığı görülmektedir. Türbülans etkileri $n = 3$ ile dikkate alındığında dahi, Eş. 4.5'in maksimum değeri c/D düzeneklerinde 0,62, l/D düzeneklerinde ise 0,59 olmaktadır. Bu sonuçlar, standart C_D denkleminin duvar etkilerinin belirgin olduğu ve tanenin akım sınırlarından etkilendiği durumlarda, taneye etki eden sürüklenme kuvvetinin yeterli düzeyde oluşmasına gereken katkıyı sağlayamadığını göstermektedir. Çizelge 4.8, farklı deney düzenekleri için hesaplanan ortalama C_D değerleri ile Eş. 4.5'ten elde edilen ortalama sonuçları $n = 0$ için karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Tablo içinde "Ortalama C_D (St)" ifadesi, Morsi ve Alexander (1972) tarafından geliştirilen standart sürüklenme katsayısı denkleminde elde edilen değerleri, "Ortalama C_D (Zeng)" ifadesi ise Zeng ve diğerleri (2009) tarafından önerilen denkleme göre hesaplanan değerleri temsil etmektedir. Karşılaştırmalarda referans olarak Zeng ve diğerleri (2009) denkleminde elde edilen sonuçlar esas alınmıştır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde tane seviyesinde oluşan akım Reynolds sayısı ise 250-2700 aralığında değişmektedir.

Çizelge 4.8. Farklı c/D ve l/D düzenekleri için sürüklenme katsayısı denklemlerinin karşılaştırılması

c/D	l/D	Ortalama C_D (St)	Ortalama C_D (Zeng)	Fark (%)	Eş. 4.5 (St)	Eş. 4.5 (Zeng)	Fark (%)
1,5	0	0,54	0,97	-44,3	0,31	0,73	-57,5
0,5	0	0,55	0,97	-43,3	0,26	0,60	-56,7
1	0	0,53	0,93	-43,0	0,32	0,73	-56,2
1	1	0,54	0,96	-43,8	0,28	0,65	-56,9
1	2	0,53	0,94	-43,6	0,30	0,71	-57,7

Morsi ve Alexander (1972) tarafından önerilen standart denklemle elde edilen C_D değerleri tüm düzeneklerde 0,53–0,55 aralığında kalırken, Zeng ve diğerleri (2009) denklemiyle hesaplanan değerler 0,93–0,97 aralığında yer almaktadır. Bu da standart C_D değerlerinin, Zeng denklemine göre ortalama % 43–44 oranında daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Daha düşük C_D değerleri, sürüklenme kuvvetinin olduğundan az tahmin edilmesine yol açmakta ve bu da Eş. 4.5 ile hesaplanan değerlerin kritik sınırın oldukça altında kalmasına neden olmaktadır. Nitekim, standart denklemle hesaplanan Eş. 4.5 yaklaşık 0,26-0,32 düzeyinde kalırken, Zeng denklemi kullanıldığında bu değer 0,60–0,73 aralığına yükselmiştir. Bu durum, standart C_D ile hesaplanan Eş. 4.5'in yaklaşık % 60 oranında daha düşük kaldığını göstermektedir.

Son olarak, kaldırma katsayısının (C_L) Eş. 4.5 içerisindeki etkisi incelenmiştir. C_D doğrudan sürüklenme kuvvetinin bir bileşeni olduğundan, bu katsayıda meydana gelen bir değişim Eş. 4.5 sonuçlarını aynı oranda etkilemektedir. Bu nedenle analiz kapsamında C_L katsayısının etkisi değerlendirilmiştir. Şekil 4.16, C_L 'nin %10 azaltılması durumunda Eş. 4.5 değerinde meydana gelen ortalama azalmayı farklı deney düzenekleri için göstermektedir. Grafikten görüldüğü üzere, C_L 'deki %10'luk azalma tüm düzeneklerde Eş. 4.5 değerinde yaklaşık %6 civarında bir düşüşe yol açmıştır. Bu durum, C_D 'nin C_L 'ye göre hareket başlangıcında daha etkili olmakla birlikte, C_L 'nin de göz ardı edilmemesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.16. C_L %10 azaltıldığı takdirde tane hareketinde meydana gelen değişim

Özetle elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, su alma ağzı akımı etkisinde tanenin hareket başlangıcının yalnızca ortalama akım özelliklerine değil, akımın türbülans özelliklerine de doğrudan bağlı olduğu açıkça görülmektedir. Özellikle c/D oranının küçülmesi, akımdaki tane yüksekliğindeki hız gradyanını ve Reynolds gerilme bileşenlerini belirgin biçimde artırarak, taneye etkiyen anlık kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin büyüklüğünü artırmaktadır. Bu durum, türbülans yoğunluğunun artmasıyla birlikte, tanenin hareketine neden olan hidrodinamik kuvvetlerin ortalama değerlerden ziyade ani çalkantılara bağlı olarak geliştiğini göstermektedir.

Ayrıca taneye etki eden kaldırma kuvveti bileşenleri arasından özellikle, tanenin dönme hareketinden kaynaklanan Magnus etkisi, en baskın bileşen olarak öne çıkmakta ve tanenin denge durumundan ayrılmasında sürüklenme kuvveti ile belirleyici rol oynamaktadır. Buna karşın, hız gradyanından kaynaklanan kaldırma bileşeni daha sınırlı bir katkı sunmaktadır. Su alma ağzının oluşturduğu düşey hız bileşeninden kaynaklanan kaldırma kuvvetinin ise yalnızca ağza çok yakın konumlarda anlamlı olabilecek bir etki yarattığı görülmektedir.

Bu sonuçlar, sediment hareketinin hem deneysel hem de teorik analizinin, su alma ağzından kaynaklanan hız dağılımlarına doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir. İzleyen bölümde, söz konusu hız dağılımlarının deneysel olarak nasıl ölçüldüğü detaylandırılmakta ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı biçimde tartışılmaktadır.



5. SU ALMA AĞZI MEMBASINDAKİ HIZ DAĞILIMININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

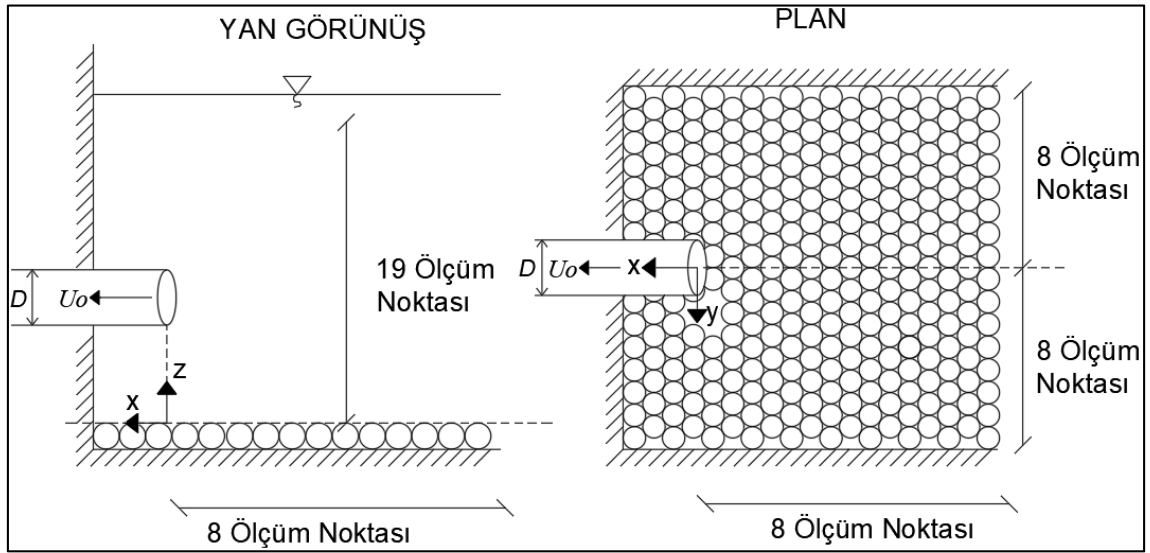
Bu başlık altında su alma ağız konumunun, ağız membasındaki hız dağılımına olan etkisinin deneysel olarak incelenmesi aktarılmaktadır. Deney düzeneğiyle ilgili detaylı bilgiler Bölüm 3'te sunulduğu için bu başlıkta tekrar yer verilmemiş, çalışmanın yöntemi ve sonuçları burada sunulmuştur. Ağız akımından kaynaklı hız dağılımının sayısal olarak incelenmesi başlığında oluşturulan modeller (Bölüm 6), bu başlıktaki deneysel çalışma sonuçlarına dayanmaktadır.

5.1. Deneysel Yöntem

Su alma ağız membasındaki hız dağılımının tespit edilebilmesi amacıyla, Bölüm 3'te sunulan tüm deney düzenekleri için Şekil 5.1'de ölçeksiz olarak gösterilen konumlarda hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir ($l/D=0$ için $c/D=0,5; 1; 1,5; 2$ ve $c/D=1$ için $l/D=0, 1, 2$). Ölçümlerin referans noktası; kanal boyunca (x yönü) ve yatayda (y yönü) ağız merkezi, derinlik boyunca ise (z yönü) sabit tane üst kotu olarak alınmıştır. Kanal boyunca ölçüm konumları $x/D = 0,70; 0,94; 1,13; 1,50; 1,88; 2,35; 2,82$ ve $3,76$ 'dır. Oluşturulan tüm şekillerde x/D mutlak değer olarak gösterilmektedir. Öncelikle her bir x/D konumunda, hız dağılımının derinlikle değişiminin tespiti için 19 nokta tayin edilmiş, ölçümler ağız merkez eksenine doğrultusunda yapılmıştır ($y/D=0$). Tüm deney düzeneklerinde kanal tabanında 8 mm tanelerden oluşan yatak yapısı korunmuştur. Derinlik boyunca yapılan ölçümler sabit tanenin üst kotu ile ADV'nin müsaade ettiği, kanal su serbest yüzeyine en yakın konum arasında gerçekleştirilmiştir ($z/D=0 - 3,1$). Hız dağılımının yatay düzlemde değişiminin incelenmesi için ise her bir x/D konumunda 17 nokta tayin edilmiş, ölçümler ağız merkez yüksekliğinde yapılmıştır (Örneğin $c/D=1$ için $z/D=1$). Burada belirtilenler haricinde, gerekli görülen noktalarda yapılan noktasal ölçüm konumlarına ise genelleştirilmemesi için yer verilmemiştir. Her bir deney düzeneğinde $Q=2,86; 5,00$ ve $8,95$ lt/s debileri için ölçümler yapılmış sadece $c/D=1, l/D=0$ düzeneğinde fazladan $Q=6,94$ ve $10,9$ lt/s debileri de kullanılmıştır (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Deney düzenekleri

c/D	l/D	Q (lt/s)				
0,5	0	2,86	5,00		8,95	
1	0	2,86	5,00	6,94	8,95	10,9
1,5	0	2,86	5,00		8,95	
2	0	2,86	5,00		8,95	
1	1	2,86	5,00		8,95	
1	2	2,86	5,00		8,95	



Şekil 5.1. Hız ölçüm konumları

Çizelge 5.2 ise $c/D=1$ deney düzeneğine ait ölçüm konumlarını göstermektedir. Yatay ve düşey ölçümler, her bir x/D konumunda, tabloda listelenen sabit y/D ve z/D noktalarında gerçekleştirilmiştir. Tüm deney düzeneklerinde kanal boyunca, ağız merkezinden itibaren olan x/D konumları sabittir. z/D ve y/D konumlarında ağız yüksekliğine bağlı olarak küçük farklılıklar olsa da ölçüm sayısının aynı olması nedeniyle yalnızca $c/D=1$ düzeneğinin sunulması yeterli görülmüştür.

Çizelge 5.2. $c/D=1$ düzeneği için ölçüm noktaları

x/D	0,70	y/D	-4,00	z/D	0,00
			-3,36		0,02
			-2,61		0,04
	0,94		-1,86		0,06
			-1,30		0,08
	1,13		-0,92		0,09
			-0,55		0,13
	1,50		-0,26		0,26
			0,00		0,50
	1,88		0,26		0,64
			0,55		0,83
	2,35		0,92		1,00
			1,30		1,20
	2,82		1,86		1,50
			2,61		1,67
	3,76		3,36		2,14
			4,00		2,61
					3,08

Hız ölçümleri SonTek 16 MHz MicroADV kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.2). MicroAD; akustik sensörlerden oluşan sonda (probe), sinyalleri işleyerek veri toplama birimine uygun hale getiren sinyal koşullandırma modülü (signal conditioning module) ve ölçülen verilerden üç yönde hız değerlerini hesaplayıp kullanıcıya okunabilir biçimde sunan işlemci modülü (processing module) olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. İşlenen veriler kablo aracılığıyla bilgisayara aktarılmakta, SonTek tarafından geliştirilen HorizonADV yazılımı kullanılarak kaydedilmektedir. 50 Hz maksimum örnekleme frekansına sahip MicroADV, akustik sensörlerinden 5 cm uzaklıkta, 0,09 mililitre hacminde örneklem alabilmektedir (Sontek, 2007).

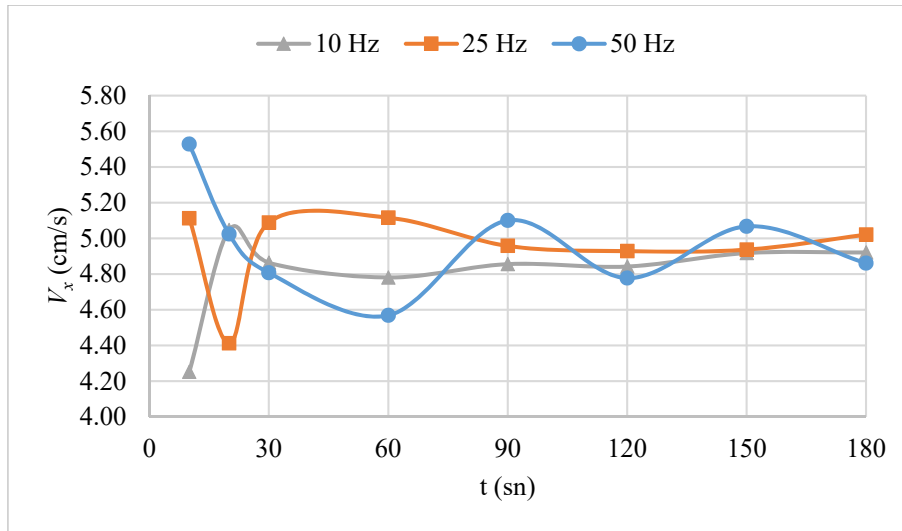


Şekil 5.2. SonTek 16 MHz MicroADV (Sontek, 2017)

5.2. Hazırlık Deneyleri

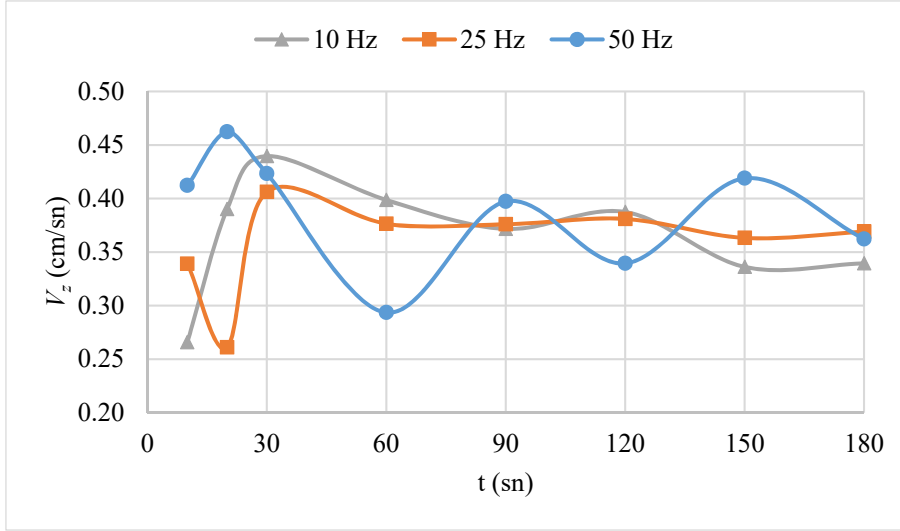
Hız ölçümlerinden elde edilen verilerin kalitesi, örnekleme frekansına ve ölçüm süresine doğrudan bağlıdır (Yağcı, 2006). Yetersiz veri elde edilmesi sonuçların doğruluğunu etkileyebileceği gibi gereğinden fazla veri ise zaman kaybına yol açabilmektedir. Bu sebeple nihai hız ölçümleri gerçekleştirilmeden önce, örnekleme frekansı ve ölçüm süresine karar verilmesini sağlayacak ön deneyler gerçekleştirilmiştir. $c/D=1$, $Q=2$ lt/s, $H/D=5,4$ koşullarında, $x/D=1,5$, $y/D=0$, $z/D=1,5$ konumu için örnekleme frekansı olarak 10, 25 ve 50 Hz, ölçüm süresi olarak ise 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150 ve 180 saniyeleri karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.3 (a) x yönündeki zamansal ortalama hız bileşeninin (V_x), Şekil 5.3 (b) ise z yönündeki zamansal ortalama hız bileşeninin (V_z) 10, 25 ve 50 Hz örnekleme frekansları için farklı ölçüm sürelerindeki değişimini göstermektedir. Şekillerden görüldüğü üzere 90 saniyeden az gerçekleştirilen ölçümlerde hız değerlerinde önemli oranda sapmalar meydana gelmektedir. 90 saniyeden uzun gerçekleştirilen ölçümlerde ise 10 ve 25 Hz örnekleme frekansı için hız değerleri sabitleşme eğilimi gösterirken, 50 Hz örnekleme frekansı için hız değerlerinin salınım yapmaya başladığı görülmektedir. Analizin detaylandırılabilmesi için hız çalkantılarının değişimi de incelenmiştir.



(a)

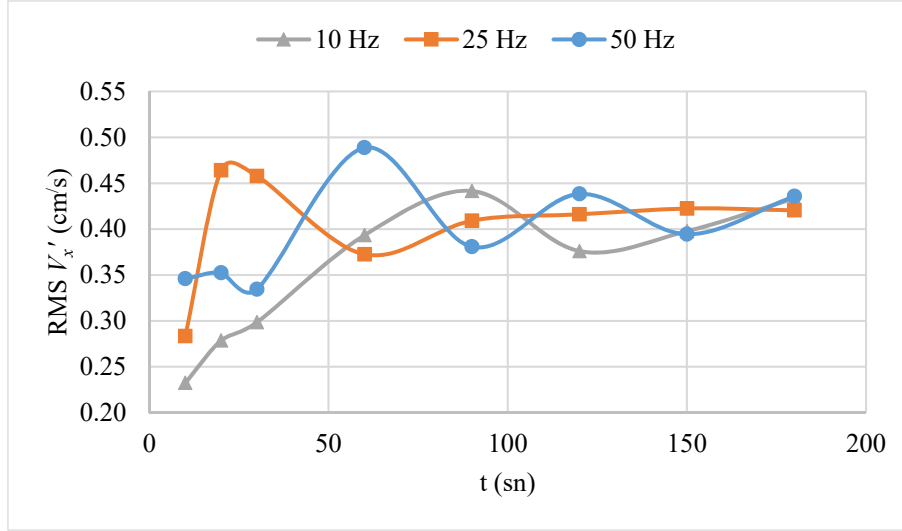
Şekil 5.3. (a) x yönündeki zamansal ortalama hız bileşeninin, (b) z yönündeki zamansal ortalama hız bileşeninin farklı örneklem frekans ve sürelerindeki değişimleri



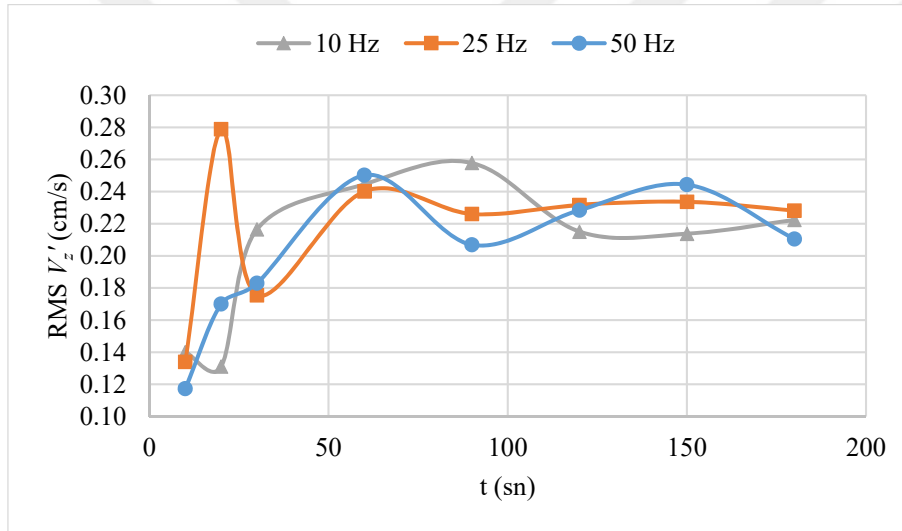
(b)

Şekil 5.3. (devam) (a) x yönündeki zamansal ortalama hız bileşeninin, (b) z yönündeki zamansal ortalama hız bileşeninin farklı örneklem frekans ve sürelerindeki değişimleri

Şekil 5.4 (a) ve (b) ise sırasıyla x ve z yönlerindeki hız çalkantı bileşenlerinin kök ortalama kare değerleri (RMS), bir başka ifade ile türbülans yoğunluğu değerlerinin farklı örneklem frekanslarında zamana bağlı değişimini göstermektedir. 10 Hz örneklemede türbülans yapısının yeterli oranda ortaya konamadığı, zamana bağlı olarak RMS değerlerinde önemli değişimler yaşandığı görülmektedir. 50 Hz örneklemede ise yüksek frekans dolayısıyla sinyallerdeki gürültü (noise) oranının arttığı, ortalama hız değerlerinde olduğu gibi (Şekil 5.3), RMS değerlerinde de salınım oluştuğu görülmektedir. Şekil 5.3 ve 5.4'te de görüldüğü üzere, 25 Hz ve 90 saniye değerlerinin hem ortalama hız hem de RMS verileri için daha tutarlı sonuçlar verdiği için ölçüm parametreleri olarak seçilmelerine karar verilmiştir.



(a)

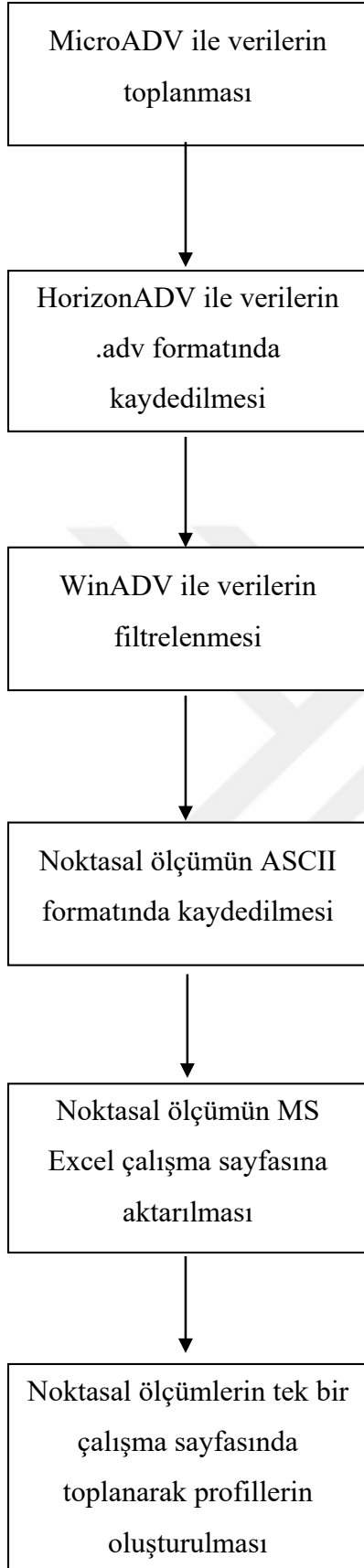


(b)

Şekil 5.4. Hız çalkantı bileşenleri kök ortalama kare değerlerinin farklı örneklem frekans ve sürelerindeki değişimleri: (a) x yönünde (b) z yönünde

90 saniye ölçüm süresi ve 25 Hz örneklem frekansı seçimiyle birlikte her bir ölçüm noktası için toplamda 2250 adet veri elde edilmesi sağlanmıştır. Her bir deney setinde, en az üç farklı debi için ölçüm yapıldığı, tek bir debi için ise yaklaşık 300 ölçüm noktası olduğu düşünülürse analizi gerçekleştirilecek verinin büyüklüğü daha iyi anlaşılmaktadır. Bu sebeple, çok büyük miktardaki bu veriden anlamlı sonuçların elde edilebilmesi için sistemli ve verimli bir kayıt ve işleme süreci işletilmesi gerekmektedir.

Öncelikle HorizonADV yazılımı aracılığıyla veriler .adv ve .sds uzantılarıyla kaydedilmektedir. İşlenmemiş ham verilerin tutulduğu .adv dosyası analizler için kullanılacak kaynak dosyası iken kullanıcının uyguladığı grafik, istatistik, düzeltme vb. bilgiler .sds dosyasına kaydedilmektedir. Ancak toplanan ham veriler içerisinde ani sıçramalar ve aykırı değerler bulunabileceği veya düşük kaliteli ölçümler gerçekleştirilmiş olabileceği için hesaplanan ortalama hız ve türbülans parametrelerinin hatalı olma riski bulunmaktadır. Bu sebeple ham verilerin çeşitli filtreleme yöntemlerinden geçirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla ABD Islah Bürosu Su Kaynakları Araştırma Laboratuvarı (U.S. Bureau of Reclamation - Water Resources Research Laboratory) tarafından geliştirilen WinADV yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen hız değerlerinin kalitesi için öncelikli olarak dikkat edilmesi gereken iki parametre; korelasyon (correlation, COR) ve sinyal-gürültü oranı (Signal-to-noise ratio, SNR) değerleridir (Wahl, 2000). Bilindiği üzere ADV cihazları, akım hızını ses dalgaları aracılığıyla ölçmektedir. ADV tarafından gönderilen ses dalgaları (sinyal) akım içerisindeki tortu, hava kabarcığı gibi parçacıklardan yansır ve geri döner. SNR bu sinyallerin, parazit, hata veya zayıf yansıma olarak değerlendirilebilecek gürültüye (noise) olan oranını ifade etmektedir ve desibel (dB) cinsinden gösterilmektedir. COR değeri ise elde edilen sinyallerin birbiriyle uyumunun bir göstergesidir. SonTek 16 MHz MicroADV kullanım kılavuzuna göre %70 üzeri COR değeri ve yüksek frekanslı ölçümler için 15 dB üzeri SNR değeri, kaliteli hız değerleri için uygun olmaktadır (Sontek, 2007). Ham veri seti, COR ve SNR parametreleriyle filtrelense dahi, içerisinde hala ani sıçrama (spike) ve aykırı değerler (outlier) bulunabilmekte ve bu değerlerin veri setinden ayıklanması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında Goring ve Nikora (2002) tarafından ortaya konulan ve Wahl (2003) tarafından geliştirilen yöntem (Phase-Space Despiking) kullanılarak aykırı verilerin temizliği gerçekleştirilmiştir. Son olarak WinADV aracılığıyla filtreleme ve temizleme işleminden geçirilen ASCII formatındaki veriler, MS Excel çalışma sayfalarına aktarılarak analize uygun hale getirilmiş olmaktadır. Şekil 5.5 yukarıda anlatılan hız ölçüm sürecini özetlemektedir.

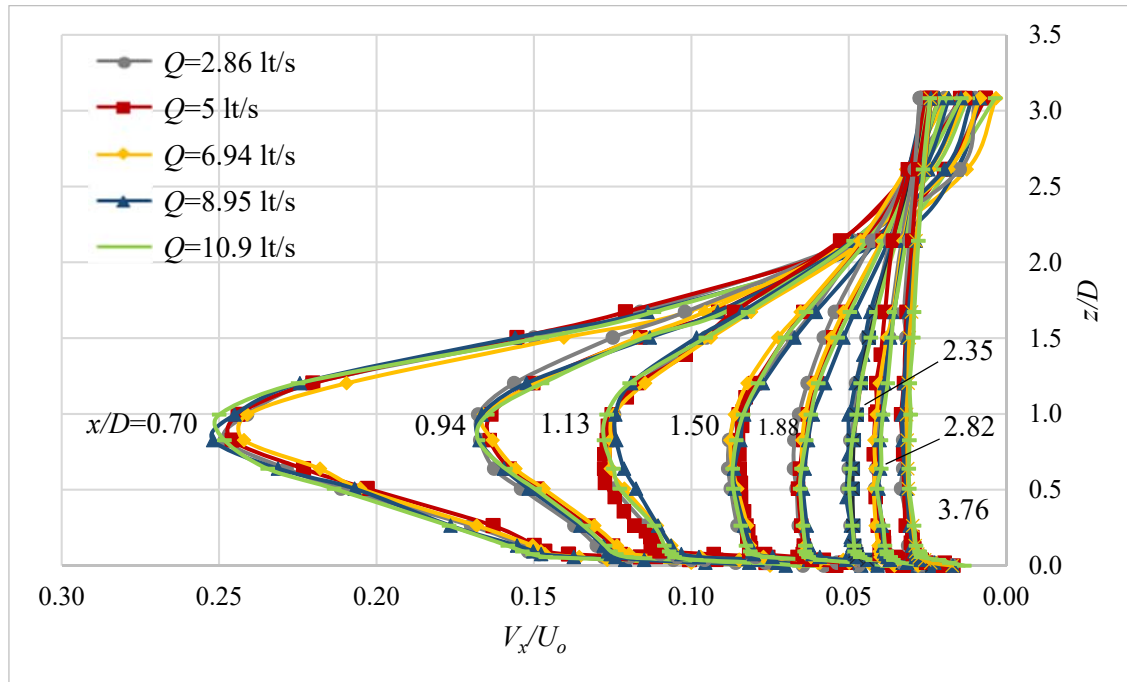


Şekil 5.5. Hız ölçüm süreci akış şeması

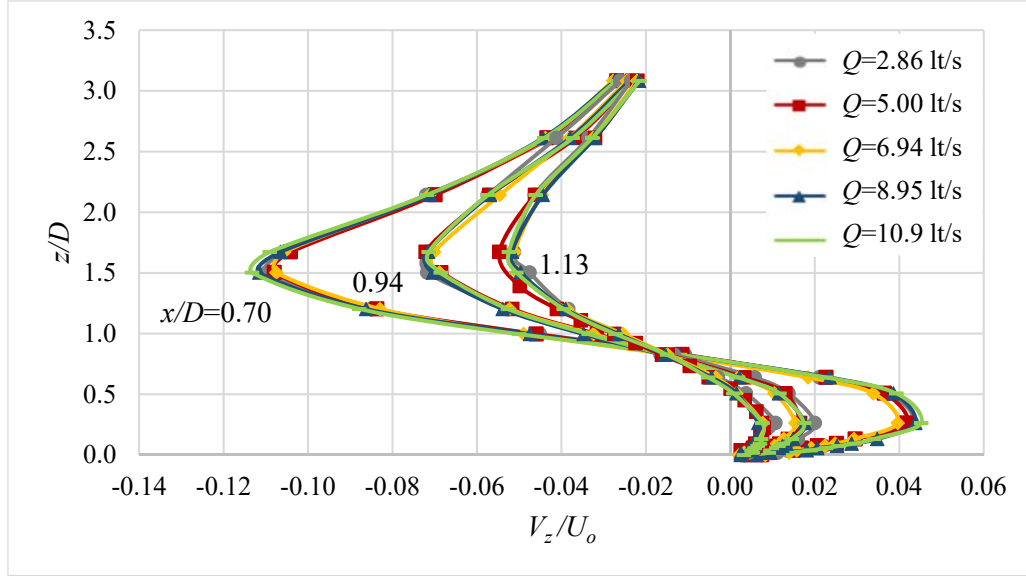
5.3. Deney Sonuçları

Su alma ağzı konumunun, ağız membasındaki hız dağılımına olan etkilerine ait deneysel sonuçları, üç yöndeki hız bileşenlerinin (V_x , V_y , V_z) kanal boyunca, yatayda ve derinlikle değişimleri üzerinden bu başlık altında anlatılmıştır. Her bir alt başlıkta özel olarak belirtilmedikçe, hız bileşenleri su alma ağzı içerisindeki kesit ortalama hızı (U_o), konumlar ise su alma ağzı iç çapı (D) kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır.

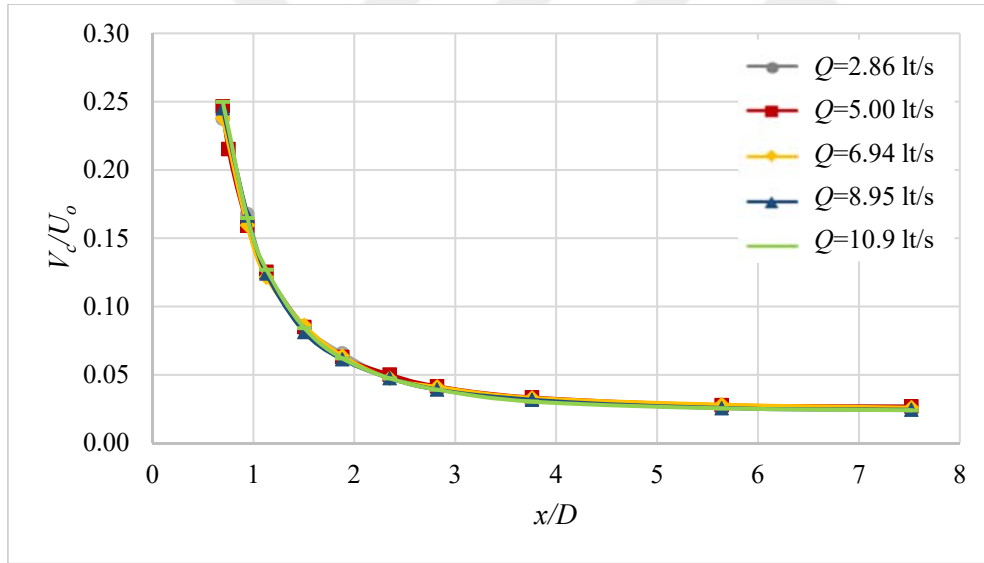
Şekil 5.6 $c/D=1$, $l/D=0$ deney düzeneğinde, farklı debiler için V_x hızının sırasıyla $x/D=0,70$; 0,94; 1,13; 1,50; 1,88; 2,35; 2,82 ve 3,76 konumları için derinlikle değişimini göstermektedir ($y/D=0$). Şekil 5.7 aynı deney düzeneğinde farklı debiler için V_z hızının sırasıyla $x/D=0,70$, 0,94 ve 1,13 konumları için derinlikle değişimini göstermektedir ($y/D=0$). Şekil 5.8 ise ağız merkez çizgisinde x yönündeki hızın (V_c), farklı debiler için kanal uzunluğu boyunca değişimini göstermektedir. Şekillerden görüldüğü üzere U_o kullanılarak yapılan boyutsuzlaştırma işlemi farklı debiler için ilgili konumlarda benzer hız dağılımları elde edilmesini sağlamaktadır. Bu sebeple aksi belirtilmedikçe, her bir deney parametresi için aynı konumda farklı debilerden elde edilen hız değerlerinin ortalamaları alınarak, daha anlaşılabilir ve yorumlanabilir grafikler oluşturulması sağlanmıştır.



Şekil 5.6. V_x hızının farklı x/D ve debi değerleri için derinlikle değişimi ($c/D=1$, $l/D=0$)



Şekil 5.7. V_z hızının farklı x/D ve debi değerleri için derinlikle değişimi ($c/D=1$, $l/D=0$)

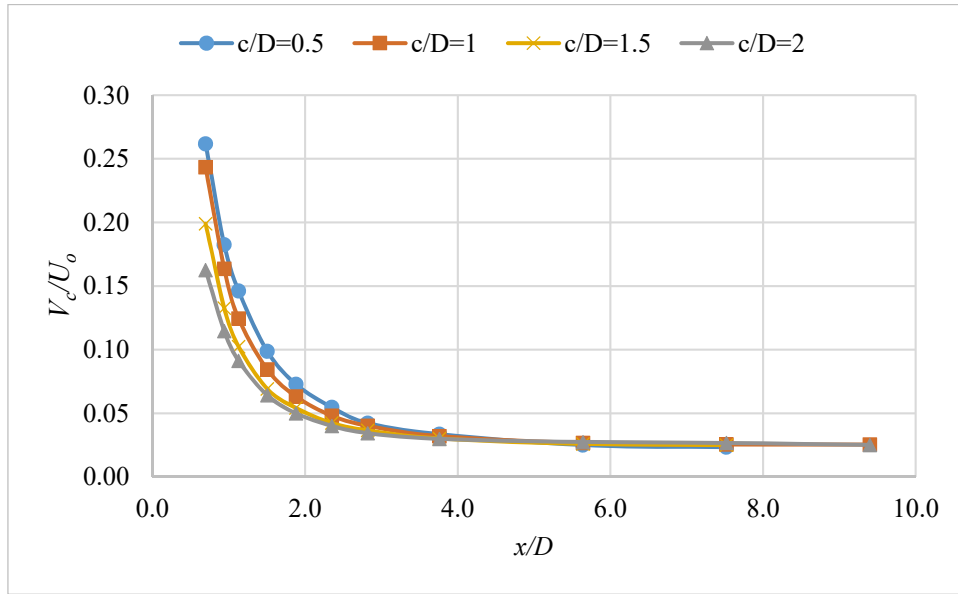


Şekil 5.8. V_c hızının kanal boyunca değişimi ($c/D=1$, $l/D=0$)

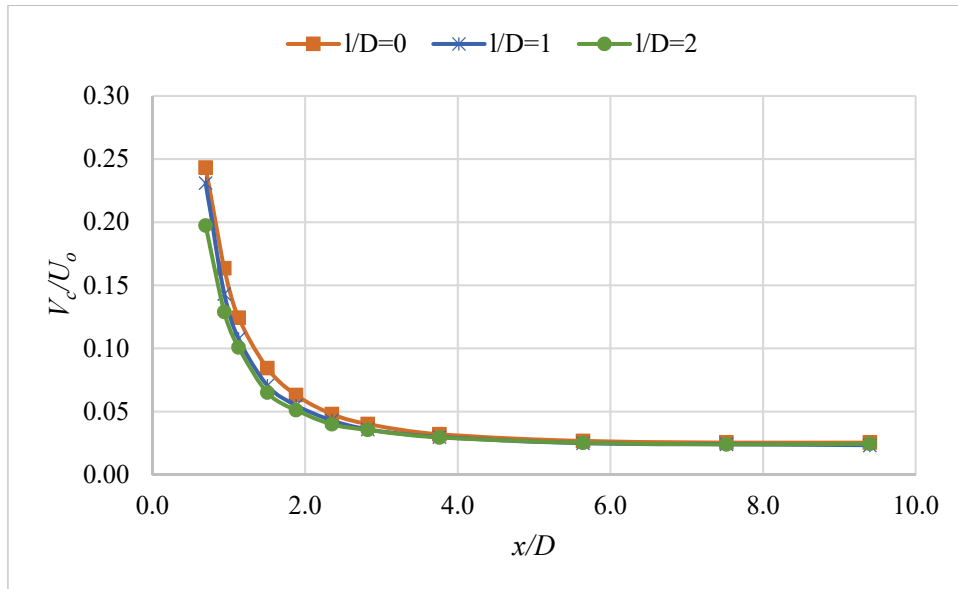
5.3.1. Ağız merkez çizgisindeki hızın (V_c) kanal boyunca değişimi

Su alma ağzının tabana (c/D) ve ölü son duvarına (l/D) olan mesafelerinin, ağız merkez çizgisindeki hızın (V_c) kanal boyunca değişimine olan etkileri sırasıyla Şekil 5.9 (a) ve (b) aracılığıyla sunulmaktadır. Ağız tabana olan mesafesi incelenirken ölü son duvarına olan mesafesinin sabit tutulduğu ($l/D=0$), ölü son duvarına olan mesafesi incelenirken ise tabana olan mesafesinin sabit tutulduğu ($c/D=1$) akıldan çıkarılmamalıdır. Bölüm 3'te detayları anlatıldığı üzere, akım sınırlarından kaynaklanan engel etkisinin yüksek olduğu

durumlarda, akım içerisindeki hız değerleri, engel etkisi olmayan duruma göre daha yüksek olacaktır. Şekil 5.9 (a)'da ortaya konulduğu üzere, ağzın konumu düşeyde tabandan yukarı doğru yükseldikçe sınır etkileri gittikçe ortadan kalkmakta ve V_c giderek azalmaktadır. Benzer olarak Şekil 5.9 (b)'de de ağzın ölü son duvarına olan mesafesinin arttırılmasının V_c hızının azalmasına yol açtığı görülmektedir. Ayrıca V_c hızındaki değişimlerin ağız konumundan bağımsız, yaklaşık $x/D=4$ itibariyle gelişmeye başladığı, ağza yaklaştıkça ise değişim hızının oldukça arttığı görülmektedir.



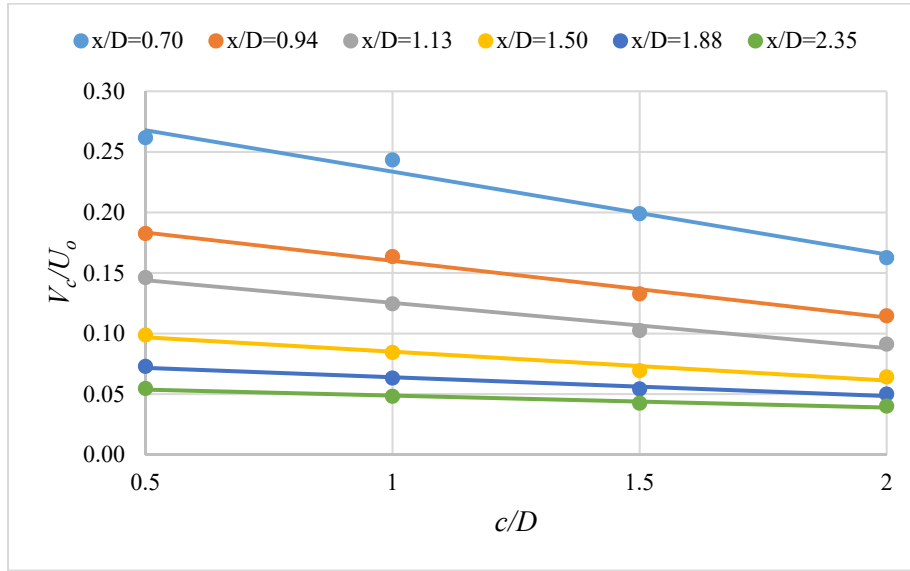
(a)



(b)

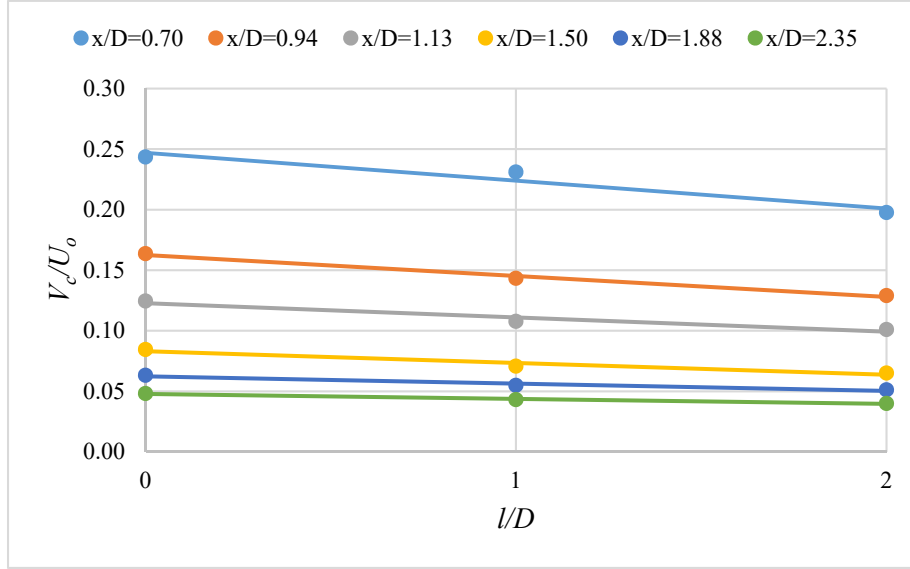
Şekil 5.9 Su alma ağzı konumunun V_c hızının kanal boyunca değişimine olan etkileri: (a) c/D etkisi ($l/D=0$), (b) l/D etkisi ($c/D=1$)

Şekil 5.10 su alma ağzı yerleşiminin V_c üzerine etkisini (a) c/D , (b) l/D açısından sabit x/D konumlarında ortaya koymaktadır. Kanal boyunca ağza doğru yaklaşıldıkça, yaklaşık $x/D = 1,50$ konumuna kadar V_c yüzdelik farkları artmakta, sonrasında ise azalmaya başlamaktadır. Bu azalmanın sebebi ağız merkezinde ($x/D = 0$), ağız konumundan bağımsız V_c/U_o oranının 1'e eşit olmasıdır. Ağzın tabana olan mesafesindeki değişimin V_c üzerindeki etkisi, en belirgin şekilde $x/D = 0,94-1,88$ aralığında gözlemlenmektedir. Ağız merkez çizgisindeki hız, c/D artışıyla birlikte hızlı bir şekilde azalmaya başlamakta, ancak belli bir noktadan sonra bu azalma yavaşlamaktadır. Örneğin, $x/D=1,13$ için yapılan incelemede, c/D 'nin 0,5'ten 1'e ve ardından 1'den 1,5'a çıkarılmasının V_c 'de yaklaşık %15'lik bir azalmaya neden olduğu, 1,5'tan 2'ye çıkarılmasının ise yalnızca %7,7'lik bir azalma yarattığı görülmektedir. Bu durum, $c/D=1,5$ 'ten itibaren sınır etkilerinin azalmaya başladığını göstermektedir. Benzer bir durum, ağzın ölü son duvarına olan mesafesindeki değişimde de gözlemlenmektedir. $x/D=1,5$ için, l/D 'nin 0'dan 1'e çıkarılması V_c 'nin %16,2 azalmasına yol açarken, 1'den 2'ye çıkarılması %6,7'lik bir azalmaya sebep olmaktadır. Bu da $l/D=1$ 'den itibaren sınır etkilerinin gücünün azalmaya başladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca c/D değişiminin V_c üzerinde yaklaşık %38, l/D değişiminin ise yaklaşık %23 düzeyinde bir etkisi olabildiği görülmektedir.



(a)

Şekil 5.10 Ağız yerleşiminin V_c hızına olan etkisi: (a) c/D değişimi ($l/D=0$), (b) l/D değişimi ($c/D=1$)



(b)

Şekil 5.10 (devam) Ağız yerleşiminin V_c hızına olan etkisi: (a) c/D değişimi ($l/D=0$), (b) l/D değişimi ($c/D=1$)

Çizelge 5.3 V_c 'de meydana gelen bu değişimlerin yüzdesel oranını tüm konumlar için göstermektedir. Tabloda ağız tabanda ($c/D=0,5$ ve $l/D=0$) ve ölü son duvarı üzerinde ($l/D=0$ ve $c/D=1$) olduğu durumlar referans olarak alınmıştır.

Çizelge 5.3. Ağız yerleşiminin V_c hızına olan etkisi (%)

x/D	V_c değişimi (%)							
	$c/D=0,5$	$c/D=1$	$c/D=1,5$	$c/D=2$		$l/D=0$	$l/D=1$	$l/D=2$
0,70	-	-7,0	-24,0	-36,9		-	-5,1	-18,9
0,94	-	-10,4	-27,2	-37,2		-	-12,4	-21,2
1,13	-	-14,9	-29,9	-37,6		-	-13,5	-18,9
1,50	-	-14,5	-29,9	-35,0		-	-16,2	-22,9
1,88	-	-13,2	-25,5	-31,3		-	-13,2	-19,1
2,35	-	-11,9	-22,3	-26,6		-	-10,6	-17,0
2,82	-	-4,9	-13,3	-18,7		-	-10,7	-11,8
3,76	-	-4,5	-9,9	-11,0		-	-7,1	-8,0

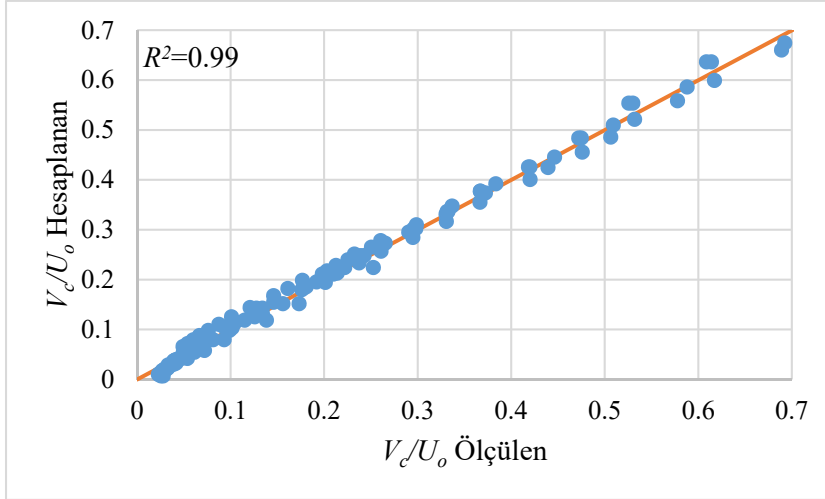
Shammaa ve diğerleri (2005) ve Bryant ve diğerleri (2008) çalışmalarında, sınır etkilerinin olmadığı durumda, ağız merkez çizgisindeki hızın kanal boyunca değişimini, potansiyel akım teorisine dayalı olarak aşağıdaki eşitlikle açıklamaktadır (Eş. 5.1).

$$\frac{V_c}{U_o} = 1 - \left(1 + \frac{a_1}{(x/D)^{b_1}}\right)^{-c_1} \quad (5.1)$$

Eş. 5.1’de $a_1=0,25$, $b_1=2$ ve $c_1=0,5$ ile ifade edilmektedir (Bryant ve diğerleri, 2008). Powell ve Khan (2015) ise çalışmalarında bu değerlerin, sabit ve hareketli taban durumlarında sırasıyla 0,332; 1,679; 0,515 ve 0,145; 1,493; 0,913 olarak elde edildiğini belirtmiştir. Shammaa ve diğerleri (2005) ve Bryant ve diğerleri (2008) çalışmalarını, su alma ağzının ölü son duvarına bitişik ($l/D=0$) ve taban sınır etkilerinden uzakta olduğu koşullarda gerçekleştirmiştir. Powell ve Khan (2015) ise benzer şekilde ağzın ölü son duvarına bitişik, ancak sabit taban durumu için kanal tabanında konumlandırıldığı düzenden elde ettikleri sonuçları ortaya koymuştur. Bu tez çalışması kapsamında, yukarıdaki çalışmalarda verilen denklemlerin, ölü son duvarı ve kanal tabanının etkilerini de içerecek şekilde düzenlenmesiyle, SPSS yazılımı kullanılarak çoklu regresyon analizi neticesinde aşağıdaki ampirik denklem elde edilmiştir. Bu sayede ağız konumunun V_c üzerine etkisi ifade edilmiştir.

