

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ISLANMAZ YÜZEYLER ÜZERİNE GÖNDERİLEN SU JETİNİN  
DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makina Müh. Mert TÜKEL**

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği**

**Danışman: Doç. Dr. Hasan KARABAY**

**KOCAELİ, 2011**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ISLANMAZ YÜZEYLER ÜZERİNE GÖNDERİLEN SU JETİNİN  
DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

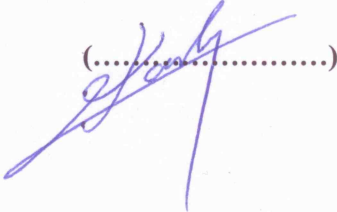
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Makina Müh. Mert TÜKEL**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 03.06.2011**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 13.07.2011**

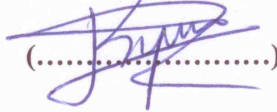
**Tez Danışmanı**

**Doç. Dr. Hasan KARABAY**

(.....)  


**Üye**

**Doç. Dr. K. Süleyman YİĞİT**

(.....)  


**Üye**

**Doç. Dr. Murat KARABEKTAŞ**

(.....)  


**KOCAELİ, 2011**

## **ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR**

Tabiatta bulunan maddelerin ıslanmazlık özelliği uzun zamandan beri bilinmektedir. Nilüferlerin kirli sularda temiz kalması, karalahana sebzesinin kışın donmadan yaşayabilmesinin sebeplerinden bir tanesi de ıslanmazlık özelliğidir. Islanmaz yüzeylerin endüstriyel olarak elde edilmesiyle ıslanmaz yüzeylerin kullanımı günlük yaşam içerisine girmiştir.

Islanmaz yüzeylerin kullanımının artması ile birlikte bu yüzeyler hakkında daha detaylı araştırmalar yapılmasını gerektirmektedir. Bu tez çalışması kapsamında amaç ıslanmaz yüzey üzerine çarpan bir su jetinin davranışının değişik parametrelerin değişimiyle nümerik olarak analiz edilmesidir.

Bu tez çalışmasını yapmamda bana imkan ve destek sağlayan sayın hocam Doç. Dr. Hasan KARABAY'a, yaptığı deneysel çalışma verilerini benimle paylaşan ve fikirleriyle çalışmama katkıda bulunan Yrd. Doç. Dr. Ali KİBAR'a, adı geçen çalışmanın yapılmasında desteği bulunan DPT'ye teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iii
TABLolar DİZİNİ .....	vi
SEMBOLLER .....	vii
ÖZET .....	viii
İNGİLİZCE ÖZET .....	ix
BÖLÜM 1. GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2. GENEL BİLGİLER .....	3
2.1. Yüzey Gerilimi .....	3
2.2. Kontak Açısı .....	5
2.3. Young Eşitliği .....	7
2.4. Literatür Araştırması .....	9
2.4.1. Yatay yüzey üzerine damla çarpması ile ilgili çalışmalar .....	9
2.4.2. Katı yüzeye gönderilen sıvı jetiyle ilgili yapılan çalışmalar .....	14
BÖLÜM.3: SAYISAL MODEL .....	22
3.1. Akışkan Hareketinin Genel Denklemleri .....	22
3.2. Kullanılan Çözüm Metodları .....	23
3.3. VOF Modeli .....	23
3.4. Arayüzey Geometrisinin Tespiti .....	25
3.5 Sınır Koşulları ve Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması.....	26
3.6. Sayısal Çözüm Ağının Oluşturulması .....	29
BÖLÜM 4. ANALİZ SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMA .....	30
4.1. Eşdeğer Yayılma Faktörü .....	54
4.2. Uzama Faktörü .....	56
4.3.Yüzeye Uygulanan Teğetsel Kuvvet .....	57
4.4. Yansıma Açısı .....	58
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	60
KAYNAKLAR .....	62
ÖZGEÇMİŞ .....	64

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1:	a) Normal yüzey üzerinde akan sıvının kirli parçacıklar üzerine etkisi, b) İslanmaz yüzey üzerinde akan sıvının kirli parçacıklar üzerine etkisi (Barthlott ve Neinhuis, 1997) .....	1
Şekil 2.1:	Yağmur sonrasında yüzey gerilimi sebebiyle su damlasının aldığı küresel şeklin görünümü .....	3
Şekil 2.2:	Sıvı yüzeyinde ve sıvı içindeki molekül üzerindeki gerilmeler (Beyaz, 2011) .....	4
Şekil 2.3:	a) Süper ıslanmaz, b) İslanmaz, c) Süper ıslanır malzeme üzerindeki su damlasının görünüşü .....	5
Şekil 2.4:	Nilüfer (Nelumbo nucifera) yaprağının elektron mikroskopuyla çekilmiş görüntüsü (Barthlott ve Neinhuis, 1997).....	6
Şekil 2.5:	Normal yüzey ve ıslanmaz yüzey üzerindeki sıvı hareketinin şematik gösterimi (Kibar, 2008) .....	6
Şekil 2.6:	Katı yüzey üzerinde denge durumunda bulunan sıvı damlasının görünümü ve üç fazın bir araya geldiği noktadaki kuvvetlerin detaylı olarak görünümü .....	7
Şekil 2.7:	Katı yüzeylerin ıslatma özellikleri ve gerilim dengeleri diyagramı (Zengerle ve Metz, 2007) .....	9
Şekil 2.8:	Damlanın katı yüzeye çarpması sonucu oluşabilecek durumların çizimi (Bai ve Gossman, 1995) .....	11
Şekil 2.9:	Damlanın katı yüzeye çarpmasıyla ortaya çıkan damla hareketleri (Rioboo ve diğ. 2001) .....	12
Şekil 2.10:	Su damlasının bir balmumu yüzeye çarpmasının zaman dizisi ( $We=90$ ). Sol yanda deney sağ yanda ise sayısal çözüm görülmektedir. (a) Yayılma evresi, (b) Geri toplanma evresi Sikalo ve Ganic, 2006) .....	13
Şekil 2.11:	Yatay yüzey üzerine çarpan bir sıvı damlasının içindeki basınç ve hız dağılımının zamanla değişimini gösteren nümerik çözüm (Fujimoto ve diğ. 2007) .....	14
Şekil 2.12:	Katı yüzeye çarpan su jetinin yüzey üzerinde oluşturduğu basınç dağılımları. (a) Yüzeye dik jetin, (b) yüzeye $30^\circ$ açıyla gelen jetlerin oluşturduğu basınç dağılımları .....	15
Şekil 2.13:	Jetlerin çarpışması sonucu oluşan sıvı yaprakların yüksek hızlı kamerayla elde edilen görüntüleri (Miller ve diğ.,2005) .....	16
Şekil 2.14:	Dikey olarak duran ıslanmaz yüzeyin şematik görünüşü (Kibar, 2008) .....	17
Şekil 2.15:	Dikey olarak duran ıslanmaz yüzeye su akışının yüzeyde aldığı şeklin geometrisi (Kibar, 2008) .....	18
Şekil 2.16:	Su jetinin ıslanmaz yüzey üzerindeki yayılma olayının ve su zinciri oluşumunun $We$ sayısı ile değişimi ( $\theta=112^\circ$ , $\alpha=30^\circ$ , $d=1.75$ mm) (Kibar, 2010) .....	19