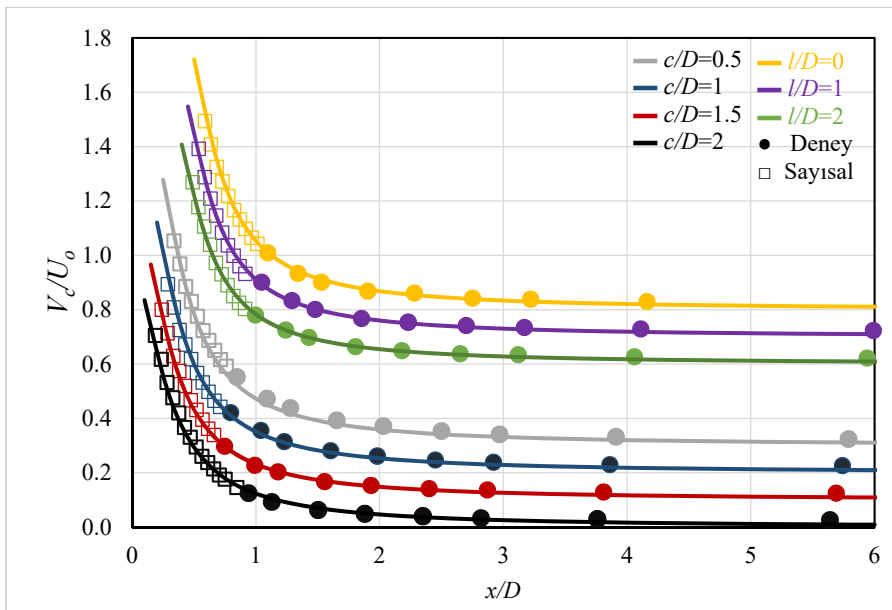
$$\frac{V_c}{U_o} = \left[1 - \left(1 + \frac{a_1}{(x/D)^{b_1}}\right)^{-c_1}\right] (c/D)^{d_1} (1 + l/D)^{e_1} \quad (5.2)$$

Eş. 5.2 için a_1 , b_1 , c_1 , d_1 ve e_1 katsayıları sırasıyla 0,060; 1,492; 2,412; -0,087 ve -0,119, belirleme katsayısı (R^2) değeri ise 0,99 olmaktadır. Deneysel çalışmada, ADV’nin üç ayaklı yapısı sebebiyle ağza en yakın $x/D=0,70$ konumundan veri elde edilebilmiştir. Dolayısıyla Eş. 5.2 elde edilirken, $x/D<0,70$ için detayları Bölüm 6 ve 7’de verilen, kalibre edilmiş sayısal modelden elde edilen veriler de kullanılmıştır. Elde edilen eşitlik $c/D=0,5-2$; $l/D=0-2$; $Q=2,9-10,9$ lt/s değer aralıkları için geçerlidir. Tüm deneysel veriler ve Eş. 5.2’den hesaplanan değerlerin kıyaslanması Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Yatay eksen deneysel sonuçları, dikey eksen ise Eş. 5.2 ile hesaplanan değerleri göstermektedir.



Şekil 5.11. Deneysel sonuçlarla Eş. 5.2'nin uyumunun incelenmesi

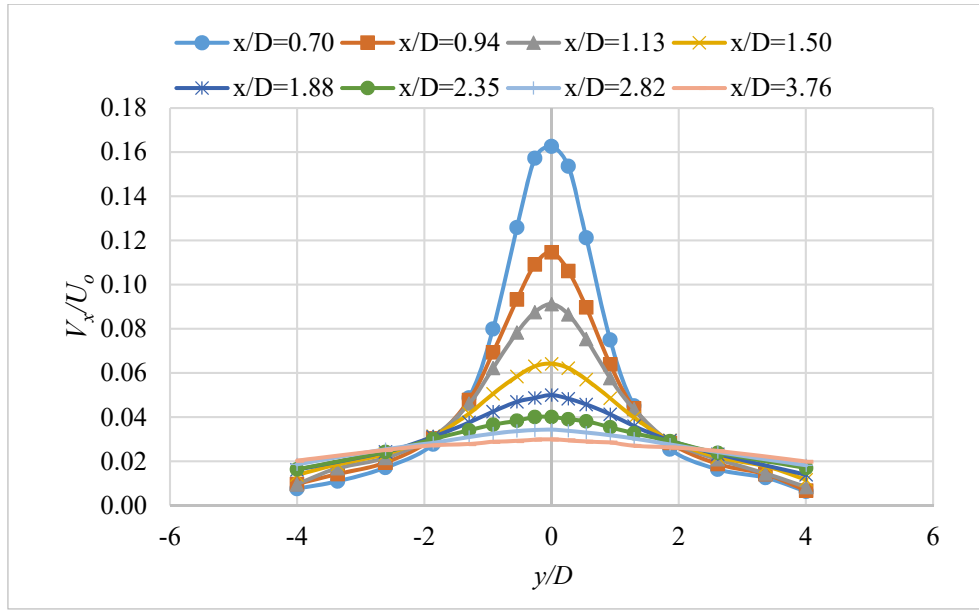
Şekil 5.12 tüm deney düzenekleri için deneysel ve Eş. 5.2'den elde edilen sonuçların tamamını göstermektedir (Bu şekilde yukarıda belirtildiği üzere ölü-son duvarına yakın konumlarda veri alınamadığı için doğrulanmış sayısal model sonuçları da kullanılmıştır). Şekilde, deneysel veriler ●, sayısal veriler □, Eş. 5.2 verileri ise farklı renklerdeki — simgeleri ile gösterilmektedir. Tüm verilerin tek bir şekilde gösterilebilmesi için veriler x ve y eksenlerinde kaydırılmıştır: $c/D=1.5$ (0,05; 0,1), $c/D=1$ (0,1; 0,2), $c/D=0.5$ (0,15; 0,3), $l/D=2$ (0,3; 0,6), $l/D=1$ (0,35; 0,7), ve $l/D=0$ (0,4; 0,8). Parantez içinde verilen ilk değerler x eksenindeki, ikinci değerler ise y eksenindeki kaydırma miktarlarını göstermektedir.



Şekil 5.12. Tüm deney düzenekleri için deneysel, sayısal ve Eş. 5.2 sonuçları

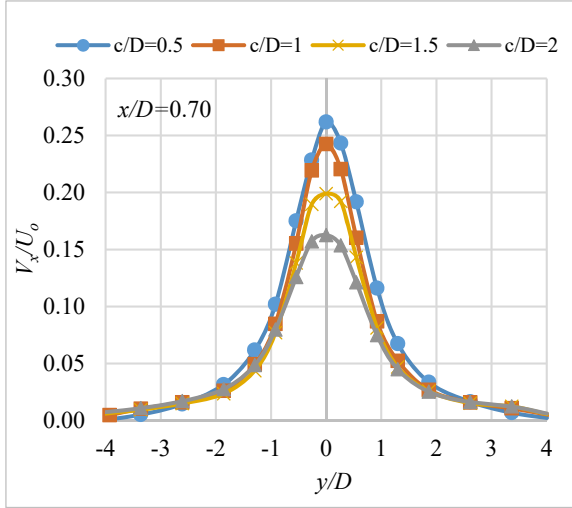
5.3.2. Ağız merkezi yüksekliğindeki V_x hızının kanal boyunca yatayda değişimi

Su alma ağız merkezi yüksekliğinde V_x hızının kanal boyunca yatayda değişimi $c/D = 2$ ($l/D = 0$) deney düzeneği için Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Hız profillerinin kanal boyunca değişimi, diğer deney düzeneklerinde de benzer olduğu için sadece birine örnek olarak yer verilmiştir. Hız değerleri ağız eksenine göre simetrik olmakta ve maksimum hızlar eksen üzerinde gelişmektedir. Ağızdan uzaklaşıldıkça hız profilinin eğriliği gittikçe azalmaktadır.

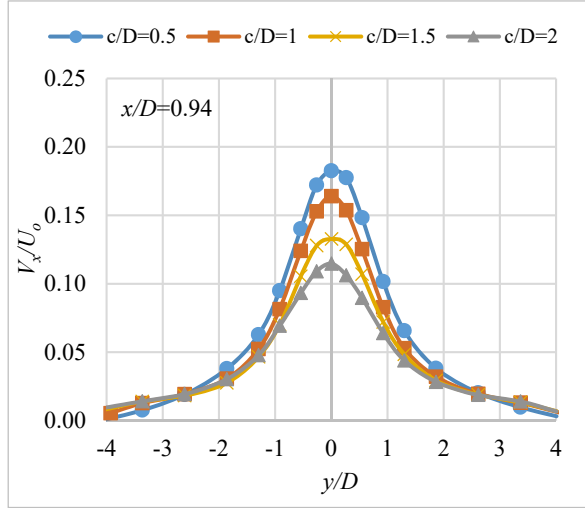


Şekil 5.13. $c/D=2$ için kanal boyunca ve yatayda V_x değişimi ($l/D=0$)

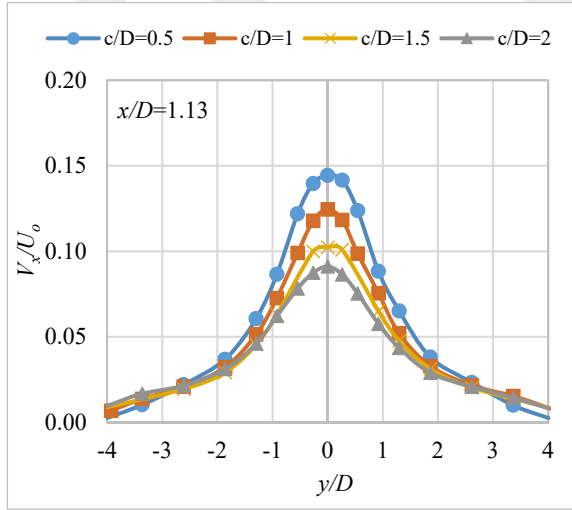
Ağız konumunun V_x ile ilişkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için c/D etkisi Şekil 5.14, l/D etkisi Şekil 5.15'te farklı x/D konumları için gösterilmiştir. Her iki şekilde de c/D ve l/D parametrelerinden bağımsız, ağıza yakın bölgelerde V_x profili oldukça dar ve tepe noktası yüksek olmaktadır. Ağızdan uzaklaşıldıkça ise tepe değeri azalmakta ve profil yatayda genişlemektedir. Her iki şekilde de $x/D=3,76$ itibariyle hız profillerinin arasındaki farkın hemen hemen ortadan kalktığı görülmektedir.



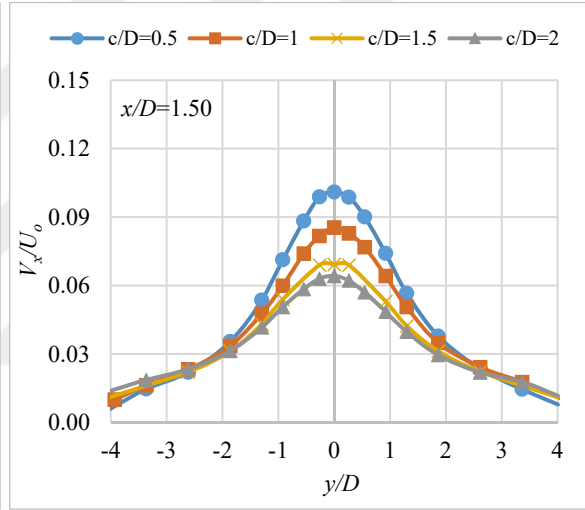
(a)



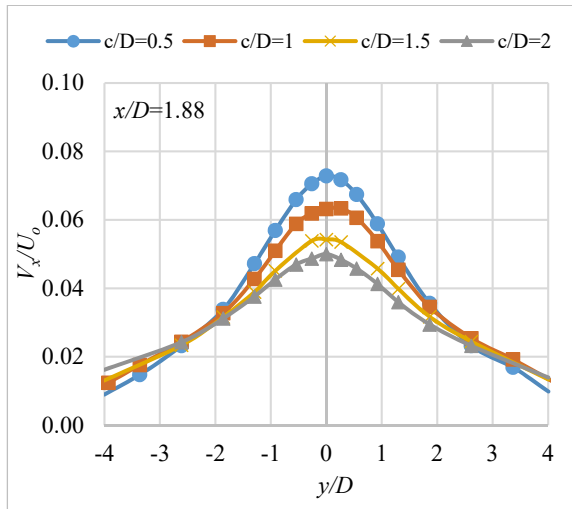
(b)



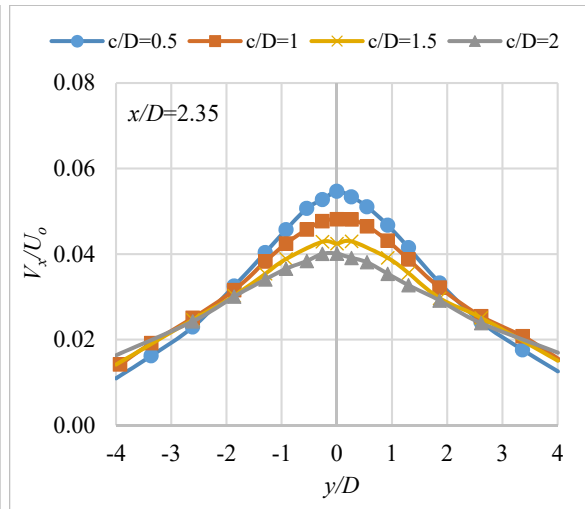
(c)



(d)

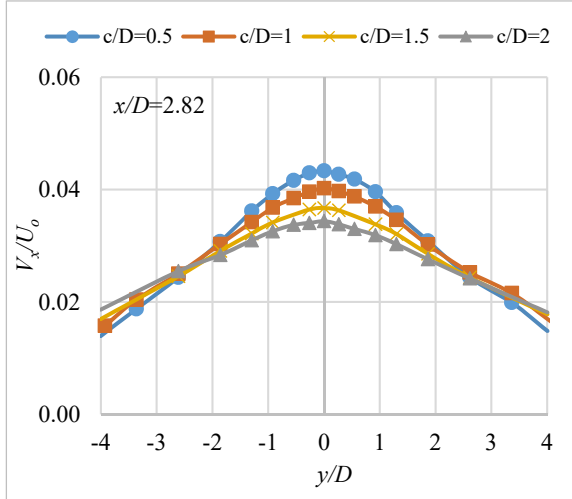


(e)

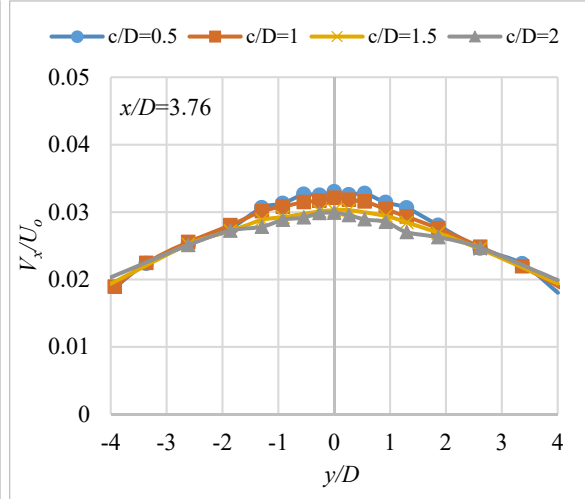


(f)

Şekil 5.14. Farklı c/D değerleri için V_x hızının yatayda değişimi ($l/D=0$) a) $x/D=0,70$, b) $x/D=0,94$, c) $x/D=1,13$, d) $x/D=1,50$, e) $x/D=1,88$, f) $x/D=2,35$, g) $x/D=2,82$, h) $x/D=3,76$



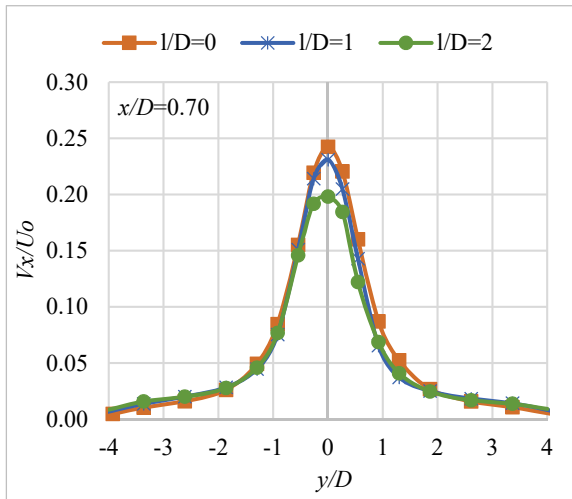
(g)



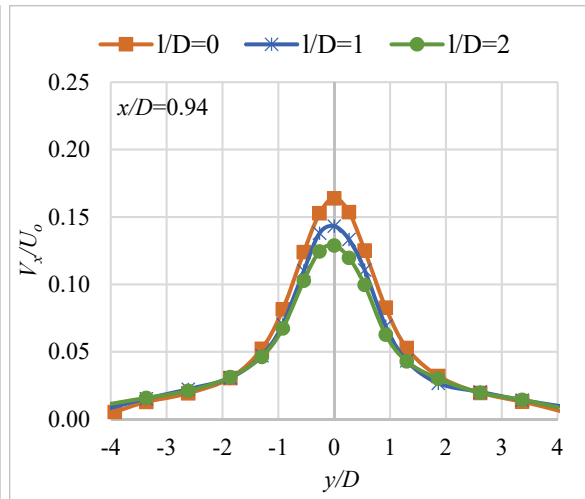
(h)

Şekil 5.14. (devam) Farklı c/D değerleri için V_x hızının yatayda değişimi ($l/D=0$) a) $x/D=0,70$, b) $x/D=0,94$, c) $x/D=1,13$, d) $x/D=1,50$, e) $x/D=1,88$, f) $x/D=2,35$, g) $x/D=2,82$, h) $x/D=3,76$

Diğer taraftan, ağzın ölü son duvarına olan mesafesi (l/D) arttıkça hız değerlerinin azaldığı, ancak $l/D=1$ ve 2 için, maksimum hızlar farklı olsa da $x/D=1,13$ itibariyle hız profillerin üst üste gelmeye başladığıdır. Ağızdan önemli ölçüde etkilenen ağza yakın bölge hızlarında farklılık olmakla birlikte, l/D mesafe etkisinin hızlı bir biçimde ortadan kaybolduğu görülmektedir (Şekil 5.15) Akım sınır etkilerinin artmasının, oluşan hızları da genel olarak arttırdığı Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'ten anlaşılmaktadır.

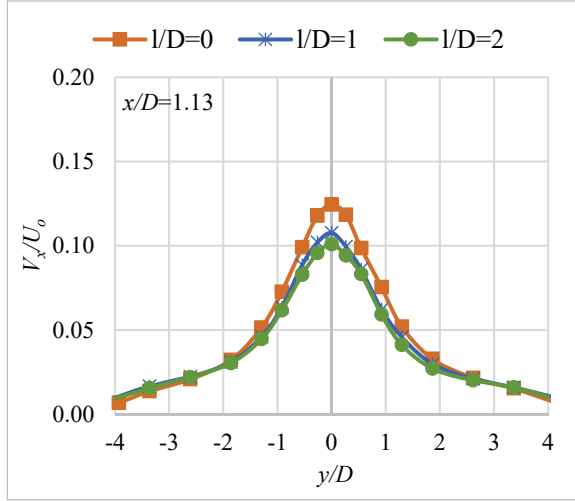


(a)

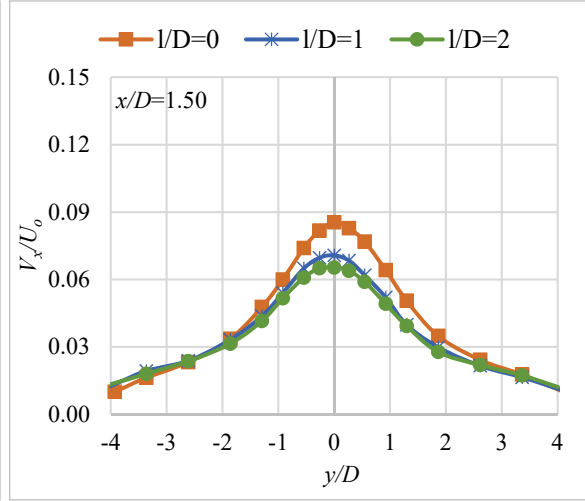


(b)

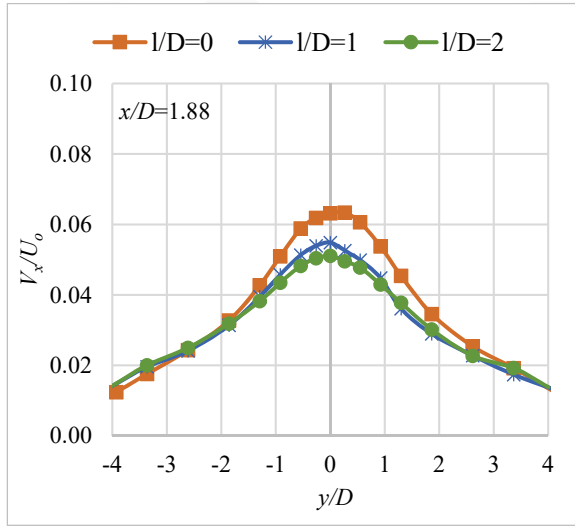
Şekil 5.15. Farklı l/D değerleri için V_x hızının yatayda değişimi ($c/D=1$) a) $x/D=0,70$, b) $x/D=0,94$, c) $x/D=1,13$, d) $x/D=1,50$, e) $x/D=1,88$, f) $x/D=2,35$, g) $x/D=2,82$, h) $x/D=3,76$



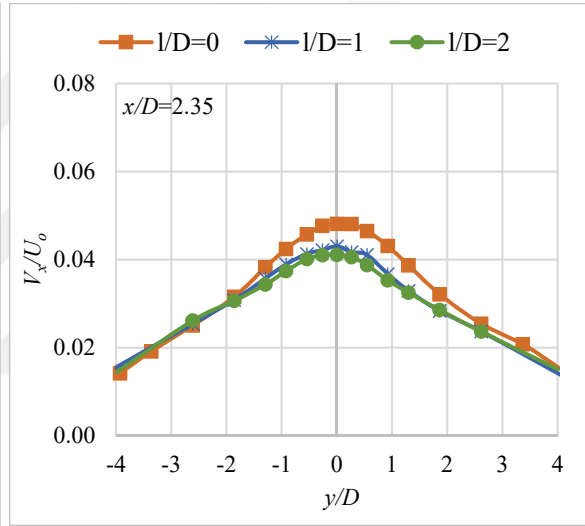
(c)



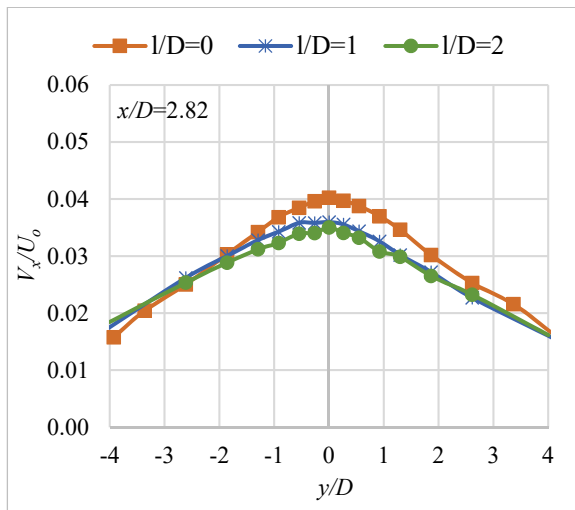
(d)



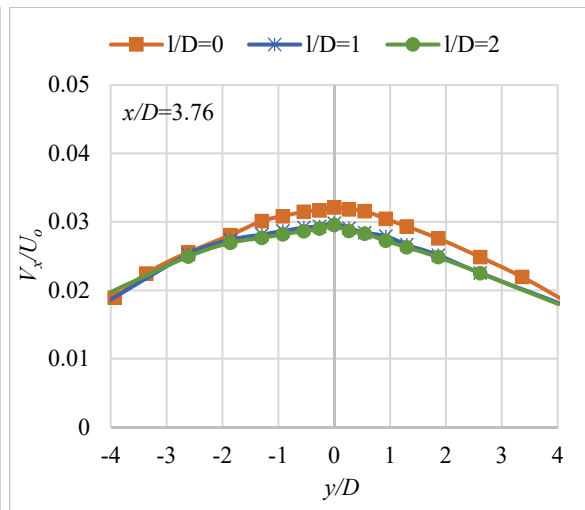
(e)



(f)



(g)



(h)

Şekil 5.15. (devam) Farklı l/D değerleri için V_x hızının yatayda değişimi ($c/D=1$) a) $x/D=0.70$, b) $x/D=0.94$, c) $x/D=1.13$, d) $x/D=1.50$, e) $x/D=1.88$, f) $x/D=2.35$, g) $x/D=2.82$, h) $x/D=3.76$

Ağız yerleşiminin V_x hızına olan etkisi Çizelge 5.4 üzerinden $x/D=0,70$ ve $0,94$ konumları için görülebilmektedir. Tabloda ağız tabanda ($c/D=0,5$ ve $l/D=0$) ve ölü son duvarı üzerinde ($l/D=0$ ve $c/D=1$) olduğu durumlar referans olarak alınmıştır. Akım sınırlarının V_x üzerinde $y/D=\pm 2$ aralığında etkili olduğu görülmektedir. Ağız tabana olan mesafesi, duvara olan mesafesine göre hız profili üzerinde daha kuvvetli bir değişim yaratmaktadır. Örneğin $x/D = 0,70$ konumunda, c/D değerinin $0,5$ 'ten $1,5$ 'e artırılması hız değerinde yaklaşık %30, l/D değerinin 0 'dan 1 'e çıkarılması ise yaklaşık %21 azalmaya neden olmaktadır.

Çizelge 5.4. Ağız yerleşiminin V_x hızına olan etkisi (%)

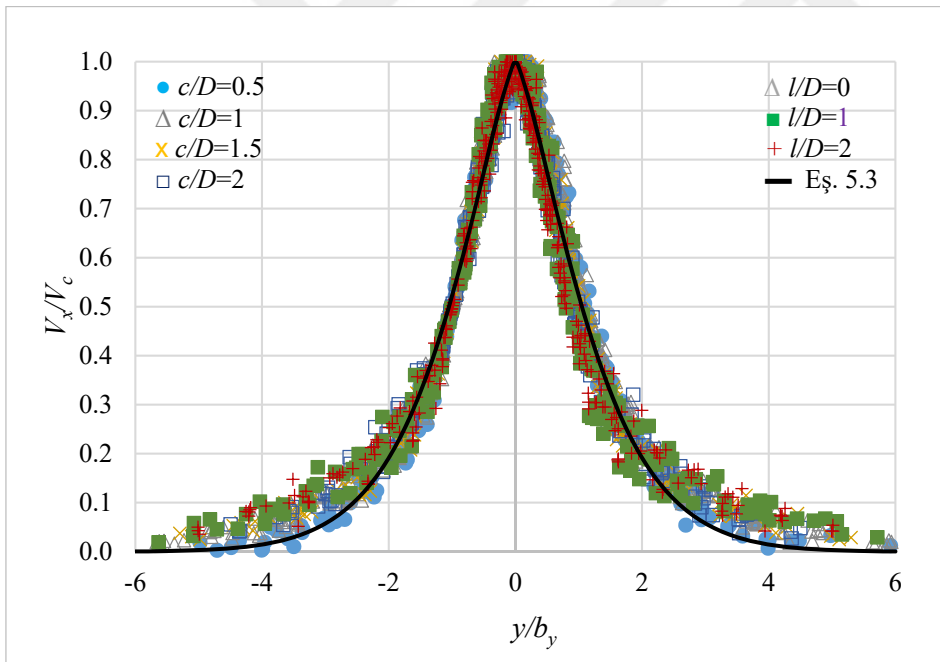
V_x değişimi (%)								
$x/D=0,70$	y/D	$c/D=0,5$	$c/D=1$	$c/D=1,5$	$c/D=2$	$l/D=0$	$l/D=1$	$l/D=2$
	0,00	-	-7,0	-24,0	-36,9	-	-5,1	-18,9
	0,26	-	-9,4	-21,0	-36,8	-	-7,1	-16,3
	0,55	-	-16,5	-25,4	-36,8	-	-10,8	-23,8
	0,92	-	-25,1	-30,0	-35,5	-	-20,7	-21,0
	1,30	-	-22,3	-30,4	-33,1	-	-20,9	-21,7
	1,86	-	-20,1	-23,1	-24,3	-	-6,5	-8,1
	2,61	-	-3,9	-7,2	-1,3	-	-0,7	-0,4
V_x değişimi (%)								
$x/D=0,94$	y/D	$c/D=0,5$	$c/D=1$	$c/D=1,5$	$c/D=2$	$l/D=0$	$l/D=1$	$l/D=2$
	0,00	-	-10,4	-27,2	-37,2	-	-12,4	-21,2
	0,26	-	-13,4	-27,4	-40,1	-	-13,2	-22,1
	0,55	-	-15,5	-27,8	-39,5	-	-11,6	-20,4
	0,92	-	-18,4	-29,0	-37,0	-	-16,5	-21,2
	1,30	-	-19,4	-26,3	-33,0	-	-18,1	-18,9
	1,86	-	-15,9	-23,2	-25,7	-	-6,8	-6,2
	2,61	-	-4,1	-6,8	-7,6	-	-0,7	-0,8

Wu ve Rajaratnam (1990) ve Powell ve Khan (2015) çalışmalarındakine benzer şekilde, hız değerleri ve yatay konum sırasıyla, ilgili (x/D) konumunda ağız merkez çizgisinde oluşan hız (V_c) ve yatayda $0,5V_c$ değerinin olduğu mesafe (b_y) kullanılarak

boyutsuzlaştırılmıştır. SPSS yazılımı kullanılarak çoklu regresyon analizi neticesinde elde edilen Eş. 5.3 aşağıda gösterilmektedir.

$$\frac{V_x}{V_c} = \exp(-a_2 |(y/b_y)|^{b_2}) \quad (5.3)$$

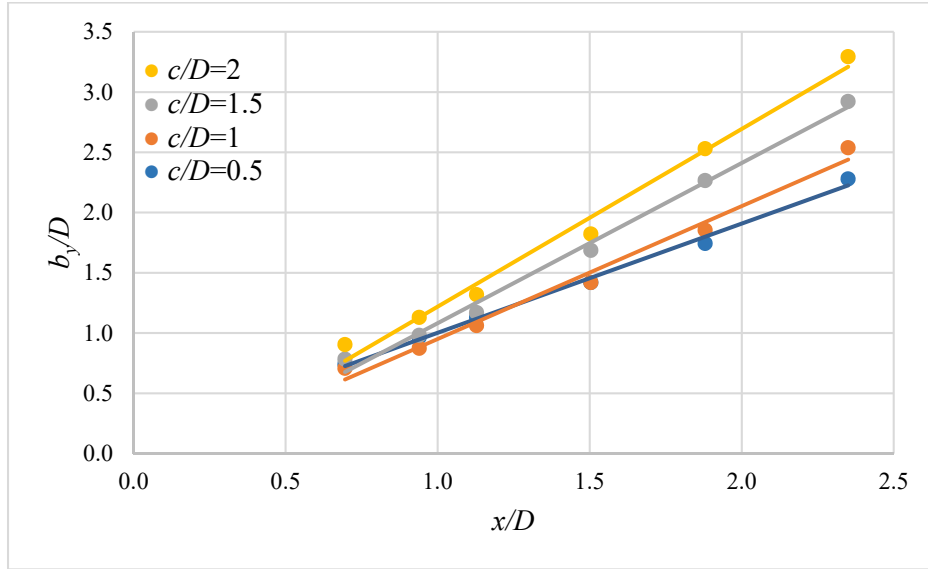
Eş. 5.3 katsayıları $a_2 = 0,649$; $b_2 = 1,347$ ve belirleme katsayısı değeri $R^2 = 0.98$ olmaktadır. Powell ve Khan (2015) çalışmasında ise bu katsayılar sabit ve hareketli taban durumları için sırasıyla $a_2 = 0,677$; $b_2 = 1,821$ ve $a_2 = 0,657$; $b_2 = 1,756$ olarak belirtilmiştir. Şekil 5.16, boyutsuz hız profilleri ve Eş. 5.3'ü tüm deney düzenekleri için göstermektedir. Ağzın tabana ve ölü sona olan uzaklıklarından bağımsız olarak, verileri ifade edecek tek bir eğri mümkün olmaktadır. Deneysel veriler ve Eş. 5.3 arasında $y/b_y = \pm 2$ mesafeleri dışında kalan bölgeler için uyumsuzluğun arttığı görülmektedir.



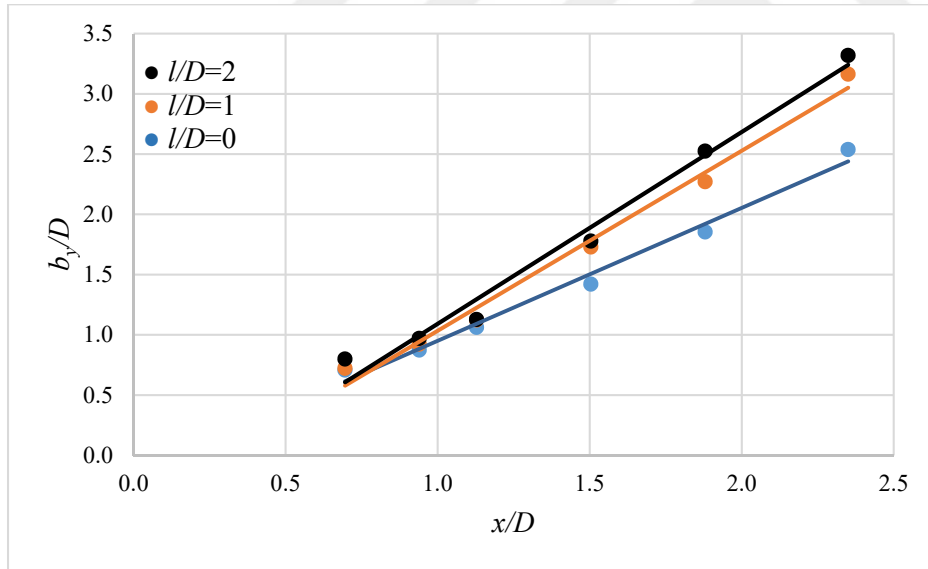
Şekil 5.16. Tüm düzenekler için boyutsuz V_x hız profilleri ile Eş. 5.3 karşılaştırması

Şekil 5.17'de ise yatay boyutsuzlaştırma parametresinin (b_y) kanal boyunca değişimi, c/D (Şekil 5.17-a) ve l/D (Şekil 5.17-b) için ayrı ayrı sunulmuştur. Ağzın akım sınırlarına olan mesafesi arttıkça, verileri birleştiren regresyon eğrilerinin eğiminin de arttığı görülmektedir. Bu durum, ağızdan kanal boyunca uzaklaştıkça gözlemlenen hız

profilinin yatayda genişlemesi olayının, sınır etkilerinin azaldığı durumlar için daha belirgin olduğunu göstermektedir.



(a)

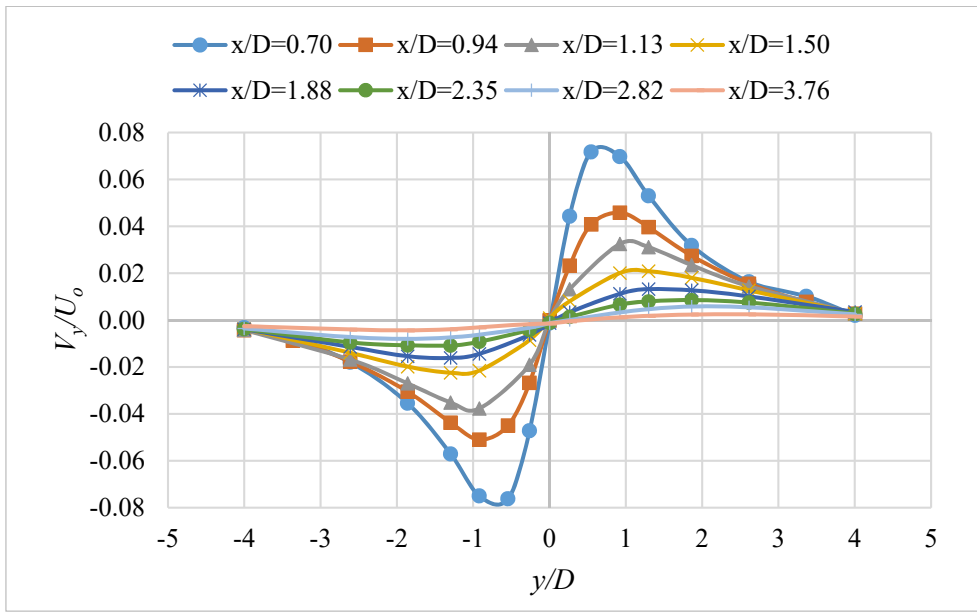


(b)

Şekil 5.17. Yatay boyutsuzlaştırma parametresinin (b_y) kanal boyunca değişimi (a) c/D 'ye göre ($l/D=0$) (b) l/D 'ye göre ($c/D=1$)

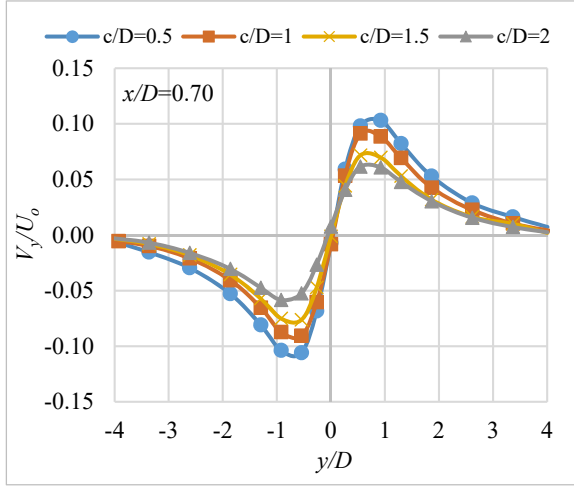
5.3.3. Ağız merkezi yüksekliğindeki V_y hızının kanal boyunca yatayda değişimi

Su alma ağız merkezi yüksekliğinde yatay yöndeki V_y hızının, kanal boyunca yatayda değişimi $c/D=1,5$; $l/D=0$ deney düzeneği için Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Hız profillerinin kanal boyunca değişimi diğer deney düzeneklerinde de benzer olduğu için birine örnek olarak yer verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere V_y ağız eksenine göre simetrik ve eksen üzerinde sıfır olmaktadır. Ağızdan uzaklaştıkça, özellikle $x/D=2$ ’den itibaren hız profillerinin genliği önemli ölçüde azalmaktadır.

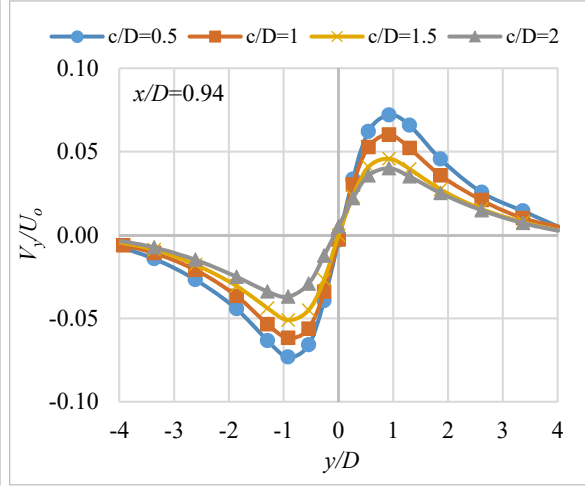


Şekil 5.18. $c/D=1,5$ için kanal boyunca V_y değişimi ($l/D=0$)

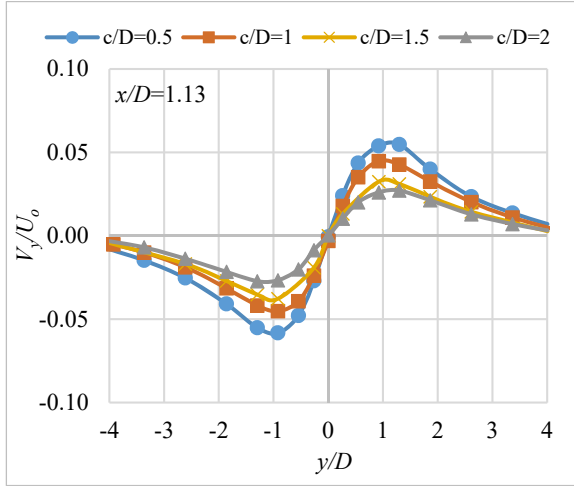
Ağız konumunun V_y üzerine etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için c/D ile değişim Şekil 5.19, l/D ile değişim Şekil 5.20’de farklı x/D konumları için gösterilmiştir. Her iki şekilde de c/D ve l/D parametrelerinden bağımsız, V_y profilinin tepe noktaları ağıza yakın bölgelerde $y = \pm D$ mesafesi içerisinde gelişirken, ağızdan uzaklaştıkça bu mesafenin $y = \pm 2D$ mertebesine genişlediği görülmektedir.



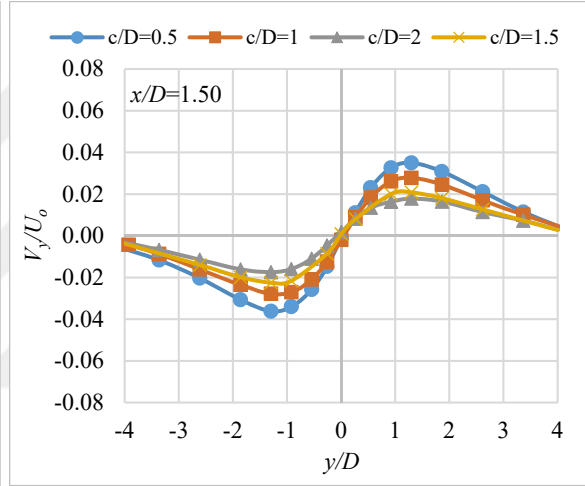
(a)



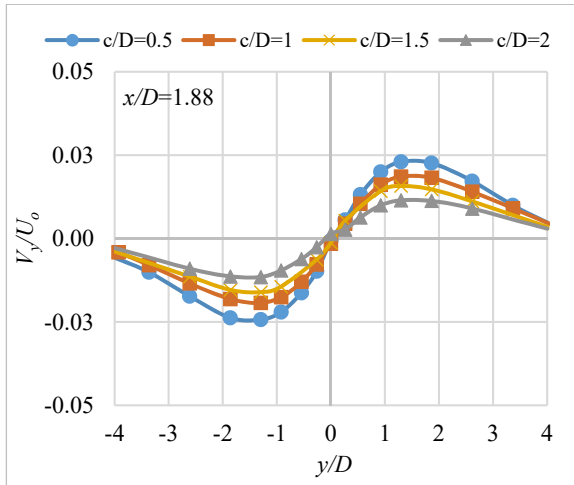
(b)



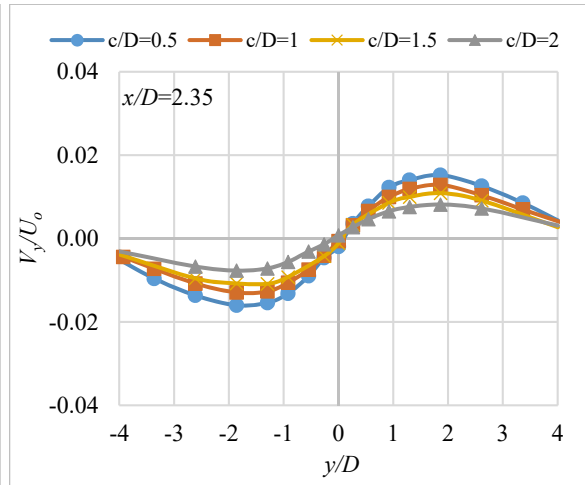
(c)



(d)

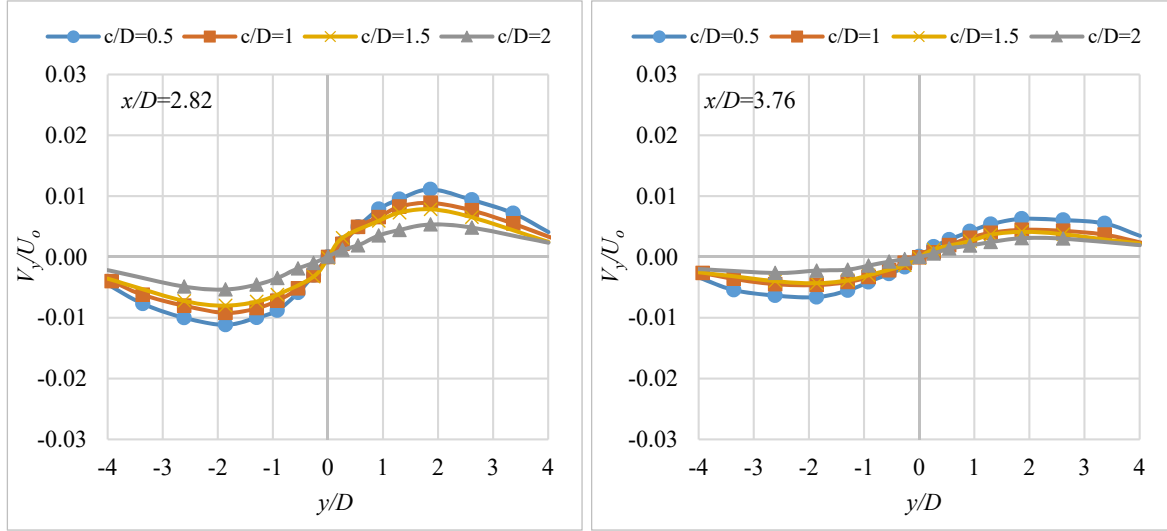


(e)



(f)

Şekil 5.19. Farklı c/D değerleri için V_y hızının yatayda değişimi ($l/D=0$) a) $x/D=0,70$, b) $x/D=0,94$, c) $x/D=1,13$, d) $x/D=1,50$, e) $x/D=1,88$, f) $x/D=2,35$, g) $x/D=2,82$, h) $x/D=3,76$

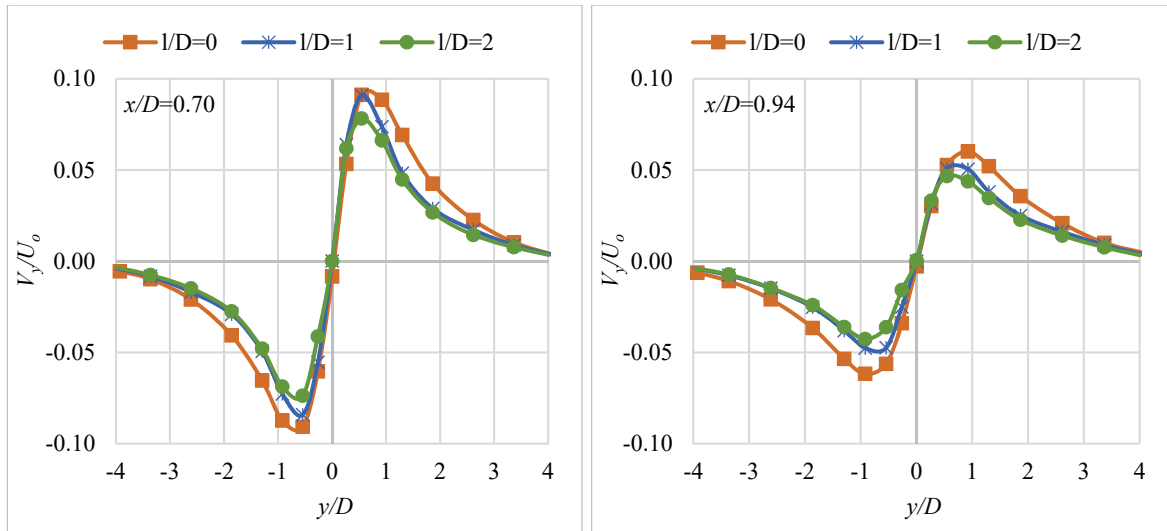


(g)

(h)

Şekil 5.19. (devam) Farklı c/D değerleri için V_y hızının yatayda değişimi ($l/D=0$) a) $x/D=0,70$, b) $x/D=0,94$, c) $x/D=1,13$, d) $x/D=1,50$, e) $x/D=1,88$, f) $x/D=2,35$, g) $x/D=2,82$, h) $x/D=3,76$

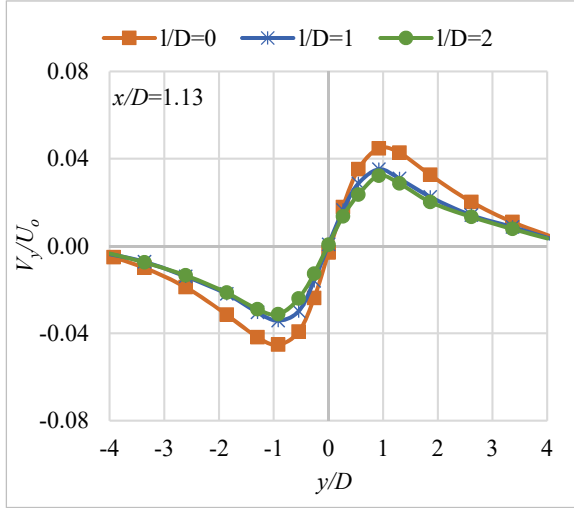
Şekil 5.20 incelendiğinde, Şekil 5.14'e benzer şekilde $l/D=1$ ve 2 için $x/D=1,13$ itibariyle V_y hız profilleri üst üste gelmeye başladığı anlaşılmaktadır. Akım sınır etkilerinin artmasının, oluşan hızları da arttırdığı Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de görülebilmektedir.



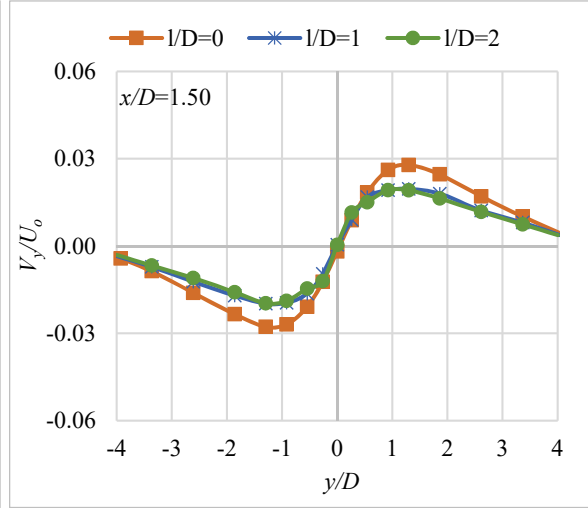
(a)

(b)

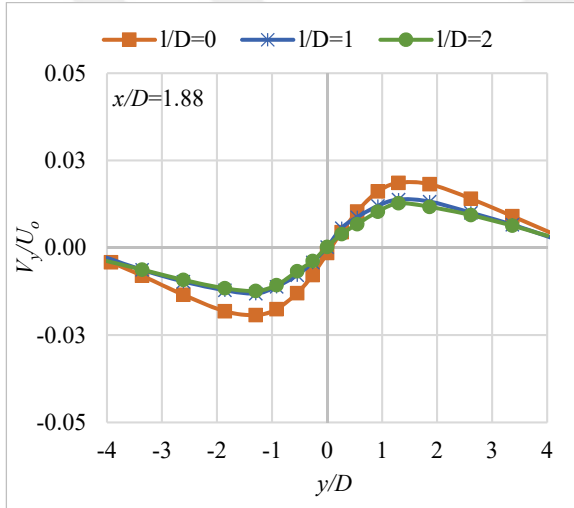
Şekil 5.20. Farklı l/D değerleri için V_y hızının yatayda değişimi ($c/D=1$) a) $x/D=0,70$, b) $x/D=0,94$, c) $x/D=1,13$, d) $x/D=1,50$, e) $x/D=1,88$, f) $x/D=2,35$, g) $x/D=2,82$, h) $x/D=3,76$



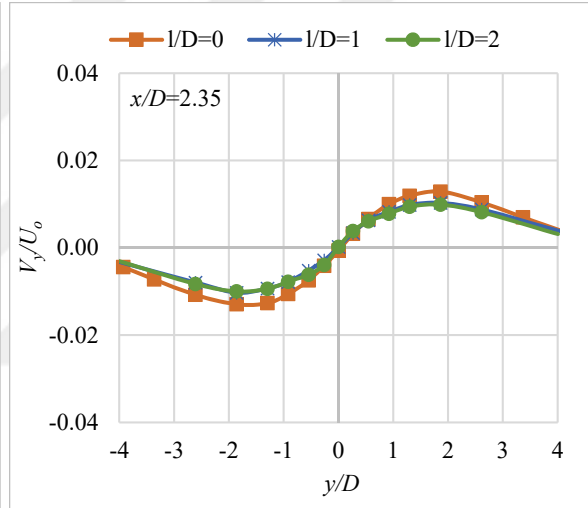
(c)



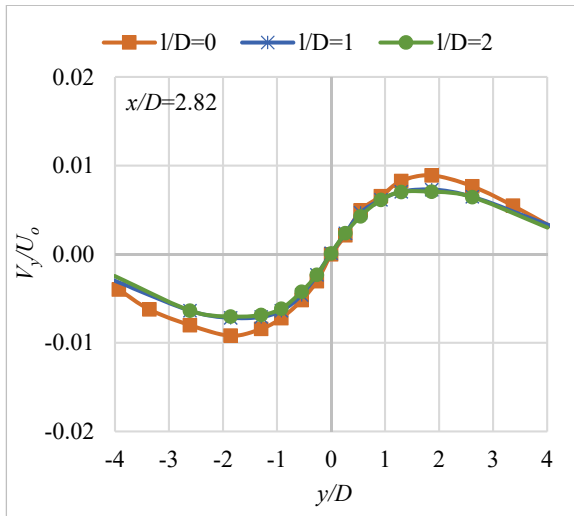
(d)



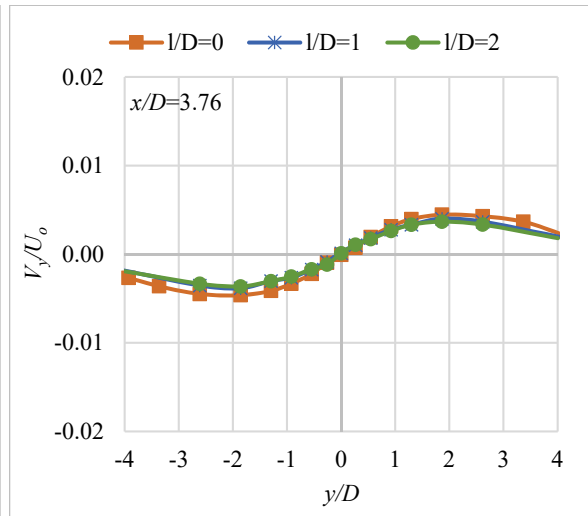
(e)



(f)



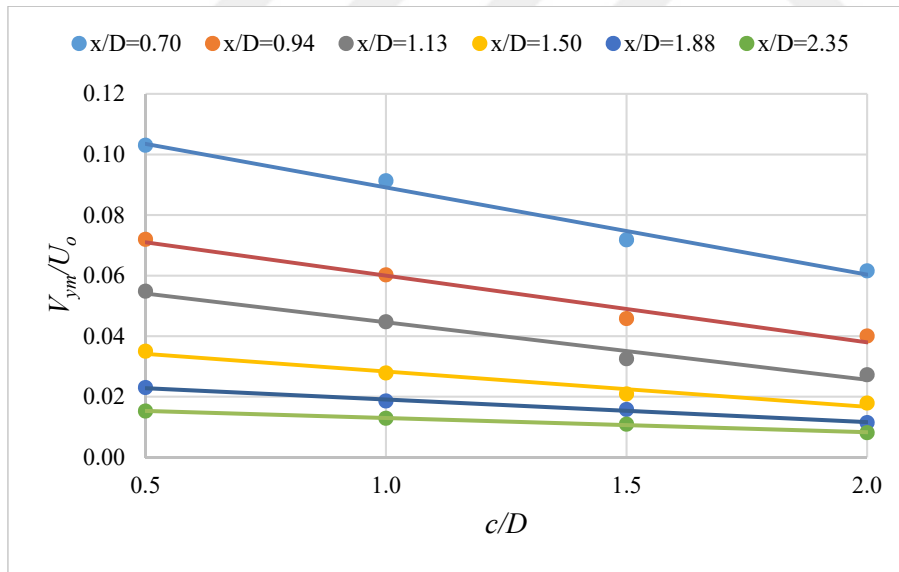
(g)



(h)

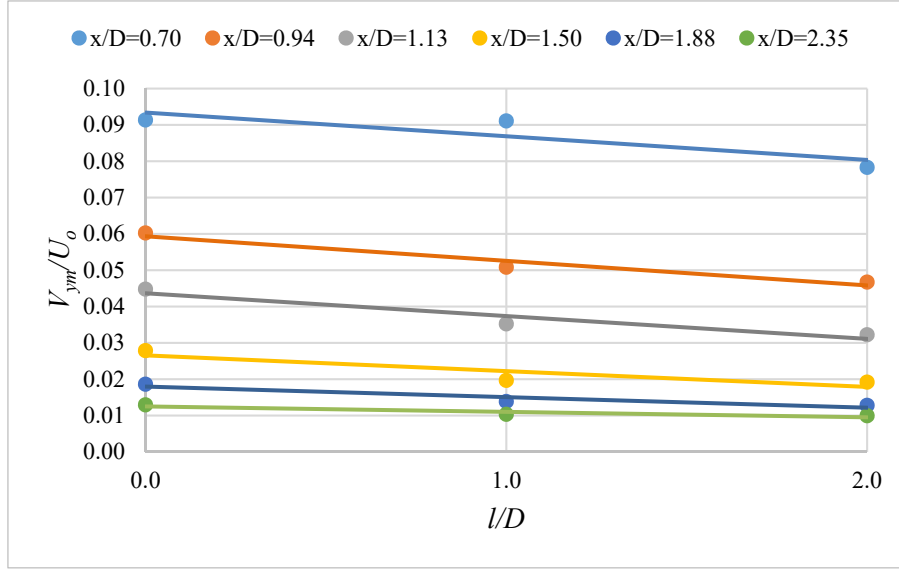
Şekil 5.20. (devam) Farklı l/D değerleri için V_y hızının yatayda değişimi ($c/D=1$) a) $x/D=0,70$, b) $x/D=0,94$, c) $x/D=1,13$, d) $x/D=1,50$, e) $x/D=1,88$, f) $x/D=2,35$, g) $x/D=2,82$, h) $x/D=3,76$

Şekil 5.21 (a) ve (b) sırasıyla c/D ve l/D 'nin maksimum yatay hız (V_{ym}) üzerine etkisini sabit x/D konumlarında ortaya koymaktadır. Çizelge 5.5 ise meydana gelen bu değişimlerin yüzdesel oranını göstermektedir. Tabloda, ağzın tabanda ($c/D=0,5$ ve $l/D=0$) ve ölü son duvarı üzerinde ($l/D=0$ ve $c/D=1$) olduğu durumlar referans olarak alınmıştır. Her iki durumda da sınır etkileri artışının maksimum yatay hızın da artmasına yol açtığı görülmektedir. Ancak bu artış l/D açısından, c/D değişiminde olduğu kadar yüksek mertebelerde değildir. Ağız konumunun V_{ym} üzerindeki etkisi, ağız akımının güçlü ve yatay hız profillerinin daha belirgin olduğu $x/D=1,50$ konumuna kadar daha açık şekilde gözlemlenmektedir. Bu aralıkta, c/D oranının 0,5'ten 1'e çıkarılması %21, 1'den 1,5'e çıkarılması %22, 1,5'ten 2'ye çıkarılması ise %10 oranında bir hız azalmasına yol açmaktadır. Aynı bölgede, l/D oranının 0'dan 1'e yükseltilmesi yatay hızda %30'a varan bir azalma oluştururken, 1'den 2'ye çıkarılması yalnızca %14'lük bir azalmaya neden olmaktadır. V_c hızında olduğu gibi, $c/D=1,5$ ve $l/D=1$ mesafelerinden sonra akım sınır etkilerinin azalmaya başladığı görülmektedir. c/D değişiminin V_{ym} üzerinde yaklaşık %52, l/D değişiminin ise yaklaşık %31 düzeyinde bir etkisi olabildiği görülmektedir.



(a)

Şekil 5.21. Ağız yerleşiminin V_{ym} hızına olan etkisi: (a) c/D değişimi ($l/D = 0$), (b) l/D değişimi ($c/D = 1$)



(b)

Şekil 5.21. (devam) Ağız yerleşiminin V_{ym} hızına olan etkisi: (a) c/D değişimi ($l/D = 0$), (b) l/D değişimi ($c/D = 1$)

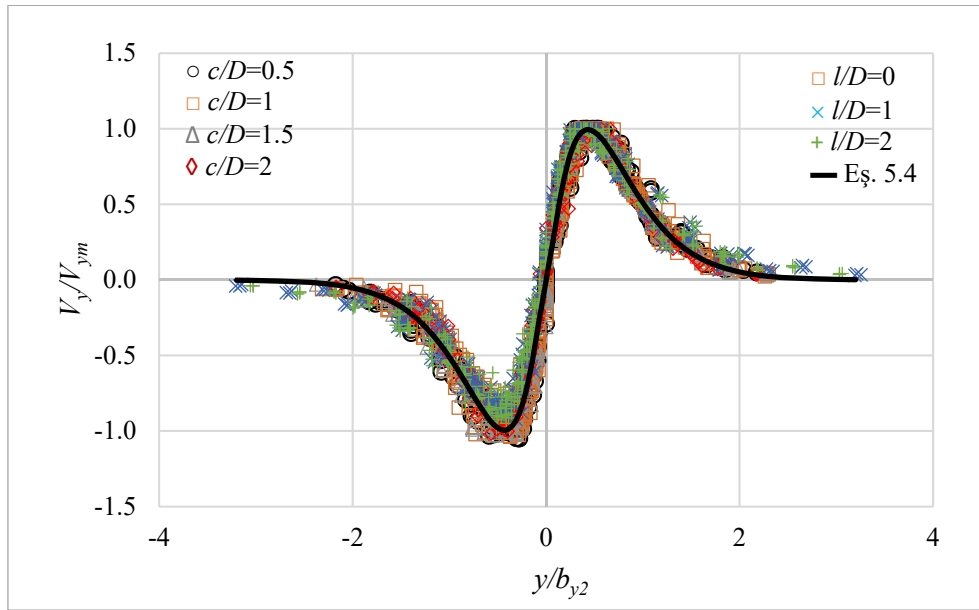
Çizelge 5.5. Ağız yerleşiminin V_{ym} hızına olan etkisi (%)

x/D	V_{ym} değişimi (%)					$l/D=0$	$l/D=1$	$l/D=2$
	$c/D=0,5$	$c/D=1$	$c/D=1,5$	$c/D=2$				
0,70	-	-11,4	-30,4	-40,3		-	-0,3	-14,3
0,94	-	-16,3	-36,3	-44,3		-	-15,6	-22,5
1,13	-	-18,3	-40,7	-50,3		-	-21,4	-28,1
1,50	-	-20,6	-40,3	-48,9		-	-29,5	-31,1
1,88	-	-19,2	-31,4	-50,1		-	-25,7	-31,3
2,35	-	-15,4	-28,5	-46,6		-	-20,0	-23,2
2,82	-	-19,8	-29,4	-51,8		-	-18,2	-20,7

İlgili x/D konumundaki yatay hız, maksimum yatay hız (V_{ym}); yatay konum ise, V_{ym} geliştikten sonra hız profili azalmaya başladığında görülen $0,5V_{ym}$ değerinin olduğu mesafe (b_{y2}) kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır (Wu ve Rajaratnam, 1990). SPSS yazılımı kullanılarak yapılan çoklu regresyon analizi neticesinde Eş 5.4 elde edilmiştir.

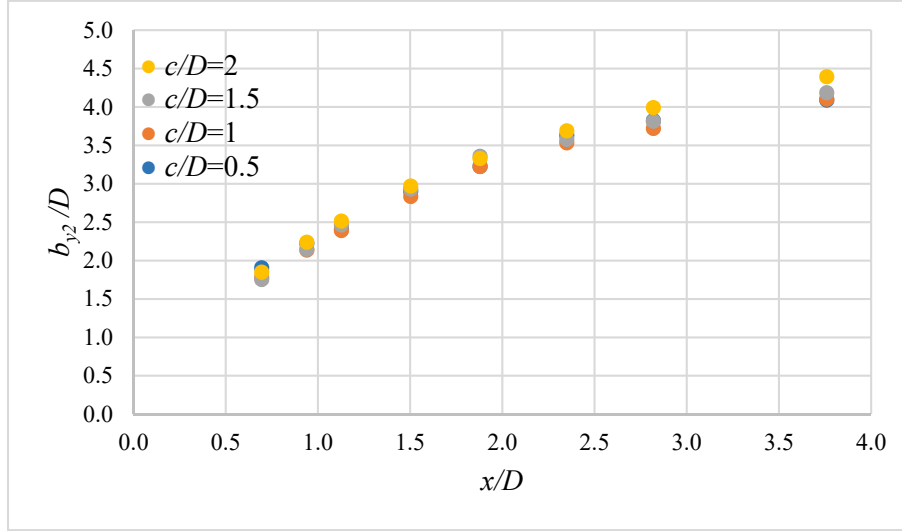
$$\frac{V_y}{V_{ym}} = a_3 (y/b_{y2})^{b_3} \exp(-c_3(y/b_{y2})) \quad (5.4)$$

Eş. 5.4 katsayıları $a_3=13,192$; $b_3=1,407$; $c_3=3,251$ ve belirleme katsayısı değeri $R^2=0.98$ olmaktadır. Şekil 5.22, boyutsuz hız profilleri ve Eş. 5.4'ü tüm deney düzenekleri için göstermektedir. Ağızın tabana ve ölü sona olan uzaklıklarından bağımsız olarak, verileri ifade edecek tek bir eğri mümkün olmaktadır. Eş. 5.4'ün, pozitif x eksen bölgesindeki veriler kullanılarak elde edildiği, orijine göre simetrisi alınarak x eksen negatif bölgesi için de çizildiği unutulmamalıdır.

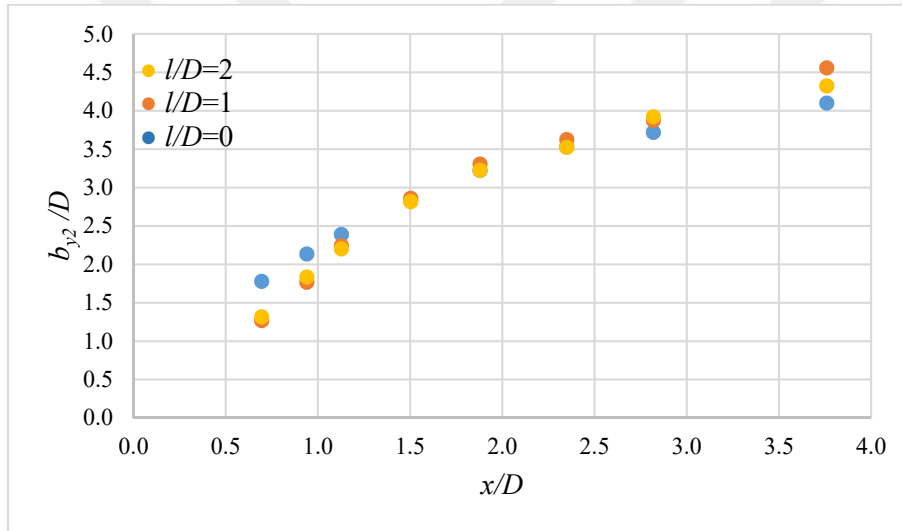


Şekil 5.22. Tüm deney düzenekleri için boyutsuz yatay hız profilleri ve Eş. 5.4

Şekil 5.23 ise yatay boyutsuzlaştırma parametresinin (b_{y2}) kanal boyunca değişimini c/D (Şekil 5.23 a) ve l/D (Şekil 5.23 b) için göstermektedir. b_{y2} değeri kanal uzunluğu boyunca, ağızdan uzaklaştıkça artmakta, bu durum da hız profilleri genişliğinin gittikçe arttığını ve ağız akımı etkisinin gittikçe ortadan kalkmaya başladığını göstermektedir. Farklı l/D düzenekleri için $x/D=1,5$ konumuna kadar $l/D=0$ için b_{y2} değerlerinin daha yüksek, dolayısıyla profilin yatayda daha geniş olduğu, ağızdan uzaklaşmaya devam ettikçe ise bu farkın gittikçe ortadan kalkmaya başladığı görülmektedir.



(a)



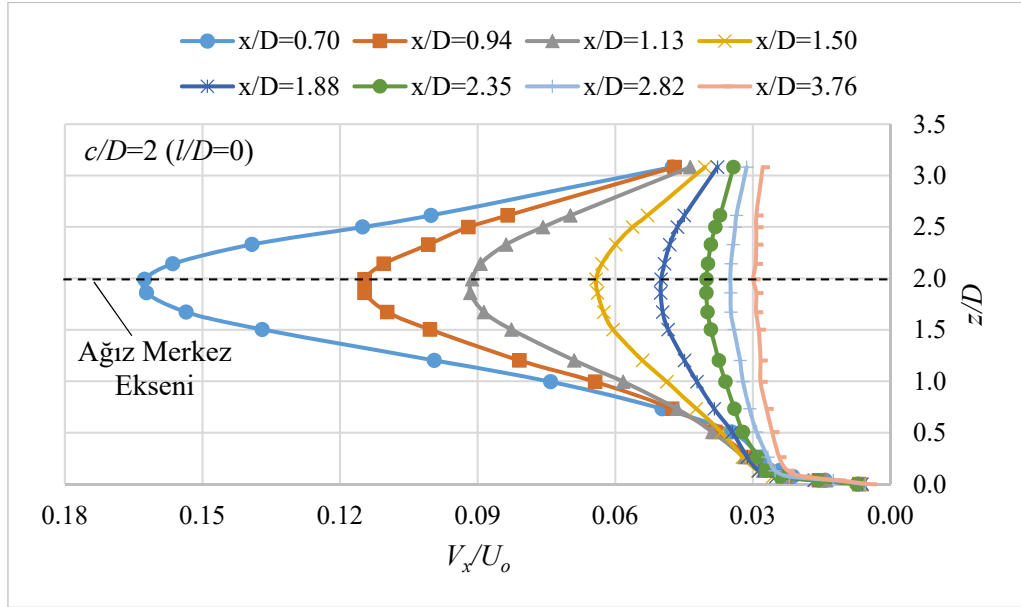
(b)

Şekil 5.23. Konuma bağlı b_{y2} değişimi (a) c/D etkisi ($l/D=0$), (b) l/D etkisi ($c/D=1$)

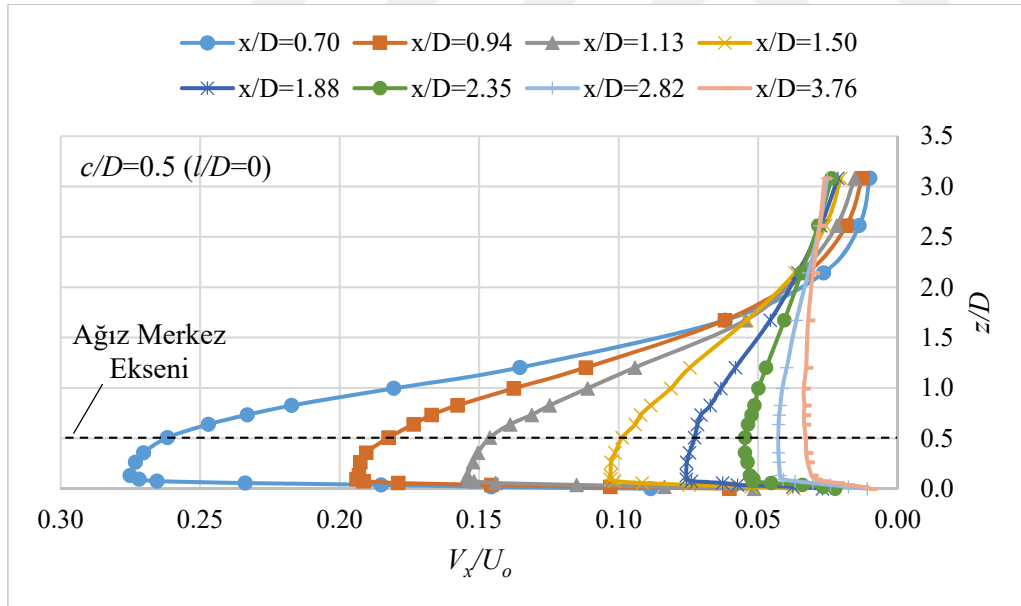
5.3.4. Ağız merkez eksenindeki V_x hızının kanal boyunca derinlikle değişimi

Ağız merkez eksenindeki V_x hızının kanal boyunca derinlikle değişiminin örnekleri $c/D=2$ için Şekil 5.24 (a)'da, $c/D=0,5$ için ise Şekil 5.24 (b)'de gösterilmektedir. Akım sınırlarının etkisinden uzaklaştıkça ($c/D=2$), maksimum hız ağza yakın konumlarda ağız merkez ekseninde, ağızdan kanal boyunca uzaklaştıkça ise ağız merkezinin altında meydana gelmektedir. Akım sınırları etkisinin en fazla olduğu durumda ($c/D=0,5$) ise, maksimum hız ağza yakın konumlarda ağız merkez ekseninin hemen altında oluşurken, ağızdan kanal boyunca uzaklaştıkça ağız merkez çizgisine doğru yaklaşmaktadır. $x/D=2$ konumundan

itibaren ağız akımı etkisini kaybetmeye başlamakta, hız profillerinde tepe noktası sönümlenmeye başlayarak profil genişliği artmaktadır.



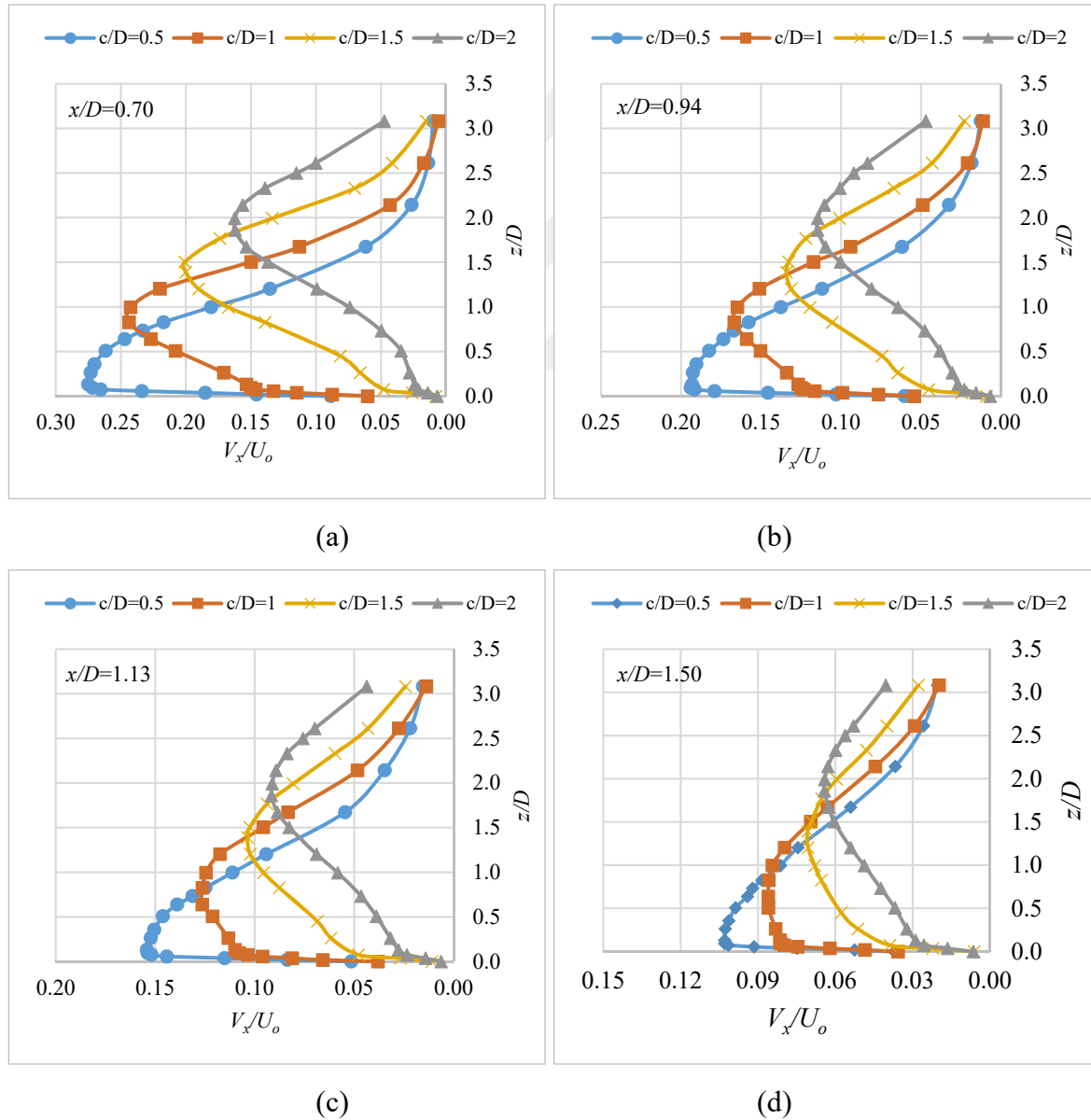
(a)



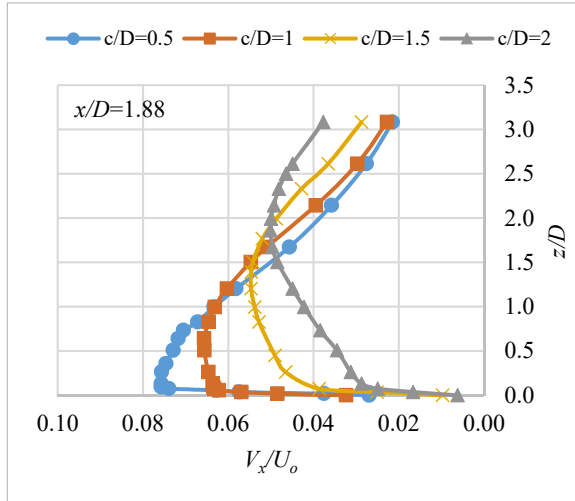
(b)

Şekil 5.24. V_x hızının derinlikle ve kanal boyunca değişimi (a) $c/D=2$ (b) $c/D=0,5$ ($l/D=0$)

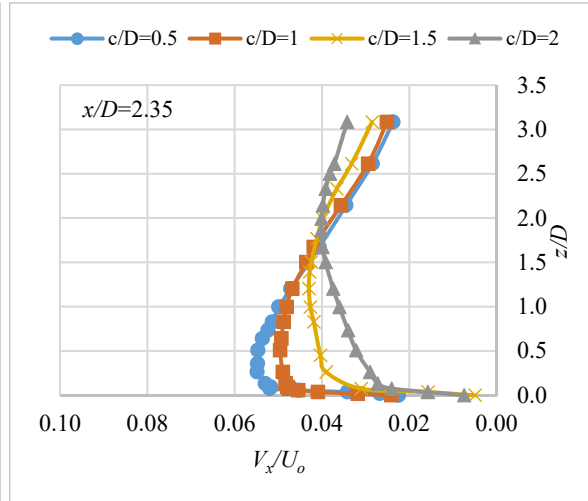
Ağız konumunun V_x üzerine etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için c/D değişimi Şekil 5.25, l/D değişimi Şekil 5.26'da farklı x/D konumları için gösterilmiştir. Sınır etkileri arttıkça, ağız akımı dolayısıyla oluşan hızların da gittikçe arttığı, ancak bu etkinin ağızdan uzaklaştıkça sönümlendiği şekillerden görülebilmektedir. Profillerin tepe bölgesinin genişliği ağızdan uzaklaştıkça artmaktadır. Profillerdeki hız farkları, su alma ağız, tabandan veya ölü son duvarından uzaklaştıkça azalmaktadır. $x/D = 3,76$ itibariyle ise ağız konumundan bağımsız, hız profillerinin büyük oranda birbirine benzediği görülmektedir. l/D etkisi açısından ise $l/D = 1$ ve 2 hız profillerinin $x/D = 2,82$ itibariyle büyük oranda üst üste oturmaya başladığı görülmektedir.



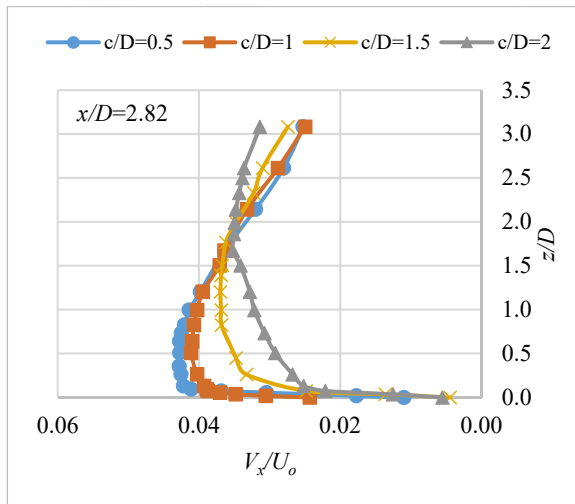
Şekil 5.25. V_x hızının derinlikle ve kanal boyunca değişimine c/D etkisi ($l/D=0$)



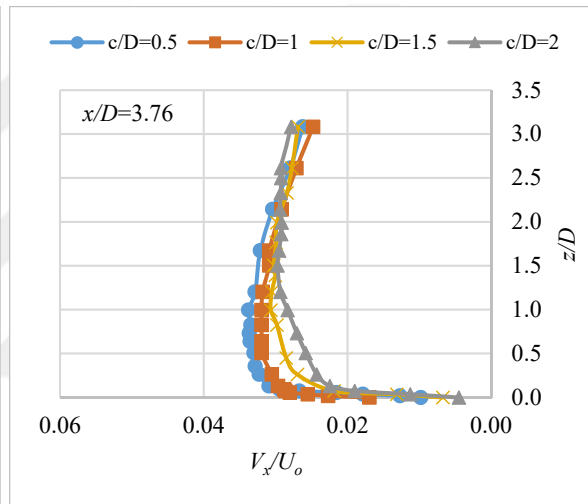
(e)



(f)

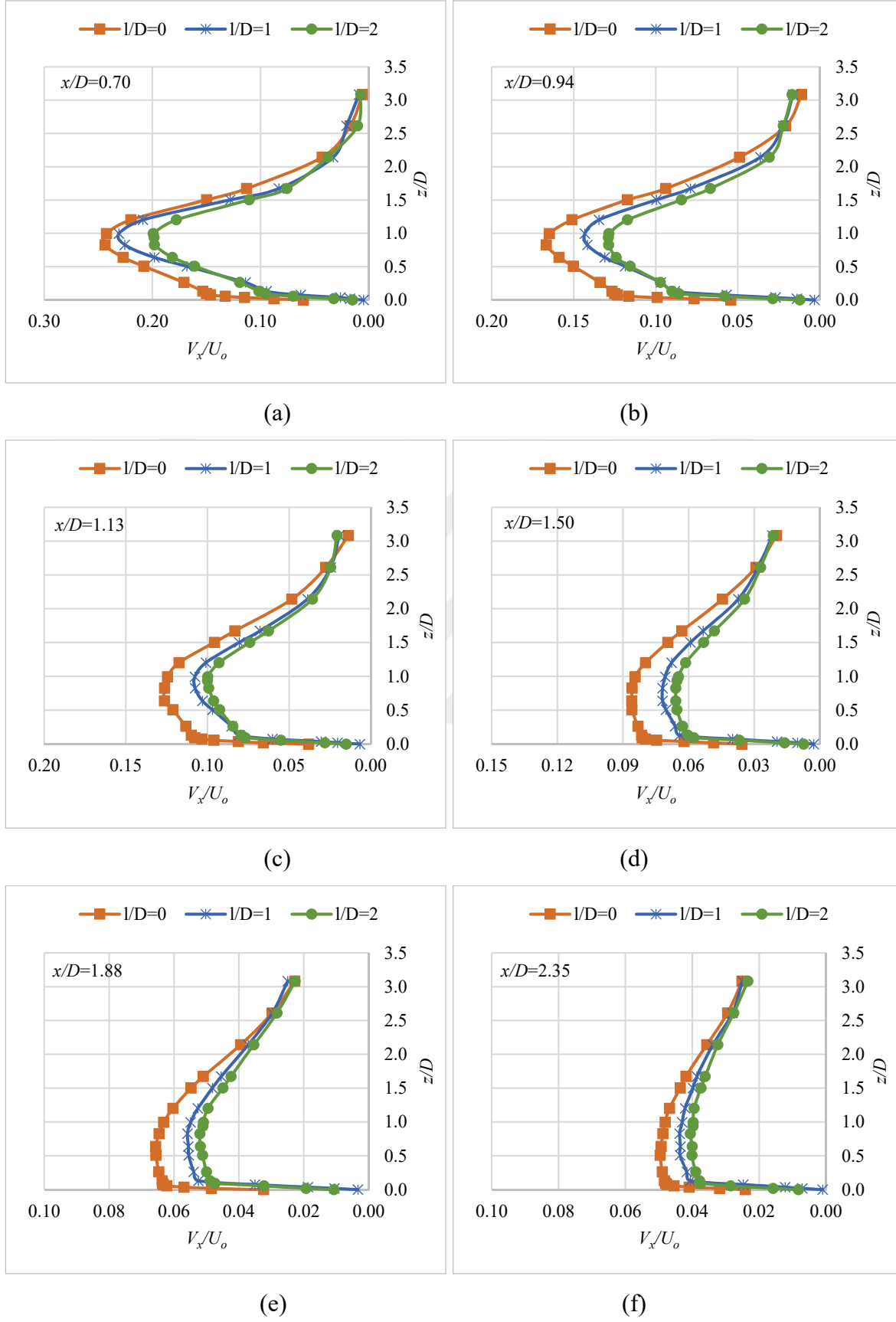


(g)

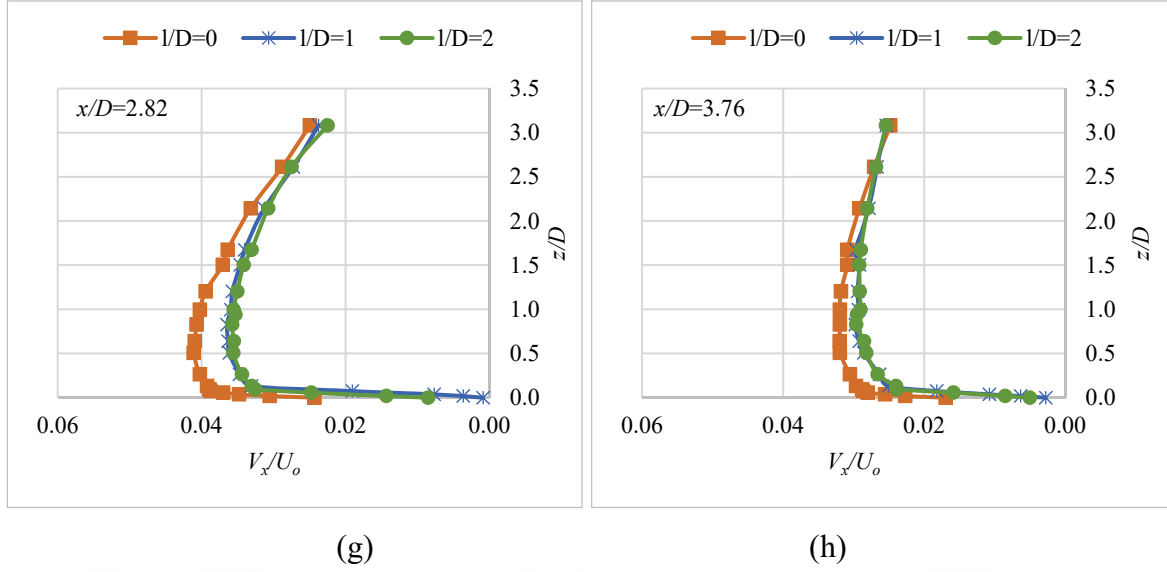


(h)

Şekil 5.25. (devam) V_x hızının derinlikle ve kanal boyunca değişimine c/D etkisi ($l/D=0$)

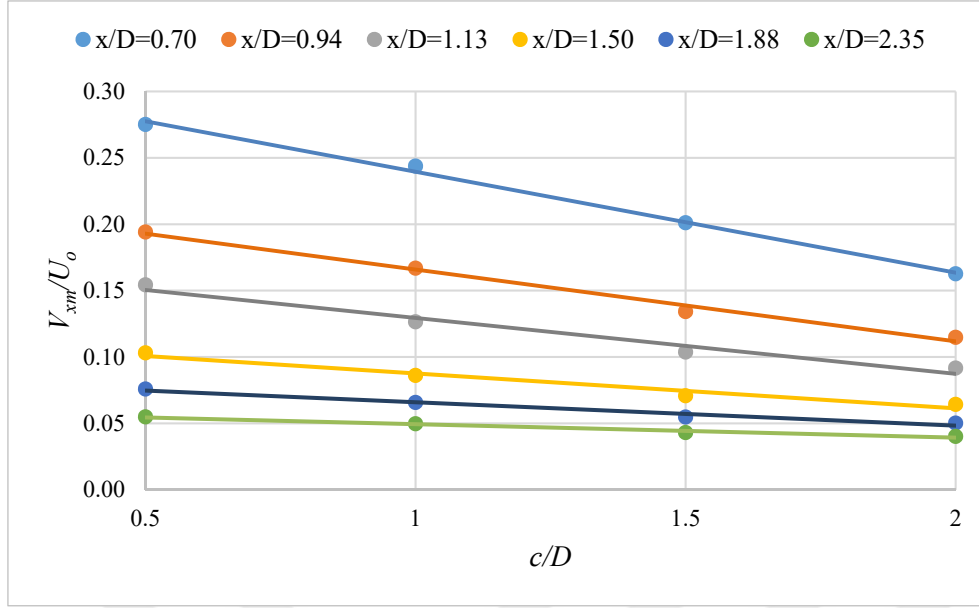


Şekil 5.26. V_x hızının derinlikle ve kanal boyunca değişimine l/D etkisi ($c/D=1$)

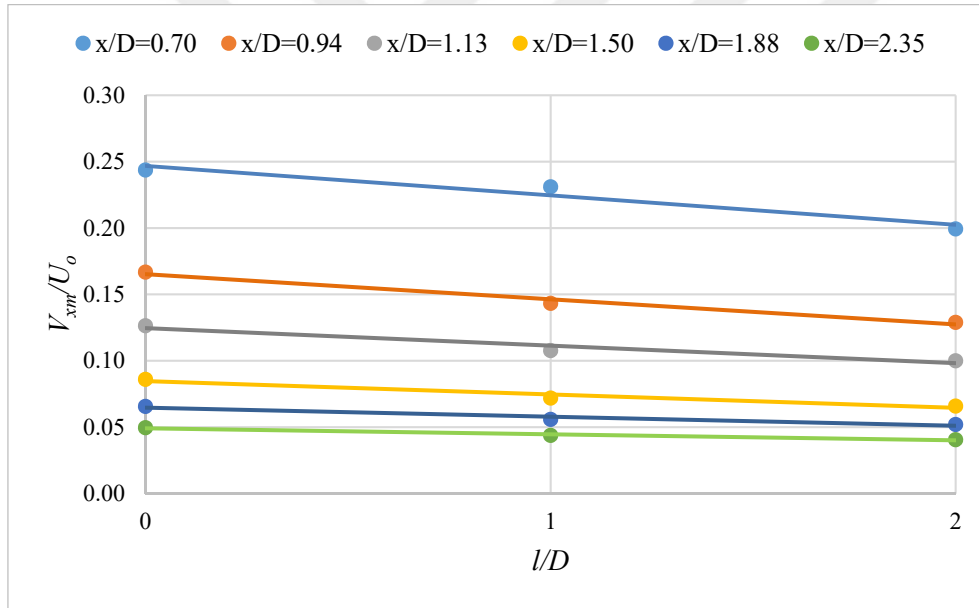


Şekil 5.26. (devam) V_x hızının derinlikle ve kanal boyunca değişimine l/D etkisi ($c/D=1$)

Şekil 5.27 su alma ağzı yerleşiminin ilgili konumdaki maksimum hıza (V_{xm}) etkisini (a) c/D , (b) l/D açısından ortaya koymaktadır. Çizelge 5.6 ise V_{xm} açısından, meydana gelen bu değişimlerin yüzdesel oranını göstermektedir. Tabloda ağzın tabanda ($c/D=0,5$ ve $l/D=0$) ve ölü son duvarı üzerinde ($l/D=0$ ve $c/D=1$) olduğu durumlar referans olarak alınmıştır. Her iki durumda da sınır etkileri artışının maksimum hızın da artmasına yol açtığı görülmektedir. Ağzın akım sınırlarına olan mesafesindeki değişimin V_{xm} üzerindeki etkisi, V_c 'ye benzer şekilde, $x/D=0,94-1,88$ aralığında en belirgin olmaktadır. Örneğin, $x/D = 1,13$ için yapılan incelemede, c/D 'nin 0,5'ten 1'e ve ardından 1'den 1,5'e çıkarılmasının V_{xm} üzerinde sırasıyla %18 ve %14,8'lik bir azalmaya neden olduğu, 1,5'ten 2'ye çıkarılmasının ise yalnızca %7,8'lik bir azalma yarattığı görülmektedir. Benzer bir durum, ağzın ölü son duvarına olan mesafesindeki değişimde de gözlemlenmektedir. $x/D = 1,5$ için, l/D 'nin 0'dan 1'e çıkarılması V_{xm} 'nin %16,3 azalmasına yol açarken, 1'den 2'ye çıkarılması %7,1'lik bir azalmaya sebep olmaktadır. c/D değişiminin V_{xm} üzerinde yaklaşık %41, l/D değişiminin ise yaklaşık %23 düzeyinde bir etkisi olabildiği görülmektedir.



(a)



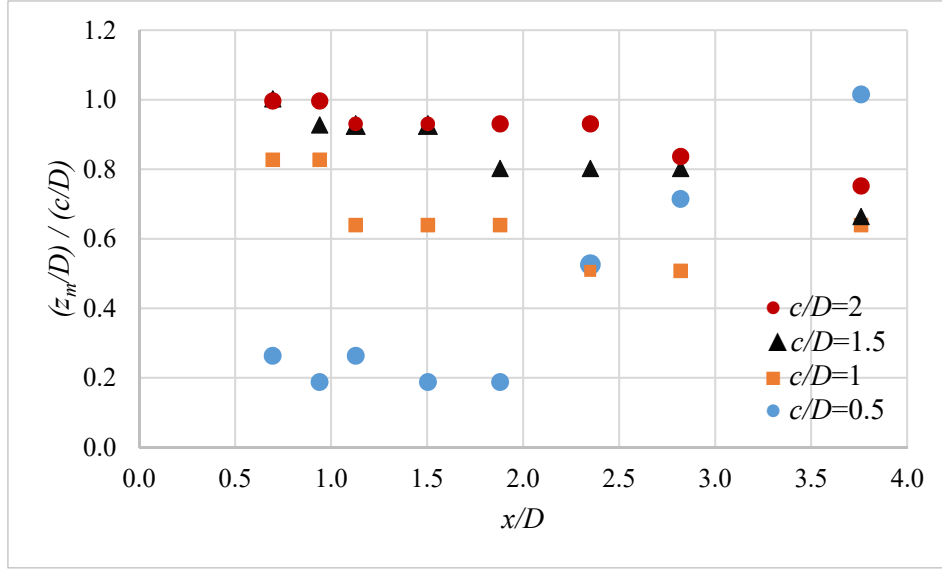
(b)

Şekil 5.27. Ağız yerleşiminin V_{xm} hızına olan etkisi: (a) c/D değişimi ($l/D = 0$), (b) l/D değişimi ($c/D = 1$)

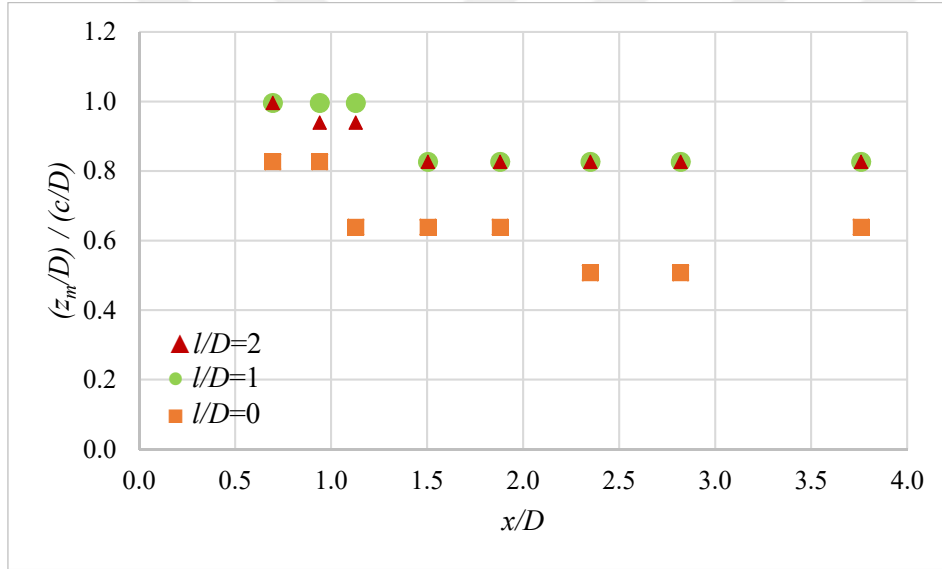
Çizelge 5.6. Ağız yerleşiminin V_{xm} hızına olan etkisi (%)

x/D	V_{xm} değişimi (%)							
	$c/D=0,5$	$c/D=1$	$c/D=1,5$	$c/D=2$		$l/D=0$	$l/D=1$	$l/D=2$
0,70	-	-11,4	-26,9	-40,9		-	-5,2	-18,2
0,94	-	-14,1	-30,8	-40,9		-	-14,1	-22,7
1,13	-	-18,0	-32,8	-40,6		-	-14,8	-20,9
1,50	-	-16,5	-31,3	-37,6		-	-16,3	-23,4
1,88	-	-13,3	-27,8	-33,9		-	-15,0	-20,8
2,35	-	-9,6	-21,6	-26,8		-	-11,7	-18,1
2,82	-	-3,9	-13,6	-17,7		-	-11,3	-13,1
3,76	-	-4,7	-8,6	-11,4		-	-6,9	-7,2

Şekil 5.25 ve 5.26 incelendiği takdirde sınır etkilerinin, oluşan maksimum hızın ağız merkez çizgisinin altında meydana gelmesine sebep olduğu, bu etkiler ortadan kalktıkça ise maksimum hızın ağız merkez çizgisine doğru hareket ettiği görülmektedir. Bu değişimin sınır etkileri ve kanal boyunca olan konum açısından ilişkisini netleştirebilmek için Şekil 5.28 ortaya konulmuştur. Şekil 5.28 (a) c/D etkisini, Şekil 5.28 (b) l/D etkisini maksimum hızın olduğu (z_m) yüksekliği üzerinden açıklamaktadır. Her iki şekilde de z_m değeri, düzeneğin c/D değerine bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. Şekil 5.28 (b) için üç düzenekte de ağzın tabana olan yüksekliğinin ($c/D = 1$) aynı olduğu unutulmamalıdır. $c/D = 0,5$ haricinde tüm düzeneklerde kanal boyunca ağızdan uzaklaştıkça maksimum hızın ağız merkezinden daha aşağıda oluşmaya başladığı görülmektedir. $c/D = 0,5$ 'teki durumun farklı olmasının sebebi de ağız merkezinin tabana çok yakın konumlanmasından ötürüdür.