Şekil 2.17:	Su jetinin süper ıslanmaz yüzey üzerindeki yayılımının We sayısı ile değişimi. ( $\theta=167^\circ$ , $\alpha=30^\circ$ , $d=1.75$ mm) (Kibar, 2010) .....20
Şekil 2.18:	Yansıma açısının Weber sayısı ve Jet açısıyla değişim grafiği ( $\theta=167^\circ$ , $d=1.75$ mm) (Kibar ve diğ., 2010) .....21
Şekil 3.1:	$\alpha_q$ değerinin sayısal ağ içindeki konumu .....24
Şekil 3.2:	Arayüzey Hesaplamaları. (a) Gerçek arayüzey geometrisi. (b) Geometrik yeniden yapılandırma esas olan doğrusal parçalı arayüzey düzenlemesi. (c) Alıcı – verici şeması esas alınarak çizilen arayüzey düzenlemesi (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide,2009) .....26
Şekil 3.3:	Sayısal çözüm için oluşturulan model .....27
Şekil 3.4:	Modelin giriş kesitindeki ağ yapısı görünümü .....29
Şekil 4.1:	Su jetinin yayılımının sayısal çözümünün deneysel verilerle karşılaştırılması ( $\theta=167^\circ$ , $\alpha=30^\circ$ , $d=1.75$ mm) .....30
Şekil 4.2:	Şekil 4.2: Su jetinin yüzeydeki yayılımının sayısal çözümünün deneysel verilerle karşılaştırılması ( $\theta=112^\circ$ , $\alpha=30^\circ$ , $d=1.75$ mm) ....32
Şekil 4.3:	Kontak açısı $167^\circ$ olan yüzeye gönderilen 1.525 m/s hızındaki su jetinin yüzey üzerindeki hareketinin zamanla gelişimi .....34
Şekil 4.4:	Kontak açısı $167^\circ$ olan yüzeye gönderilen 1.525 m/s hızındaki su jetinin yüzey üzerindeki hareketinin zamanla gelişimi .....35
Şekil 4.5:	Kontak açısı $167^\circ$ olan yüzeye gönderilen 1.525 m/s hızındaki su jetinin yüzey üzerindeki hareketinin zamanla gelişimi .....36
Şekil 4.6:	Kontak açısı $167^\circ$ olan yüzeye gönderilen 1.525 m/s hızındaki su jetinin yüzey üzerindeki hareketinin zamanla gelişimi .....37
Şekil 4.7:	Kontak açısı $167^\circ$ olan 1.733 m/s hıza sahip su jetinin çarpma ve hidrolik sıçrama bölgesi detay görüntüsü .....38
Şekil 4.8:	Kontak açısı $167^\circ$ olan 1.733 m/s hıza sahip su jetinin yüzeyden ayrılma noktasının detay görüntüsü .....39
Şekil 4.9:	Kontak açısı $112^\circ$ olan 1.109 m/s hıza sahip su jetinin su – hava arayüzeyindeki hız alanının detay görünümü .....40
Şekil 4.10:	Kontak açısı $112^\circ$ olan 1.109 m/s hıza sahip su jetinin yüzeyden ayrılmayarak tekrar yüzeye çarparak yayılması .....41
Şekil 4.11:	Islanmaz yüzeye çarptıktan sonra yayılarak tekrar birleşen akışkanın birleşme noktasındaki görüntüsü (Kibar, 2008) .....41
Şekil 4.12:	Kontak açısı $167^\circ$ olanyüzey üzerine gönderilen sıvı jetinin sıçramasının (a) yandan, (b) üstten görünüşü ( $We = 75.3$ ) .....42
Şekil 4.13:	Kontak açısı $112^\circ$ olan yüzey üzerinde sıvı zinciri şeklinde hareket eden su jetinin (a) yandan, (b) üstten görünüşü ( $We=20.4$ ).....43
Şekil 4.14:	Su jetinin harekete dik olan çeşitli kesitlerindeki hız vektörü alanları ( $\theta = 167^\circ$ , $We = 75.3$ ) .....44
Şekil 4.15:	Su jetinin harekete dik olan çeşitli kesitlerindeki hız vektörü alanları ( $\theta = 167^\circ$ , $We = 75.3$ ) .....45
Şekil 4.16:	Su jetinin harekete dik olan çeşitli kesitlerindeki hız vektörü alanları ( $\theta = 112^\circ$ , $We = 30.5$ ) .....46
Şekil 4.17:	Su jetinin harekete dik olan çeşitli kesitlerindeki hız vektörü alanları ( $\theta = 112^\circ$ , $We = 30.5$ ) .....47
Şekil 4.18:	Su jetinin harekete dik olan çeşitli kesitlerindeki hız vektörü alanları ( $\theta = 112^\circ$ , $We = 30.5$ ) .....48