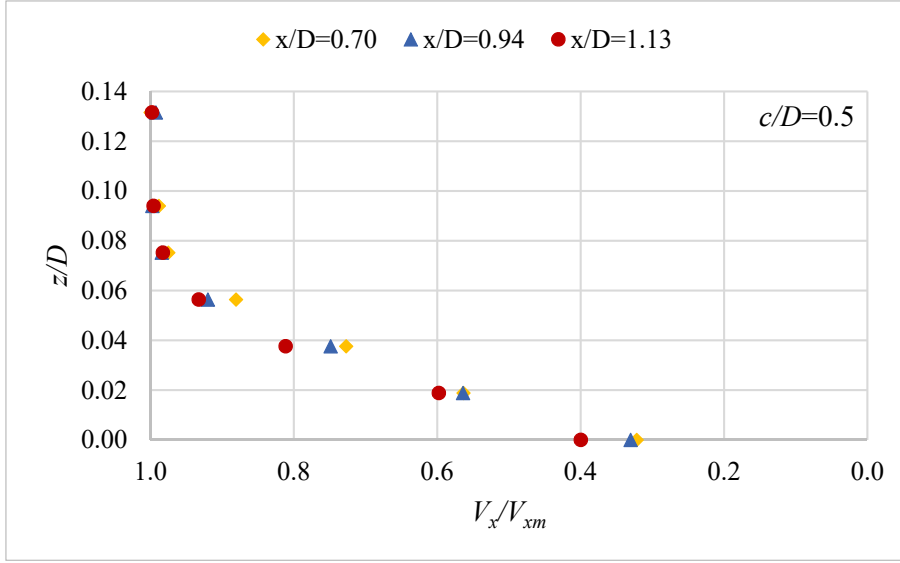
(a)



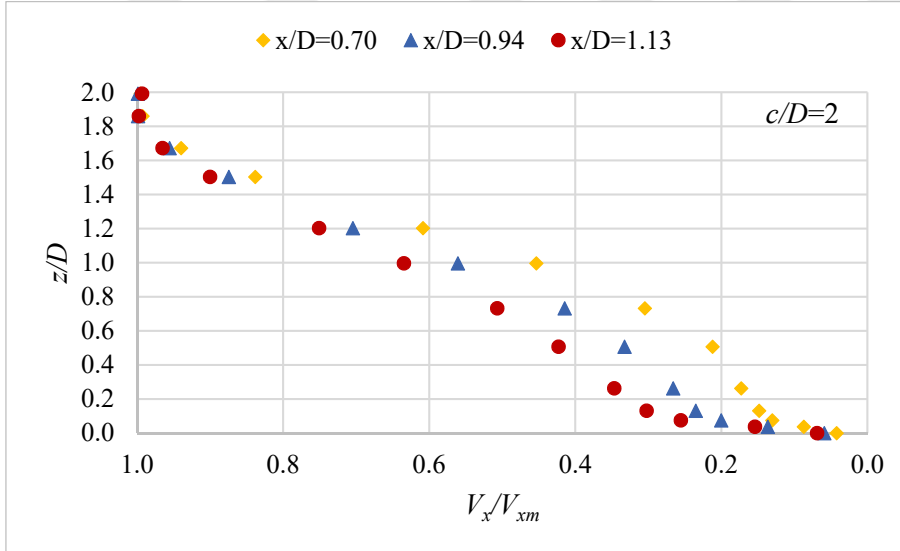
(b)

Şekil 5.28. Maksimum hızın oluştuğu yüksekliğin (z_m) konuma bağlı değişimi (a) c/D etkisi ($l/D=0$) (b) l/D etkisi ($c/D=1$)

Bölüm 3'te detayları sunulduğu üzere, hız ölçümleri kanal tabanında 8 mm çapında tanelerin yerleşik olarak bulunduğu koşullarda gerçekleştirilmiştir. $x/D=0,70$; $0,94$ ve $1,13$ için $c/D=0,5$ ve 2 düzeneklerinde, maksimum hızın gerçekleştiği yüksekliğe kadar olan düşey yönde V_x dağılımı, sırasıyla Şekil 5.29 (a) ve (b)'de gösterilmektedir. $c/D=0,5$ ve 2 düzenekleri ağzın tabana olan mesafesinde iki ayrı limit durumu yansıttıkları için seçilmiş, bu sebeple ara düzeneklere yer verilmemiştir.



(a)



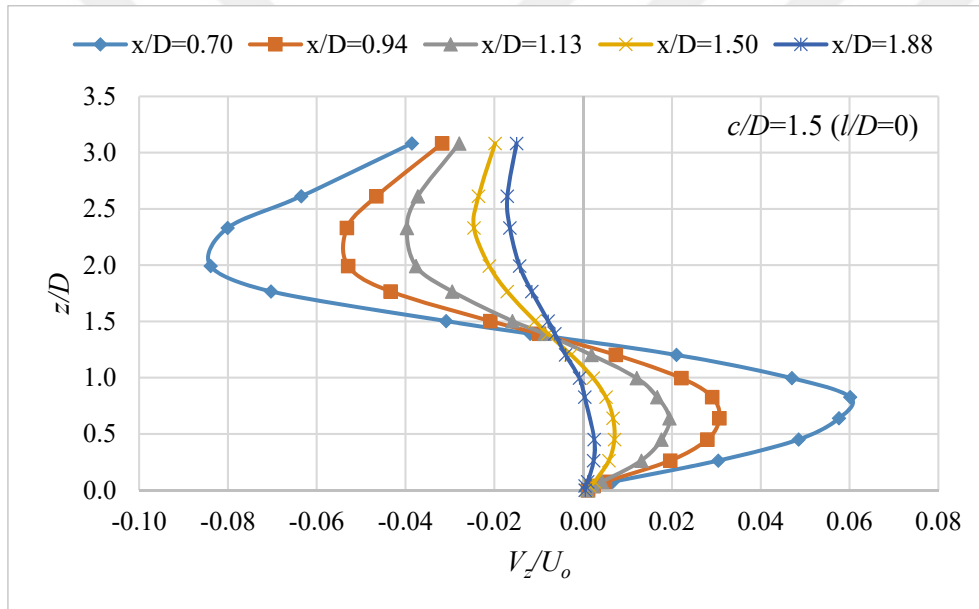
(b)

Şekil 5.29. Tabandaki hız dağılımının değişimi (a) $c/D=0,5$, (b) $c/D=2$ ($l/D=0$)

Sınır etkilerinin en fazla olduğu, ağzın tabanda yer aldığı $c/D=0,5$ düzeneğinde $z/D = 0,019$ yüksekliğinde ($z \approx 0,1\text{cm}$) yaklaşık $0,60V_{xm}$, $z/D = 0,075$ yüksekliğine ($z \approx 0,4\text{cm}$) ise $0,99V_{xm}$ hızına ulaşıldığı görülmektedir. $c/D = 2$ düzeneğinde ise $z/D = 1,20$ yüksekliğinde ($z \approx 6,4\text{cm}$) yaklaşık $0,60V_{xm}$, $z/D = 1,67$ yüksekliğine ($z \approx 8,9\text{cm}$) ise $0,90V_{xm}$ hızına ulaşıldığı görülmektedir. Bu durum sınır etkilerinin en fazla olduğu düzenek için hız profilinin çok hızlı geliştiğini göstermektedir. Bölüm 3'te de ayrıntılı olarak incelendiği üzere, tabandaki katı tanelerin harekete geçmesi için ağızdan çekilmesi gereken debi, akım sınır etkilerinin artmasıyla birlikte, hız dağılımı üzerinden de görülebileceği gibi belirgin şekilde azalabilmektedir.

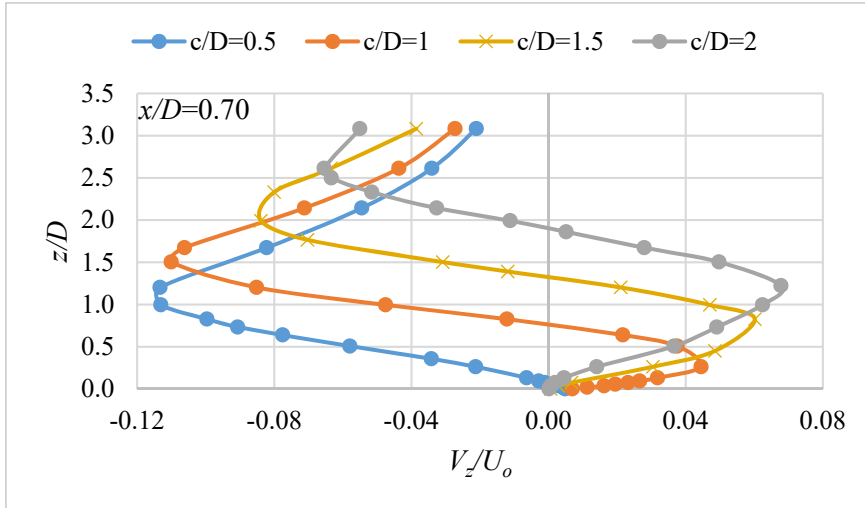
5.3.5. Ağız merkez eksenindeki V_z hızının kanal boyunca derinlikle değişimi

Şekil 5.30 ağız merkez çizgisindeki ($y/D = 0$) düşey yönde oluşan V_z hızının, kanal boyunca farklı konumlardaki derinlikle değişimini $c/D=1,5$ düzeneği için göstermektedir. V_z diğer hız bileşenlerine kıyasla daha düşük değerler almakta, $x/D=1,88$ konumundan sonra ise hız profilleri belirginliğini kaybetmeye başlamaktadır. Bu sebeple Şekil 5.30'da $x/D=1,88$ konumundan sonra oluşan profillere yer verilmemiştir. Farklı x/D konumlarında, V_z üzerine c/D etkisini ortaya koymak için Şekil 5.31, l/D etkisi için ise Şekil 5.32 sunulmuştur. Önceki başlıklarda ortaya konulan sınır etkilerinin hız dağılımına olan yansımaları V_z açısından da benzerlikler taşımaktadır.

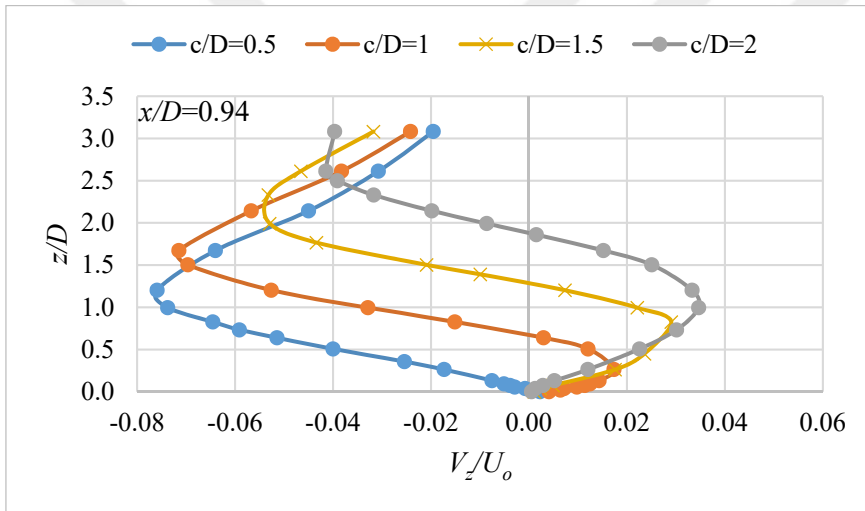


Şekil 5.30. $c/D=1,5$ için kanal boyunca ve derinlikle V_z değişimi ($l/D=0$)

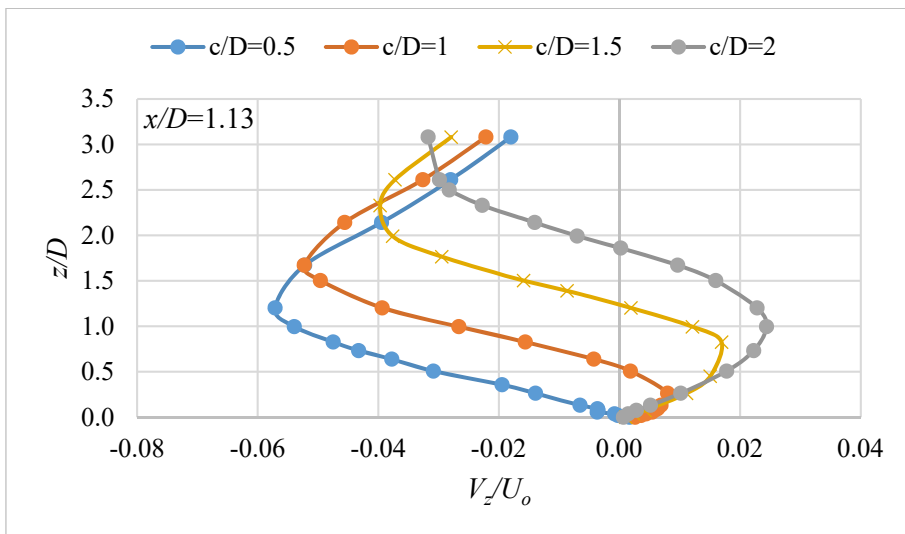
Ağıza yakın bölgelerde, $c/D=2$ için V_z profillerinde yön değişimi ağız merkezinin hemen altında meydana gelmektedir. Ağız yerleşimi tabana yaklaştırıldıkça ise yön değişiminin konumu, ağız merkez çizgisinin gittikçe daha fazla altında meydana gelmeye başlamaktadır. Öyle ki sınır durum $c/D=0,5$ için V_z profilleri yön değişimi tabanın hemen üzerinde meydana gelmektedir ($x/D=0,70$ için $z/D=0,08$, $x/D=0,94$ için $z/D=0,04$). Şekil 5.31 ve 5.32 üzerinden de görülebildiği gibi, akım sınır etkilerinin ortadan kalkmaya başlaması, meydana gelen V_z hızını azaltmaktadır. Önceki başlıklarda incelenen hız profillerine benzer şekilde $l/D=1$ ve 2 için V_z profilleri arasındaki farklar, diğer düzeneğe kıyasla daha az olmaktadır.



(a)

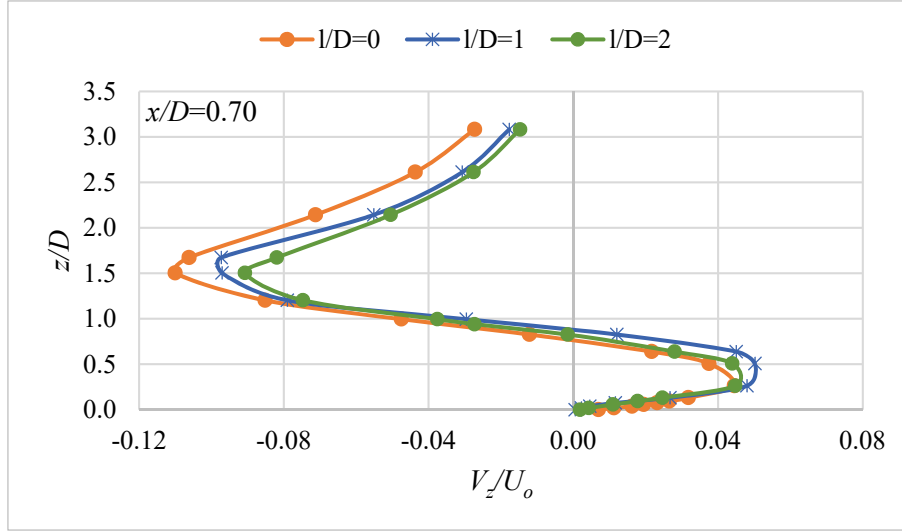


(b)

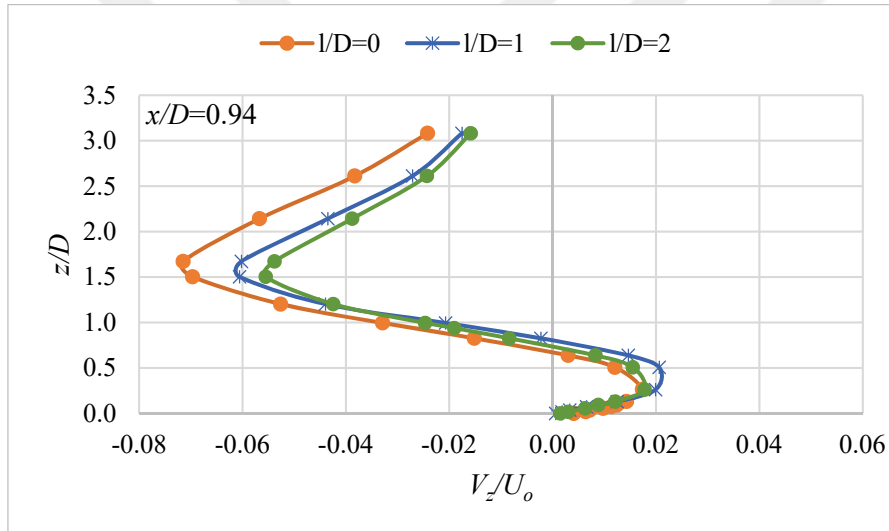


(c)

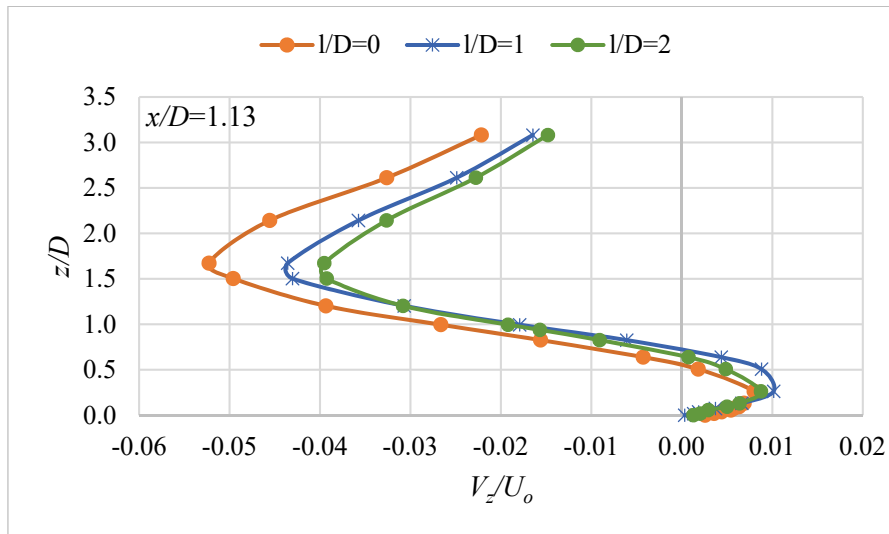
Şekil 5.31. V_z değişimine c/D etkisi ($l/D=0$)



(a)



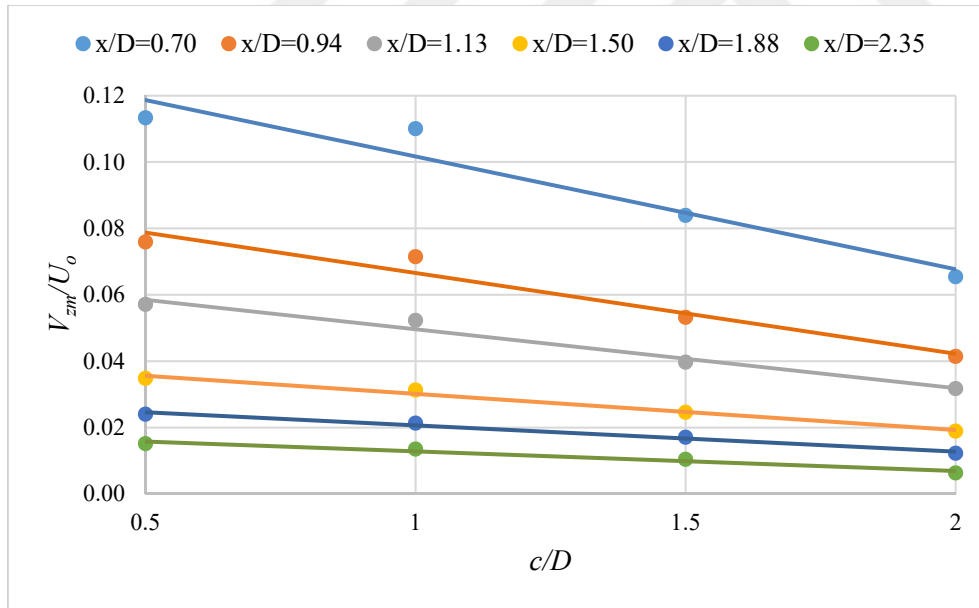
(b)



(c)

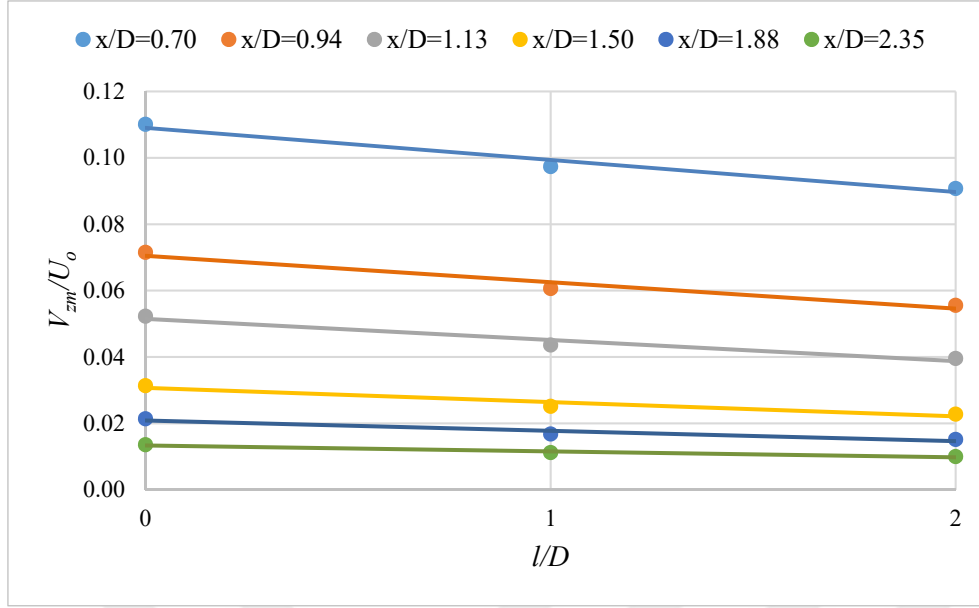
Şekil 5.32. V_z değişimine l/D etkisi ($c/D=1$)

Şekil 5.33 su alma ağzı yerleşiminin ilgili konumdaki maksimum düşey yöndeki hıza (V_{zm}) etkisini (a) c/D , (b) l/D açısından ortaya koymaktadır. Çizelge 5.7 ise V_{zm} açısından, meydana gelen bu değişimlerin yüzdesel oranını göstermektedir. Tabloda ağzın tabanda ($c/D=0,5$ ve $l/D=0$) ve ölü son duvarı üzerinde ($l/D=0$ ve $c/D=1$) olduğu durumlar referans olarak alınmıştır. Her iki durumda da sınır etkileri artışının maksimum hızın da artmasına yol açtığı görülmektedir. Diğer hız profillerindeki duruma benzer şekilde, ağzın tabana olan mesafesi, duvara olan mesafesine nazaran V_{zm} üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olmaktadır. Ağız konumunun $1D$ miktarında sınırlardan uzaklaştırılması, taban etkisi açısından %30, duvar etkisi açısından ise %21 oranında V_{zm} 'nin azalmasına sebep olmaktadır. c/D 'nin 1'den 1,5'e çıkarılması %18-24, 1,5'ten 2'ye çıkarılması ise %14-20 aralığında hız azalmasına sebep olmaktadır. Duvar sınır etkisi açısından ise l/D 'nin 0'dan 1'e çıkarılması %12-21, 1'den 2'ye çıkarılması ise %6-8 hız azalmasına sebep olmaktadır. c/D değişiminin V_{zm} üzerinde yaklaşık %49, l/D değişiminin ise yaklaşık %27 düzeyinde bir etkisi olabildiği görülmektedir.



(a)

Şekil 5.33. Ağız yerleşiminin V_{zm} hızına olan etkisi: (a) c/D değişimi ($l/D = 0$), (b) l/D değişimi ($c/D = 1$)



(b)

Şekil 5.33. (devam) Ağız yerleşiminin V_{zm} hızına olan etkisi: (a) c/D değişimi ($l/D = 0$), (b) l/D değişimi ($c/D = 1$)

Çizelge 5.7. Ağız yerleşiminin V_{zm} hızına olan etkisi (%)

x/D	V_{zm} değişimi (%)							
	$c/D=0,5$	$c/D=1$	$c/D=1,5$	$c/D=2$		$l/D=0$	$l/D=1$	$l/D=2$
0,70	-	-2,9	-26,0	-42,3		-	-11,6	-17,5
0,94	-	-5,9	-29,9	-45,4		-	-15,2	-22,3
1,13	-	-8,5	-30,5	-44,4		-	-16,6	-24,4
1,50	-	-10,1	-29,4	-45,7		-	-19,9	-27,4
1,88	-	-11,1	-28,8	-48,8		-	-21,4	-29,2

5.3.6. Türbülans parametrelerinin değişimi

Akışkan parçacık hareketinin düzensiz ve karmaşık olduğu türbülanslı akımlarda, sabit bir noktadaki hız ve basınç gibi akım özellikleri, zamana göre sabit kalmamakta, oldukça düzensiz çalkantılar göstermektedir. Bu sebeple Reynolds ayrıştırması yöntemiyle, zaman ortalamalı hız değerlerini çalkantılardan ayırarak ifade etmek uygun olmaktadır. Reynolds ayrıştırması yöntemi ile bir noktadaki anlık hız bileşeni (V_x , V_y , V_z), zaman ortalaması alınmış hız ($\bar{V}_x$, $\bar{V}_y$, $\bar{V}_z$) ve çalkantı bileşeni (V'_x , V'_y , V'_z) toplamından oluşmaktadır. Yüksek frekans ve düzensizlikle meydana gelen bu çalkantıların büyüklüğünü

değerlendirebilmek için ise kök ortalama kare değeri (*RMS*) kullanılmaktadır (Eş. 5.5) ve bu terim çoğunlukla türbülans yoğunluğu olarak ifade edilmektedir (Dey, 2004). Eş. 5.5 her üç yöndeki hız bileşeni için ayrı ayrı ifade edilebilmektedir.

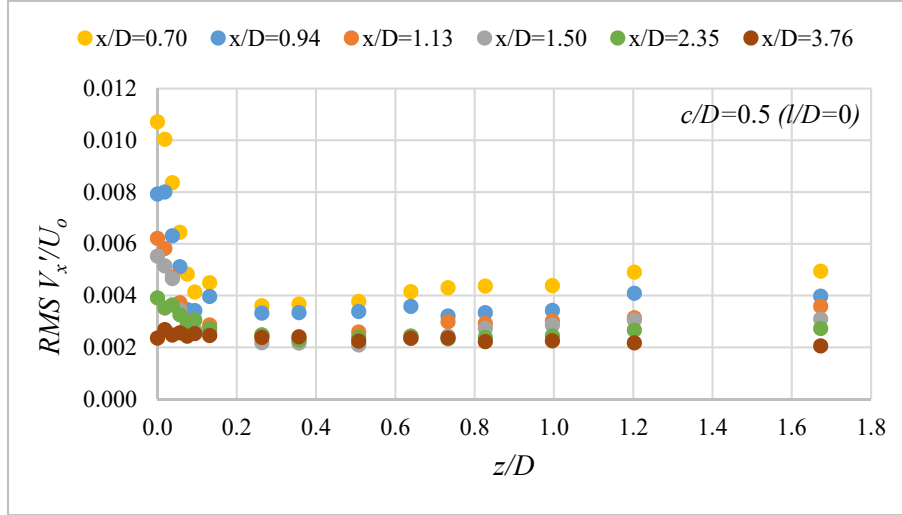
$$RMS V_x' = (\overline{V_x' V_x'})^{0.5} \quad (5.5)$$

Hız bileşenlerinin taşıdığı enerjiyi ifade etmek için ise türbülans kinetik enerjisi (*TKE- k*) tanımı yapılmaktadır (Eş. 5.6). *TKE*'nin büyüklüğü akımdaki daha fazla girdap ve karışımı, dolayısıyla da daha yüksek enerjiyi ifade etmektedir.

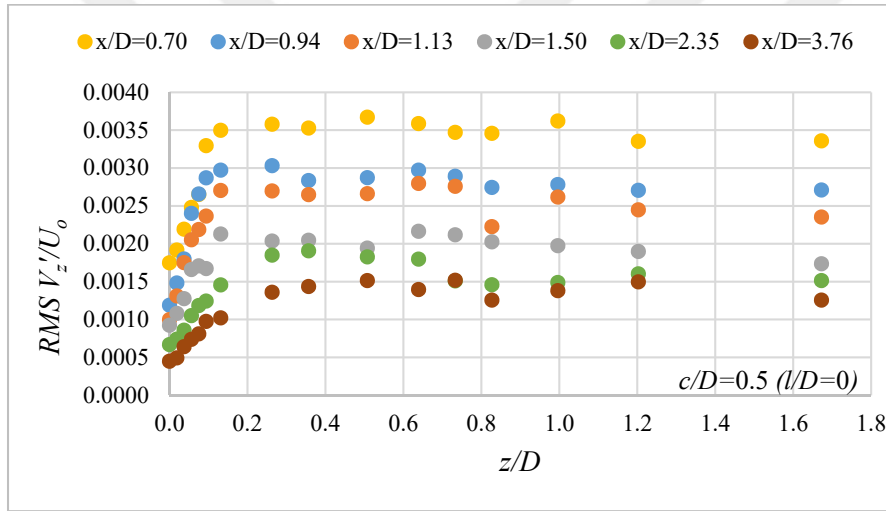
$$TKE = k = 0.5 (\overline{V_x' V_x'} + \overline{V_y' V_y'} + \overline{V_z' V_z'}) \quad (5.6)$$

Bu başlık altında, ağız akımı etkisindeki akımda, türbülans yoğunluğu ve *TKE*'nin akım alanı içerisindeki değişimi, ağzın farklı konumları açısından incelenmektedir. Önceki alt başlıklarda olduğu gibi öncelikle, bu parametrelerin ağız akımı altında kanal boyunca derinlikle değişimi incelenmiştir. Ağzın tabana yerleştiği limit durum olan $c/D = 0,5$ için boyutsuz *RMS V_x'*, *RMS V_z'* ve *TKE* değerlerinin derinlikle değişimi sırasıyla Şekil 5.34 (a), (b) ve (c)'de sunulmaktadır. Aynı parametrelerin ağzın tabana en uzak durum olan $c/D=2$ için değişimi ise Şekil 5.35'te gösterilmektedir.

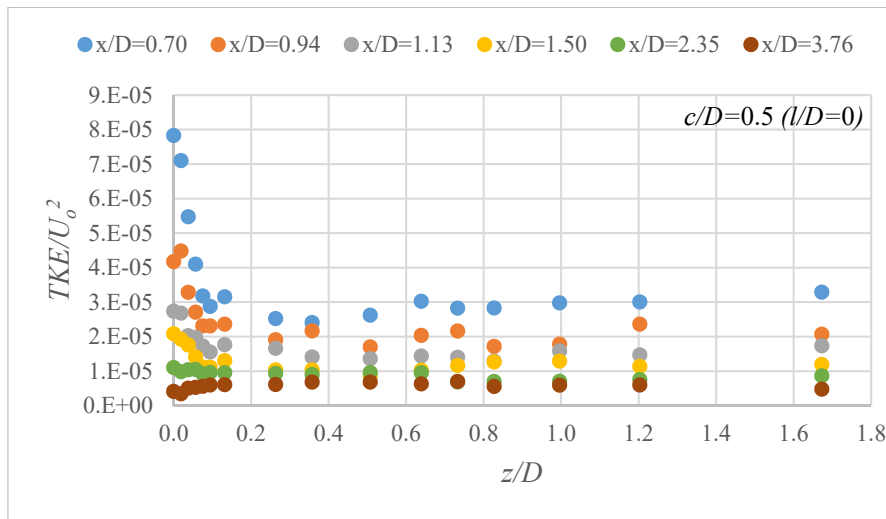
$c/D=0,5$ için akım doğrultusundaki türbülans yoğunluğu, taban pürüzlülük elemanının etkisiyle tabana yakın bölgelerde en yüksek değerini alırken, derinlikle beraber azalarak, $z/D=0,2$ yüksekliğinden itibaren sabit kalma eğilimine girmektedir. $x/D = 3,76$ mesafesine ulaşıldığında ise *RMS V_x'* profili büyük oranda derinlik boyunca sabit kalmaktadır. z yönündeki türbülans yoğunluğu ise tabanda en düşük değerini alsa da çok hızlı artmakta, benzer şekilde $z/D = 0,2$ itibariyle sabit kalma eğilimine girmektedir. *RMS V_x'*, *RMS V_z'* değerlerine kıyasla çok daha büyük olduğu için *TKE* yapısında baskın bir rol oynamakta, bu sebeple Şekil 5.34 (c)'de gösterildiği gibi *TKE* üzerine yapılacak yorumlar *RMS V_x'* ile benzer olmaktadır. Her üç parametrenin de ağızdan uzaklaştıkça büyüklüklerinin azaldığı görülmektedir. Bölüm 4'te detaylı olarak incelendiği üzere özellikle tabandaki sediment tanesinin harekete başlama koşullarında akımın türbülans karakteristiği, özellikle $c/D = 0,5$ için büyük önem kazanmaktadır.



(a)



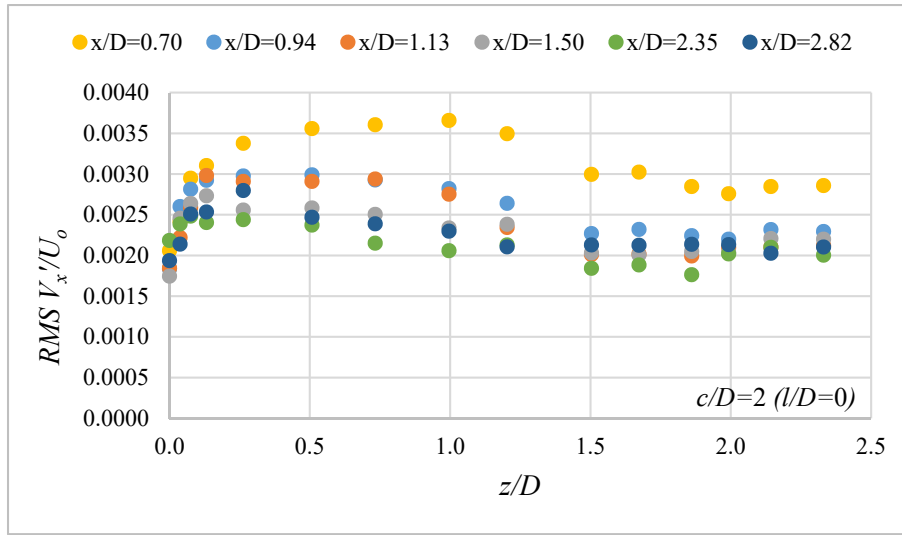
(b)



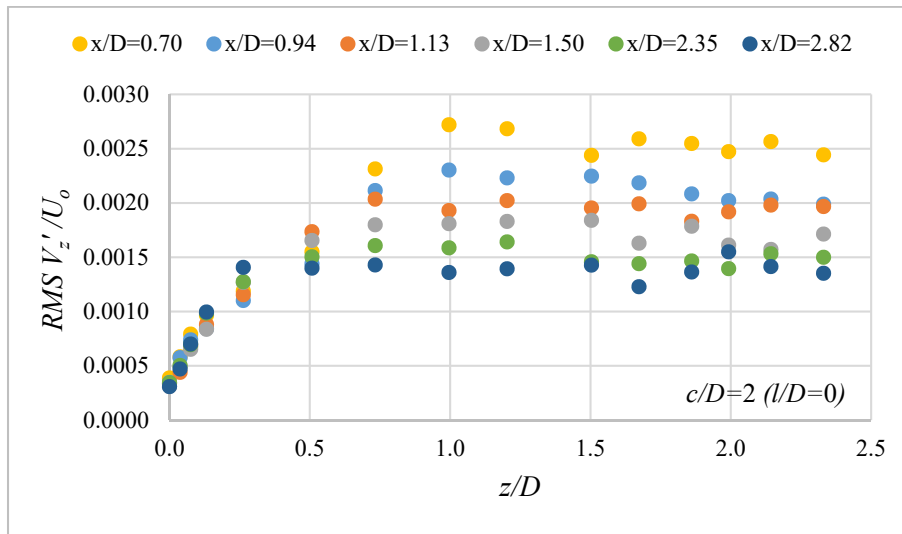
(c)

Şekil 5.34. $c/D=0,5$ ($l/D=0$) düzeneğinde farklı x/D değerleri için türbülans parametrelerinin derinlikle değişimi (a) $RMS V'_x$, (b) $RMS V'_z$, (c) TKE

$c/D = 2$ için ise akım doğrultusundaki türbülans yoğunluğu, tabanda en düşük değerini aldıktan sonra hızlıca artmakta, tepe noktasını gördükten sonra ise hafif bir miktarda azaldıktan sonra sabit kalmaktadır. z yönündeki türbülans yoğunluğu da benzer şekilde tabanda en düşük değerini alsa da çok hızlı artmakta ve sonrasında sabit kalmaktadır. $RMS V_z'$ profili tepe noktasını ağza yakın konumlar ($x/D=0,70; 0,94$) için $z/D = 1$ yüksekliğinde görmekte, ancak bu yükseklik ağızdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Örneğin $x/D = 2,82$ konumunda tepe noktası $z/D = 0,25$ konumunda oluşmakta ve sonrasında büyük oranda sabit kalmaktadır. $c/D = 0,5$ düzeneğindeki sonuçlara benzer olarak TKE profili $RMS V_x'$ ile benzerlik göstermektedir.

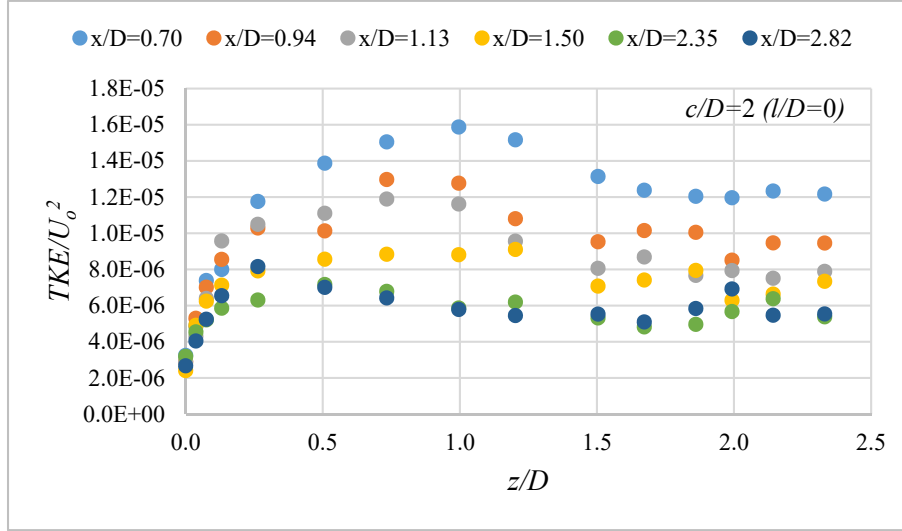


(a)



(b)

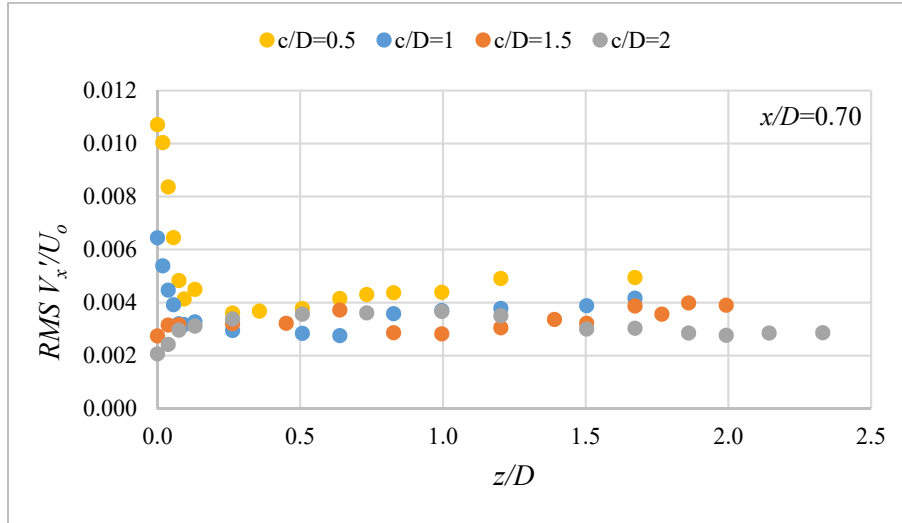
Şekil 5.35. $c/D=2$ ($l/D=0$) düzeneğinde farklı x/D değerleri için türbülans parametrelerinin derinlikle değişimi (a) $RMS V_x'$, (b) $RMS V_z'$, (c) TKE



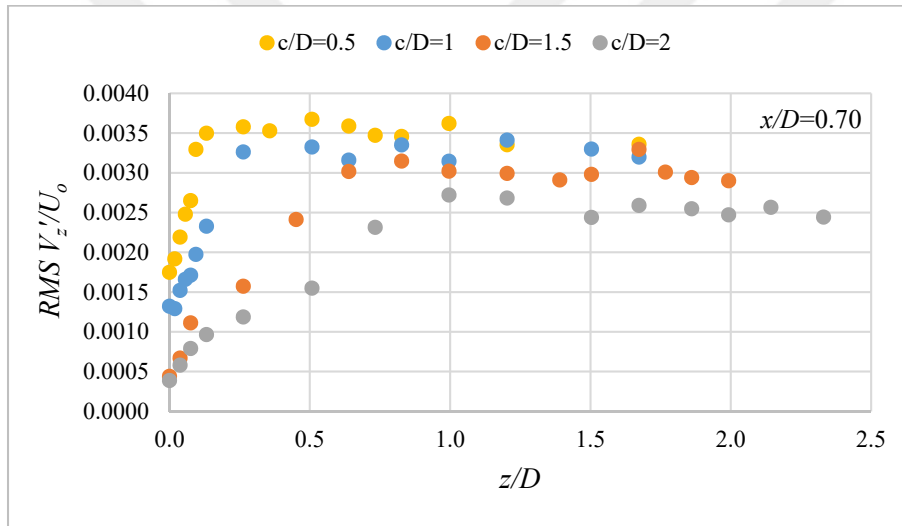
(c)

Şekil 5.35. (devam) $c/D=2$ ($l/D=0$) düzeneğinde farklı x/D değerleri için türbülans parametrelerinin derinlikle değişimi (a) $RMS V_x'$, (b) $RMS V_z'$, (c) TKE

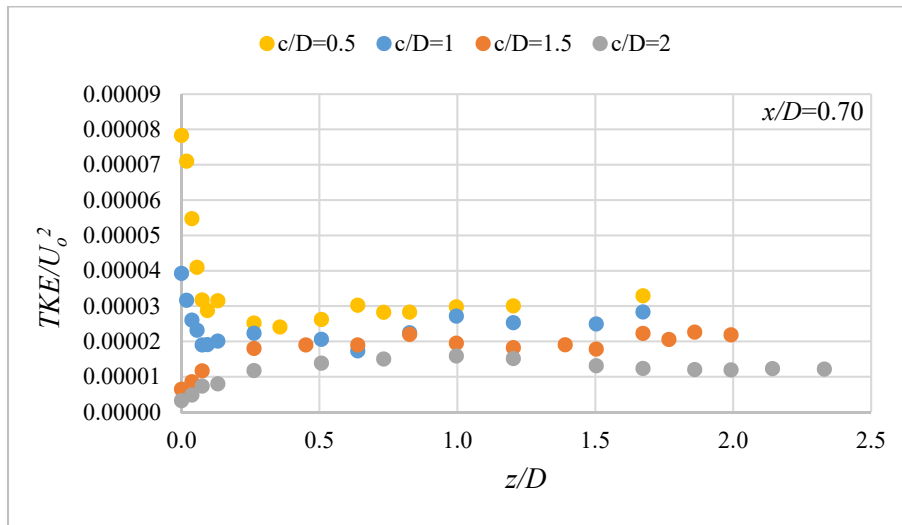
Şekil 5.36 ağza en yakın konum olan $x/D = 0,70$ için, Şekil 5.37 ise ağza en uzak konum olan $x/D = 3,76$ için türbülans yoğunlukları $RMS V_x'$ ve $RMS V_z'$ ile TKE değişimine c/D etkisini sırasıyla (a), (b) ve (c) üzerinden göstermektedir. Şekil 5.36 (a)'dan görülebildiği üzere, ağzın tabana yaklaşması tabana yakın hızların dolayısıyla da türbülanslık derecesinin artmasına yol açmaktadır. $c/D = 0,5$ ve 1 düzeneğinde akım doğrultusunda maksimum türbülans yoğunluğu tabana yakın bölgede gelişirken, $c/D = 1,5$ ve 2 düzeneğinde ise tabandan biraz yukarıda gelişmekte ve sonrasında büyük oranda sabit kalmaktadır. z yönündeki türbülans yoğunluğu ise ağız tabana yaklaştıkça daha yüksek değerler almaktadır. Bahsi geçen tüm parametreler üzerine c/D etkisi ağızdan kanal boyunca uzaklaştıkça ise azalmaktadır. Şekil 5.37'den de görüldüğü üzere ise $x/D = 3,76$ konumu itibarıyla $RMS V_x'$ ve $RMS V_z'$ ile TKE profilleri üzerine c/D 'nin etkisi oldukça sönümlenmektedir. Bölüm 4'te Şekil 4.9 ve Çizelge 4.2 ile sunulan sonuçlar da, ağzın tabandan uzaklaştırılmasının tane hareketinde türbülans etkisini azalttığını n_{ort} değerleri üzerinden ortaya koymuştu. Şekil 5.36'da verilen hız ölçümlerinden elde edilen türbülans yoğunluğu profilleri de söz konusu eğilimi doğrulamaktadır. Özellikle c/D arttıkça hem $RMS V_x'$ hem $RMS V_z'$ hem de TKE değerlerinin tabana yakın bölgelerde belirgin şekilde azaldığı görülmekte; bu durum tanenin maruz kaldığı ani hız çalkantılarının zayıfladığını ve tanenin harekete başlamasındaki önemini giderek yitirdiğini göstermektedir.



(a)

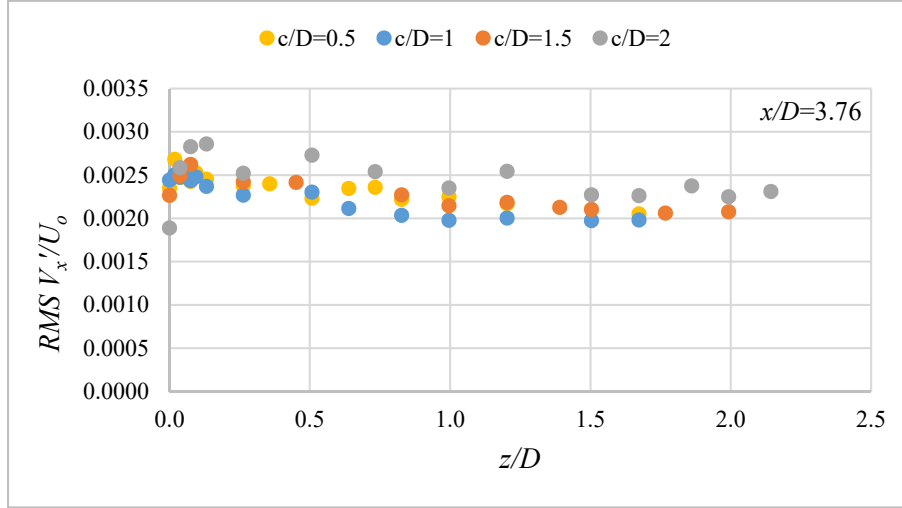


(b)

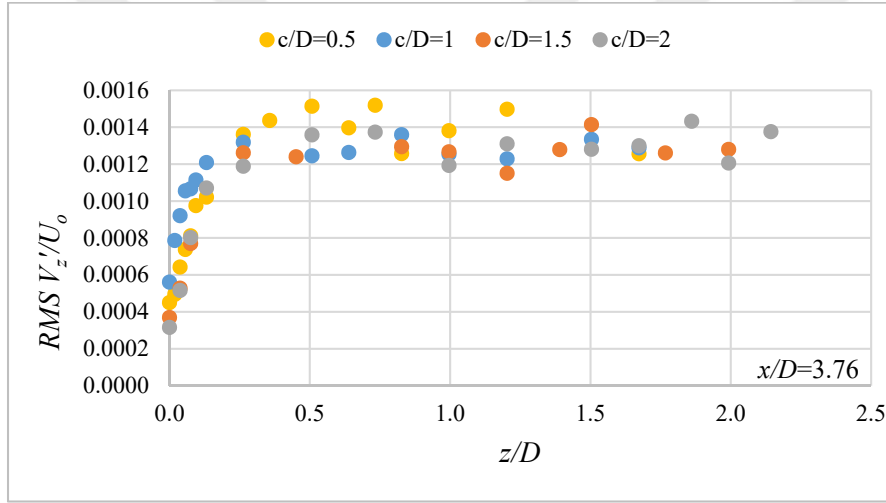


(c)

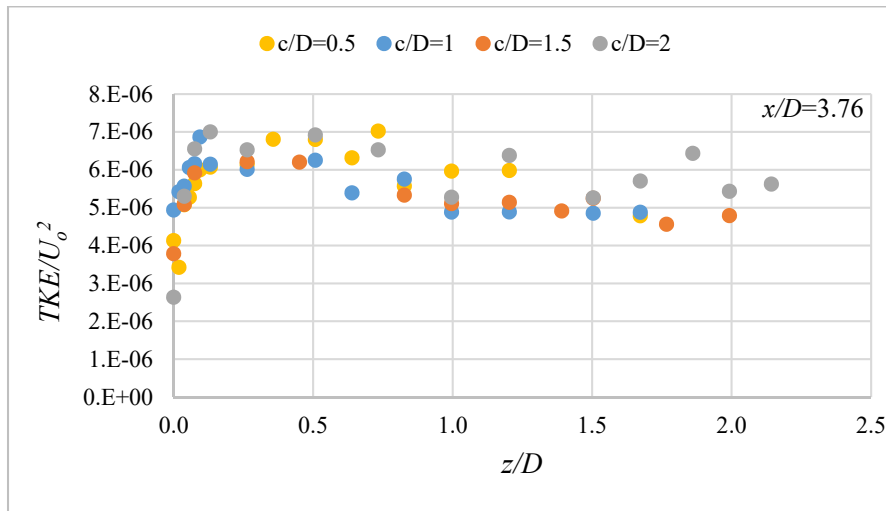
Şekil 5.36. $x/D = 0,70$ için türbülans parametrelerinin c/D ($l/D=0$) ile değişimi (a) $RMS V'_x$, (b) $RMS V'_z$, (c) TKE



(a)



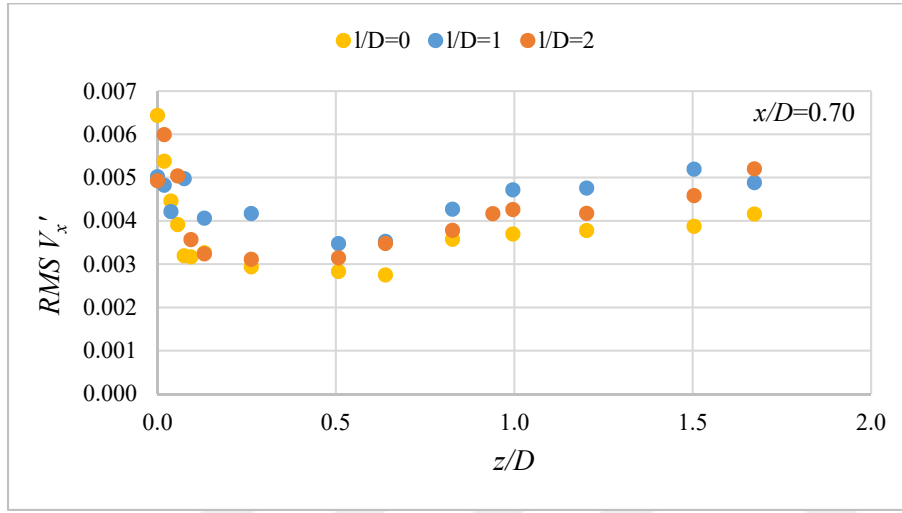
(b)



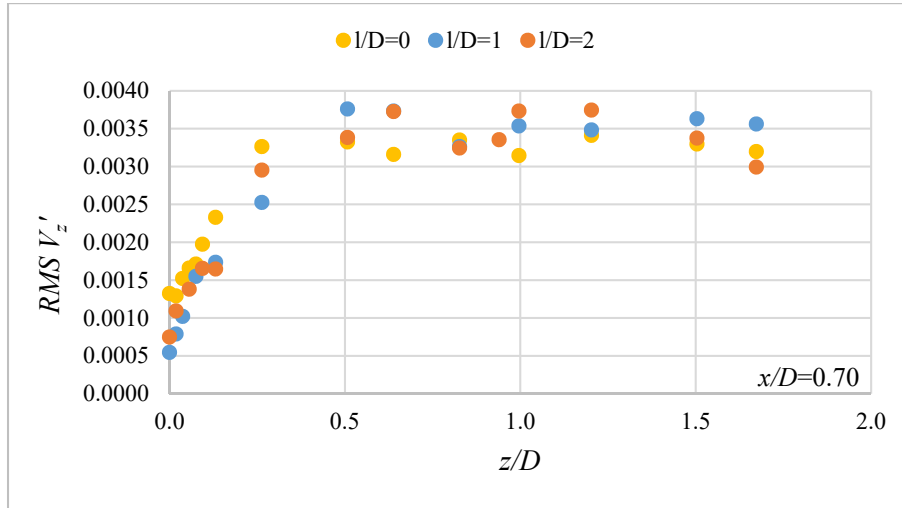
(c)

Şekil 5.37. $x/D = 3,76$ için türbülans parametrelerinin c/D ($l/D=0$) ile değişimi (a) $RMS V_x'$, (b) $RMS V_z'$, (c) TKE

Şekil 5.38 ise ağıza en yakın konum olan $x/D = 0,70$ için türbülans yoğunlukları $RMS V_x'$ ve $RMS V_z'$ ile TKE değişimine l/D etkisini sırasıyla (a), (b) ve (c) üzerinden göstermektedir. Önceki şekillerde gösterilen c/D etkisinin aksine ağzın ölü son duvarına olan mesafesinin türbülans parametreleri üzerinde anlamlı değişiklikler yapmadığı görülmektedir. Önceki başlıklarda incelendiği üzere ağzın düşey konumunun hız profilleri üzerine, yatay konumuna nazaran daha yüksek etkisinin olması bu duruma sebep olmaktadır.

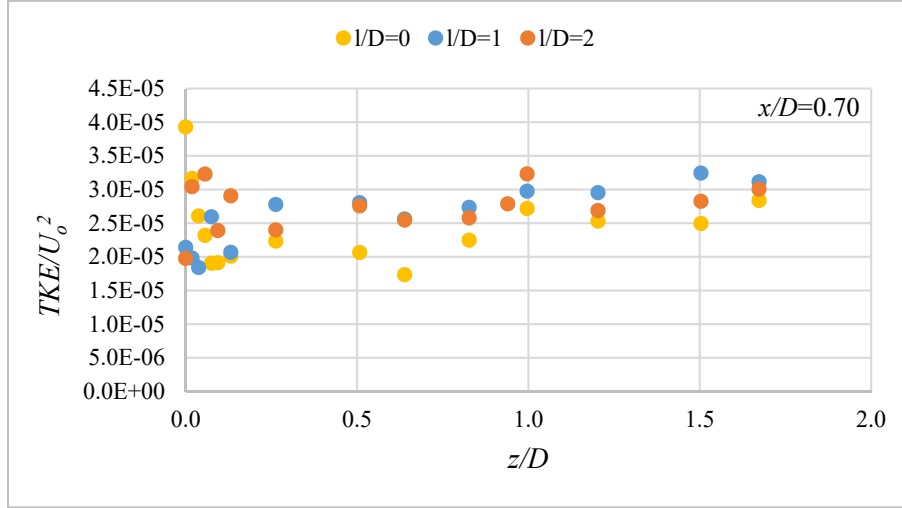


(a)



(b)

Şekil 5.38. $x/D = 0,70$ için türbülans parametrelerinin l/D ($c/D=1$) ile değişimi (a) $RMS V_x'$, (b) $RMS V_z'$, (c) TKE



(c)

Şekil 5.38. (devam) $x/D = 0,70$ için türbülans parametrelerinin l/D ($c/D=1$) ile değişimi (a) $RMS V_x'$, (b) $RMS V_z'$, (c) TKE

Bu bölümde, su alma ağzından kaynaklanan hız dağılımları ile bu dağılımlar üzerinde akım sınırlarının etkileri deneysel olarak sunulmuştur. Tezin ilerleyen kısımlarında, Bölüm 6'da kullanılan HAD yazılımı FLOW-3D HYDRO tanıtılacak; ardından Bölüm 7'de ise ağız membasındaki hız dağılımını bulmak için kullanılan sayısal modelin oluşturulma aşamaları ile modelden elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

6. SAYISAL ÇALIŞMADA KULLANILAN YAZILIMIN TANITIMI

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamalarında amaç, akım davranışını ve istenilen noktadaki basınç, hız, kayma gerilmesi vb. özellikleri elde ederek incelemektir. Yazılımlar kütle, momentum ve enerji denklemlerinin sayısal olarak çözümünü, bu özelliklerin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu ise incelenen olayın iki veya üç boyutlu olarak yazılıma tanımlanması, tanımlanan modelin çeşitli boyutlarda hücrelere ayrılarak, belirli zaman aralıklarında çözümünü mümkün olmaktadır. Böylece her bir hücre içerisinde istenilen parametrelerin değerleri elde edilebilmektedir.

Önceki bölümde deneysel olarak incelenen su alma ağzı konumunun, ağız membasında oluşan hız dağılımına etkisi olayının sayısal olarak araştırılması için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD/CFD) yazılımlarından bir tanesi olan FLOW-3D HYDRO kullanılmıştır. Flow Science tarafından geliştirilen bu yazılım AM, CAST, WELD ve HYDRO başlıklarıyla özelleşmiş olarak malzeme davranışı, döküm ve kaynak çalışmaları ile akışkanlar dinamiği problemlerinin modellenmesini sağlamaktadır. Yazılım sonlu hacimler yöntemini kullanarak bahsi geçen süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerini sayısal olarak çözebilmektedir. Aynı zamanda sediment veya katı cisim hareketi ve ısı transferi gibi konularda da modelleme yapılabilmektedir.

FLOW-3D, Hirt ve Nichols (1981) tarafından geliştirilen Akışkan Hacmi (The Volume of Fluid – VOF) yöntemini kullanarak serbet yüzeyli akışları modellemektedir. Bu sayede iki veya daha fazla akışkan ara yüzeyinin takibi yapılabilmektedir. Bu yöntemde her bir çözüm hücresine V_F olarak tanımlanan bir hacim değeri atanmaktadır. Bu değer bir eşiğin olması hücrenin tamamen su, sıfıra eşit olması ise tamamen hava ile dolu olduğu anlamına gelmektedir. Bu sayede serbest su yüzeyinin yeri belirlenebilmekte, su ile hava arasında kayma gerilmesi olmayan ve sabit basınçlı bir ara yüzey tanımlanabilmektedir. Sıfır ve bir arasındaki değerler ise hücrede hava ve suyun birlikte yer aldığını göstermektedir ve bu hücre için araştırılan hız, basınç gibi değerler hacim oranına göre hesaplanmaktadır. Programda katı cisimlerin modellenmesi ise Kesirli Alan-Hacim Engel Temsili (Fractional Area/Volume Obstacle Representation- FAVOR) yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. VOF yöntemine benzer şekilde çözüm hücresi içerisindeki katı cismin oranı, atanan hacmin sıfır ile bir arasında bir değer alması ile belirlenmektedir. Her iki yöntemde de detayları

ilerleyen bölümde verileceği üzere, çözüm ağı boyutlarının seçimi oldukça önemli bir yer tutmaktadır.

Sayısal bir çalışmadaki amaç, deneysel çalışma ile incelenmesi pratik veya mümkün olmayan bir doğa hadisesinin çeşitli özelliklerinin, yine deneysel çalışmadaki verilerle doğrulanmış modeller aracılığıyla elde edilmesidir. Dolayısıyla sayısal modelin fiziksel hadiseyi mümkün olan en yüksek doğrulukta tanımlaması, deneysel verilerle desteklenmesi ve çıktılarının kabul edilebilir bir hata payı içermesi gerekmektedir.

Bu bölümde öncelikle programın çözdüğü denklemler başta olmak üzere arka planı, sonrasında ise ara yüzü aracılığıyla sayısal modelleme aşamaları tanıtılacaktır.

6.1. Çözülen Temel Denklemler

Akışkan hareketinin matematiksel olarak ifade edilmesi doğrusal olmayan, kısmi ve ikinci dereceden diferansiyel eşitlikler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Ancak karmaşık yapıdaki akışların analitik olarak çözümü mümkün olmadığından, bu eşitlikler belirli kabuller altında sayısal olarak çözülebilmektedir.

Bu başlık altında FLOW-3D HYDRO programının çözümünü gerçekleştirdiği süreklilik ve momentum denklemleri ile türbülanslı akımın modellenmesi için program aracılığıyla seçilebilecek farklı yaklaşımlar tanıtılacaktır.

6.1.1. Kütle ve momentumun korunumu denklemleri

Program tarafından çözülen, kartezyen koordinat sistemindeki, üç boyutlu, sıkıştırılamaz akışa ait kütlenin korunumu Eş. 6.1'de, momentumun korunumu (Navier-Stokes) ise Eş. 6.2'de gösterilmiştir. Eşitliklerde yönler x , y ve z ile, bu yöndeki hızlar da V_x , V_y ve V_z ile gösterilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x}(V_x A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(V_y A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho_w} \quad (6.1)$$

Eş. 6.1'de A oransal akış yüzey alanı, ρ_w akışkanın yoğunluğu, kütle kaynak terimi (density source term) olan R_{SOR} ise sisteme eklenen veya sistemden çıkarılan kütlenin bir ifadesidir.

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(V_x A_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y A_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z A_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + f_x - \frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F} V_x \quad (6.2 - a)$$

$$\frac{\partial V_y}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(V_x A_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y A_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z A_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + f_y - \frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F} V_y \quad (6.2 - b)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(V_x A_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y A_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z A_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + f_z - \frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F} V_z \quad (6.2 - c)$$

Eş. 6.2'de p basıncı, g yerçekimi ivmesini, f viskoz ivmeyi ifade etmektedir. Daha önce açıklandığı gibi çözüm hücresi içerisindeki akışkan hacminin bir göstergesi olan V_F terimi ise Eş. 6.3'ten hesaplanmaktadır.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(\frac{\partial}{\partial x} (F A_x V_x) + \frac{\partial}{\partial y} (F A_y V_y) + \frac{\partial}{\partial z} (F A_z V_z) \right) = 0 \quad (6.3)$$

Eşitlik 6.3'te verilen F bileşeni, 0 ve 1 arasında bir değer olarak ilgili çözüm hücresi içerisindeki su doluluk oranını göstermektedir.

Bu başlık altında verilen eşitliklerin kartezyen koordinat sistemindeki, üç boyutlu, sıkıştırılmaz dolayısıyla sabit yoğunlukta akış için sadeleştirildiği unutulmamalıdır. Örneğin ısı transferi, hareketli objeler veya yüzey geçirimsizliği modelleri, çalışılan konu kapsamı dışında yer aldığı için eşitliklerde ilgili terimlere yer verilmemiştir.

6.1.2. Türbülans modelleri

Türbülanslı akımlarda, akışkanın düzenli tabakalar halinde hareket ettiği laminar akımın tersine, hız değerlerinde ani ve kaotik çalkantılar meydana gelmektedir. Bahsi geçen türbülans çalkantılarının matematiksel olarak ifade edilebilmesi için hareket denklemlerindeki (Navier-Stokes) değişkenlerin Reynolds ayrıştırması yöntemiyle, zamana göre ortalama ve çalkantı bileşenlerine ayrılması gerekmektedir. Reynolds ortalama

Navier-Stokes (RANS) denklemleri olarak ifade edilen bu eşitliklerde oluşan ek türbülans gerilmelerinin çözülebilmesi için çeşitli türbülans modelleri geliştirilmiştir. Bu başlıkta FLOW-3D HYDRO programında kullanılabilecek, RANS temelli modeller ile LES modeli kısaca tanıtılmaktadır.

Prandtl karışım uzunluğu modeli üç boyutlu türbülans etkilerini araştıran ilk yaklaşımlardan olması sebebiyle, FLOW-3D HYDRO aracılığıyla kullanılabilecek en basit model olarak ifade edilebilir. Farklı akım türleri için deneysel olarak belirlenen karışım uzunluğu değeri gerektirmesi genelleştirilmesini kısıtlamakta, akım içerisinde ayrılma veya dönme etkilerinin olduğu bölgelerde başarılı sonuçlar verememektedir.

Yine erken dönem yaklaşımlarından biri olan tek denklemlili türbülans modeli ise hesaplamalara türbülans kinetik enerjisini (k) de katması sebebiyle Prandtl karışım uzunluğu modeline göre daha gelişmiştir. Ancak her noktada türbülans karışım uzunluğunun (L_t) bilinmesi gerektiği için karmaşık akışların çözümünde yeterli olmamaktadır.

Geniş bir akış aralığında geçerli olan ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan $k - \varepsilon$ modeli, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans sönümlenme oranını (ε) birlikte hesaplamakta, türbülans karışım uzunluğunu da otomatik olarak bulmaktadır.

RNG metodu ile türetilen RNG $k - \varepsilon$ modeli, standart $k - \varepsilon$ modelinin daha geliştirilmiş bir hali olup özellikle geçiş rejimini ve türbülans ayrıntılarını yakalamada başarılı olması sebebiyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. $k - w$ modeli ise türbülans sönümlenme oranı yerine türbülans frekansını ($w = \varepsilon/k$) kullanmaktadır. Duvar sınırlarına yakın ve akış yönünde basınç gradyanı olan durumlarda faydalı olabilmektedir.

Büyük çevrinti modeli (Large Eddy Simulation – LES) ise akım içerisindeki büyük ölçekli girdapların doğrudan, küçük ölçeklilerin ise modelleme yoluyla çözümünü içermektedir. İki eşitlikli modellere göre akışın türbülanslı yapısı hakkında daha detaylı istatistiki bilgilere sahip olsa da daha yüksek sıklıkta çözüm ağları ve dolayısıyla daha uzun çözüm süreleri gerektirmektedir.

6.1.3. Kütle-momentum kaynağı

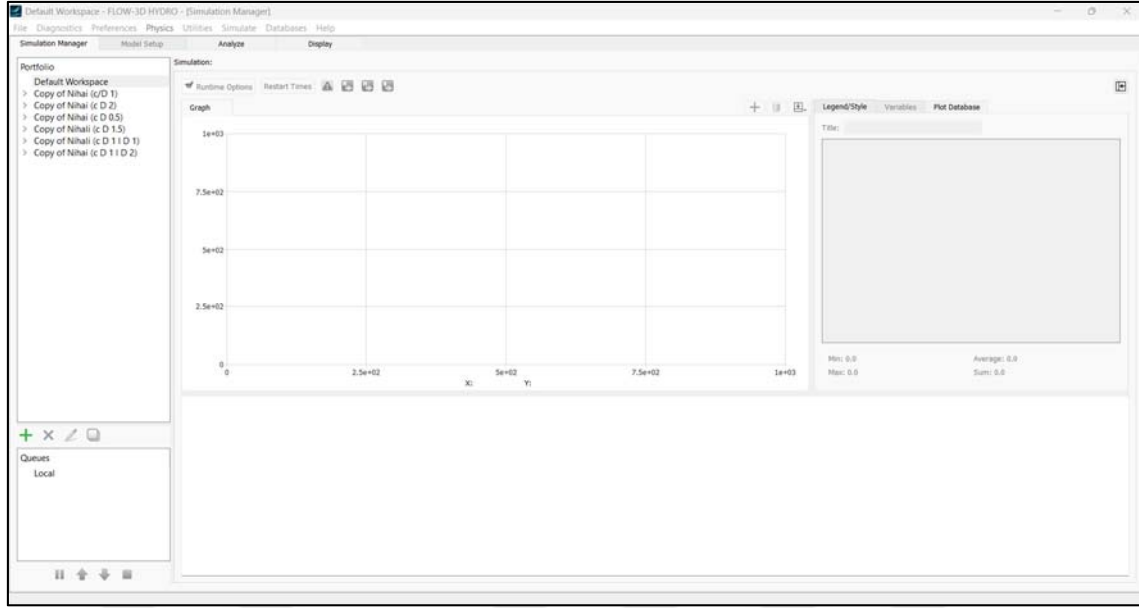
FLOW-3D HYDRO programı kullanıcıya, istenilen geometrik şekilde ve yerleşimde, nozul, boru veya havalandırma kanalı gibi akım kaynaklarını, bu kaynakların kendisini modellemeye gerek kalmadan sisteme tanıtabileceği kütle-momentum kaynağı adında bir araç sunmaktadır. Bu kaynak aracılığıyla istenilen konumda, zamana göre değişken veya sabit debi/hız tanımlanabilmekte, akım yönü seçimine bağlı olarak kaynak, kuyu şeklinde de çalışabilmektedir. Kütle-momentum kaynağı, özellikle boyutlarının çözüm alanına kıyasla küçük olduğu durumlarda faydalı olmakta, çözüm süresinin kısalabilmesine katkı sağlamaktadır. Dikkat edilmesi gereken nokta ise, kaynağın çözüm alanı sınırlarıyla üst üste geldiği durumlarda, yuvarlama hataları sebebiyle programın kaynağın şeklini bir miktar değiştirmesine, bunun da hızları etkilemesine yol açabilmesidir. Bu durumda yapılması gereken kaynağın veya çözüm ağı sınırının konumunu belirli bir miktar değiştirmektir.

6.2. Program Arayüzü

FLOW-3D HYDRO kullanıcıya, gerçekleştirilmesi istenilen simülasyonların oluşturulması ve analiz sonuçlarının incelenmesi için kullanışlı bir arayüz sunmaktadır. Bu başlık altında FLOW-3D HYDRO v23 için modelleme ile ilgili tüm işlemlerin yapılabildiği Simülasyon Yöneticisi, Model Kurulumu, Analiz ve Görüntü sekmeleri tanıtılacaktır.

6.2.1. Simülasyon yöneticisi

Programın ilk sekmesi olan Simülasyon Yöneticisi modülü, kullanıcının çalışma klasörleri ve simülasyonlarını oluşturduğu, sıraladığı ve çözüm süresince simülasyonları ile ilgili anlık ve o ona kadar olan bilgilere erişebildiği ilk ekrandır (Şekil 6.1). Analiz sonuçlarından elde edilecek hemen hemen her bilginin anlık olarak bu ekrandan takip edilebilmesi mümkündür. Aynı zamanda kurulan model ile ilgili uyarılar veya varsa hatalar bu ekranda uyarılar düğmesi aracılığıyla incelenebilmektedir.



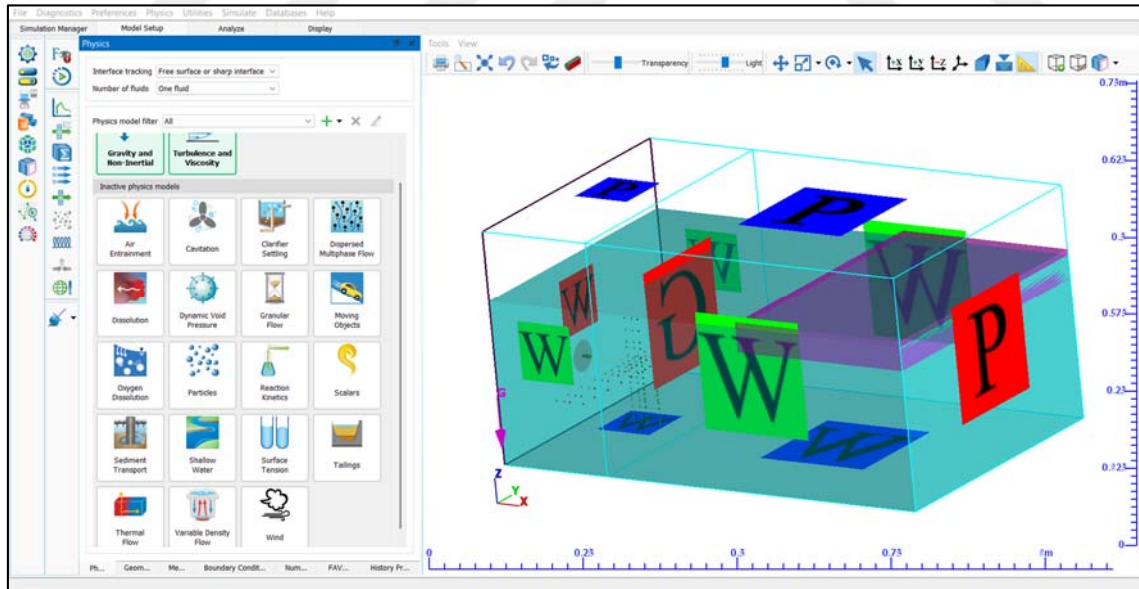
Şekil 6.1. Simülasyon yöneticisi

6.2.2. Model kurulumu

Model Kurulumu sekmesi simülasyonun tüm tanımlama bilgilerinin girildiği alandır ve üç ana kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım genel, fizik, akışkanlar, geometri, çözüm ağı, sınır koşulları, başlangıç koşulları, çıktı ve sayısal sekmelerinden, ikinci kısım geometrinin program tarafından nasıl algılandığının kontrol edilebildiği FAVOR ve sayısal çözümün başlatılabildiği simülasyon sekmelerinden, üçüncü kısım ise simülasyona eklenebilecek ölçüm noktaları veya yüzeyleri, kütle-momentum kaynağı ve sünger, yay gibi rijit olmayan geometrik elemanların olduğu sekmeleri içermektedir (Şekil 6.2).

Genel sekmesi simülasyonda kullanılan birim sisteminin görüldüğü, basınç tipinin (mutlak veya bağıl) ve çözüm süresinin seçildiği bölümdür. Fizik sekmesi akışkan sayısının ve incelenen konu ile alakalı fiziksel parametrelerin tanımlandığı kısımdır. Yerçekimi ivmesi, türbülans ve viskozite, kavitasyon, hareketli objeler, sediment taşınımı, sıg akımlar, ısı transferi gibi 21 farklı modül bu ekranda tanımlanabilmektedir. Akışkanlar kısmında simülasyonda kullanılacak akışkanlar ve yoğunluk, viskozite gibi özellikleri gerek kullanıcı tarafından gerekse de programda mevcut olanlar içerisinde seçilerek (örneğin 20 °C su) tanımlanabilmektedir. Geometri sekmesi modelin fiziksel olarak programa girildiği kısımdır. Kullanıcı hem mevcut olan geometrileri kullanarak hem de .stl uzantılı dosyaları programa yükleyerek modeli fiziksel olarak tanımlayabilmektedir. Çözüm ağı sekmesinde

ise oluşturulacak çözüm ağlarının boyutları ve sıklıkları tanımlanmakta, toplam kaç adet çözüm ağı hücresinin oluşturulduğu gibi bilgiler görülebilmektedir. Program altı farklı yön için (X Min, X Max, Y Min, Y Max, Z Min, Z Max) on farklı sınır koşulunun tanımlanabilmesine imkan sağlamaktadır. Bu sayede çözüm için sınır koşullarının belirtilmesi gerçekleştirilmiş olmaktadır. Simetri (S) sınır koşulunda hız ve basınç gibi akım değerlerinin simetri eksenine göre türevlerinin sıfır olduğu, yani akım özelliklerinin sınır boyunca bir değişime uğramadan çözüm alanının dışında da devam ettiği kabul edilmektedir. Duvar (W) sınır koşulu, sınır üzerinde hız değerinin sıfır olduğu, katı yüzeylerdeki kaymama durumunu tanımlamaktadır. Basınç (P) sınır koşulunda yüzeye istenilen değerde basınç atanabilmekte, örneğin rezervuardaki su yüksekliğinin tanımlanmasında kullanılabilmektedir. Hız (V) ve debi (Q) sınır koşullarında yüzey boyunca istenilen miktar ve değişimde akım giriş veya çıkışı tanımlanabilmektedir. Izgara yerleşimi (Grid overlay – G) sınır koşulu birden çok çözüm ağı kullanımı durumunda hücreler arası akım verilerinin sürekliliğini sağlamaktadır. İncelenen konu ile yakından ilgileri olmadığı için yer verilmeyen diğer sınır koşulları hakkında detaylı bilgilere ise programın Yardım sekmesindeki “Dökümanlar” düğmesi yardımıyla ulaşılabilmektedir.



Şekil 6.2. Model kurulum ekranı

Başlangıç sekmesi çözüm ağı içerisinde istenilen bölgeye akışkan kütlesi eklenmesine imkan sağlamaktadır. Bu sayede çözüm alanının akışkan ile dolması süresi ortadan kaldırılmaktadır. Ancak başlangıç su seviyesinin boru akışı gibi modellerde, tam gelişmiş

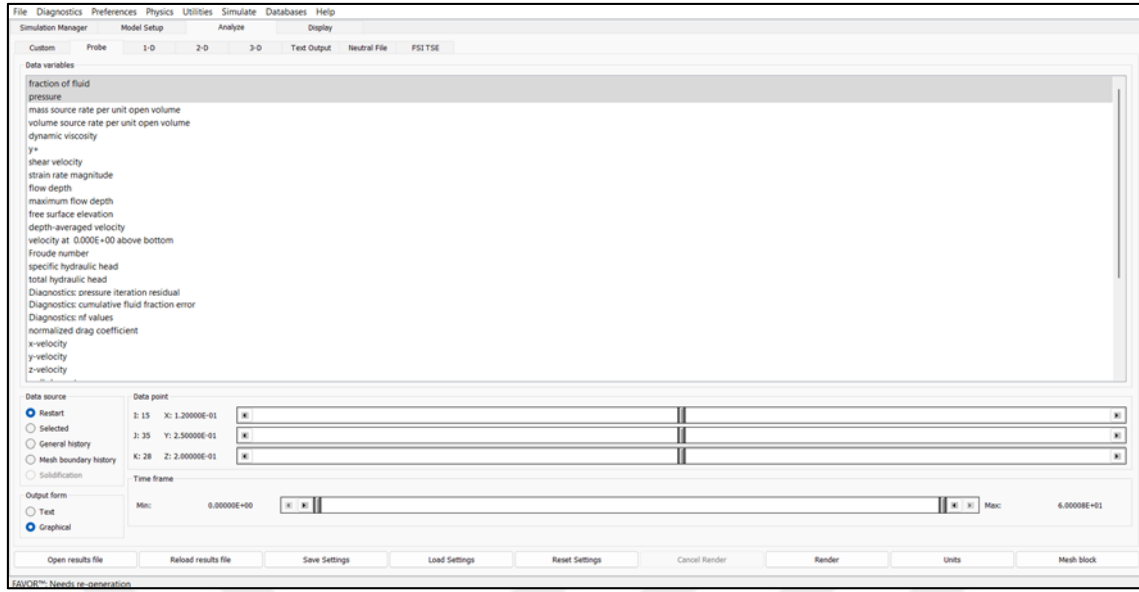
akım oluşmasında etkili olduğu, simülasyonun sonuçlarını doğrudan etkileyebildiği de unutulmamalıdır. Çıktı sekmesi, hem simülasyondan elde edilmesi istenilen verilerin, hem de bu verilerin elde edileceği zaman aralıklarının seçildiği ekran olması dolayısıyla simülasyonun bilgisayar ortamında kaplayacağı büyüklüğü doğrudan ilgilendirmektedir. Sayısal kısmında ise programın kullandığı sayısal çözüm yöntemleri ve çözüm tekniği, zaman adımları, yakınsama kriterleri gibi ayarlar kontrol edilip değiştirilebilmektedir.

Model sekmesinin ikinci ana bölümü FAVOR ve Simülasyon sekmelerinin olduğu kısımdır. FAVOR yöntemi özetle modele girişi yapılan katı cismin program tarafından nasıl algılandığının önceden görülebilmesini sağlayan kısımdır. Bu sayede kullanıcı, çözüm ağı sıklığının, geometrinin algılanışı için ne derece yeterli olduğunu simülasyonu başlatmadan tespit edebilmektedir. Simülasyon düğmesi ise Simülasyon yöneticisi sekmesinde olduğu gibi simülasyonun ön kontrolünü, ön simülasyonu ve simülasyonun kendisini gerçekleştirebileceği yerdir.

Model sekmesinin üçüncü ana bölümü ise özellikle ölçüm noktası ve yüzeyi gibi çözümü etkilemeyen ancak istenilen nokta veya yüzeyde, hız, basınç, debi gibi akımla ilgili özelliklerin elde edilebilmesini sağlayan eklentilerin programa tanımlanabildiği kısımdır. Aynı zamanda kütle-momentum kaynağı ve ihtiyaç duyuluyorsa sünger, yay gibi araçlar da ilgili düğmeler aracılığıyla eklenebilmektedir.

6.2.3. Analiz

Analiz sekmesi kullanıcının istediği parametre sonucunu, çözüm ağı içerisinde istenilen noktada veya bölgede, bir, iki veya üç boyutta, metin veya grafik biçiminde ve istediği zaman dilimi için elde edebilmesini sağlayan bölümdür (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. Analiz ekranı

6.2.4. Görüntü

Görüntü sekmesi, analiz sekmesinde seçilen parametre özelliklerinin görselleştirildiği bölümdür. Analiz çıktıların görselleştirildiği ve akışın animasyon haline getirilebildiği araçlar sunmaktadır.



7. SU ALMA AĞZI MEMBASINDAKİ HIZ DAĞILIMININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Bu bölümde su alma ağzı membasında oluşan hız dağılımının FLOW-3D HYDRO programı aracılığıyla sayısal olarak analizi açıklanmaktadır. Meydana getirilen HAD modeli, 5. Bölümde detaylı olarak anlatılan deneysel çalışmayı gerek deney düzeneğinin fiziksel yapısı gerekse de sonuçları itibarıyla referans olarak almıştır. Sayısal model oluşturulurken, aşağıdaki değişkenlerin sonuçlara etkileri araştırılmış, deney sonuçlarına en yakın sonuçları sağlayacak model elde edilmiştir:

- Kanal uzunluğu ve dalga kırıcı yapısı
- Su alma ağzı
- Çözüm ağı boyutları
- Simülasyon süresi
- Türbülans modeli
- Kanal tabanındaki sabit tanelerden kaynaklı pürüzlülük

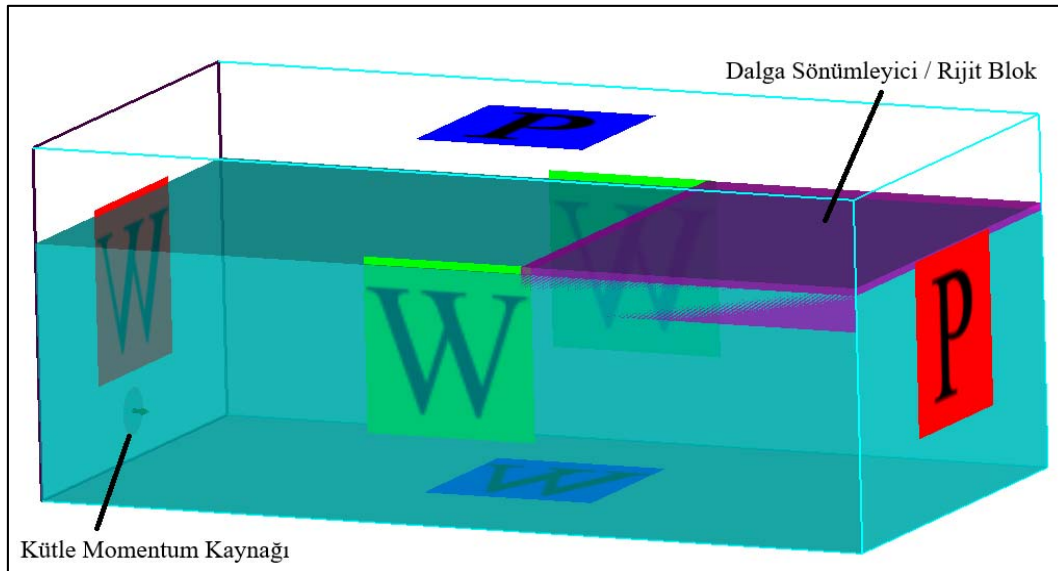
Tüm karar alma aşamalarında $c/D = 1$, $l/D = 0$, $H/D = 4,5$, $Q = 4,995$ lt/sn deney düzeneğinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Her bir incelenen başlıkta sadece ilgili parametrenin değişken olarak seçildiği, geri kalan tüm girdilerin aynı tutulduğu akıldan çıkarılmamalıdır. HAD modeli kalibre edildikten sonra ise Çizelge 7.1’de sunulan deney düzeneklerinin sayısal çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.1. Sayısal modelde kullanılan deney düzenekleri

c/D	l/D	Q (lt/sn)		
0,5	0	2,86	4,99	8,95
1	0	2,86	4,99	8,95
1,5	0	2,86	4,99	8,95
2	0	2,86	4,99	8,95
1	1	2,86	4,99	8,95
1	2	2,86	4,99	8,95

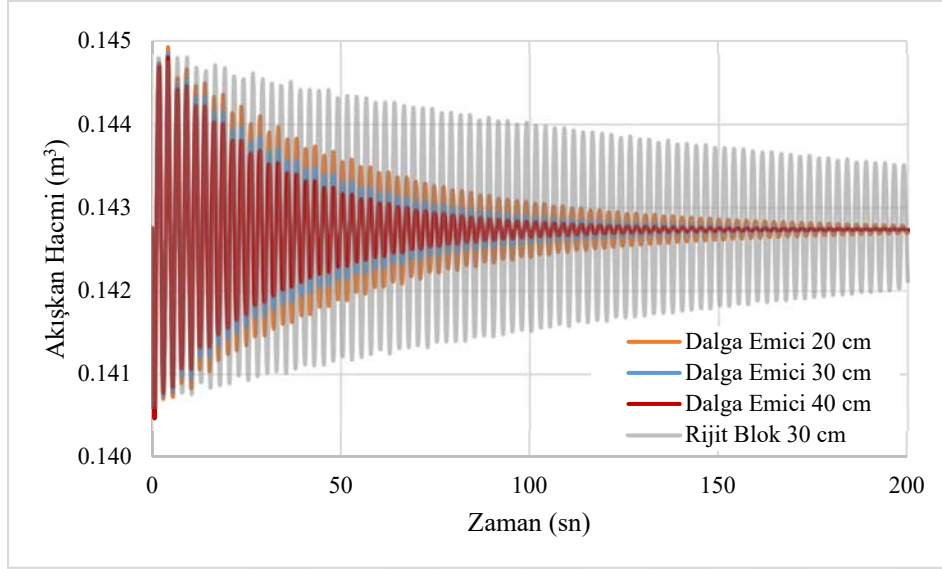
7.1. Kanalin Fiziksel Özelliklerinin ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Sayısal modele karar verilebilmesi için öncelikli olarak 0,5 m genişlik ve yüksekliğinde, 1 m uzunluğunda kanal seçimi yapılmıştır. Su alma ağzını modellemek için çapı, ağız iç çapı olan 5,32 cm'ye eşit kütle momentum kaynağı, akım memba koşullarını sağlamak için ise sınır koşulu olarak hidrostatik basınç değeri (P) verilmiştir. Kanal tabanı ve yan duvarları ile ölü son yapısı, duvar (W) sınır koşulu olarak modele tanımlanmıştır (Şekil 7.1). Çözüm ağı kanalı kapsayacak tek bir blok olarak oluşturulmuş ve çözüm ağı sıklığı 2 cm olarak seçilmiştir. Bu noktada öncelikli olarak dalga sönümleyici yapısının özelliklerine karar verilmiştir. Çünkü kanalda meydana gelecek dalgalanma, serbest su yüzeyine yakın noktalardaki hız değerlerini etkileyecektir. Ayrıca bu dalgalanmanın simülasyonda belirli bir süreden sonra, çözüm alanı içerisindeki su hacmini gerçekte olması gerekenden farklı bir değere taşıyabileceği de belirtilmektedir (Wei, 2015). Bu amaçla kanal membasına yerleştirilen, 5 cm kalınlık ve 50 cm genişlik değerleri sabit olacak şekilde sırasıyla 20, 30 ve 40 cm uzunluğunda dalga emici blok ve 30 cm uzunluğunda rijit blok karşılaştırılmıştır. Dalga kırıcının mansaptaki akışı etkilememesi için en fazla 40 cm uzunluk seçilmiştir. Dalga emici bloklarda ise sönümlenme katsayısı, başlangıç ve bitiş içerisinde sıfırdan bire lineer değişecek şekilde tanımlanmıştır.

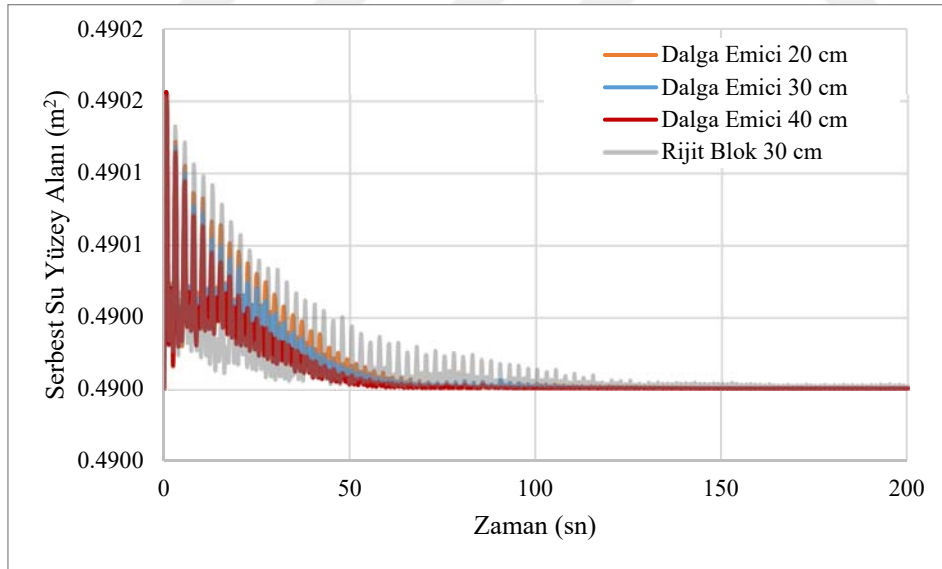


Şekil 7.1. Başlangıç HAD model örneği

Simülasyon sonuçları 40 cm uzunluğunda dalga emici kullanımının 1 m uzunluğundaki kanal içerisinde, dalgalanmayı önemli ölçüde engellediğini göstermiş, aynı zamanda simülasyon süresi olarak, 50-100 sn aralığının yeterli olacağı yönünde bir kanaat oluşturmuştur (Şekil 7.2).



(a)



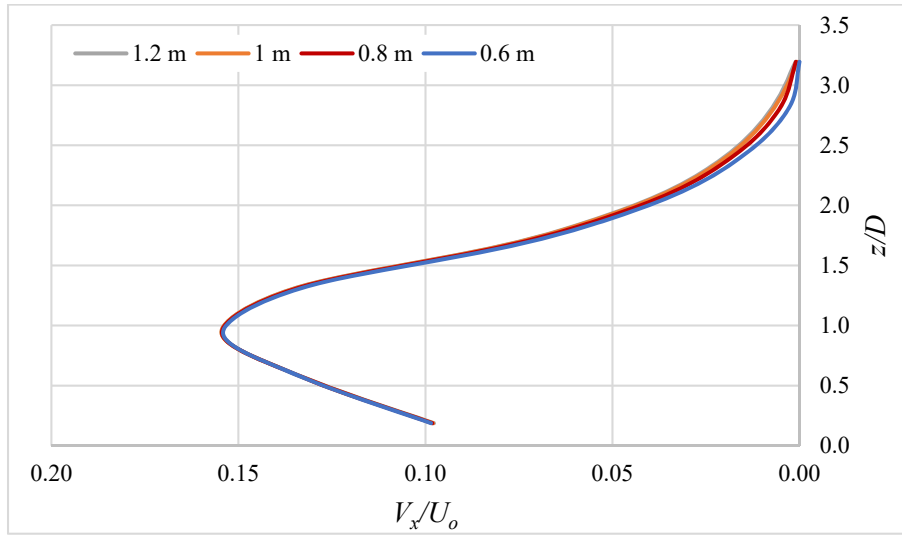
(b)

Şekil 7.2. Dalga kırıcı yapılarının karşılaştırılması (a) Akışkan hacmi (b) Serbest su yüzey alanı

Dalga sönümleyiciye karar verildikten sonra sıra kanal uzunluğunun seçimine gelmiştir. Sayısal model kurulumunda, kanal uzunluğunun akım şartlarını etkilemeyecek kadar uzun, simülasyon zamanını ise en uygun sürede tutacak kadar kısa olması gerekmektedir. Bu

sebeple deney düzeneğinde kullanılan kanal genişliği olan 50 cm sabit tutulmakla birlikte, 60, 80, 100 ve 120 cm kanal uzunlukları karşılaştırılmıştır. Dalga sönümleyicinin ağız akımını etkilememesi için, dalga sönümleyicinin kanal uzunluğuna olan oranı 0,40 olarak sabit tutulmuştur.

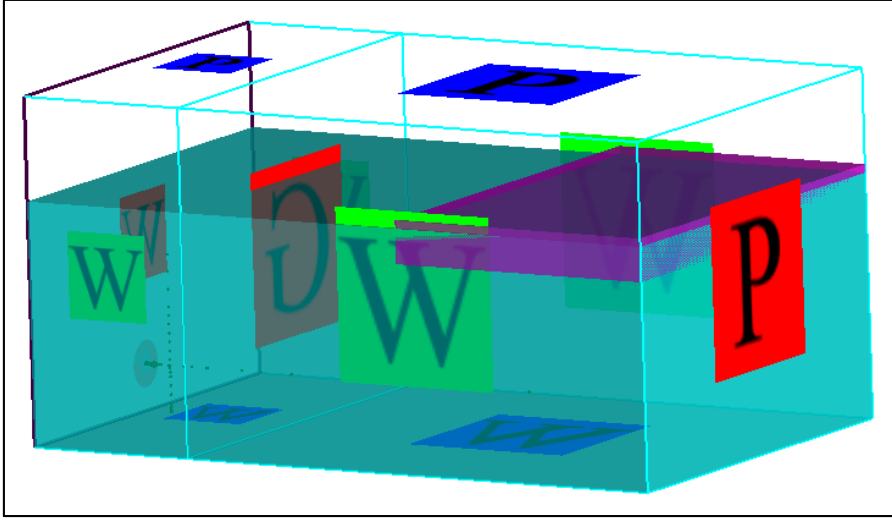
Simülasyon sonuçları $x/D = 0,94$ konumunda ve x yönündeki hız dağılımları için incelendiğinde 0,8 m kanal uzunluğunun yeterli olduğuna karar verilmiştir (Şekil 7.3).



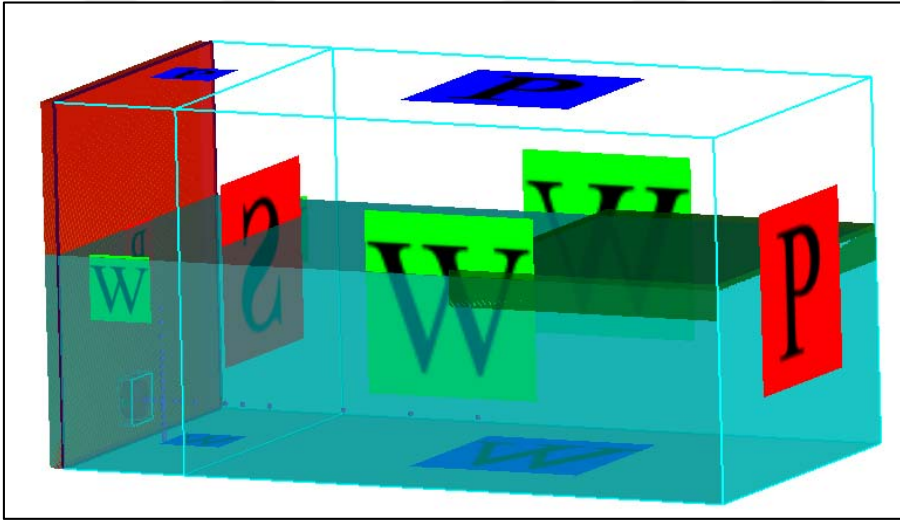
Şekil 7.3. Kanal uzunluklarının karşılaştırılması

7.2. Su Alma Ağzının Modellenmesi

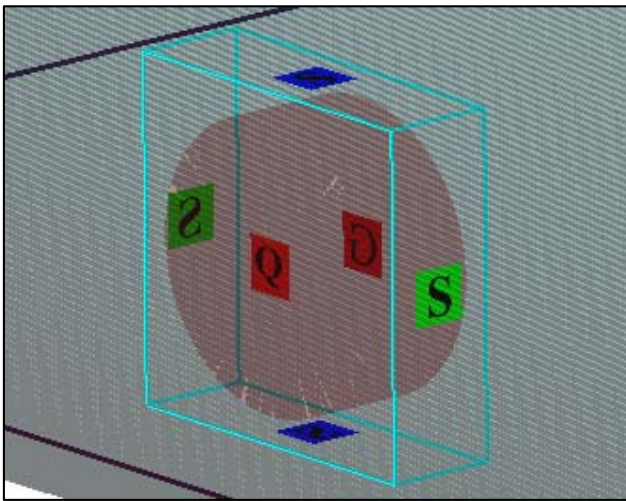
Su alma ağzı sayısal modelde kütle momentum kaynağı olarak tanımlanabileceği gibi dairesel katı bir cisim ve katı cismin içerisine boşluk oluşturulması yoluyla da fiziksel olarak programa tanımlanabilmektedir. İkinci yöntem seçildiği takdirde ağız için de ayrı bir çözüm ağ bloğu oluşturulmalı ve mansap sınır koşulu olarak Debi (Q) tanımlanmalıdır. İki ayrı yöntemden uygun olanın seçilebilmesi için Şekil 7.4'te gösterilen iki farklı model oluşturulmuştur. Şekil 7.4 (a) kütle momentum kaynaklı modeli, Şekil 7.4 (b) ve (c) ise ağız için ayrı bir çözüm ağ tanımlanan modeli göstermektedir. Her iki durumda da ağız akımından yoğunlukla etkilenen ilk 20 cm uzunluğundaki kısım için 1 cm, kalan 60 cm uzunluğundaki kısım için ise 2 cm inceliğinde çözüm ağ oluşturulmuştur. Su alma ağzının modellenmesi için ise 0,5 ve 1 cm inceliklerinde iki ayrı model karşılaştırılmıştır.