Şekil 4.19:	$x' = 0.571$ kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 167^\circ$ , $We = 58.3$ ) .....	49
Şekil 4.20:	$x' = 4$ kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 167^\circ$ , $We = 58.3$ ) .....	50
Şekil 4.21:	$x' = 6.286$ kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 167^\circ$ , $We = 58.3$ ) .....	50
Şekil 4.22:	$x' = 9.714$ kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 167^\circ$ , $We = 58.3$ ) .....	51
Şekil 4.23:	$x' = 0.571$ kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 112^\circ$ , $We = 30.5$ ) .....	52
Şekil 4.24:	$x' = 4$ kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 112^\circ$ , $We = 30.5$ ) .....	52
Şekil 4.25:	$x' = 9.714$ kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 112^\circ$ , $We = 30.5$ ) .....	53
Şekil 4.26:	Eşdeğer Yayılma Faktörü (EYF) değerlerinin Weber sayısı ile değişimlerinin deneysel, sayısal ve Denklem 2.5'e göre karşılaştırılması ( $\theta = 167^\circ$ , $\alpha = 30^\circ$ ) .....	55
Şekil 4.27:	Eşdeğer Yayılma Faktörü (EYF) değerlerinin Weber sayısı ile değişimlerinin deneysel, sayısal ve Denklem 2.5'e göre karşılaştırılması ( $\theta = 112^\circ$ , $\alpha = 30^\circ$ ) .....	55
Şekil 4.28:	Uzama Faktörünün Weber sayısı ile değişimi ( $\theta = 167^\circ$ ) .....	56
Şekil 4.29:	Uzama Faktörünün Weber sayısı ile değişimi ( $\theta = 112^\circ$ ) .....	57
Şekil 4.30:	Teğetsel kuvvetlerin Reynolds sayısı ile değişiminin deneysel ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması ( $\theta = 167^\circ$ ) .....	58
Şekil 4.31:	Teğetsel kuvvetlerin Weber sayısı ile değişiminin deneysel ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması ( $\theta = 167^\circ$ ) .....	58
Şekil 4.32:	Sayısal çözüm ile bulunan yansıma açılarının Weber Sayısı ile değişiminin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması .....	59

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1:	Hesaplamada kullanılan hız değerleri (m/s) .....	28
Tablo 3.2:	Sayısal çözümde kullanılan fiziksel özellikler .....	28



## SEMBOLLER

A	: Yüzeydeki suyun izdüşüm alanı, (m <sup>2</sup> )
d	: Nozul çapı, (m)
D	: Eşdeğer çap, (m)
E	: Yüzey gerilim enerjisi, (J)
F <sub>y</sub>	: Tegetsel kuvvet, (N)
g	: Yer çekimi ivmesi, (m/s <sup>2</sup> )
L	: Suyun yüzeydeki izdüşümünün boyu, (m)
M <sub>jet</sub>	: Momentumun düşey bileşeni, (kg.m/s <sup>2</sup> )
$\dot{m}$	: kütleli debi, (kg/s)
q	: Hacimsel debi, (m <sup>3</sup> /s)
Re	: Reynolds sayısı, ( $\frac{\rho V d}{\mu}$ )
W	: Suyun yüzeydeki izdüşümünün genişliği, (m)
We	: Weber sayısı, ( $\frac{\rho V^2 d}{\sigma}$ )
x'	: Boyutsuz mesafe
V	: Sıvı hızı, (m/s)
$\alpha_q$	: Hacimsel fraksiyon oranı
$\alpha$	: Jet açısı, (°)
$\beta$	: Yansıma açısı, (°)
$\sigma$	: Sıvının yüzey gerilimi, (N/m)
$\rho$	: Yoğunluk, (kg/m <sup>3</sup> )
$\mu$	: Dinamik viskozite, (kg/ms)
$\nu$	: Kinematik viskozite, (Pa.s)
$\theta$	: Yüzeyin kontak açısı, (°)
$\Phi$	: Kontak açısı parametresi, (1+ cos(180 - $\theta$ ))

## Alt indisler

ED	: Eşdeğer çap
n	: Normal
GL	: Gaz ve sıvı
GS	: Gaz ve katı
LS	: Sıvı ve Katı

## Kısaltmalar

EYF	: Eşdeğer Yayılma Faktörü
UF	: Uzama Faktörü

# ISLANMAZ YÜZEYLER ÜZERİNE GÖNDERİLEN SU JETİNİN DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Mert TÜKEL

**Anahtar Kelimeler:** Su jeti, Islanmaz yüzey, Hidrolik sıçrama, HAD analizi, Kontak açısı, Yüzey gerilimi, Jet akışı, Viskoz sürtünmenin azaltılması.

**Özet:** Bu tez çalışmasında ıslanmaz ve süper ıslanmaz iki yüzey üzerine 30° açıyla gönderilen su jetinin yüzey üzerindeki akışı sayısal olarak incelenmiştir. Islanmaz yüzey kontak açısı 112° ve süper ıslanmaz yüzey kontak açısı 167° olmak üzere iki farklı yüzey için çalışılmıştır. Su jetinin çapı 1.75 mm olup su jeti yüzeye 30° açıyla gönderilmiş ve Weber sayısı 14 – 200, Reynolds sayısı 200 – 2500 arasında değiştirilerek sayısal çözümlenmeler yapılmıştır.

Literatürden alınan deneysel ölçümler ve bulunan ampirik bağıntılar ile nümerik çalışmalarla elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan sayısal çalışmalarda yayılma sıçrama olayları ve sıvı zinciri oluşumları görülmüştür. Bunlar deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür. Bunların dışında suyun yüzey üzerinde oluşturduğu alan, yayılmanın boyu ve genişliği incelenmiştir. Yüzeyin ıslanmazlık özelliğinin artmasıyla jetin yüzeyde yayıldığı alanın azaltılabileceği görülmüştür. Eşdeğer çap ve uzama faktörünün Reynolds sayısı ve Weber sayısı ile değişimleri incelenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sayısal çözümlerde elde edilen ıslanmaz yüzeydeki teğetsel kuvvetlerin literatürden alınan deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Katı yüzeye çarpan sıvı jetinin yüzey üzerinde oluşturduğu viskoz kuvvetlerin kontak açısı yüksek yüzeyler kullanılarak ciddi şekilde azaltılabileceği görülmüştür.

# NUMERICAL INVESTIGATION OF BEHAVIOUR OF WATER JET FLOW ON HYDROPHOBIC SURFACES

Mert TÜKEL

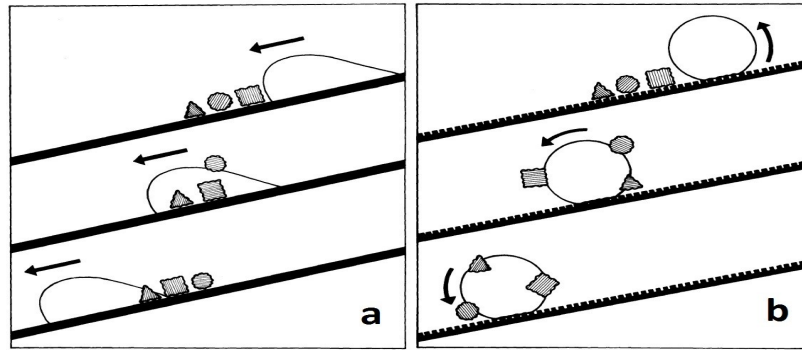
**Keywords:** Water Jet, Hydrophobic Surface , Hydraulic Jump, CFD Analysis, Contact angle, Surface tension, Jet flow, Reduction of viscos drag

**Abstract:** In this study, the behaviour of inclined water jet impinged onto hydrophobic and super hydrophobic surfaces investigated numerically. The contact angle of surfaces are  $112^\circ$  and  $167^\circ$ . Diameter of water jet is 1.75mm. Water jet impinges the surfaces with inclination angle of  $30^\circ$ . Weber number varies between 14-200. Reynolds numbers are in the range of 200-2500.

The results obtained from the numerical study were compared with the experimental results taken from the literature. A good agreement is achieved between the computed and experimental results. Computations show that when the inclined water jet impinges onto hydrophobic surface it spreads first and than bouncing from the surface. Variation of the spreading area with Reynolds number and Weber number is shown. Water jet tangential force is also computed and compared with measured values. It has been shown that the viscous force can be reduced significantly in jet impingement applications using hydrophobic surfaces.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde nano teknolojinin ilerlemesiyle birlikte ıslanmaz yüzey teknolojisi de gelişmektedir. Islanmaz özellik gösteren bitki ve hayvanlar bulunmakla birlikte bu konu üzerine çalışmalar oldukça yenidir. Islanmaz yüzeyler nilüfer yaprağı, kara lahana yaprağı gibi bitkilerde görülmektedir. Buna rağmen ıslanmaz yüzeylerle ilgili çalışmalar, nilüfer yaprağı üzerinde yapılan araştırmalarla 90'lı yılların sonlarında başlamıştır. Kirli sularda yaşamasına rağmen nilüfer yapraklarının temiz kalmasının sebebi araştırılmış ve ıslanmaz yüzeye sahip olduğu için yaprağa düşen su damlacıklarının yüzeyde tutunamayarak yaprak üzerinden yuvarlandığı görülmüştür. Böylece yuvarlanarak yaprak üzerinde hareket eden su damlasının her türlü pisliği kendisiyle birlikte alıp götürdüğü ve yaprak yüzeyini temizlediği tespit edilmiştir (Barthlott ve Neinhuis, 1997). Şekil 1.1.a'da görüldüğü gibi normal yüzeylerde akan sıvı, kirlerin sadece yerini değiştirmektedir. Oysa ıslanmaz yüzeyde yuvarlanan damlacıklar yaprak yüzeyindeki parçacıkları toplayarak ilerlemekte ve böylece yüzeyi temizlemektedirler (Şekil 1.1.b).



Şekil 1.1: a) Normal yüzey üzerinde akan sıvının kirli parçacıklar üzerine etkisi, b) Islanmaz yüzey üzerinde akan sıvının kirli parçacıklar üzerine etkisi (Barthlott ve Neinhuis, 1997).

Islanmaz yüzeylerin kullanılmasıyla sağlanacak avantajlardan bazıları yüzeylerinin su tutmaması, kendi kendini temizleyebilme yeteneği olarak sayılabilir (Yu ve diğ. 2005).

Bu tez çalışmasında farklı kontak açılarına sahip ıslanmaz ve süper ıslanmaz yüzeyler üzerine gönderilen dairesel su jetinin davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Problemdeki katı yüzeyin konumu yere dik olarak alınmıştır. Bu şartlar altında jet akışının davranışları sayısal olarak çözümlenmiştir. Daha önce yapılmış olan deneysel çalışmalarda elde edilen eşdeğer çap, eşdeğer yayılma faktörü, uzama faktörü, teğetsel kuvvet lmlerinin Reynolds sayısı, Weber sayısı, nozul çapı ve kontak açısı parametreleriyle değişiminin, sayısal çözümde elde edilen verilerle karşılaştırması yapılmıştır.