(a)

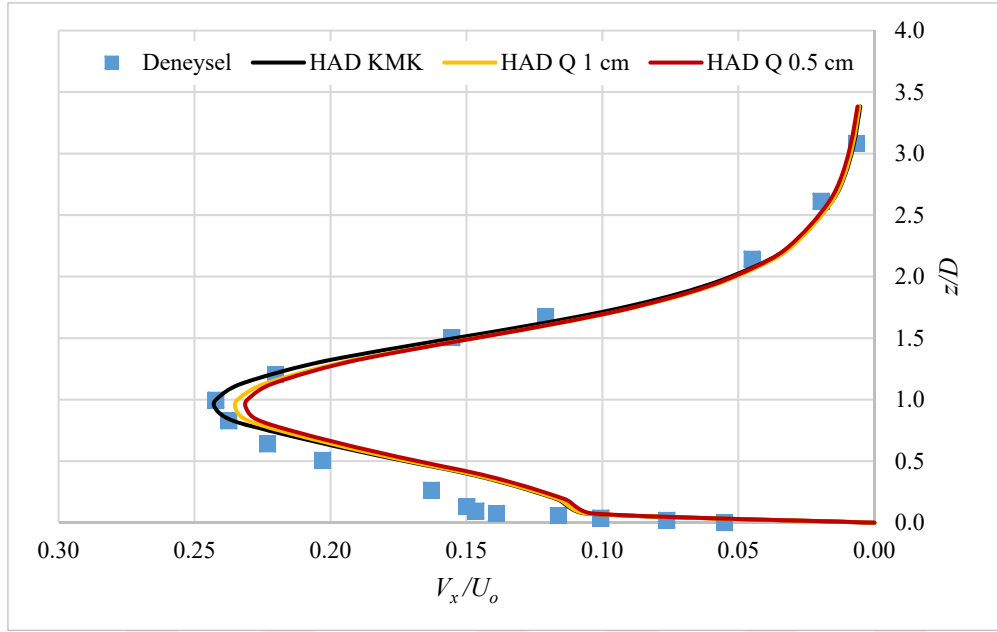


(b)



(c)

Şekil 7.4. Farklı su alma ağzı modelleri: (a) kütle momentum kaynağı (b) ve (c) boşluk olarak tanımlanan su alma ağzı



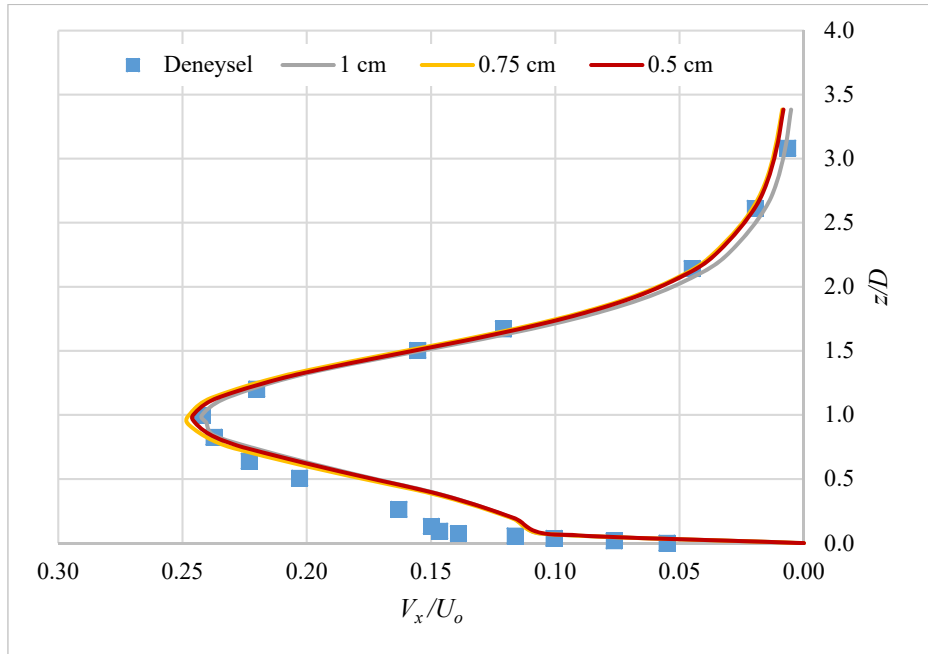
Şekil 7.5. Su alma ağız modellerinin karşılaştırılması

Şekil 7.5'te, 'KMK' kütle momentum kaynağı kullanılarak oluşturulan modeli; 'Q 1 cm' debi (Q) sınır koşulu ve 1 cm incelikli çözüm ağıyla oluşturulan modeli; 'Q 0,5 cm' ise debi (Q) sınır koşulu ve 0,5 cm incelikli çözüm ağıyla oluşturulan modeli ifade etmektedir. Şekil 7.5 incelendiğinde akım kaynağı olarak kütle momentum kaynağının kullanımının, deneysel verilerle tutarlı sonuçlar elde etmeye katkı sağlayacağı görülmüştür. Ağızın katı cisim içerisinde boşluk olarak tanımlanması ise fazladan çözüm ağı gerektirmekte ve ağızın program tarafından doğru bir şekilde algılanabilmesi için bu çözüm ağı sıklığının ince tutulmasını önemli kılmaktadır. Dolayısıyla çözüm süresi kütle momentum kaynaklı modele göre daha uzun olmaktadır. Bu sebeple akım kaynağı olarak kütle momentum kaynağı kullanılmasına karar verilmiştir.

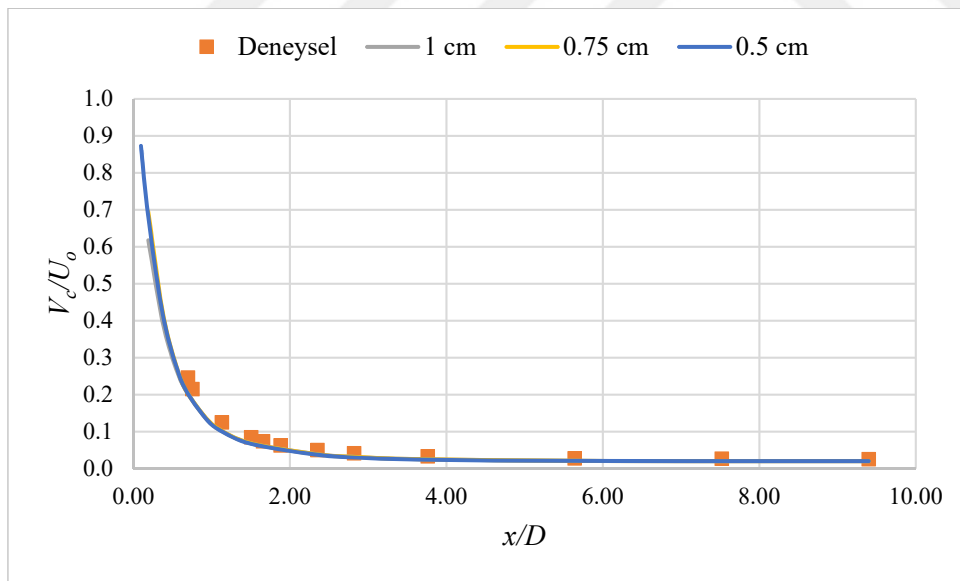
7.3. Çözüm Ağı Aralığına Karar Verilmesi

Sayısal model oluşturulurken en önemli noktalardan bir tanesi ise çözüm ağından bağımsız sonuçlar elde edebilmek açısından en uygunun bulunmasıdır. 0,80 m kanal uzunluğu ve kütle momentum kaynağı seçiminden sonra çözüm ağı özelliklerinin hız dağılımına etkisi araştırılmıştır. Ağız akımı etkisi altında yoğun olarak bulunan ilk 20 cm'lik kısım ve kalan 60 cm'lik kısım iki ayrı çözüm ağı bloğu olarak tanımlanmıştır. İlk çözüm ağı için 1, 0,75 ve 0,5cm aralıklar karşılaştırılırken, ikinci çözüm ağı için ise 2 cm aralık sabit tutulmuş, simülasyon süresi de 60 saniye olarak seçilmiştir. Şekil 7.6 (a) $x/D = 0,70$ konumundaki

hız dağılımının derinlikle değişimini, Şekil 7.6 (b) ise ağız eksenindeki hızın kanal uzunluğu boyunca değişimini göstermektedir.



(a)



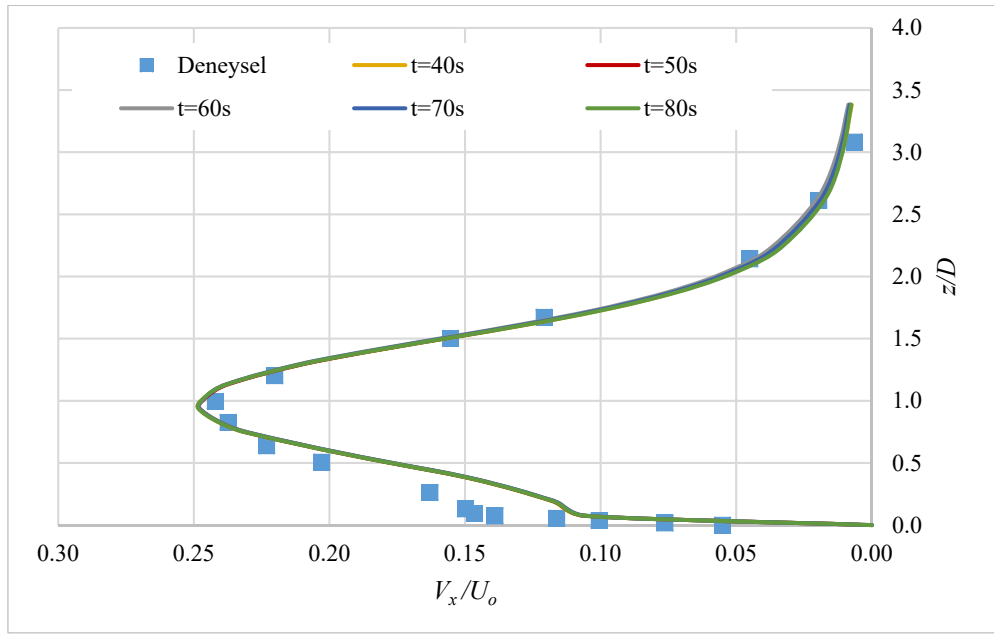
(b)

Şekil 7.6. Farklı çözüm ağı sıklıklarının hız dağılımları üzerinden karşılaştırılması (a) Derinlikle değişim (b) Kanal boyunca değişim

Çözüm süresi ve deneysel sonuçlarla uyumluluk karşılaştırıldığında 0,75 cm çözüm ağı sıklığı yeterli bulunmuştur.

7.4. Simülasyon Süresine Karar Verilmesi

Kanalın fiziksel özelliklerinin belirlenmesi başlığında sunulan Şekil 7.2’de, simülasyon süresi olarak 50 ila 100 saniye aralığının yeterli olacağı ön fikri daha önce sunulmuştu. Bu sürenin kesinleştirilebilmesi için 40, 50, 60, 70 ve 80 saniye sürelerinin hız dağılımına olan etkileri araştırılmıştır (Şekil 7.7).



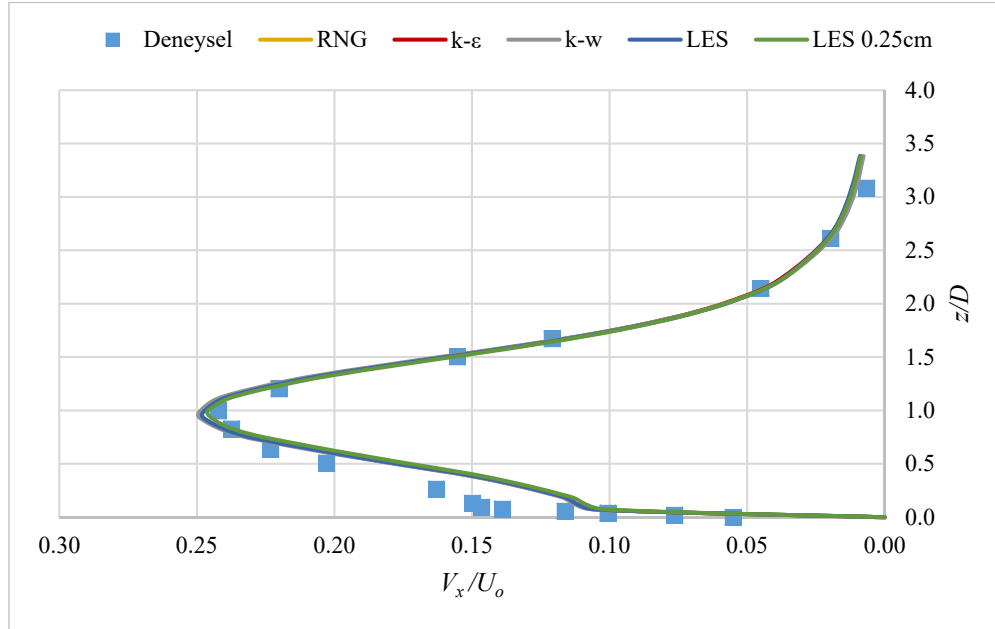
Şekil 7.7. Farklı simülasyon sürelerinin karşılaştırılması

Şekil 7.7’de elde edilen sonuçlar, incelenen sürelerin hız dağılımına çok büyük etkisinin olmadığını göstermekte ancak kanal içerisindeki akışkan hacmi ve serbest yüzey alanı (Şekil 7.2) ile birlikte değerlendirildiklerinde 60 saniye simülasyon süresinin yeterli olacağına işaret etmiştir.

7.5. Türbülans Modeline Karar Verilmesi

Türbülans modeline karar verilebilmesi için RNG, $k-\varepsilon$, $k-w$ ve LES yaklaşımları karşılaştırılmıştır. Ayrıca LES yaklaşımının diğer türbülans modellerine göre daha sıkı çözüm aralığı gerektirdiği bilindiği için 0,25 cm çözüm aralığı da karşılaştırılmıştır (Şekil 7.8). Sonuçlar arasında kayda değer bir fark olmadığı ve su alma ağız akımları ile ilgili önceki sayısal çalışmalarda da sıklıkla kullanıldığı görüldüğü için (Tokyay ve

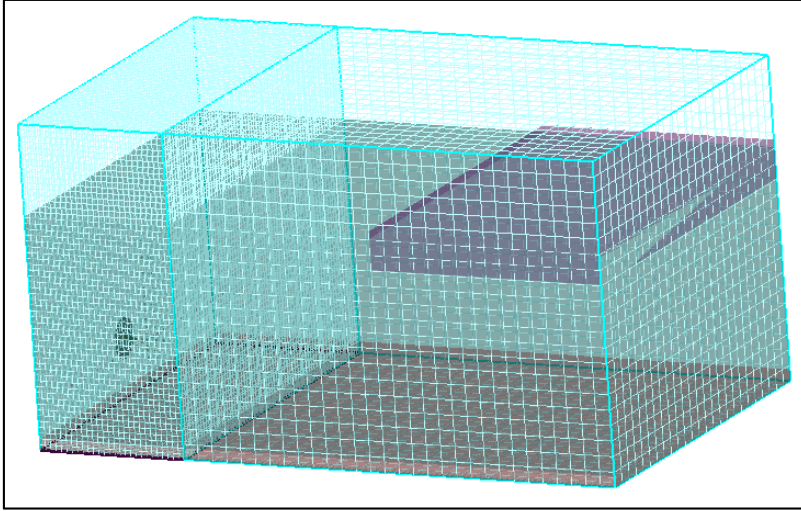
Constantinescu, 2006; Nakayama ve Hisasue, 2010; Taştan ve diğerleri, 2023) 0,75 cm çözüm aralığına sahip LES yaklaşımının kullanılmasına karar verilmiştir.



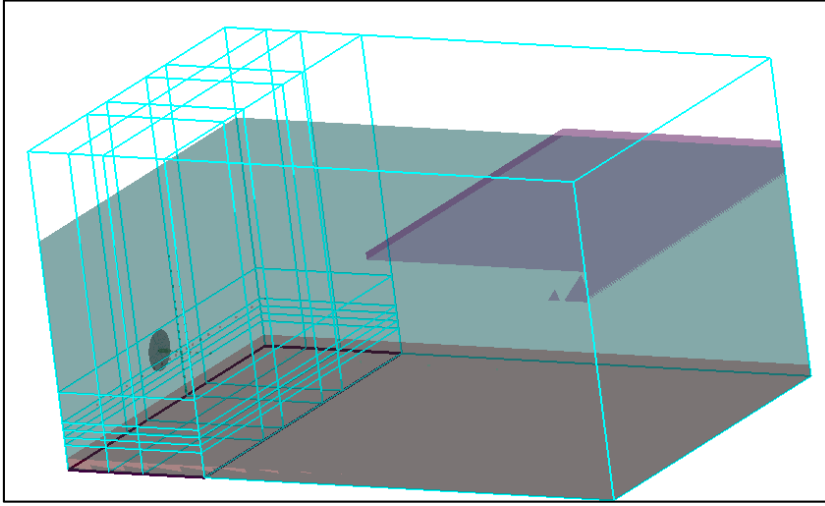
Şekil 7.8. Türbülans modellerinin karşılaştırılması

7.6. Kanal Tabanının Modellenmesi

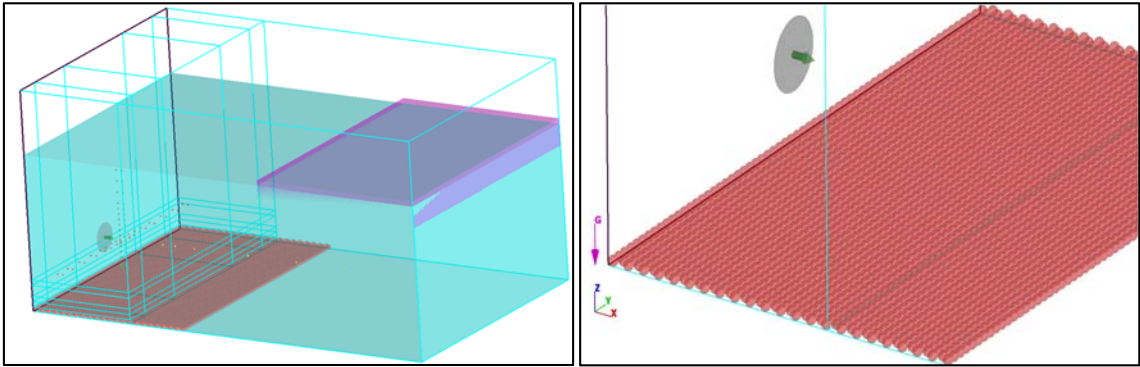
Bölüm 6’da detayları anlatıldığı üzere hız dağılımlarının ölçümünde, kanal tabanında 8 mm sabit tanelerin oluşturduğu bir yatak kullanılmıştır. Bu tanelerin yarattığı pürüzlülüğün programa tanımlanabilmesi için üç ayrı yöntem denenmiştir. İlk yöntemde kanal tabanına sabit katı bir cisim yerleştirilerek, bu cismin taban pürüzlülüğü 8 mm olarak ayarlanmıştır. Çözüm ağı bir önceki başlıkta anlatıldığı üzere 0.75 ve 2 cm’den oluşan iki ayrı blok olarak değiştirilmeden kullanılmıştır (“Pürüzlülük 7.5 mm” Modeli- Şekil 7.9 (a)). İkinci yöntemde ise çözüm ağı sıklığı, ilk çözüm ağı bloğu için üç ayrı x, y ve z yönünde 1 mm ile 1 cm aralığında düzenli olarak arttırılmıştır (“Pürüzlülük 1 mm” Modeli- Şekil 7.9 (b)). Bu modelde oluşturulan toplam çözüm ağı hücre sayısı 1 666 854’tür. Üçüncü yöntemde ise tabandaki sabit taneler Autocad programı aracılığıyla üç boyutlu olarak çizilmiş ve oluşturulan geometri model tabanına .stl dosyası olarak tanımlanmıştır. Programın taneleri tanımlayabilmesi için benzer şekilde ilk çözüm ağı bloğu, üç ayrı x, y ve z yönünde 1.5 mm ile 1 cm aralığında düzenli olarak arttırılmıştır (“Tane stl.” Modeli- Şekil 7.9 (c)). Bu modelde oluşturulan toplam çözüm ağı hücre sayısı ise 1 648 905’tir.



(a)



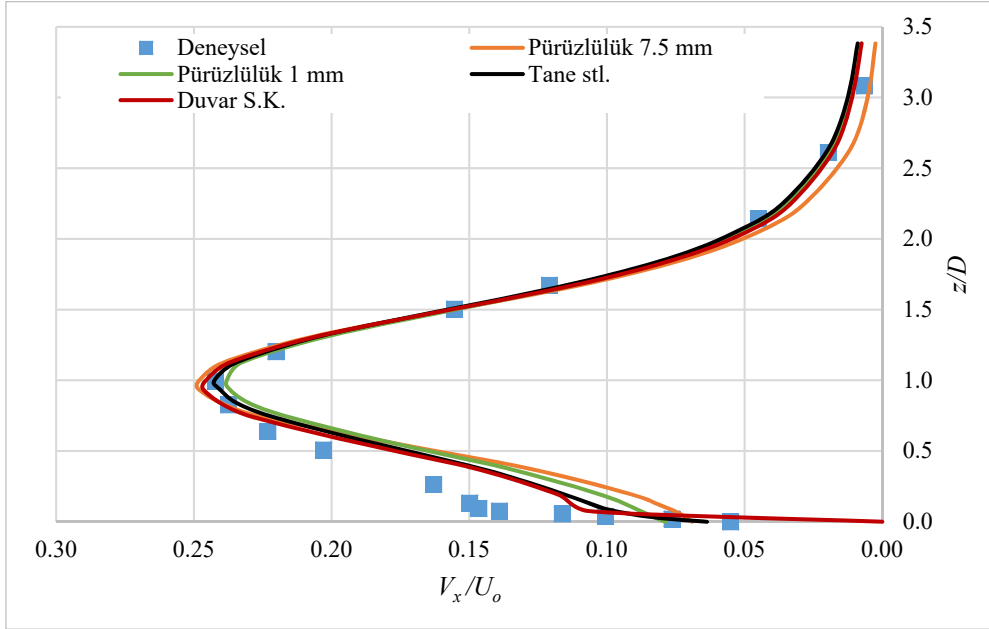
(b)



(c)

Şekil 7.9. Taban pürüzlülüğü için oluşturulan farklı modeller (a) “Pürüzlülük 7.5 mm” Modeli (b) “Pürüzlülük 1 mm” Modeli (c) “Tane stl.” Modeli

Bu üç modelle birlikte kanal tabanının pürüzlülük girilmeden duvar (W) sınır koşulu (Duvar S.K.) olarak tanımlandığı modellerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 7.10'da gösterilmiştir. Sunulan hız dağılımları $x/D = 0,70$ konumunu göstermektedir.



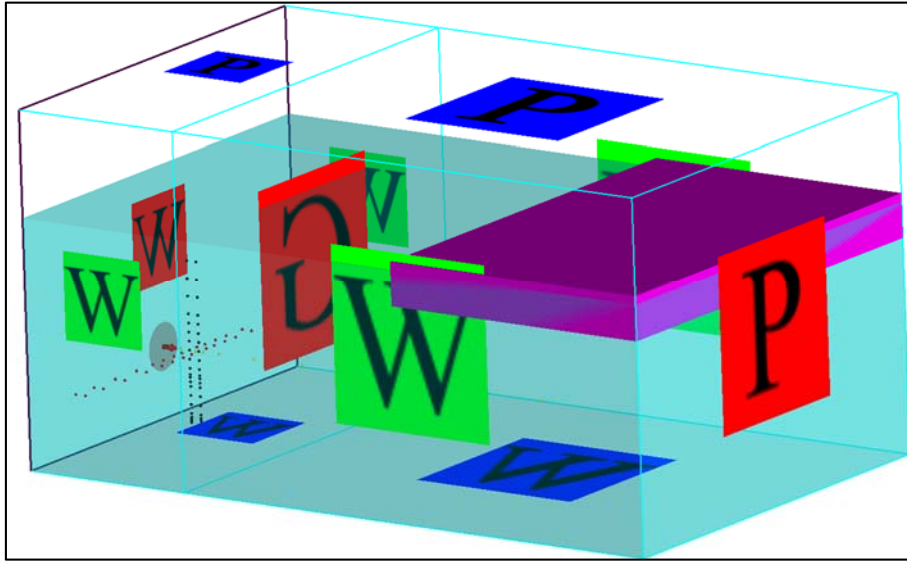
Şekil 7.10. Farklı taban pürüzlülüğü modellerinin karşılaştırılması

Şekil 7.10'dan görüldüğü üzere 8 mm taban pürüzlülüğü tanımlanan modellerde 7,5 mm'lik çözüm ağı sıklığı yeterli olmamakta ancak aralığı 1 mm'ye düşürmek de görece az bir değişime yol açmaktadır. Tabanda fiziksel olarak katı parçacıkların tanımlandığı tane .stl modeli, pürüzlülük modellerine kıyasla deneysel verilerle daha uyumlu olsa da tabanın duvar sınır koşulu olarak tanımlandığı modelden daha başarılı olmamıştır. Öte yandan pürüzlülük ve taneli modeller, duvar sınır koşulu modeline göre çok daha uzun çözüm süresi gerektirmektedirler. Aynı kapasitedeki bilgisayarda gerçekleştirilen simülasyonlarda, taban duvar sınır koşulu modeline göre simülasyon süreleri karşılaştırıldığında, 1 mm pürüzlülük modeli yaklaşık 225 kat, 1,5 mm tane modeli yaklaşık 100 kat daha uzun sürmektedir. Taban duvar sınır koşulu modelinin en uygun çözüm süresine sahip olması ve aynı zamanda deneysel verilerle en uyumlu sonuçları vermesi dolayısıyla kanal tabanı modellenmesine kullanılmasına karar verilmiştir.

7.7. Hız Dağılımı Verilerinin Elde Edilmesi

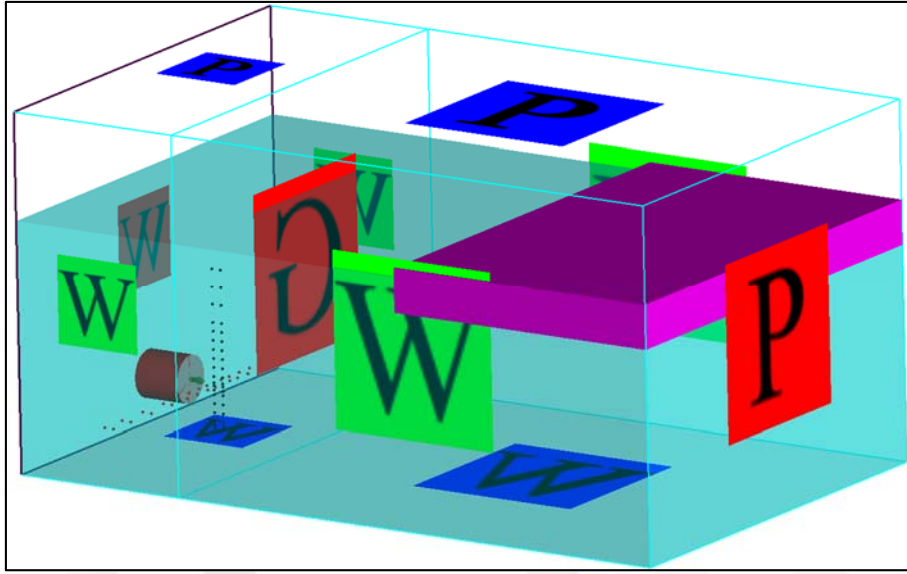
Su alma ağzının, özellikle kendisine yakın bölgelerdeki hız dağılımını önemli ölçüde etkilediği, konumdaki milimetre hassasiyetindeki değişimlerin hızlarda önemli farklılıklara yol açtığı önceki bölümlerde incelenmişti. FLOW-3D HYDRO araştırılan özelliklerin çözüm ağı hücrelerinin orta noktasında elde edilebilmesini sağlamaktadır. Bu sebeple deneysel çalışmada hız dağılımlarının elde edildiği boyuna ve yatay konumlarda, sayısal çalışma sonuçlarının doğru bir biçimde karşılaştırılabilmesi için oluşturulan modelde kontrol noktaları (probe) kullanılmıştır (Şekil 7.11). Bu kontrol noktaları sayesinde tam olarak istenilen konumdaki basınç, akım derinliği, enerji yüksekliği ve üç yöndeki akım hızları ölçülebilmektedir.

Yukarıdaki süreç sonunda elde edilen ve sayısal çalışmada kullanılan nihai model örnekleri $l/D = 0$ ve $l/D > 0$ için sırasıyla Şekil 7.11 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. $l/D > 0$ modellerinde, çapı su alma ağzının iç çapına eşit bir katı silindir tanımlanarak duvar ile kütle momentum kaynağı arasına yerleştirildiği ve su alma yapısının bu şekilde modellendiği unutulmamalıdır (Şekil 7.11 (b)).



(a)

Şekil 7.11. Nihai model örnekleri (a) $l/D = 0$ (b) $l/D > 0$



(b)

Şekil 7.11. (devam) Nihai model örnekleri (a) $l/D = 0$ (b) $l/D > 0$

7.8. Sayısal Sonuçların İncelenmesi

Bu kısımda, kalibrasyonu gerçekleştirilen sayısal modelden elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırılarak modelin doğruluk düzeyi ve ağız membasındaki akım şartlarını temsil kabiliyeti değerlendirilmiştir. İnceleme kapsamında, su alma ağzı membasında oluşan akım yapısı farklı yönlerdeki hız bileşenleri üzerinden analiz edilmiştir. İlk olarak, ağız eksenindeki hızın (V_c) akım doğrultusunda değişimi incelenmiş; ardından boyuna hız bileşeninin (V_x) hem derinlik (z) hem de yanal (y) doğrultudaki dağılımları değerlendirilmiştir. Akımın düşey hız bileşeninin (V_z) derinlikle değişimi ile yanal hız bileşeninin (V_y) y eksenindeki davranışı da ayrıca ele alınmıştır.

Sayısal modelden elde edilen sonuçların deneysel ölçümlerle uyumu, Hata Kareleri Ortalamasının Karekökü (Root Mean Square Error – RMSE) ve Belirleme Katsayısı (R^2) istatistiksel araçları kullanılarak incelenmiştir. RMSE, sayısal sonuçlar ile deneysel veriler arasındaki ortalama hata büyüklüğünü ortaya koyarken; R^2 modelin deneysel ölçüm setindeki değişkenliği ne ölçüde açıkladığını göstermektedir. Bu iki parametrenin birlikte değerlendirilmesi, sayısal modelin hem doğruluk seviyesini hem de deneysel eğilimleri yakalama kabiliyetini ortaya koymaktadır. RMSE ve R^2 için kullanılan matematiksel ifadeler sırasıyla Eş. 7.1 ve Eş. 7.2’de sunulmuştur.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{i(deney)} - y_{i(CFD)})^2} \quad (7.1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_{i(deney)} - y_{i(CFD)})^2}{\sum_{i=1}^N (y_{i(deney)} - \overline{y_{deney}})^2} \quad (7.2)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde N incelenen toplam veri sayısını; i , veri seti içinde karşılaştırılan her bir deneysel veya sayısal gözlemi gösteren alt indisi; $y_{i(deney)}$ ifadesi i numaralı deneysel sonucu; $y_{i(CFD)}$ ifadesi i numaralı sayısal model sonucunu ve $\overline{y_{deney}}$ ise veri setindeki deneysel verilerin ortalamasını ifade etmektedir.

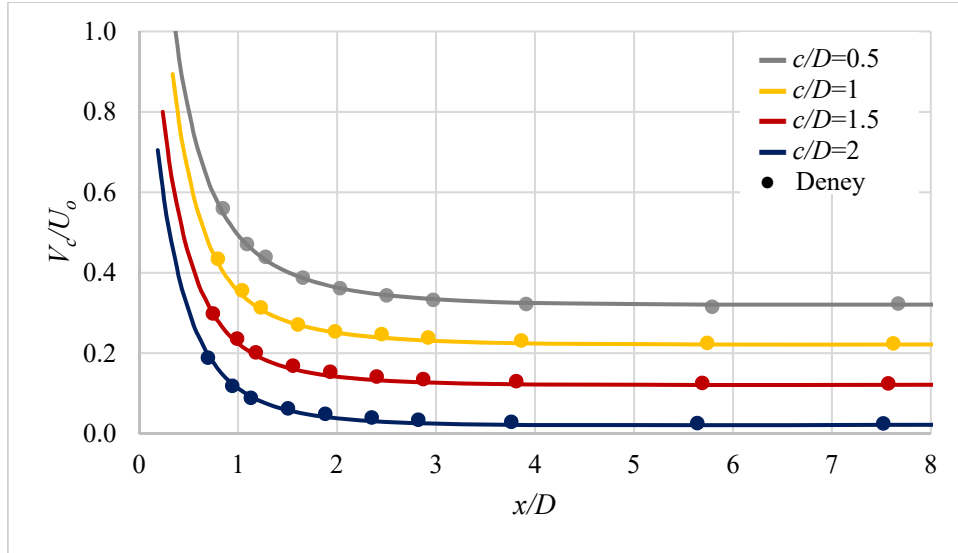
Sayısal modelden elde edilen sonuçlar ile deneysel veriler arasındaki ortalama hata büyüklüğünü ifade eden RMSE'nin sifıra yaklaşması, model hatalarının azaldığını ve doğruluğunun yükseldiğini; büyük değerler ise modelin deneysel sonuçlardan uzaklaştığını göstermektedir. R^2 değeri ise 0 ile 1 arasında değişmekte olup modelin deneysel verileri ne ölçüde açıkladığını ortaya koymaktadır. R^2 'nin 1'e yaklaşması, sayısal sonuçların deneysel verileri yüksek doğrulukla temsil ettiğini göstermektedir.

Bu kapsamda gerçekleştirilen karşılaştırmalar, sayısal modelin deneysel bulgularla genel olarak yüksek düzeyde uyum sağladığını ve su alma ağzı etrafındaki üç boyutlu akım karakteristiğini başarıyla temsil ettiğini göstermektedir.

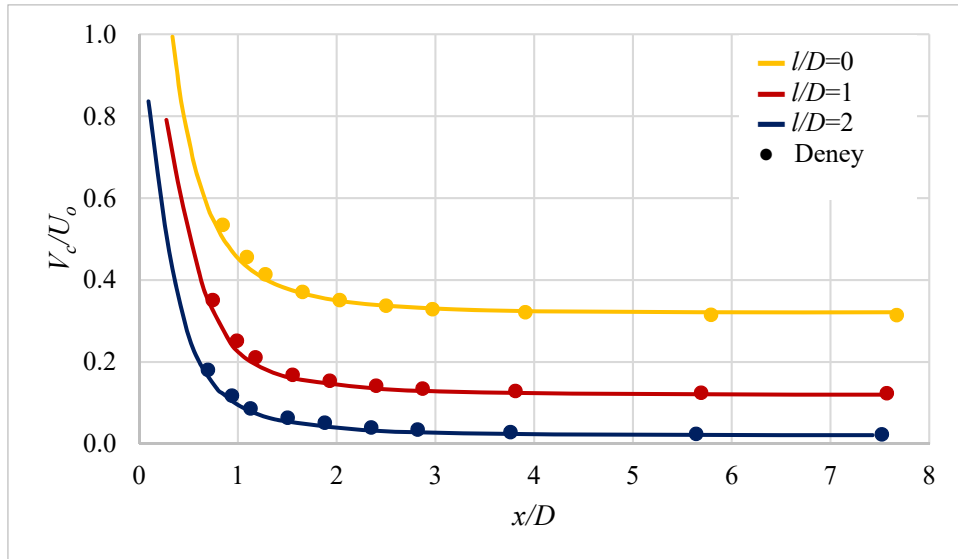
7.8.1. V_c hızının x eksenini boyunca değişiminin karşılaştırılması

Şekil 7.12 deneysel veriler ve sayısal modelden elde edilen sonuçların karşılaştırmasını (a) c/D (b) l/D değişimi için sunmaktadır. Kalibrasyonu yapılmış sayısal model sonuçları (—) sembolleriyle, deneysel veriler ise (●) sembolleriyle gösterilmiştir. Sonuçların daha net sunulabilmesi amacıyla, x ve y eksenlerinde aşağıdaki şekilde kaydırma yapılmıştır (x, y): $c/D = 1,5$ için (0,05; 0,1), $c/D = 1$ için (0,1; 0,2), $c/D = 0,5$ için (0,15; 0,3), $l/D = 1$ için (0,05; 0,1) ve $l/D = 0$ için (0,1; 0,2). Tüm düzeneklerde ağızdan $Q = 8,9469$ lt/s debi alınmaktadır.

Grafiklerden görüldüğü üzere, sayısal model sonuçları deneysel verilerle genel olarak yüksek düzeyde bir uyum göstermektedir. Bu durum, özellikle deneysel çalışmada ADV'nin üç ayaklı yapısı nedeniyle ağza en yakın $x/D = 0,70$ noktasından veri elde edilebildiği dikkate alındığında, yazılımın ağza daha yakın bölgelerdeki hız değerlerinin belirlenmesinde etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.



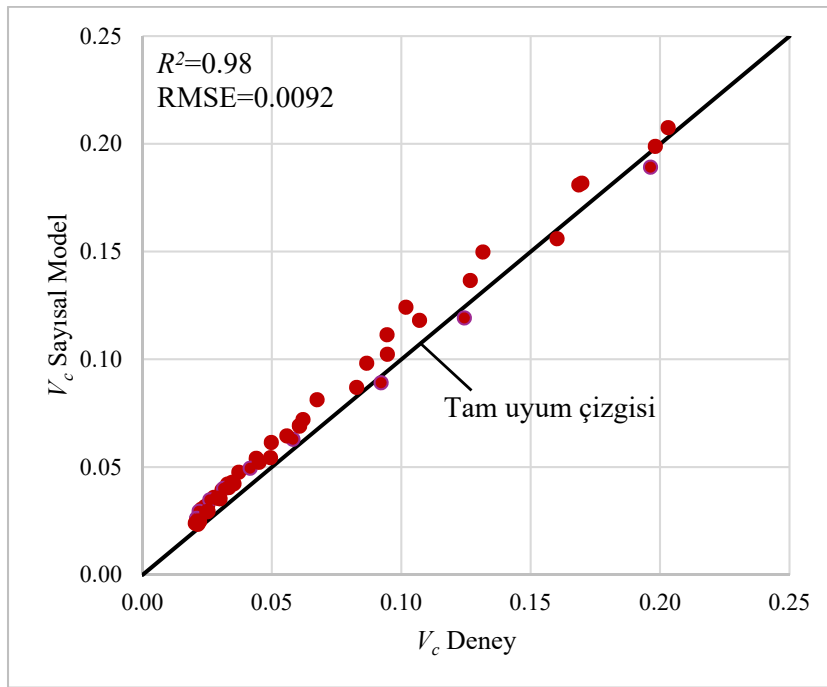
(a)



(b)

Şekil 7.12. Ağız eksenindeki hızın (V_c) x eksenini boyunca değişiminin karşılaştırılması (a) c/D değişimi (b) l/D değişimi

Şekil 7.13'te ise sayısal model ile deneysel ölçümler arasındaki ilişki tüm düzenekler için sunulmuştur. Grafikte yatay eksen deneysel verileri, düşey eksen ise sayısal model sonuçlarını göstermektedir. Tam uyum çizgisi, ideal durumda sayısal sonuçların deneysel verilerle birebir örtüşmesini temsil etmektedir. Kırmızı veri noktalarının büyük çoğunluğunun bu çizgiye oldukça yakın konumlanması, modelin deneysel sonuçları yüksek doğrulukla yansıttığını göstermektedir. Ayrıca $R^2 = 0,98$ değeri sayısal modelin deneysel verilerin büyük kısmını açıkladığını, düşük RMSE ise hataların sınırlı düzeyde kaldığını ortaya koymaktadır.

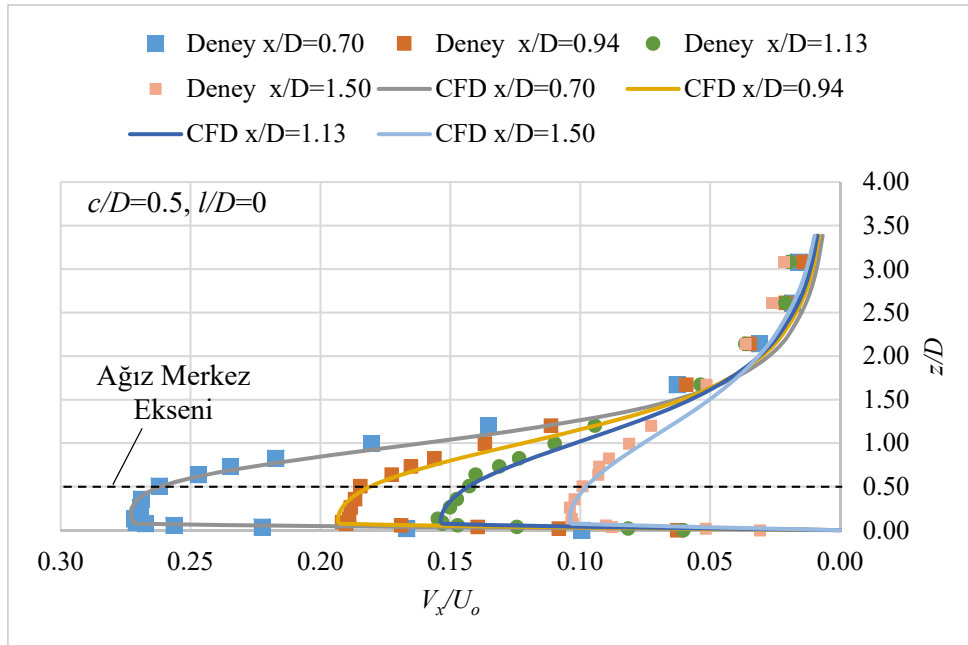


Şekil 7.13. Sayısal model sonuçlarının deneysel ölçümlerle uyumu (V_c)

7.8.2. Ağız merkez eksenindeki V_x hızının kanal boyunca derinlikle değişiminin karşılaştırılması

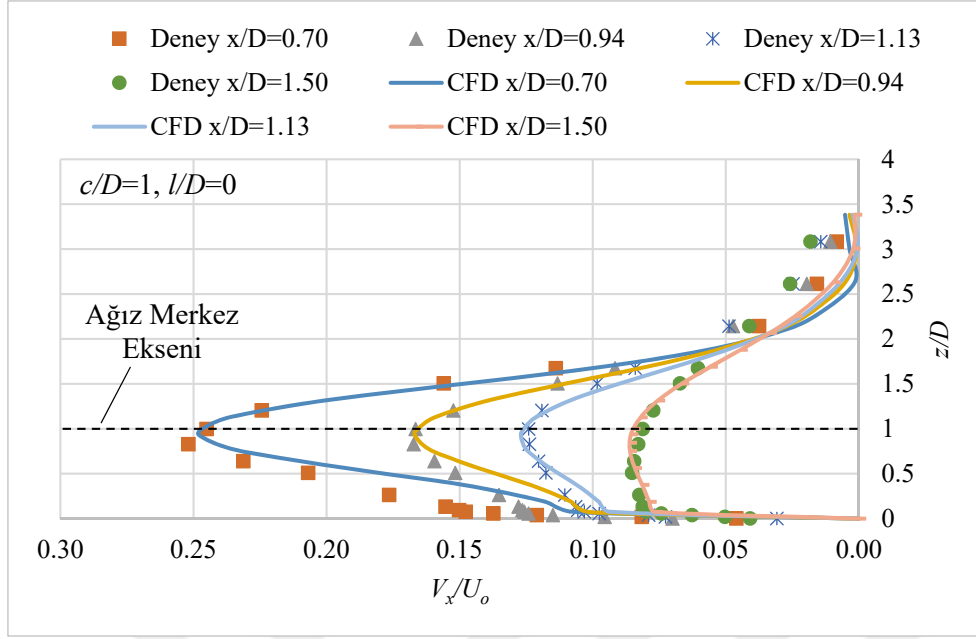
Şekil 7.14, farklı c/D ve l/D düzenekleri için V_x hızının x eksenini üzerindeki derinlik boyunca değişimini göstermektedir. Her alt şekil sırasıyla (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 4,9951$ lt/s deney düzeneğine karşılık gelmektedir. Deneysel sonuçlar ile sayısal modellerden elde edilen veriler, farklı x/D konumlarında (0,70, 0,94, 1,13 ve 1,50) karşılaştırılmıştır. Şekiller içerisinde sayısal sonuçlar CFD kısaltması ile gösterilmiştir.