## BÖLÜM 2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde ıslanır ve ıslanmaz yüzeyler arasındaki farklar ortaya konacak ve ıslanmaz yüzey üzerine gönderilen su jetinin hareketini etkileyen temel parametreler tanıtılacaktır. Daha sonra, literatürde ıslanır ve ıslanmaz yüzeyler üzerine gönderilen su jeti ve damla çarpması ile ilgili çalışmalar incelenecektir.

### 2.1. Yüzey Gerilimi

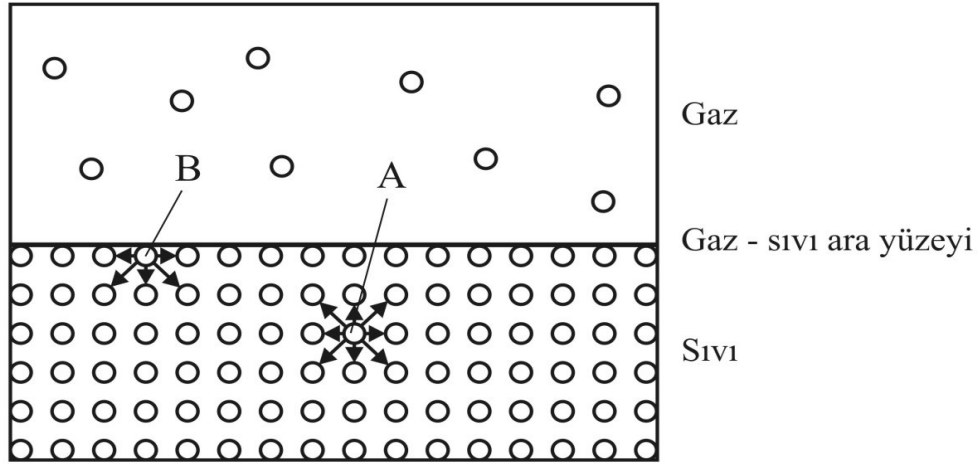
Civa damlasının, cam üzerinde küresel bir şekil aldığı, yaprak üzerinde oluşan çiy damlalarının yuvarlak bir şekil alarak yayılmadan durduğu, yağmur sonrasında yağmur damlacıklarının katı yüzeyler üzerinde dairesel şekil alarak belli bir büyüklüğe kadar akmadan durabildiği günlük yaşamda gözlenmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Yağmur sonrasında yüzey gerilimi sebebiyle su damlasının aldığı küresel şeklin görünümü.

Bu ve bunun gibi diğer durumlarda, sıvı damlacıklarının bir sıvı baloncuğu oluşturdukları gözlenmektedir. Bunun sebebi sıvı moleküllerinin birbirlerine uyguladıkları çekim kuvvetidir. Sıvı molekülleri arasındaki çekim kuvvetinin birim uzunluk başına büyüklüğü yüzey gerilimi olarak adlandırılır ve  $\sigma_s$  olarak gösterilir. Birimi  $N/m$  ile ifade edilir. Yüzey gerilmesi aynı zamanda yüzey enerjisi olarak da

adlandırılır ve  $J/m^2$  eşdeğer birimiyle dile getirilir. Bu durumda  $\sigma_s$ , sıvının yüzey alanını bir birim miktar arttırmak için yapılması gereken germe işini temsil eder (Çengel ve Cimbala, 2008).

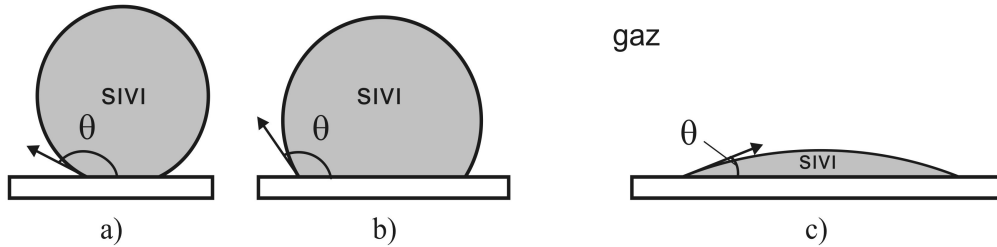


Şekil 2.2: Sıvı yüzeyinde ve sıvı içineki molekül üzerindeki gerilmeler (Beyaz, 2011)

Bütün sıvılarda, sıvının türüne göre değişmekle birlikte moleküller arası çekim kuvvetleri bulunmaktadır. Örneğin Şekil 2.2'de A olarak adlandırılmış olan molekül sıvının içinde diğer sıvı molekülleri tarafından çevrelenmektedir. A molekülünün etrafındaki diğer sıvı molekülleri, A molekülüne eşit miktarda çekim kuvveti uygulanmaktadırlar. Böylece A molekülüne etkiyen kuvvetler birbirini dengeler. Gaz – sıvı ara yüzeyinde bulunan B molekülü ise sıvı molekülleri tarafından çekilirler. Gaz molekülleri çok seyrek olduklarından uygulayacakları çekim kuvveti, su moleküllerinin uyguladığı kuvvet yanında ihmal edilebilecek mertebededir. Bu sebeple yüzeydeki su molekülü sadece su kütlesi tarafından çekilyormuş gibi davranmaktadır. Böylece B molekülü üzerinde, su molekülüne doğru bir net kuvvet oluşur. 1805'te Thomas Young sıvı yüzeyinin mekanik özelliklerinin, yüzey üzerine gerilmiş hayali bir zarın mekanik özellikleri ile ilişkilendirilebileceğini gösterdi. Böylece sıvı yüzeyi moleküller arasında mevcut olan çekim kuvvetlerinin sonucu olarak, bir bakımdan gerilmiş hayali bir zar gibi daima büzülmek isteyen ve mümkün olan en küçük yüzeyi almak isteyen bir molekül kalınlığında çok ince bir zar gibi düşünülebilir (Beyaz, 2011).

## 2.2. Kontak Açısı

Sıvı – gaz ara yüzeyinin, damlanın ıslattığı yüzey ile yaptığı açı,  $\theta$ , kontak açısı olarak adlandırılır. Katı yüzeyler, kontak açısına göre ıslanır (hydrophilic) ve ıslanmaz (hydrophobic) olarak tanımlanırlar. Yatay bir yüzey üzerinde duran bir sıvı damlasının alabileceği durumlar Şekil 2.3'te görülmektedir. Şekil 2.3 a'da görüldüğü gibi kontak açısı  $\theta > 150^\circ$  ise yüzey süper ıslanmaz (super hydrophobic) olarak adlandırılır, yüzeyde oluşan damlanın görünümü küreye çok yakındır. Kontak açısı  $90 < \theta < 150^\circ$  aralığında ise yüzey ıslanmaz yüzey olarak adlandırılır fakat damlanın küreye yakın görünümü Şekil 2.3 b'de görüldüğü gibi biraz bozulmuştur. Kontak açısı  $\theta < 90^\circ$  ise ıslanan yüzey olarak tanımlanır. Eğer bu açı  $\theta < 5^\circ$  ise süper ıslanan (super hydrophilic) yüzey olarak tanımlanır, yani damla Şekil 2.3 c'de görüldüğü gibi yüzeyde tamamen yayılmaya çalışarak daha büyük alanı ıslatmaya çalışır. Kontak açısının 0 olması pratik olarak mümkün değildir, bunun sebebi Bölüm 2.3'te incelenecektir.

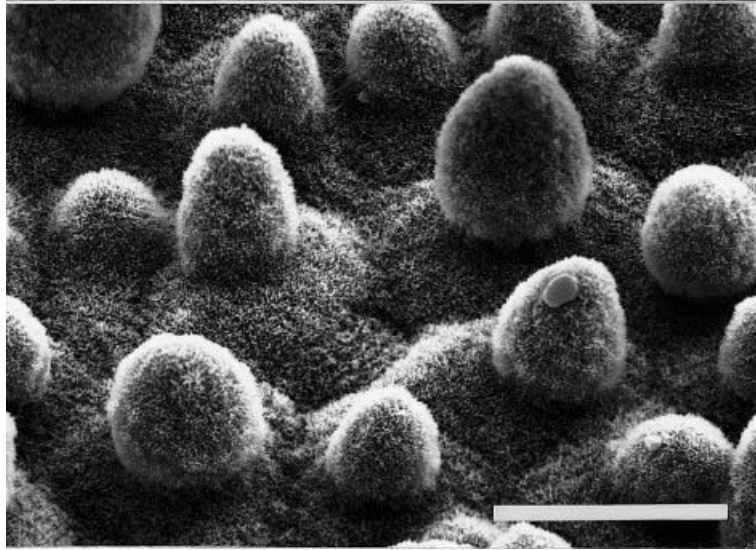


Şekil 2.3 a) Süper ıslanmaz, b) İslanmaz, c) Süper ıslanır malzeme üzerindeki su damlasının görünüşü

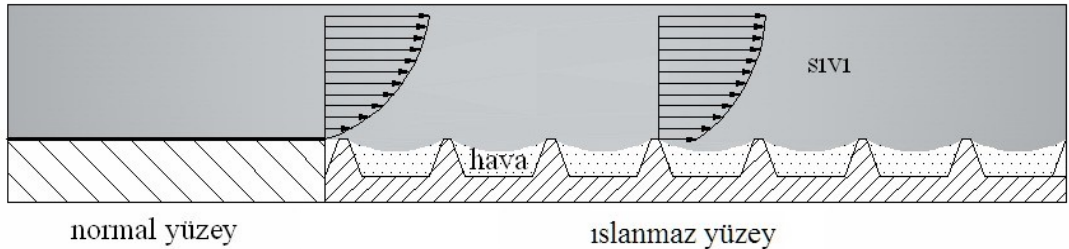
İslanmaz yüzeyler üzerinde, içinde havanın hapsoldüğü mikro oluklar bulunmaktadır. Bu oluklarda hava hapsolmesi halinde sıvı bu gözeneklere girememektedir. Böylece sıvının katı ile temas ettiği yüzey miktarı azalmakta ve sıvı hava üzerinde duruyormuş gibi davranış göstermektedir (Erbil ve diğ. 2003). Örneğin Şekil 2.5'te bir nilüfer yaprağının elektron mikroskopuyla çekilmiş görüntüsü görülmektedir. Resim üzerindeki ölçek çizgisi 20  $\mu\text{m}$ 'lik uzunluğu temsil etmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi nilüfer yaprağı üzerinde mumsu dokudan oluşmuş küçük yükseltiler



görülmektedir. Bu yükseltiler arasında hapsolmuş hava mumsu doku ile beraber nilüfer yaprağına süper ıslanmaz yüzey özelliğini kazandırmaktadır (Barthlott ve Neinhuis, 1997). Şekil 2.5'te ise bu yapının şematik olarak bir çizimi görülmektedir. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi normal yüzey üzerinde akan sıvının yüzeye temas ettiği bölgede hızı sıfırdır. Bu durum, temas halindeki katı yüzey ile sıvının aynı hızda olması gerekliliğinden kaynaklanmaktadır. Bu şart akışkanlar mekaniğinde kaymama (non-slip) şartı olarak ta bilinmektedir. Buna karşın, Şekil 2.5'teki ıslanmaz yüzey tarafında temsili olarak görüldüğü gibi sıvı yükseltiler arasında hapsolmuş hava ile dolu hacimlere girememektedir ve sıvının katı yüzeye temas ettiği alan ciddi oranda azalmıştır. Katı cidar üzerindeki kaymama şartı burada söz konusu değildir. Zira sıvı akışkan ince bir hava tabakası üzerinde yastıklanmıştır. Bu konu ilk defa Watanabe tarafından incelenmiştir (Watanabe ve diğ. 1999).