Sayısal modelin, genel olarak deneysel ölçümlerle yüksek düzeyde uyum sağladığı, özellikle ağız çevresindeki hız profillerini ise oldukça başarılı biçimde temsil ettiği görülmektedir. Derinliğin artmasıyla birlikte deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki küçük farklılıkların özellikle serbest yüzey yakınında ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bu durumun, deneysel ölçüm sırasında kanalda meydana gelen küçük ölçekli dalgalanmalardan kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, hız dağılımının tabana yakın bölgelerinde deneysel ve sayısal sonuçlar arasında gözlenen farklılıkların, deneysel düzeneklerde kanal tabanında bulunan pürüzlü yapının sayısal modelde tam olarak temsil edilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

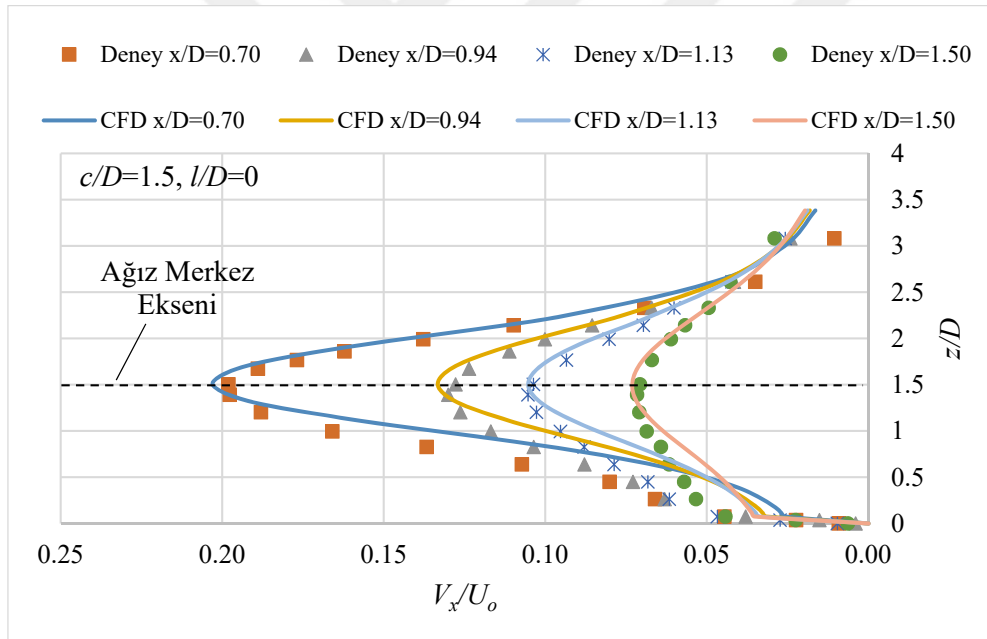


(a)

Şekil 7.14. Hız dağılımının (V_x) x ekseninde derinlikle değişiminin karşılaştırılması
 (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s,
 (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s,
 (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 4,9951$ lt/s

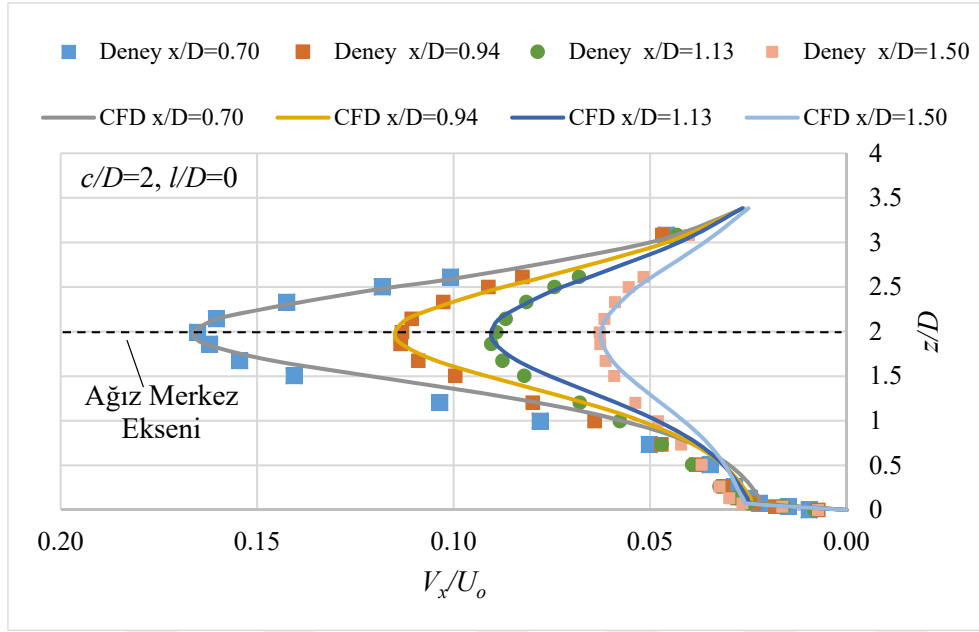


(b)

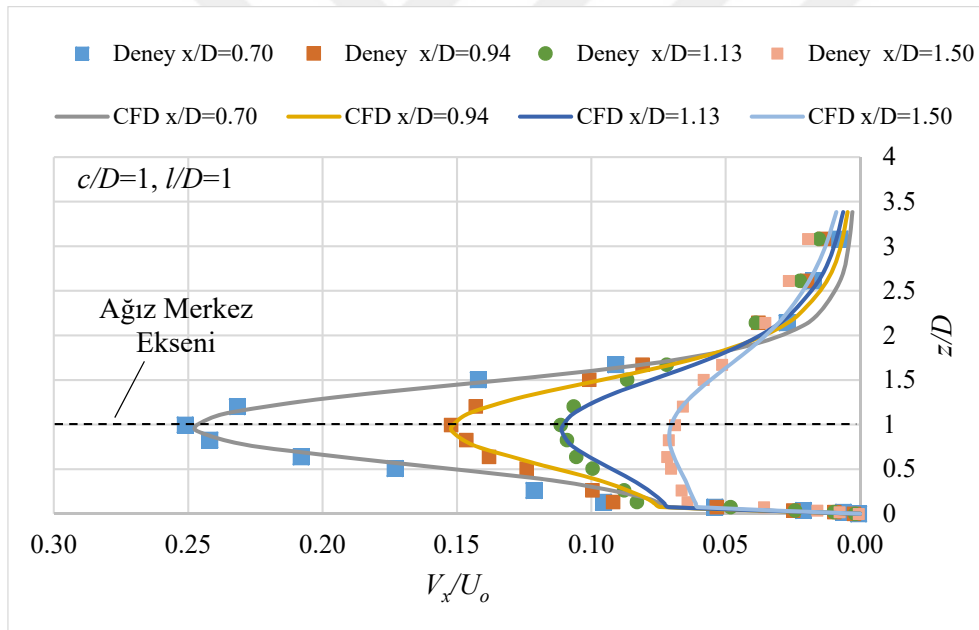


(c)

Şekil 7.14. (devam) Hız dağılımının (V_x) x ekseninde derinlikle değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 4,9951$ lt/s

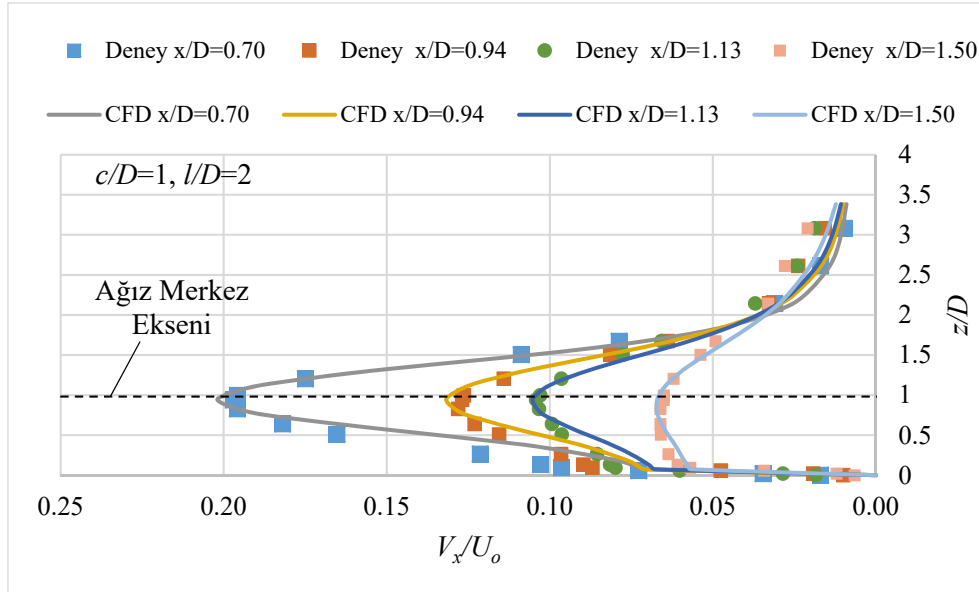


(d)



(e)

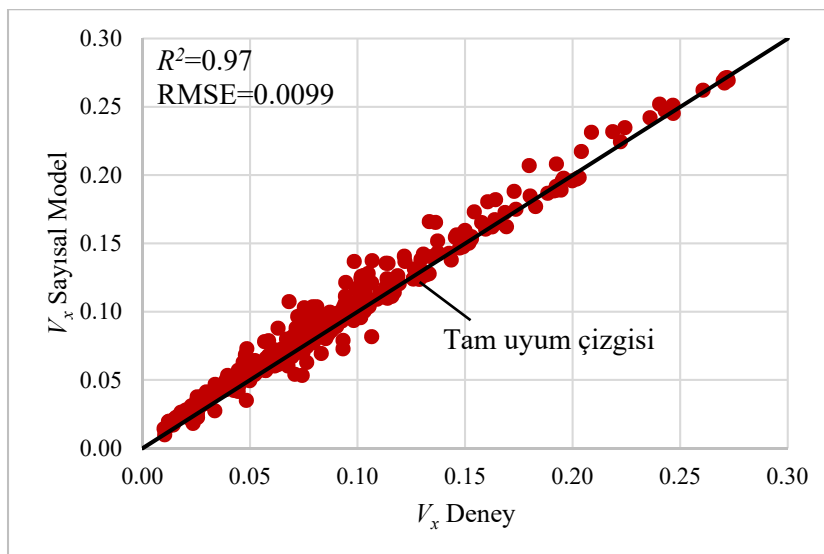
Şekil 7.14. (devam) Hız dağılımının (V_x) x ekseninde derinlikle değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 4,9951$ lt/s



(f)

Şekil 7.14. (devam) Hız dağılımının (V_x) x ekseninde derinlikle değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 4,9951$ lt/s

Şekil 7.15'te ise V_x hızının x ekseninde derinlikle değişiminin karşılaştırılmasını tüm düzenekler için sunulmuştur. Yatay eksen deneysel ölçümleri, dikey eksen ise sayısal model değerlerini göstermektedir. Veri noktalarının büyük çoğunluğunun tam uyum çizgisine yakın bir dağılım sergilediği görülmektedir. $R^2=0,97$ değerini alırken, RMSE = 0,0099 olmaktadır.

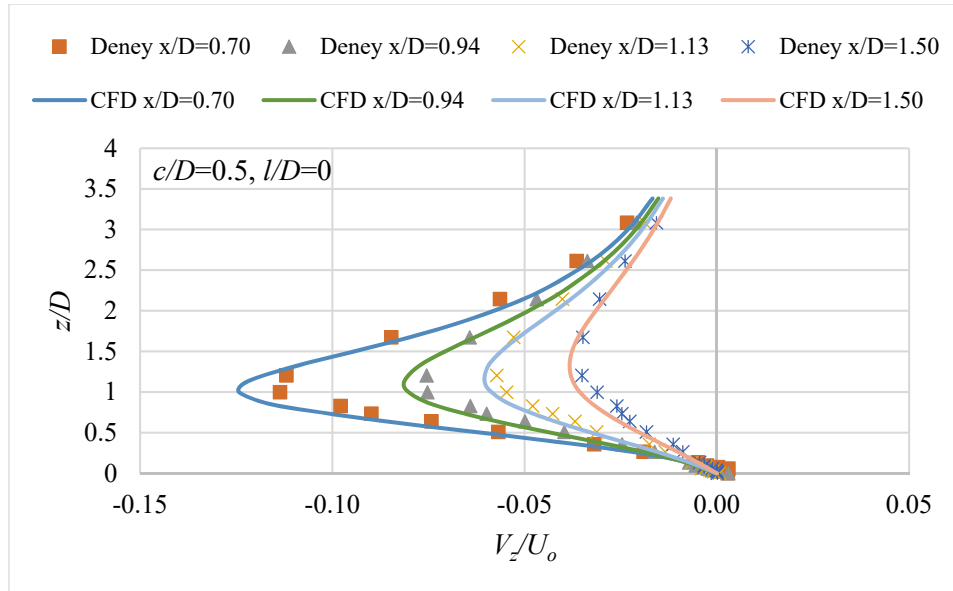


Şekil 7.15. Sayısal model sonuçlarının deneysel ölçümlerle uyumu (V_x)

7.8.3. Düşey hızın (V_z) x ekseninde derinlikle değişiminin incelenmesi ($y = 0$)

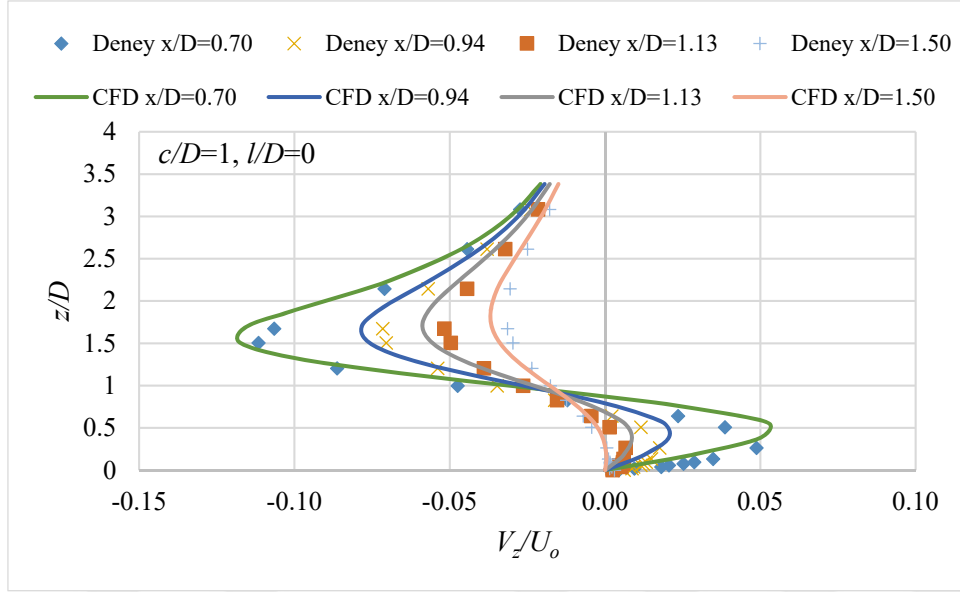
Şekil 7.16, düşey hız bileşeni olan V_z 'nin, farklı x/D konumlarında derinlik boyunca değişimini c/D ve l/D düzenekleri için göstermektedir. Her alt şekil sırasıyla (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 1$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 8,9469$ lt/s deney düzeneğine karşılık gelmektedir. Deneysel ve sayısal sonuçlar farklı x/D konumlarında (0,70; 0,94; 1,13 ve 1,50) karşılaştırılmıştır. Şekiller içerisinde sayısal sonuçlar CFD kısaltması ile gösterilmiştir.

V_z diğer hız bileşenlerine kıyasla daha küçük değerlerde olsa da sayısal model, düşey hız bileşenini de yansıtmakta başarılı olmaktadır. Hız dağılımının deneysel olarak incelendiği başlıkta, düşey hız profillerinde $c/D = 2$ için yön değişiminin ağız merkez çizgisinin hemen altında gerçekleştiği, ağız tabana yaklaştırıldıkça ise bu konumun giderek ağız merkezinin altına kaydığı ve sınır durum olan $c/D = 0,5$ için V_z profillerinde yön değişiminin tabanın hemen üzerinde meydana geldiği ifade edilmiştir. Şekil 7.16 incelendiğinde sayısal modelden elde edilen hız dağılımlarının bahsedilen davranışı yansıtmakta da başarılı oldukları görülmektedir.

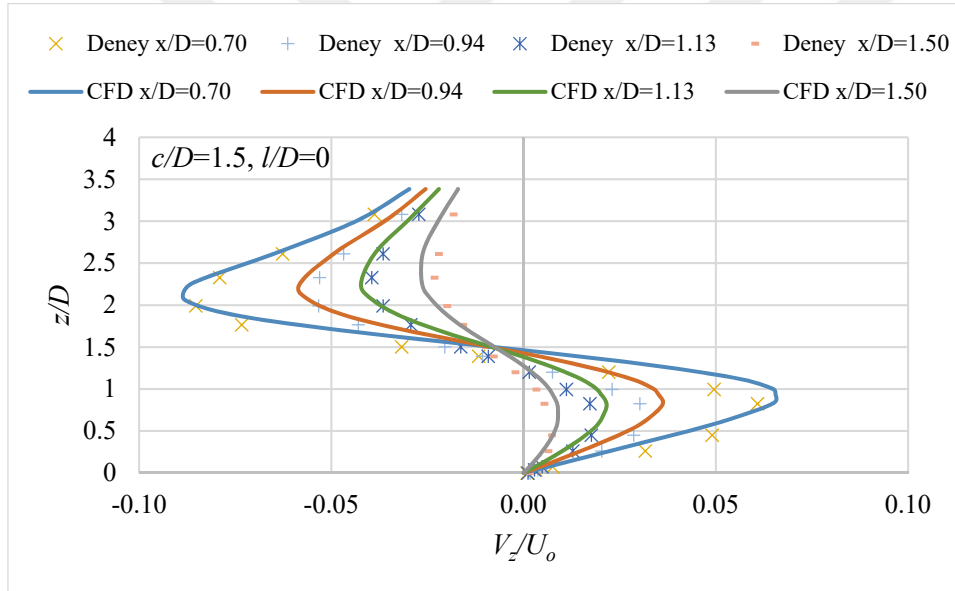


(a)

Şekil 7.16. Hız dağılımının (V_z) x ekseninde derinlikle değişiminin incelenmesi (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 1$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 8,9469$ lt/s

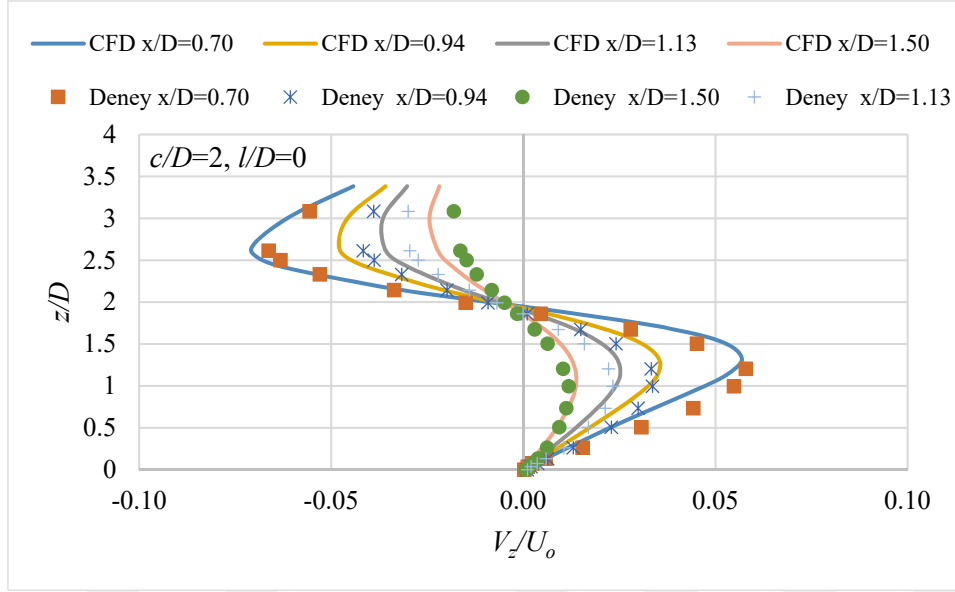


(b)

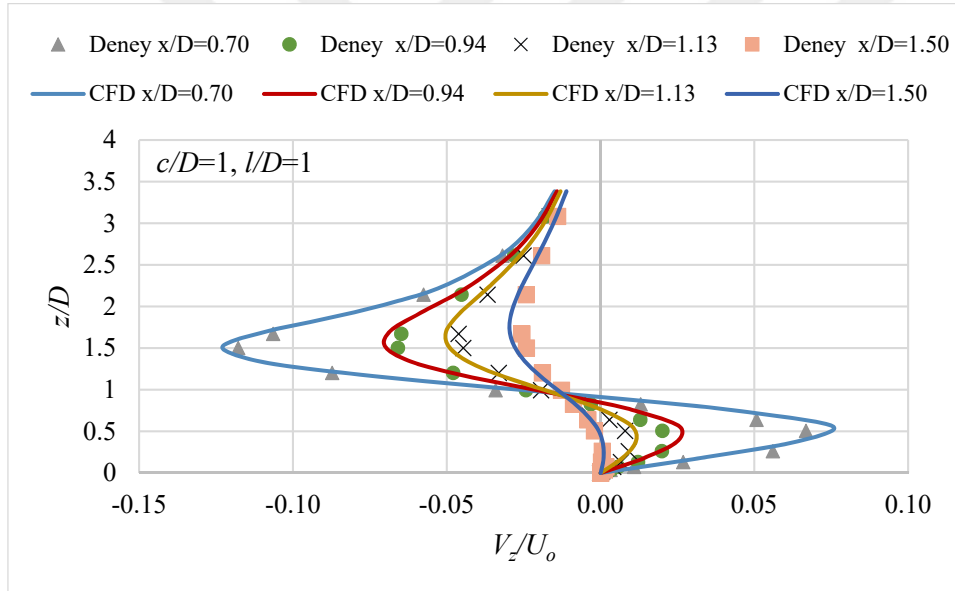


(c)

Şekil 7.16. (devam) Hız dağılımının (V_z) x ekseninde derinlikle değişiminin incelenmesi (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 1$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 8,9469$ lt/s

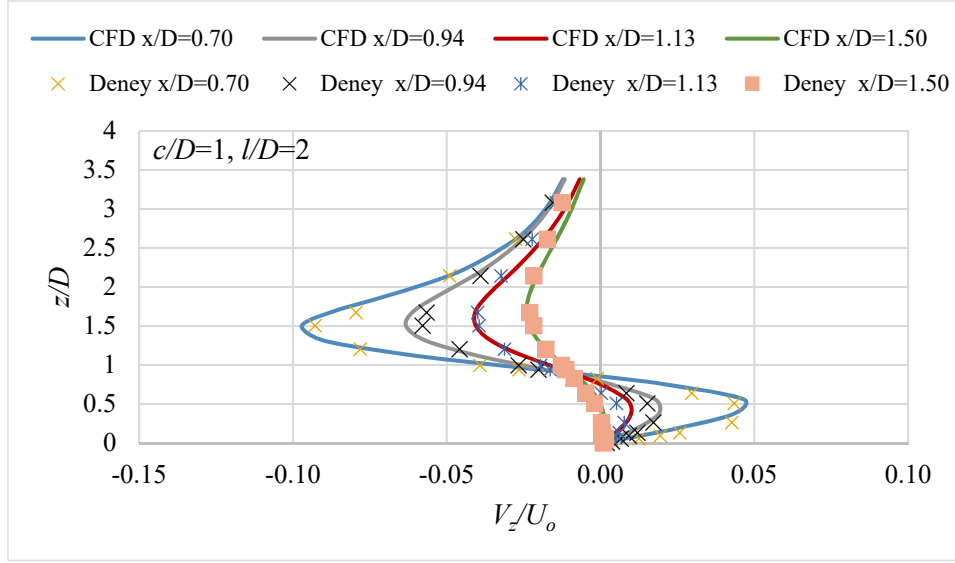


(d)



(e)

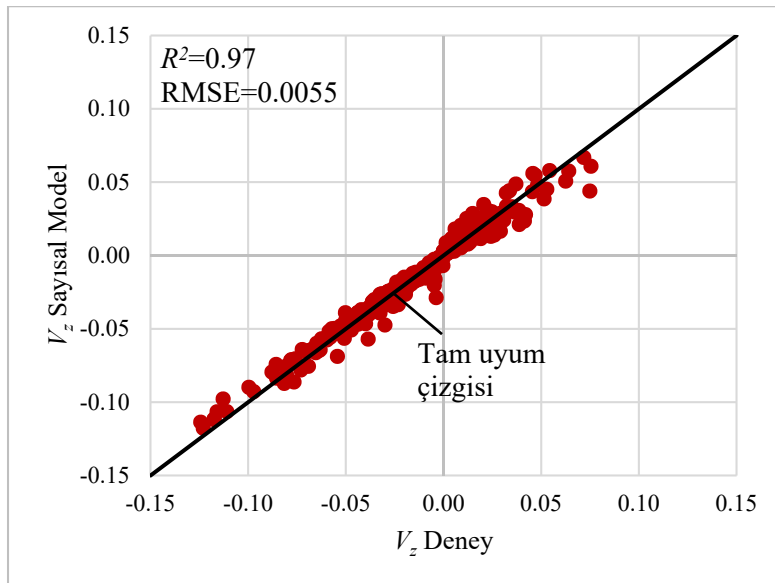
Şekil 7.16. (devam) Hız dağılımının (V_z) x ekseninde derinlikle değişiminin incelenmesi (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 1$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 8,9469$ lt/s



(f)

Şekil 7.16. (devam) Hız dağılımının (V_z) x ekseninde derinlikle değişiminin incelenmesi (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 1$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 8,9469$ lt/s

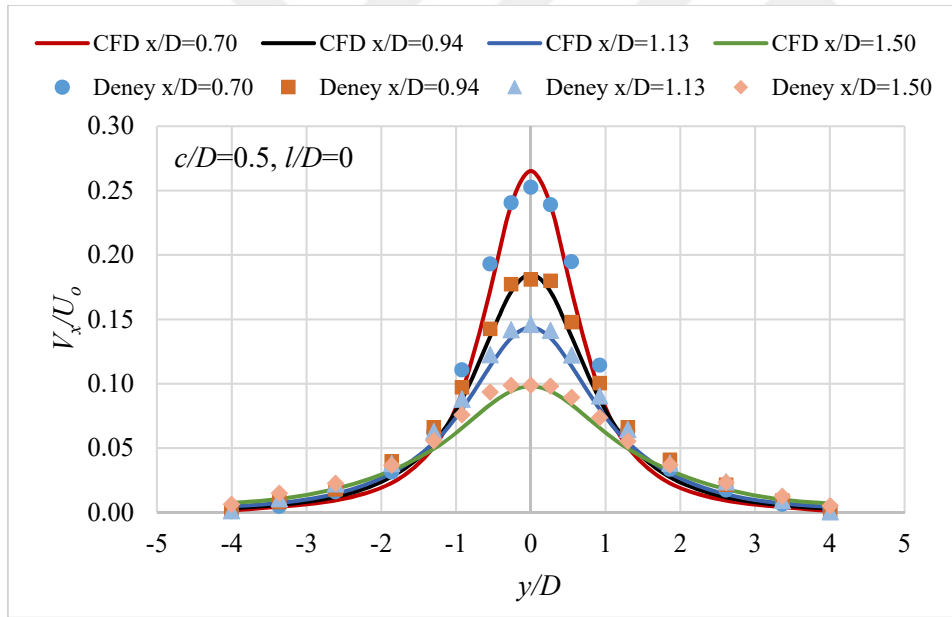
Şekil 7.17 sayısal model tarafından hesaplanan V_z bileşeni ile deneysel ölçümler arasındaki ilişkiyi tüm düzenekler için göstermektedir. Veri noktalarının tam uyum çizgisi boyunca kümelenmesi, sayısal model ile deneysel sonuçlar arasında yüksek bir uyum olduğunu göstermektedir. Şekil üzerinde gösterildiği üzere $R^2 = 0,97$ ve $RMSE = 0,0055$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.17. Sayısal model sonuçlarının deneysel ölçümlerle uyumu (V_z)

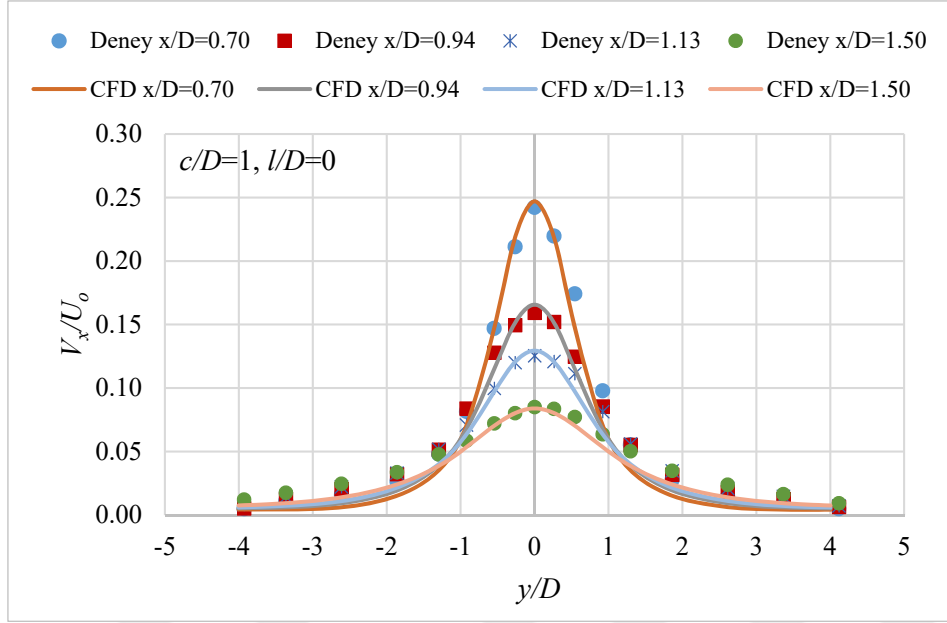
7.8.4. Ağız merkezi yüksekliğindeki V_x hızının kanal boyunca yatayda değişiminin karşılaştırılması

Şekil 7.18, V_x hız bileşeninin y eksenini boyunca değişimini farklı deney koşulları için göstermektedir. Her alt şekil sırasıyla (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 2,8575$ lt/s deney düzeneğine karşılık gelmektedir. Deneysel sonuçlar ile sayısal modellerden elde edilen veriler, farklı x/D konumlarında (0,70; 0,94; 1,13 ve 1,50) karşılaştırılmıştır. Şekiller içerisinde sayısal sonuçlar CFD kısaltması ile gösterilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında y eksenini boyunca genel bir uyum gözlenmektedir. Sayısal modeller ağız merkezinde gelişen maksimum hızı yakalamada ve hız profillerinin değişen eğriliğini yansıtmakta tüm düzenekler için başarılı olmaktadır.

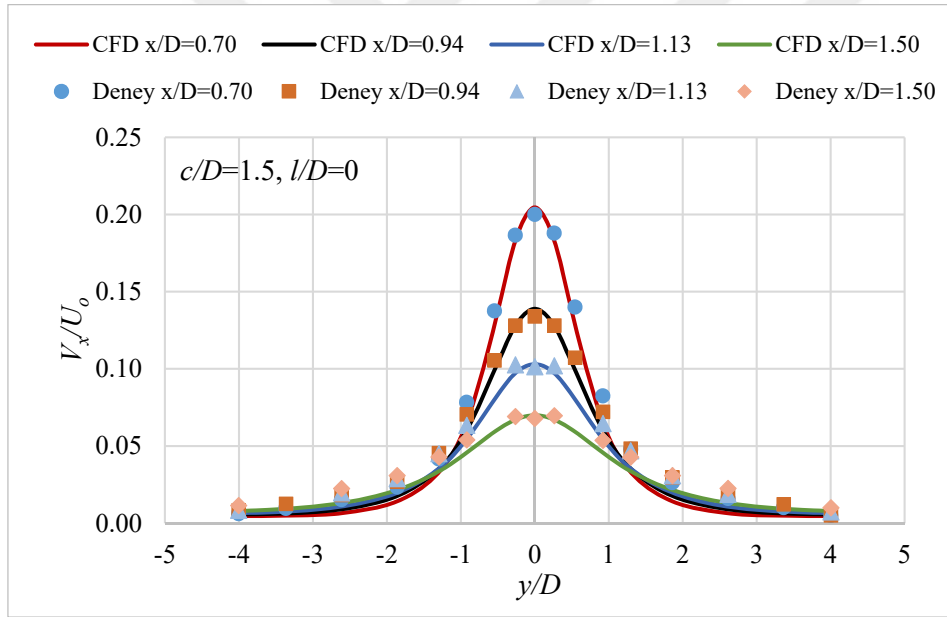


(a)

Şekil 7.18. Hız dağılımının (V_x) y eksenini üzerinde değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 2,8575$ lt/s

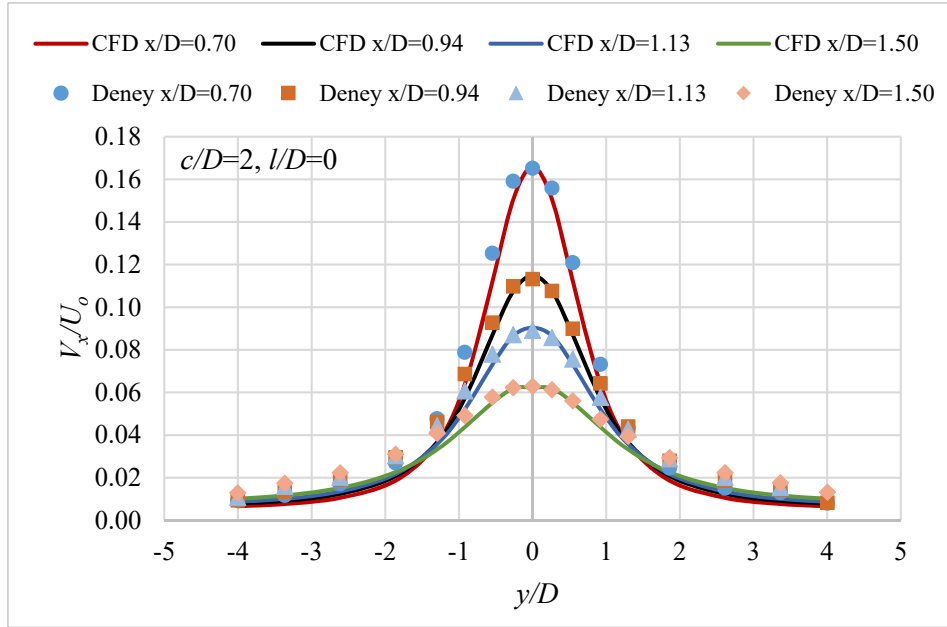


(b)

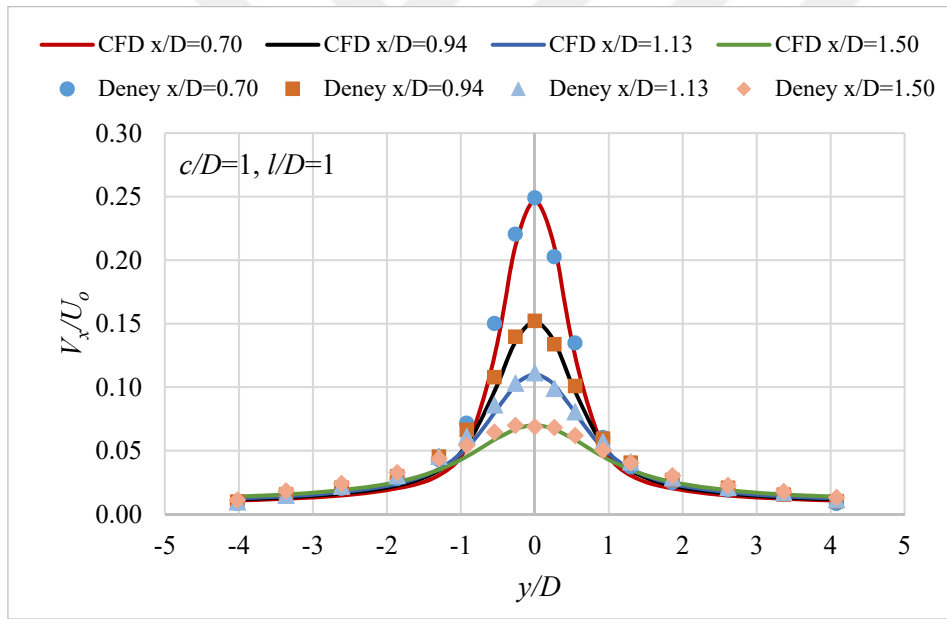


(c)

Şekil 7.18. (devam) Hız dağılımının (V_x) y ekseninde değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 2,8575$ lt/s

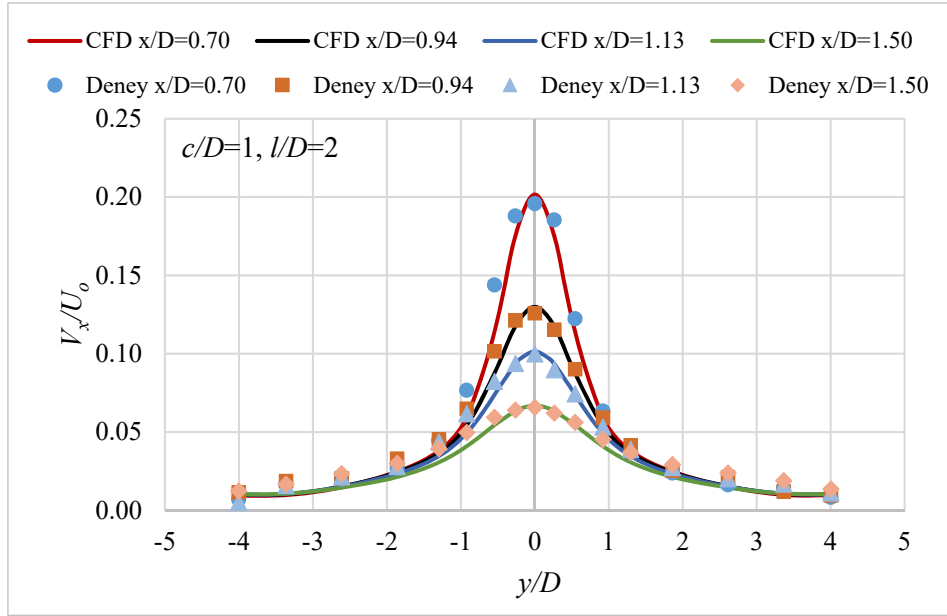


(d)



(e)

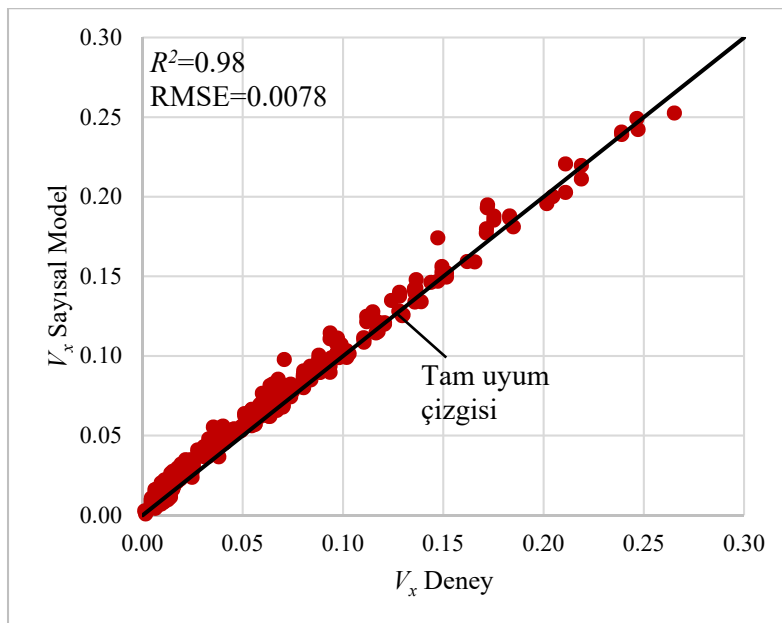
Şekil 7.18. (devam) Hız dağılımının (V_x) y ekseninde değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 2,8575$ lt/s



(f)

Şekil 7.18. (devam) Hız dağılımının (V_x) y ekseninde değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 2,8575$ lt/s

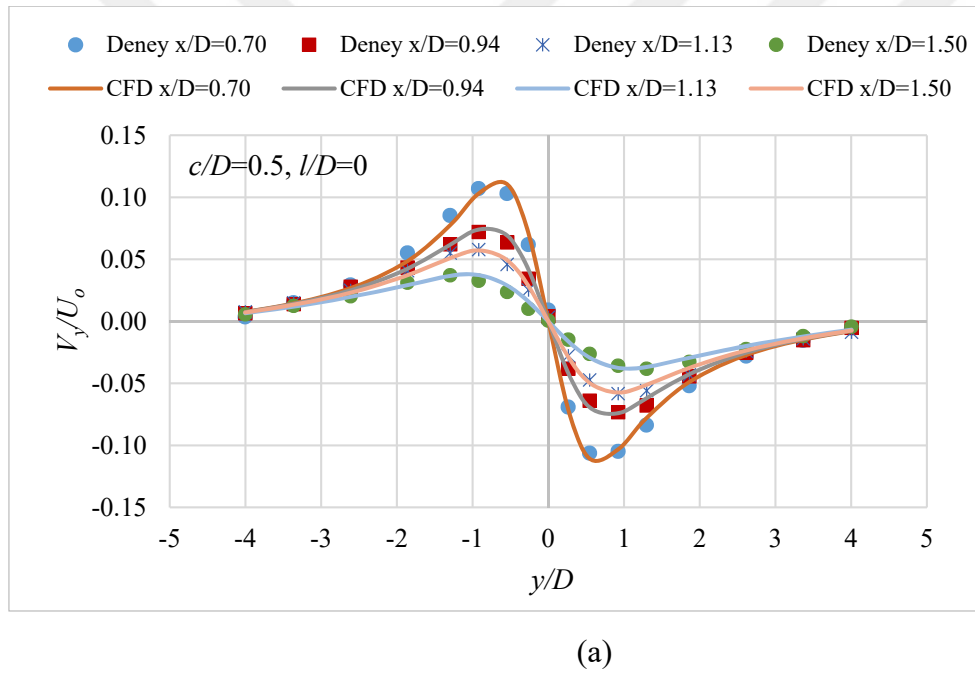
Şekil 7.19 ise sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumu tüm deney düzenekleri için göstermektedir. Veri noktalarının tam uyum çizgisine yakın bir dağılım sergilediği görülmektedir. Şekil üzerinde gösterildiği üzere $R^2 = 0,98$ ve $RMSE = 0,0078$ olarak hesaplanmıştır.



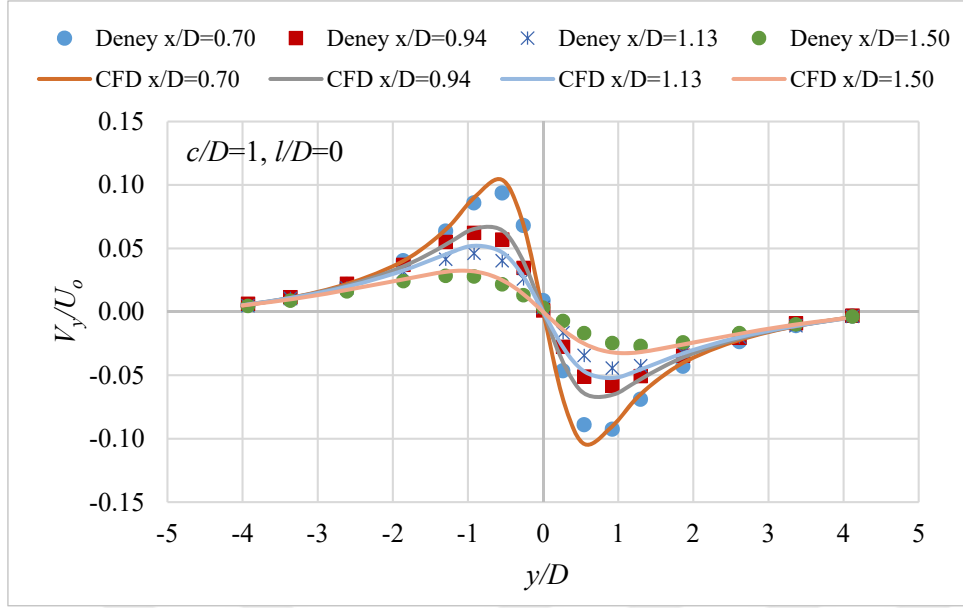
Şekil 7.19. Sayısal ve deneysel sonuçların uyumu (y ekseninde V_x dağılımı)

7.8.5. V_y hızının kanal boyunca yatayda değişiminin karşılaştırılması

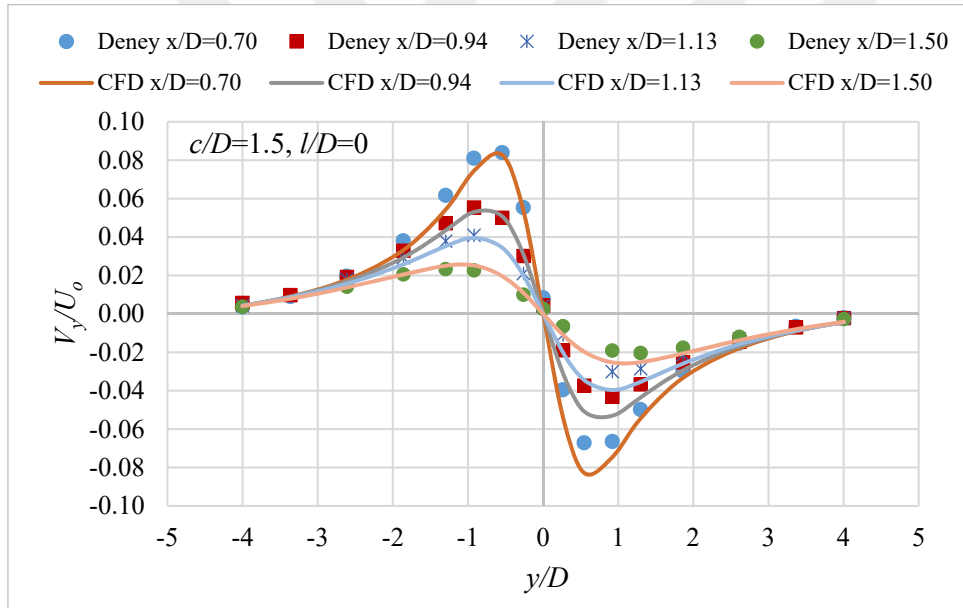
Şekil 7.20, V_y hız bileşeninin y eksenı boyunca değişimini farklı deney koşulları için göstermektedir. Her alt şekil sırasıyla (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 4,9951$ lt/s deney düzeneğine karşılık gelmektedir. Deneysel sonuçlar ile sayısal modellerden elde edilen veriler, farklı x/D konumlarında (0,70; 0,94; 1,13 ve 1,50) karşılaştırılmıştır. Şekiller içerisinde sayısal sonuçlar CFD kısaltması ile gösterilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar, diğer hız profillerine benzer şekilde, V_y profillerinde de uyum sağlamaktadır.



Şekil 7.20. Hız dağılımının (V_y) y eksenı üzerinde değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 4,9951$ lt/s

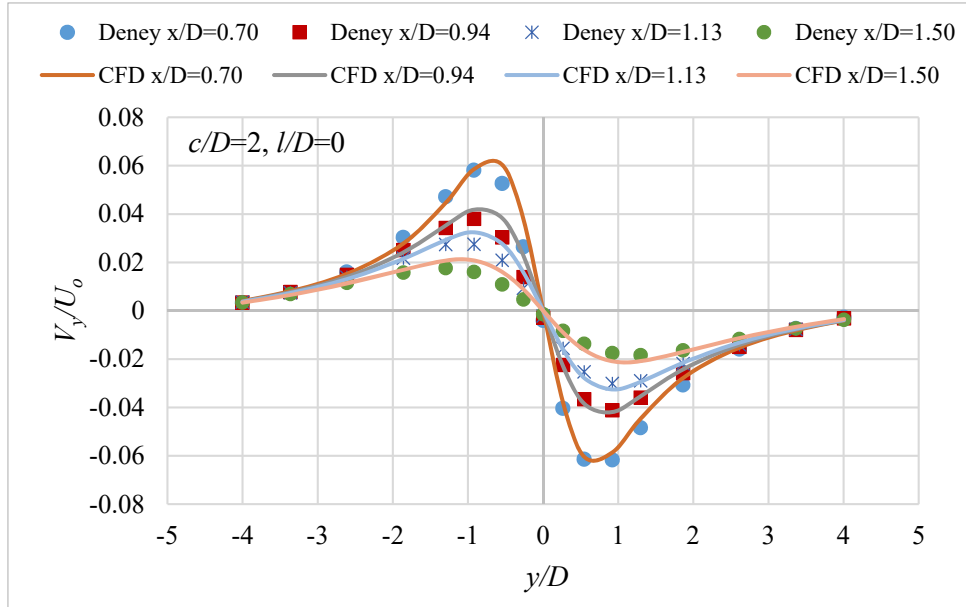


(b)

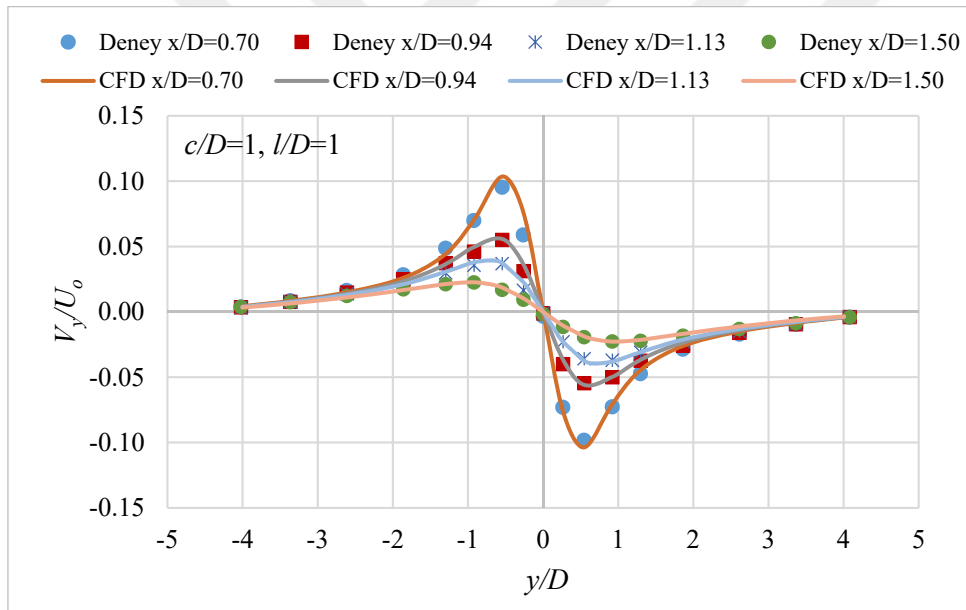


(c)

Şekil 7.20. (devam) Hız dağılımının (V_y) y ekseninde değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 4,9951$ lt/s

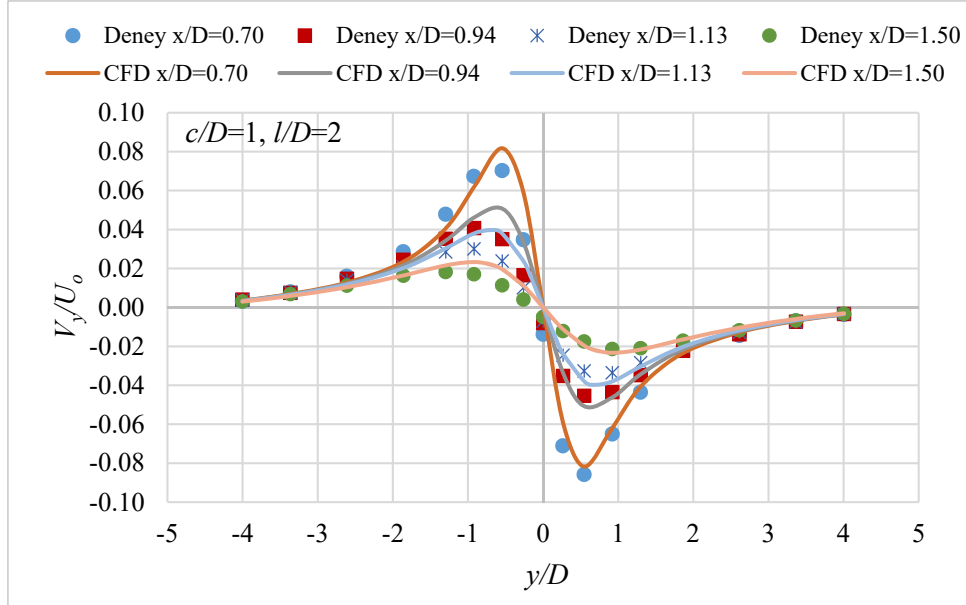


(d)



(e)

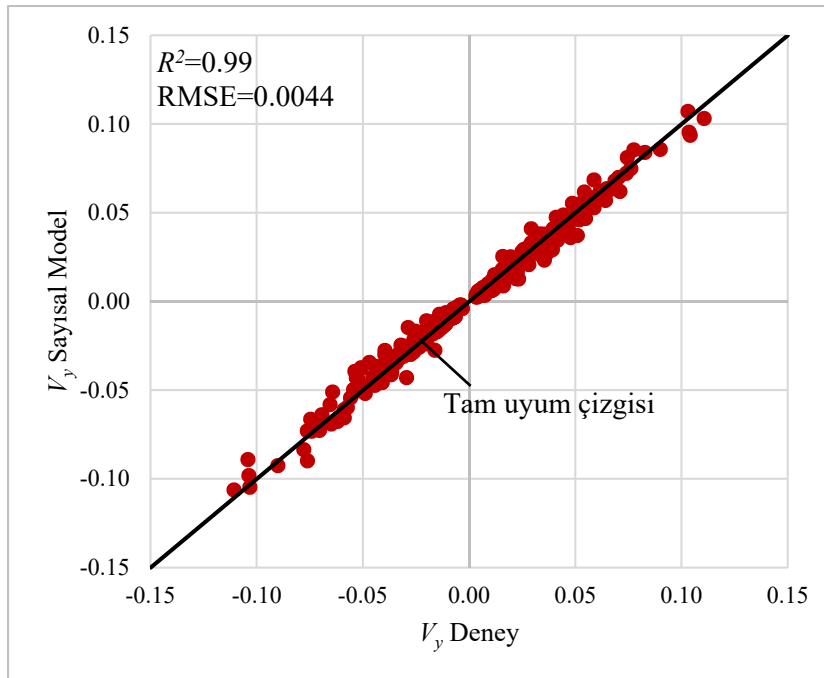
Şekil 7.20. (devam) Hız dağılımının (V_y) y ekseninde değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 4,9951$ lt/s



(f)

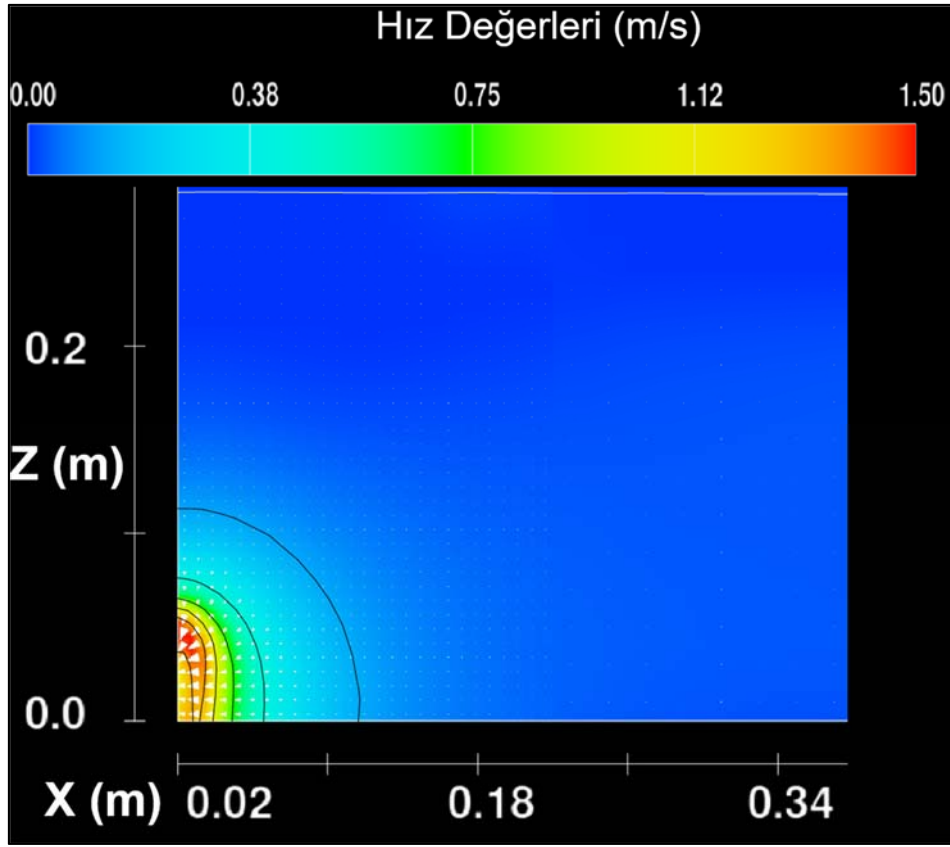
Şekil 7.20. (devam) Hız dağılımının (V_y) y ekseninde değişiminin karşılaştırılması (a) $c/D = 0,5$ ($l/D = 0$), $Q = 2,8575$ lt/s, (b) $c/D = 1$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (c) $c/D = 1,5$ ($l/D = 0$), $Q = 4,9951$ lt/s, (d) $c/D = 2$ ($l/D = 0$), $Q = 8,9469$ lt/s, (e) $c/D = 1$ ($l/D = 1$), $Q = 8,9469$ lt/s, (f) $c/D = 1$ ($l/D = 2$), $Q = 4,9951$ lt/s

Şekil 7.21 ise sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumu tüm deney düzenekleri için göstermektedir. Şekil üzerinde gösterildiği üzere $R^2 = 0,99$ ve $RMSE = 0,0044$ olarak hesaplanmıştır.