Şekil 2.4: Nilüfer (*Nelumbo nucifera*) yaprağının elektron mikroskopuyla çekilmiş görüntüsü (Barthlott ve Neinhuis, 1997).



Şekil 2.5: Normal yüzey ve ıslanmaz yüzey üzerindeki sıvı hareketinin şematik gösterimi (Kibar, 2008).

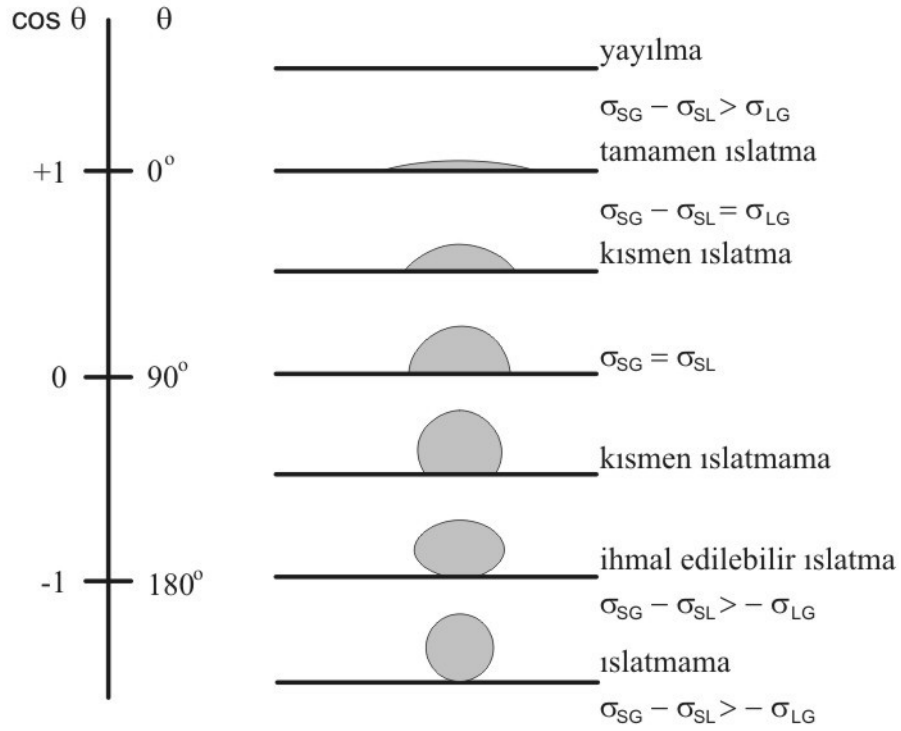


yapmaktadır. A noktasındaki kuvvet dengesi Denklem 2.1'deki gibi yazılabilir. Young (1885) bu denklemdeki kontak açısını yalnız bırakarak Denklem 2.2'de verilen Young eşitliğini elde etmiştir.

$$0 = \sigma_{SG} - \sigma_{SL} - \sigma_{LG} * \cos \theta \quad (2.1)$$

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LG}} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2 ile Young tarafından tanımlanan kontak açısının  $0^\circ$  ve ayrıca  $180^\circ$  olması fiziksel olarak mümkün değildir. Zira kontak açısının  $0$  olması halinde  $\sigma_{SG} - \sigma_{SL} = \sigma_{LG}$  eşitliğinin sağlanması gerekir, ayrıca sıvı – gaz arasındaki yüzey gerilimi kuvvetinin katı – gaz arayüzündeki gerilmeden daha büyük olmasını gerektirir. Kontak açısının  $180^\circ$  olması için ise  $\sigma_{SL} - \sigma_{SG} = \sigma_{LG}$  olmasını gerektirir. Bir sıvı damlasının yatay bir katı yüzey üzerinde kontak açısına göre alabileceği haller Şekil 2.7'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kontak açısı  $0^\circ$ 'ye yaklaştıkça sıvının yüzeyde kapladığı alan yani ıslatma eğilimi artmaktadır. Bu durumda katı – gaz arasındaki çekim kuvvetleri ( $\sigma_{SG}$ ) diğer gerilmelerden daha yüksek değeri almakta ve sıvı katı yüzey üzerinde yayılmaktadır. Kontak açısı  $90^\circ$ 'ye yaklaştıkça yüzeyi sıvı yüzeyi kısmen ıslatmaya başlamaktadır. Katı – sıvı arasındaki gerilim baskın hale geldikçe kontak açısı artmakta ve sıvı yüzeyi ıslatmamaya başlamaktadır. Açı  $90^\circ$ 'yi geçtiği durumlarda ise yüzeyi kısmen ıslatmama durumu ortaya çıkmaktadır. Kontak açısı  $180^\circ$ 'ye yaklaştığında ise yüzeyi ihmal edilebilir derecede az ıslatmaktadır.



Şekil 2.7 Katı yüzeylerin ıslatma özellikleri ve gerilim dengeleri diyagramı (Zengerle ve Metz, 2007).