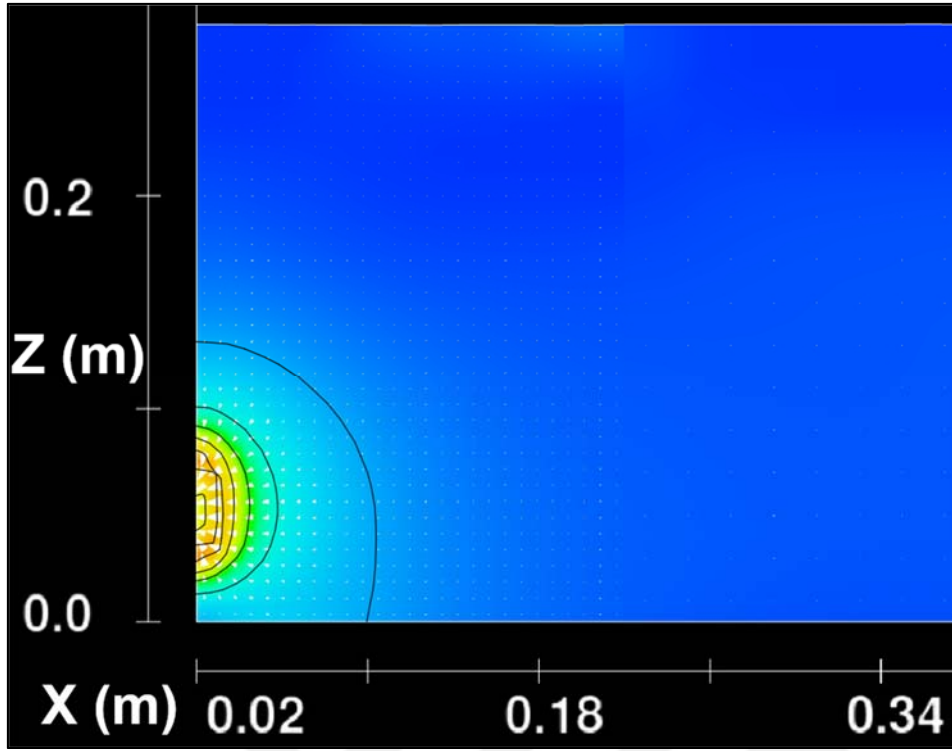
Şekil 7.21. Sayısal ve deneysel sonuçların uyumu (y ekseninde V_y dağılımı)

Öte yandan, FLOW-3D HYDRO yazılımı sayesinde laboratuvar ortamında elde edilmesi güç olan çeşitli akım özelliklerinin incelenmesi de mümkün olmaktadır. Örneğin, Şekil 7.22 $c/D = 0,5$; 1 ve 1,5 ($l/D = 0$) düzenekleri için ağızdan $Q = 2,8575$ lt/s debi alındığı durumda su alma ağzı çevresindeki hız dağılımlarını ve eş hız eğrilerini göstermektedir. Eş hız eğrilerinin ağız yakınında yarı-eliptik bir geometri sergilerken, ağızdan uzaklaştıkça kademeli olarak yarı-küresel bir şekle dönüştüğü görülmektedir. Bölüm 3'te açıklandığı üzere, su alma ağzının akım sınırlarına olan mesafesinin artması, akım alanındaki hız değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. Şekil 7.22 (a)'dan (c)'ye doğru gidildikçe, c/D değerinin 0,5'ten 1,5'e artmasıyla birlikte hız değerlerindeki azalma görülebilmektedir.

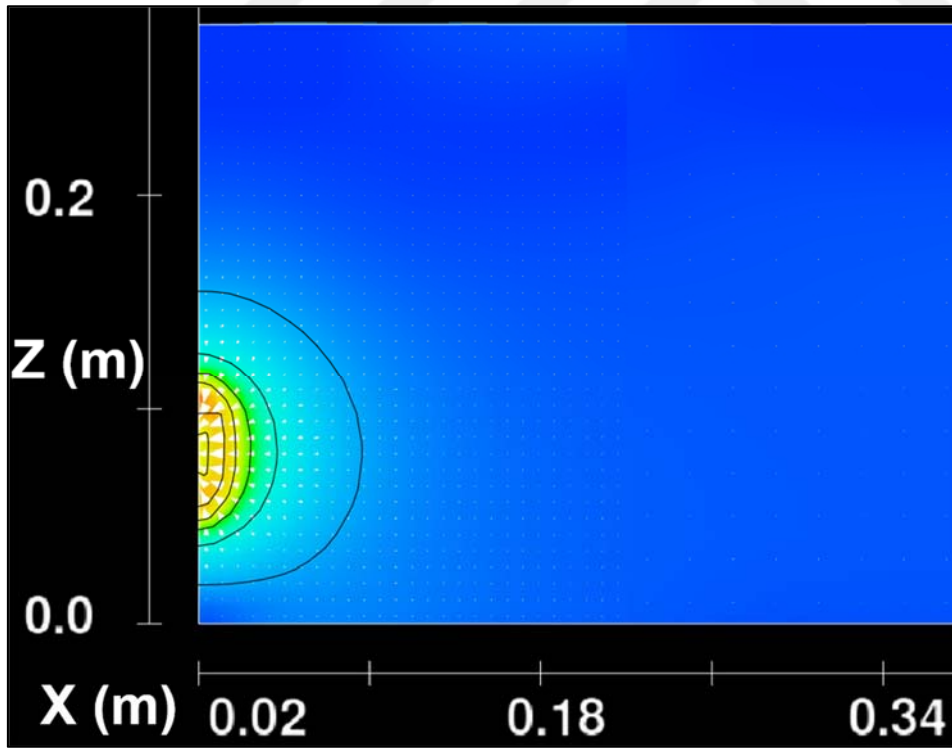


(a)

Şekil 7.22. Hız değerleri ve eş hız eğrileri (a) $c/D = 0,5$, (b) $c/D = 1$, (c) $c/D = 1,5$



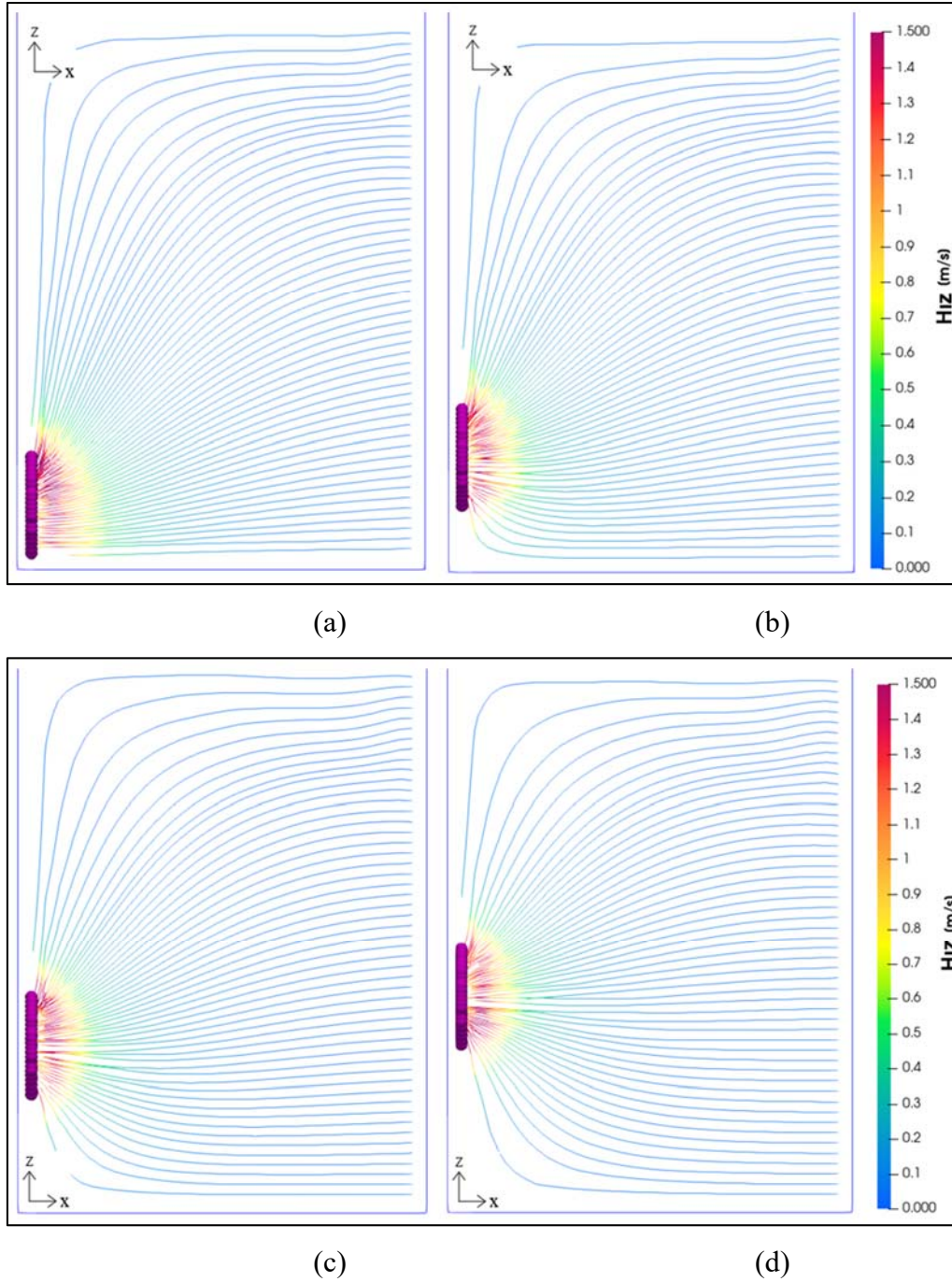
(b)



(c)

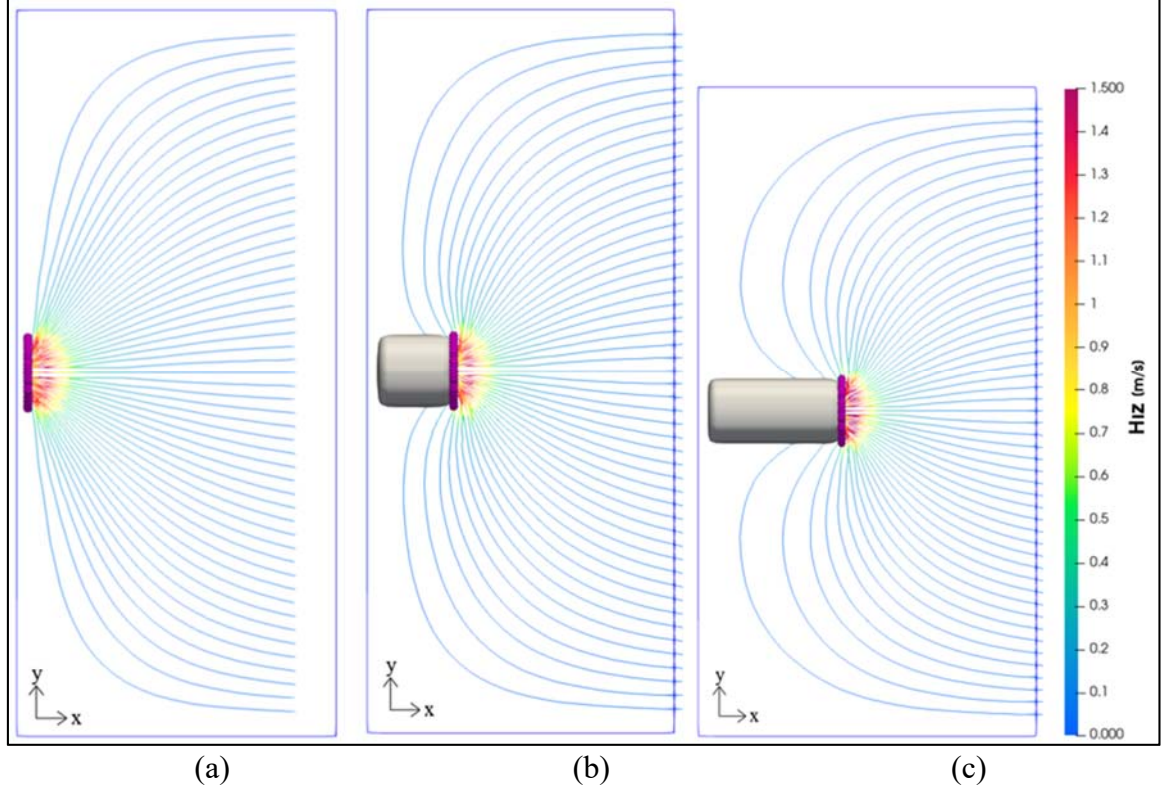
Şekil 7.22. (devam) Hız değerleri ve eş hız eğrileri (a) $c/D = 0,5$, (b) $c/D = 1$, (c) $c/D = 1,5$

Şekil 7.23, su alma ağızı akımı etkisinde ağız merkez çizgisi ($y/D=0$) boyunca oluşan akım çizgilerini (a) $c/D = 0,5$ (b) $c/D = 1$ (c) $c/D = 1,5$ (d) $c/D = 2$ deney düzeneği için göstermektedir. Ağız konumunun kanal tabanına olan düşey mesafesi arttıkça, akımın tabanla etkileşimi azalmakta ve akım çizgileri gittikçe ağız merkezine göre simetrik bir yapı kazanmaktadır.



Şekil 7.23. Farklı c/D düzenekleri için akım çizgileri (a) $c/D = 0,5$ (b) $c/D = 1$ (c) $c/D = 1,5$ (d) $c/D = 2$

Şekil 7.24 ise su alma ağzının ölü son duvarına olan mesafesinin, ağız merkez yüksekliğinde oluşan akım çizgileri üzerindeki etkisini (a) $l/D = 0$, (b) $l/D = 1$ ve (c) $l/D = 2$ için göstermektedir. l/D 'nin artması, ölüson duvarının kısıtlayıcı etkisini azaltarak akım çizgilerinin boru arkasına doğru genişlemesini sağlamaktadır.



Şekil 7.24. Farklı l/D düzenekleri için akım çizgileri (a) $l/D = 0$ (b) $l/D = 1$ (c) $l/D = 2$

8. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, su alma ağız akımı etkisi altında kanal tabanında diğer sabit tanelere göre serbest halde bulunan küresel bir sediment tanesinin harekete başlama koşulları araştırılmıştır. Gerçekleştirilen boyut analizi sonucunda, densimetrik Froude sayısı (F_d), ağızın kanal tabanı (c/D) ve ölü son duvarına olan mesafeleri (l/D) ile serbest tanenin yerleşim katsayısı (ζ) parametreleri temel değişkenler olarak belirlenmiş ve bu değişkenlerin tane hareketine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Ardından, taneye etki eden kuvvetler ve bu kuvvetleri meydana getiren parametreler tanımlanmış, tanenin harekete başlama koşulları teorik olarak incelenmiştir. İlgili parametrelerin önemi literatürdeki çalışmalarla da ortaya konularak araştırılmış, deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki uyum değerlendirilmiştir. Devamında, tanenin hareketine yol açan ağız membasındaki hız dağılımı deneysel olarak incelenmiş; ağızın kanal tabanı ve ölü son duvarına olan mesafelerinin bu dağılım üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Son olarak, ağız membasındaki hız dağılımı, HAD yazılımlarından biri olan FLOW-3D HYDRO kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiştir.

Sediment hareketinin deneysel analizinden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Deneyler sırasında yapılan gözlemler, tanenin hareketinden önce iki farklı davranış sergileyebildiğini göstermiştir. İlk olarak, tane bulunduğu konumdan ayrılmadan dönme hareketi yapabilmektedir; bu durum, dönmeden kaynaklanan kaldırma kuvveti bileşeninin etkili olduğunu göstermektedir. İkinci olarak ise, tane eksenini etrafında dönmeden, yerinde salınım veya titreşim şeklinde bir hareket sergileyebilmektedir.
- Gerçekleştirilen tüm deneylerde, ağızın tabana veya ölü son duvarına olan mesafesinden bağımsız olarak, hareketli tanenin önündeki sabit tanenin üzerinden dönerek ve onu aşarak harekete başladığı gözlemlenmiştir. Kaldırma kuvveti taneye etki etse de tanenin bulunduğu yerden havalanarak akım içinde süzülmesini sağlayacak büyüklükte değildir.
- Aynı F_d değerinde Çift yerleşime sahip tanelerin Tek yerleşimdekilere kıyasla, ağza göre daha uzak x/D mesafelerinden veya aynı x/D konumunda daha düşük F_d değerlerinde harekete başlayabildiği belirlenmiştir. Bu durumun temel nedeni, Çift

yerleşimdeki tanelerin akıma maruz kalan yüzey alanlarının Tek yerleşimdekilere kıyasla daha yüksek olmasıdır.

- Ağız akımı altında tanenin harekete başlamasında en belirleyici faktörlerden birinin, tanenin akım doğrultusunda akıma maruz kalan yüzey alanı olduğu belirlenmiştir. Hareketli tanenin merkezi ile dönme noktası arasındaki mesafe (kuvvet kolu) farklılık gösterse de, benzer yerleşim katsayısına (ζ) sahip taneler, çap farklarına rağmen aynı eğri ile temsil edilebilmektedir. Ayrıca, tüm deney düzenekleri ve kullanılan malzemeler için, tanenin hareketine ait değerlerin x/D ile F_d arasında doğrusal bir eğilim izlediği görülmektedir.
- Su alma ağzının tabana olan mesafesi arttıkça, tanenin harekete geçmesi için ağızdan çekilmesi gereken debi de artmaktadır. Bu artış, ağza yakın konumlarda daha belirgin olup ağızdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Örneğin, $x/D = 1$ gibi ağza yakın bir konumda $c/D = 0,5$ 'ten $1,5$ 'e çıkarıldığında tane hareketi için gereken F_d değeri 3,4 kat artarken, $x/D = 3$ gibi ağza uzak bir konumda F_d değerleri farklı c/D düzenekleri için birbirine yakın olmaktadır. Bu davranışın nedeni, ağzın tabana en yakın yerleşimi olan $c/D = 0,5$ için akım sınır etkileri nedeniyle yüksek hızların oluşmasıdır. Su alma ağzının tabana olan mesafesi arttıkça, sınır etkileri azalmakta ve dolayısıyla oluşan hızlar da düşmektedir. Ancak kanal boyunca ağızdan uzaklaştıkça, oluşan hız profilleri c/D değerlerinden bağımsız hale gelmekte ve bu durum, taneyi harekete geçiren debi üzerindeki c/D etkisinin azalmasını açıklamaktadır. Dolayısıyla, ağız ve kanal tabanı arasındaki mesafe özellikle ağza yakın bölgelerde belirleyici olurken, uzak mesafelerde etkisi büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır.
- Su alma ağzının ölü son duvarına olan mesafesinin artması, tıpkı c/D değişiminde olduğu gibi, tanenin harekete geçmesi için gerekli debiyi artırmaktadır. Ancak ağız merkezinin ölü son duvarına olan mesafesi $l/D = 1$ 'den $l/D = 2$ 'ye çıkarıldığında, tane hareketi anlamlı şekilde etkilenmemektedir; bunun nedeni, kanal boyunca taneye etkiyen hız dağılımlarının incelenmesinde ortaya çıkmaktadır. Sınır etkileri nedeniyle $l/D = 0$ düzeneği daha yüksek hızlar oluştururken, $l/D = 1$ ve 2 düzeneğinde hız dağılımları hemen hemen aynıdır.

Sediment hareketinin teorik analizinden elde edilen sonuçlar ise aşağıda sıralanmıştır.

- Üniorm akım koşullarında elde edilen standart sürüklenme katsayısı eşitliklerinin, tanenin tabanda bulunduğu (akım sınırlarının etkili olduğu) ve/veya ağız akımına maruz kaldığı durumlarda doğru sonuç vermediğı görülmüştür. Literatür çalışmaları, akım türü, türbülans düzeyi ve akım sınırlarının sürüklenme katsayısı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermekte olup özellikle tabana yakın tanelerde bu katsayının standart değerlerden daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada tabana oturan ve lineer kesme akımına maruz kalan küresel taneye etki eden sürüklenme katsayısı olarak Zeng ve diğeri (2009) tarafından geliştirilen eşitlik kullanılmıştır. Kaldırma katsayısı ise, sürüklenme katsayısının 0,85 katı olarak seçilmiştir.
- Ortalama taban kayma gerilmesi yaklaşımı, tanenin hareket başlangıcını belirlemede kullanılmakla birlikte, türbülanslı akışların ani hız değişimlerini ve dalgalı doğasını yeterince yansıtmamaktadır. Literatür çalışmaları, türbülanslı akımlarda tanenin hareketini sağlayan efektif kritik kayma gerilmesinin ortalama değerden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, mevcut çalışmada tanelerin maruz kaldığı etkili hız, akımın ortalama hızı ile türbülansın yol açtığı çalkantıların birlikte ele alınmasıyla hesaplanmıştır. Ölçümler, bu çalkantıların Gauss eğrisi biçiminde geliştiğini göstermiş ve çalkantı büyüklüğünü artıran bir katsayı ($0 < n < 3$) belirlenerek hesaplamalara dahil edilmiştir. Böylece türbülans, tanelerin hareket başlangıcını daha gerçekçi bir şekilde tahmin etmek amacıyla hesaba katılmıştır.
- Ağızın tabana olan mesafesi arttıkça, ortalama hızı artıran n katsayısının tane hareketine etkisinin azaldığı görülmüştür. Tabana yakın yerleşimlerde n ve n_{ort} değerleri yüksek iken, mesafe arttıkça bu değerler düşmekte; dolayısıyla türbülansın tane hareketindeki önemi azalmaktadır. Ayrıca, Tek ve Çift tane yerleşimlerinde n değerleri arasındaki farkın önemsiz olması, yerleşim düzeninin türbülans karakteri üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını göstermektedir.
- Harekete başlayacak tanenin kanal boyunca ağza göre konumu ile türbülans etkileri arasında da belirgin bir ilişki gözlemlenmektedir. Tüm düzenekler için ağızdan uzaklaştıkça, taneyi harekete geçiren n ve n_{ort} değerleri giderek azalmaktadır; dolayısıyla kanal boyunca ilerledikçe hız çalkantılarının etkisi ve tane hareketine katkısı düşmektedir.
- Tane hareketinde üç farklı kaldırma kuvveti bileşeninin etkisi değerlendirilmiştir: hız gradyanına bağlı olan, Magnus etkisinden kaynaklanan ve su alma ağzının düşey hız

bileşeninden kaynaklanan kuvvetler. Her bir kuvvetin hesaplamalardan çıkarılması durumunda, tane hareketini tanımlayan eşitlikteki değişim oranları incelenmiştir. Sonuçlar, Magnus kuvvetinin en belirleyici etkiye sahip olduğunu ve yaklaşık %37–40 oranında azalmaya yol açabildiğini göstermektedir. Hız gradyanına bağlı kuvvetin etkisi %4–5 civarında, su alma ağzı kaynaklı kuvvetin etkisi ise yalnızca %0,2–1,5 düzeyindedir. Ağzın tabana olan mesafesinin artması, kaldırma kuvvetlerinin etkilerini bir miktar artırırken, ölü son duvarıyla olan mesafe değişiminin bu etkiler üzerinde belirgin bir rol oynamadığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada ayrıca, su alma ağzı membasındaki hız dağılımları ve bu dağılımlar üzerindeki sınır etkileri deneysel ve sayısal yöntemle incelenmiştir. Sınır etkileri, su alma ağzının kanal tabanına düşey mesafesi ve ölü son duvarına yatay mesafesi değiştirilerek analiz edilmiş, kanal boyunca, yatay ve düşey doğrultulardaki hız profilleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Ağzın konumunun merkez çizgisindeki hız (V_c) üzerindeki etkisi, kanal boyunca yaklaşık $x/D = 4$ noktasından itibaren belirginleşmektedir. Akım sınırlarına daha yakın yerleştirilen su alma ağzı, $x/D = 1,13$ – $1,50$ aralığında V_c hızını önemli ölçüde artırmaktadır. c/D değişiminin V_c üzerinde yaklaşık %38, l/D değişiminin ise yaklaşık %23 düzeyinde bir etkisi olabildiği görülmektedir.
- Su alma ağzı merkez çizgisi yüksekliğinde, kanal boyuna (V_x) ve yatay (V_y) hız bileşenleri, ağız konumundan bağımsız olarak simetrik dağılımlar göstermektedir. Akım sınırlarının bu bileşenler üzerindeki etkisi, ağızdan uzaklaştıkça azalmakta; yaklaşık $x/D = 2$ civarında belirgin şekilde zayıflamakta ve $x/D = 3,76$ 'da hız profilleri birbirine yaklaşarak aradaki farklar neredeyse ihmal edilebilir hale gelmektedir. Ağzın akım sınırlarına olan düşey ve yatay mesafeleri hız alanını etkilese de l/D 'nin etkisi görece sınırlıdır. Örneğin, $x/D = 0,70$ konumunda, su alma ağzının yerleşiminde $1D$ mertebesinde yapılacak bir değişiklik, taban mesafesi söz konusu olduğunda hız değerini yaklaşık %30, duvar mesafesi söz konusu olduğunda ise yaklaşık %21 oranında değiştirmektedir.
- V_x hız bileşeninin kanal boyunca derinlikle değişimi, ağzın akım sınırlarına olan yakınlığından önemli ölçüde etkilenmektedir. Güçlü sınır etkilerinde maksimum hız başlangıçta su alma ağzı merkez çizgisinin altında meydana gelir ve mesafe arttıkça ağız çizgisine doğru kayar. Buna karşılık, sınır etkileri daha zayıf olduğunda

maksimum hız ağız merkez çizgisi hizasında ortaya çıkar ve ilerleyen mesafede aşağı doğru kayar. Su alma ağızı kanal tabanından veya ölü son duvarından uzaklaştıkça, oluşan profiller arasındaki farklar azalmakta dolayısıyla ağız etkisi zayıflamaktadır. Ayrıca, $x/D \geq 1.88$ 'den itibaren $l/D = 1$ ve 2 için hız profillerinin benzerliği, ölü son duvarına olan yatay mesafe etkisinin bu noktadan sonra ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir.

- Düşey hız bileşeni (V_z), genel olarak diğer hız bileşenlerine kıyasla düşük kalmaktadır. Kanal boyunca su alma ağızına yakın bölgelerde, taban sınır etkilerinden uzaklaştıkça hız profillerindeki yön değişimi ağız merkezinin hemen altında meydana gelmektedir; sınır etkileri arttıkça bu değişim, ağız merkez çizgisinin altına doğru kaymaktadır. Hız bileşenleri arasında V_z , su alma ağızı konumundan kaynaklanan sınır etkilerinden en fazla etkilenen bileşendir. Kanal tabanının etkisi düşey hızda yaklaşık %49'a kadar değişime yol açabilirken, ölü son duvarının etkisi %29'a kadar ulaşabilmektedir. Diğer hız bileşenlerinde olduğu gibi, $l/D=1$ ve 2 için V_z profilleri birbirine çok yakın olup yatay su alma ağızı konumunun dikey hız üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir.
- Akım doğrultusundaki ve derinlik yönündeki türbülans yoğunluğu, ağızın tabana ve duvara olan mesafesi ile yakından ilişkilidir. c/D 'nin azaldığı durumlarda, akım doğrultusundaki türbülans tabana yakın bölgelerde en yüksek değerini almakta, derinlikle azalmakta ve belirli bir yükseklikten sonra sabitlenmektedir. Derinlik yönündeki türbülans ise tabanda en düşük değerini almakta, sonrasında artmakta ve sabit kalmaktadır. c/D 'nin büyüdüğü durumlarda ise (örneğin $c/D = 2$), maksimum türbülans tabandan yukarıda oluşmakta ve sonrasında sabit kalmaktadır. Ağızın duvara olan mesafesi (l/D) değiştirildiğinde türbülans profilleri üzerinde belirgin bir etki gözlenmemektedir. Ayrıca akım doğrultusundaki türbülans, derinlik yönüne kıyasla toplam türbülans enerjisinde daha baskın rol oynamaktadır.
- Hız profilleri için elde edilen eşitlikler, belirtilen kullanım aralıklarında, akım sınır şartlarını da kapsayacak biçimde hız profillerinin davranışını güvenilir şekilde yansıtmaktadır.
- FLOW-3D HYDRO kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar deneysel verilerle güçlü bir uyum göstermektedir. Genel olarak, sayısal model akış davranışını doğru bir şekilde yakalamaktadır.

Bu çalışmanın geliştirilebilmesi için farklı ağız çapları, geometrileri, debi aralıkları ve sediment özellikleri kullanılabilir. Böylece elde edilen sonuçlar daha da geniş bir veri aralığını kapsayacak şekilde genelleştirilmiş olacaktır. Ayrıca farklı ağız şekillerine (kare veya dikdörtgen gibi) sahip su alma ağızlarının hidrolik performansları ile sediment hareketi üzerindeki etkileri daha kapsamlı biçimde değerlendirilebilir. Bunun yanı sıra, çoklu ağız düzenlerinin ve farklı yerleşim düzenlemelerinin akım alanı ve sediment hareketi üzerindeki etkilerinin incelenmesi de önemli katkılar sağlayacaktır.

Bu çalışmada sedimentin harekete başlaması deneysel olarak incelenmiş olsa da, gelecekte sediment hareketinin sayısal olarak modellenmesinin de incelenmesi faydalı olacaktır. Bu kapsamda çeşitli HAD yazılımları kullanılarak farklı debilerin, türbülans modellerinin veya sınır koşullarının üç boyutlu olarak incelenmesi, sedimentin harekete başlaması sürecinin daha ayrıntılı biçimde anlaşılmasına katkı sağlayabilir.

Son olarak, gerçek saha koşullarına daha yakın sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla, gelecekte yapılacak çalışmalarda hareketli tek tane yerine doğal sediment örnekleri kullanılabilir. Farklı tane boyu dağılımlarına, şekil düzensizliklerine ve pürüzlülük özelliklerine sahip doğal sedimentlerle gerçekleştirilecek deneyler, bu çalışmada elde edilen bulguların daha geniş koşullar için sınanmasına ve yorumlanmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Aghajani, N., Karami, H., Sarkardeh, H., ve Mousavi, S. F. (2020). Experimental and numerical investigation on effect of trash rack on flow properties at power intakes. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 100(9), e202000017.
- Ali, S. Z. ve Dey, S. (2016). Hydrodynamics of sediment threshold. *Physics of Fluids*, 28(7).
- Anayiotos, A. S., Perry, G. J., Myers, J. G., Green, D. W., Fan, P. H. ve Nanda, N. C. (1995). A numerical and experimental investigation of the flow acceleration region proximal to an orifice. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 21(4), 501-516.
- Armanini, A., ve Gregoretti, C. (2005). Incipient sediment motion at high slopes in uniform flow condition. *Water resources research*, 41(12).
- Aykan, U. (2024). *Numerical Investigation of Vortex Formation at Single and Multiple Symmetric Horizontal Intakes*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Bagnold, R. A. (1973). The nature of saltation and of 'bed-load' transport in water. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 332(1591), 473-504.
- Brucato, A., Grisafi, F. ve Montante, G. (1998). Particle drag coefficients in turbulent fluids. *Chemical Engineering Science*, 53(18), 3295-3314.
- Bryant, D. B., Khan, A. A. ve Aziz, N. M. (2008). Investigation of flow upstream of orifices. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 98-104.
- Buffington, J. M. (1999). The legend of AF Shields. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 376-387.
- Cao, Z., Pender, G., ve Meng, J. (2006). Explicit formulation of the Shields diagram for incipient motion of sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(10), 1097-1099.
- Celik, A. O., Diplas, P., Dancey, C. L. ve Valyrakis, M. (2010). Impulse and particle dislodgement under turbulent flow conditions. *Physics of Fluids*, 22(4), 046601.
- Chanson, H., Aoki, S. I. ve Maruyama, M. (2002). Unsteady two-dimensional orifice flow: a large-size experimental investigation. *Journal of Hydraulic Research*, 40(1), 63-71.
- Chara, Z., Dolansky, J. ve Kysela, B. (2017, 12-14 Temmuz). *Drag coefficient of spherical particles in turbulent channel flow*. VII International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering (Coupled Problems 2017)'de sunuldu, Rodos.

- Chepil, W. S. (1958). The use of evenly spaced hemispheres to evaluate aerodynamic forces on a soil surface. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 39(3), 397-404.
- Das, B., Ahmad, Z., & Sharma, P. K. (2024). Discharge characteristics of lateral rectangular orifice intakes in open channel flow. *Arabian Journal of Geosciences*, 17(1), 4.
- Devlet Su İşleri, (2025). 2024 Yılı Faaliyet Raporu. *DSİ*. Ankara, 43-45.
- Dey, S. (1999). Sediment threshold. *Applied Mathematical Modelling*, 23(5), 399-417.
- Dey, S. (2003). Threshold of sediment motion on combined transverse and longitudinal sloping beds. *Journal of Hydraulic Research*, 41(4), 405-415.
- Dey, S. ve Zanke, U. C. (2004). Sediment threshold with upward seepage. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(9), 1118-1123.
- Dey, S., Sarkar, S., ve Solari, L. (2011). Near-bed turbulence characteristics at the entrainment threshold of sediment beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(9), 945-958.
- Dey, S. (2014). *Fluvial Hydrodynamics* (Birinci Baskı). Almanya: Springer, 100-101.
- Dey, S. ve Ali, S. Z. (2018). Advances in modeling of bed particle entrainment sheared by turbulent flow. *Physics of Fluids*, 30(6), 061301.
- Dey, S., ve Papanicolaou, A. (2008). Sediment threshold under stream flow: A state-of-the-art review. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 12(1), 45-60.
- Diplas, P., Dancey, C. L., Celik, A. O., Valyrakis, M., Greer, K. ve Akar, T. (2008). The role of impulse on the initiation of particle movement under turbulent flow conditions. *Science*, 322(5902), 717-720.
- Dwivedi, A., Melville, B. ve Shamseldin, A. Y. (2010). Hydrodynamic forces generated on a spherical sediment particle during entrainment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(10), 756-769.
- Egiazaroff, I. V. (1965). Calculation of nonuniform sediment concentrations. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(4), 225-247.
- Einstein, H. A. (1950). The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. *Technical Bulletin No. 1026, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service*. Washington D.C. 1-74.
- Einstein, H. A. ve El-Sayed, A. El-Samni (1949). Hydrodynamic forces on a rough wall. *Reviews of Modern Physics*, 21(3), 520-524.

- Erat, B., Barbaros, E. ve Taştan, K. (2024). Experimental and numerical investigation on flow and scour upstream of pipe intake structures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(4), 5973-5987.
- Fathi-Moghadam, M., Emamgholizadeh, S., Bina, M. ve Ghomeshi, M. (2010). Physical modelling of pressure flushing for desilting of non-cohesive sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), 509-514.
- Fenton, J. D. ve Abbott, J. E. (1977). Initial movement of grains on a stream bed: The effect of relative protrusion. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 352(1671), 523-537.
- Goldman, A. J., Cox, R. G. ve Brenner, H. (1967). Slow viscous motion of a sphere parallel to a plane wall—II Couette flow. *Chemical Engineering Science*, 22(4), 653-660.
- Goring, D. G. ve Nikora, V. I. (2002). Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 117-126.
- Grass, A. J. (1970). Initial instability of fine bed sand. *Journal of the Hydraulics Division*, 96(3), 619-632.
- Habersack, H. M. (2020). *Invited lecture: Stochastic and deterministic sediment transport model concepts*. (1. Baskı). Londra: CRC Press, 916.
- Halow, J. S. (1973). Incipient rolling, sliding and suspension of particles in horizontal and inclined turbulent flow. *Chemical Engineering Science*, 28(1), 1-12.
- Heathershaw, A. D. ve Thorne, P. D. (1985). Sea-bed noises reveal role of turbulent bursting phenomenon in sediment transport by tidal currents. *Nature*, 316(6026), 339-342.
- Hirt, C. W. ve Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201-225.
- Igra, O. ve Takayama, K. (1993). Shock tube study of the drag coefficient of a sphere in a non-stationary flow. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 442(1915), 231-247.
- Islam, M. R. ve Zhu, D. Z. (2011). Flow upstream of two-dimensional intakes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(1), 129-134.
- Iwagaki, Y. (1956). (I) Hydrodynamical study on critical tractive force. *Transactions of the Japan Society of Civil Engineers*, 1956(41), 1-21.
- Jourdan, G., Houas, L., Igra, O., Estivalezes, J. L., Devals, C. ve Meshkov, E. E. (2007). Drag coefficient of a sphere in a non-stationary flow: new results. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463(2088), 3323-3345.

- Kalman, H. ve Portnikov, D. (2023). New model to predict the velocity and acceleration of accelerating spherical particles. *Powder Technology*, 415, 118197.
- Karmacharya, S. K., Ruther, N., Aberle, J., Shrestha, S. M. ve Bishwakarma, M. B. (2021). Physical modelling of pressure flushing of sediment using lightweight materials. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 9(3), 251-263.
- Keshavarzi, A., Mohammadi, G. R. ve Hamidifar, H. (2022). Time evolution of scour hole and flow characteristics upstream of a flushing orifice. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(sup1), 199-206.
- Khan, L. A., Wicklein, E. A., Rashid, M., Ebner, L. L. ve Richards, N. A. (2004). Computational fluid dynamics modeling of turbine intake hydraulics at a hydropower plant. *Journal of Hydraulic Research*, 42(1), 61-69.
- Khanarmuei, M. R., Rahimzadeh, H., Kakuei, A. R. ve Sarkardeh, H. (2016). Effect of vortex formation on sediment transport at dual pipe intakes. *Sādhanā*, 41(9), 1055-1061.
- Kim, J. ve Balachandar, S. (2012). Mean and fluctuating components of drag and lift forces on an isolated finite-sized particle in turbulence. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 26, 185-204.
- Köse, Ö. ve Yanmaz, A. M. (2010). Scouring reliability of bridge abutments. *Teknik Dergi*, 21(105), 1387-1402.
- Kramer, H. (1935). Sand mixtures and sand movement in fluvial model. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 100(1), 798-838.
- Langford, M. T., Zhu, D. Z., ve Leake, A. (2016). Upstream hydraulics of a run-of-the river hydropower facility for fish entrainment risk assessment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(4), 05015006.
- Lee, H. C., ve Wahab, A. K. A. (2019). Performance of different turbulence models in predicting flow kinematics around an open offshore intake. *SN Applied Sciences*, 1(10), 1266.
- Lee, H. ve Balachandar, S. (2012). Critical shear stress for incipient motion of a particle on a rough bed. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F1).
- Ling, C. H. (1995). Criteria for incipient motion of spherical sediment particles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(6), 472-478.
- Mantz, P. A. (1977). Incipient transport of fine grains and flakes by fluids—extended Shields diagram. *Journal of the Hydraulics Division*, 103(6), 601-615.
- Morsi, S. A. J. ve Alexander, A. J. (1972). An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. *Journal of Fluid Mechanics*, 55(2), 193-208.

- Nakayama, A. ve Hisasue, N. (2010). Large eddy simulation of vortex flow in intake channel of hydropower facility. *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), 415-427.
- Novak, P., ve Nalluri, C. (1975). Sediment transport in smooth fixed bed channels. *Journal of the Hydraulics Division*, 101(9), 1139-1154.
- Powell, D. N. ve Khan, A. A. (2015). Flow field upstream of an orifice under fixed bed and equilibrium scour conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(2), 04014076.
- Powell, D. N. ve Khan, A. A. (2012). Scour upstream of a circular orifice under constant head. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1), 28-34.
- Rajaratnam, N. ve Mazurek, K. A. (2002). Erosion of a polystyrene bed by obliquely impinging circular turbulent air jets. *Journal of Hydraulic Research*, 40(6), 709-716.
- Rubinow, S. I. ve Keller, J. B. (1961). The transverse force on a spinning sphere moving in a viscous fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 11(3), 447-459.
- Safari, M. J. S., Aksoy, H., Unal, N. E., ve Mohammadi, M. (2017). Experimental analysis of sediment incipient motion in rigid boundary open channels. *Environmental Fluid Mechanics*, 17(6), 1281-1298.
- Saffman, P. G. (1965). The lift on a small sphere in a slow shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 22(2), 385-400.
- Saffman, P. G. (1968). The lift on a small sphere in a slow shear flow - Corrigendum. *Journal of Fluid Mechanics*, 31(3), 624-624.
- Sarkardeh, H., Zarrati, A. R. ve Roshan, R. (2010). Effect of intake head wall and trash rack on vortices. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 108-112.
- Sarkardeh, H., Reza Zarrati, A., Jabbari, E., ve Marosi, M. (2014). Numerical simulation and analysis of flow in a reservoir in the presence of vortex. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(4), 598-608.
- Schmeeckle, M. W., Nelson, J. M. ve Shreve, R. L. (2007). Forces on stationary particles in near-bed turbulent flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F2).
- Selberg, B. P. ve Nicholls, J. A. (1968). Drag coefficient of small spherical particles. *AIAA Journal*, 6(3), 401-408.
- Shammaa, Y., Zhu, D. Z. ve Rajaratnam, N. (2005). Flow upstream of orifices and sluice gates. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), 127-133.
- Shields, A. (1936). *Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement*. Doktora Tezi, Prusya Su Yapıları ve Gemi İnşası Araştırma Enstitüsü, Berlin.

- SonTek/Yellow Springs Instruments. (2007). Horizon ADV Kullanım Kılavuzu. *SonTek/YSI*. San Diego. 1-28.
- Sumer, B. M., Chua, L. H., Cheng, N. S. ve Fredsøe, J. (2003). Influence of turbulence on bed load sediment transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(8), 585-596.
- Sungur, A. (2018). *Numerical investigation of vortex formation at asymmetric horizontal intakes*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Taştan, K. (2017). Scale and flow boundary effects for air entraining vortice. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 170(4), 198-206.
- Taştan, K. (2018). Prediction of critical submergence in a two-layer-stratified fluid flow. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(4), 1-7.
- Taştan, K., ve Yıldırım, N. (2018). Su alma ağzı giriş şeklinin hava girişli çevrinti üzerindeki ölçek etkisi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(3), 492-506.
- Taştan, K., Erat, B., Barbaros, E. ve Eroğlu, N. (2023). Flow boundary effects on scour characteristics upstream of pipe intakes. *Ocean Engineering*, 278, 114343.
- Taştan, K., Yıldırım, G. ve Barbaros, E. (2022). Effect of intake geometry on the velocity distribution upstream of intakes. *Sādhanā*, 47(2), 79.
- Tataroğlu, R. M. (2014). *Numerical investigation of Vortex formation at intake structures using flow-3d software*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Toktay, T. E. ve Constantinescu, S. G. (2006). Validation of a large-eddy simulation model to simulate flow in pump intakes of realistic geometry. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(12), 1303-1315.
- Torobin, L. B. ve Gauvin, W. H. (1961). The drag coefficients of single spheres moving in steady and accelerated motion in a turbulent fluid. *AIChE Journal*, 7(4), 615-619.
- Valyrakis, M., Diplas, P., Dancey, C. L., Greer, K. ve Celik, A. O. (2010). Role of instantaneous force magnitude and duration on particle entrainment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F2).
- Van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110(10), 1431-1456.
- Vollmer, S. ve Kleinhans, M. G. (2007). Predicting incipient motion, including the effect of turbulent pressure fluctuations in the bed. *Water Resources Research*, 43(5).
- Wahl, T. L. (2000, 1-2 Ağustos). *Analyzing ADV data using WinADV*. 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management'da sunuldu, Minneapolis.

- Wahl, T. L. (2003). Discussion of “Despiking acoustic Doppler velocimeter data” by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(6), 484-487.
- Wei, G. (2015). The sponge layer method in Flow-3D. *Flow Science Report 07-15*, Santa Fe, NM. 1-14
- White, C. M. (1940). The equilibrium of grains on the bed of a stream. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 174(958), 322-338.
- Wiberg, P. L. ve Smith, J. D. (1987). Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Water Resources Research*, 23(8), 1471-1480.
- Wu, S. ve Rajaratnam, N. (1990). Circular turbulent wall jets on rough boundaries. *Journal of Hydraulic Research*, 28(5), 581-589.
- Yağcı, O. (2006). *The impact of different forms of single natural vegetative elements on flow characteristics in open channels*. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Yalın, M. S. ve Karahan, E. (1979). Inception of sediment transport. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(11), 1433-1443.
- Yang, C. T. (1973). Incipient motion and sediment transport. *Journal of the hydraulics division*, 99(10), 1679-1704.
- Yang, J., Liu, T., Bottacin-Busolin, A. ve Lin, C. (2014). Effects of intake-entrance profiles on free-surface vortices. *Journal of Hydraulic Research*, 52(4), 523-531.
- Yıldırım, N. ve Kocabaş, F. (1995). Critical submergence for intakes in open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(12), 900-905.
- Yıldırım, N. ve Taştan, K. (2009). Critical submergence for multiple pipe intakes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(12), 1052-1062.
- Yıldırım, N., Eroğlu, N. ve Taştan, K. (2012). Occurrences of vortices at an intake of point sink character. *Teknik Dergi*, 23(1), 5799-5812.
- Yıldırım, N., ve Taştan, K. (2024). Velocity Distribution Upstream of Circular and Square Intakes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(1), 197-208.
- Zanke, U. C. E. (2003). On the influence of turbulence on the initiation of sediment motion. *International Journal of Sediment Research*, 18(1), 17-31.
- Zeng, L., Najjar, F., Balachandar, S. ve Fischer, P. (2009). Forces on a finite-sized particle located close to a wall in a linear shear flow. *Physics of Fluids*, 21(3).



Gazili olmak ayrıcalıktır