## 2.4. Literatür Araştırması

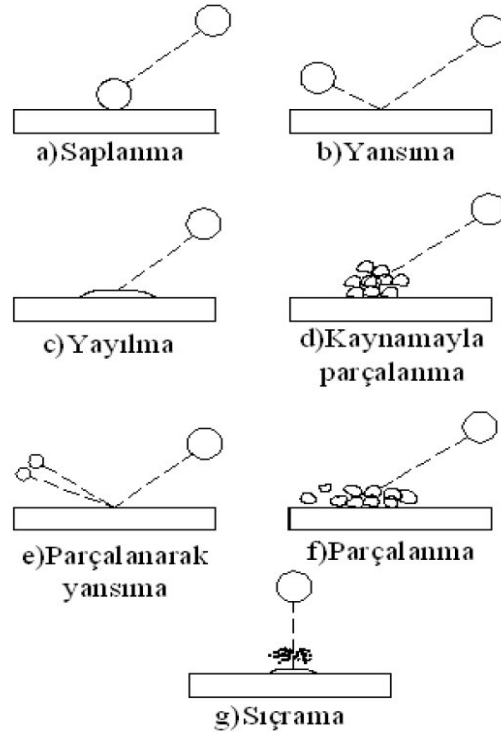
Yapılan çalışmalar incelendiğinde katı yüzey üzerindeki sıvı hareketlerinin birçok araştırmaya konu olduğu görülmektedir. Literatür araştırmasında konuyla ilgili çalışmalardan elde edilen bilgiler iki başlık altında verilmiştir. İlk kısımda hareketli veya hareketsiz durumdaki katı yüzeyler üzerine damlacık çarpmasıyla ilgili çalışmalar incelenmiştir. İkinci kısımda ise katı yüzey üzerine gönderilen sıvı jetinin davranışlarıyla ilgili yapılmış çalışmalar incelenmiştir.

### 2.4.1. Yatay yüzey üzerine damla çarpması ile ilgili çalışmalar

Bai ve Gossman (1995), yatay bir yüzey üzerine açılı olarak gönderilen bir damlanın alabileceği durumları deneysel olarak incelemiştir. Yapılan deneylerden damlanın alabileceği 7 gruba ayırmışlar ve oluşma şartlarını incelemiştir. Kontak açısı,

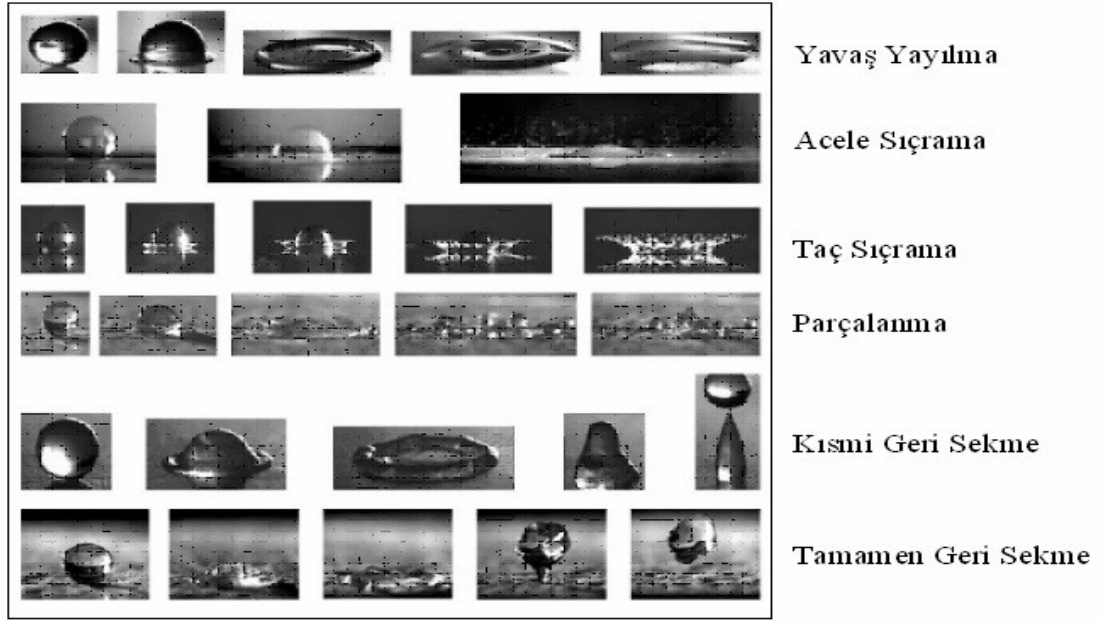
Reynold ve Weber sayılarının etkileriyle oluşan hareketleri Şekil 2.8'deki gibi 7 grupta toplamışlardır.

Rioboo ve diğ. (2001), yüksek hızlı kamera kullanarak çeşitli sıvı damlalarının katı yüzeye çarpmasını görüntülemişlerdir. Bunları Şekil 2.9'da görüldüğü gibi 6 gruba ayırmışlardır. Damla hızının, çapının, yüzey geriliminin, viskozitesinin ve yüzeyin pürüzlülüğünün çarpma sonrasındaki yayılma şekline etkisini ortaya koymuşlardır. Damlacık hızının, çapının ve yüzey pürüzlülüğünün düşük, viskozitenin yüksek olduğu durumlarda damla yavaş yayılma göstermektedir. Yüzeye çarpan sıvı damlasının hızı ve çapı büyük, buna karşılık viskozitesi ve yüzey gerilimi düşük ise acele sıçrama hareketi görülmüştür. Acele sıçrama örneğine göre damlanın yüzey gerilimi yükseltildiğinde sıçrama olayı taç sıçramaya dönüşmüştür. Eğer yüzey gerilim ve hız çok büyük ise sıvı damlası birçok küçük damlacığa bölünmekte ve bu olay parçalanma olarak adlandırılmıştır. Yüksek hız ve düşük viskozite ve yüzey gerilimi durumunda damla yüzeye çarptıktan sonra yayılıp toplanmakta ve sıvının bir kısmı yüzeyden ayrılmaktadır. Bu durum kısmi geri sekme olarak adlandırılmıştır. Eğer yüzey gerilimi daha yükselirse bu kez damlanın tamamı yüzeyden ayrılırki bu olay da tamamen geri sekme olarak adlandırılmıştır.



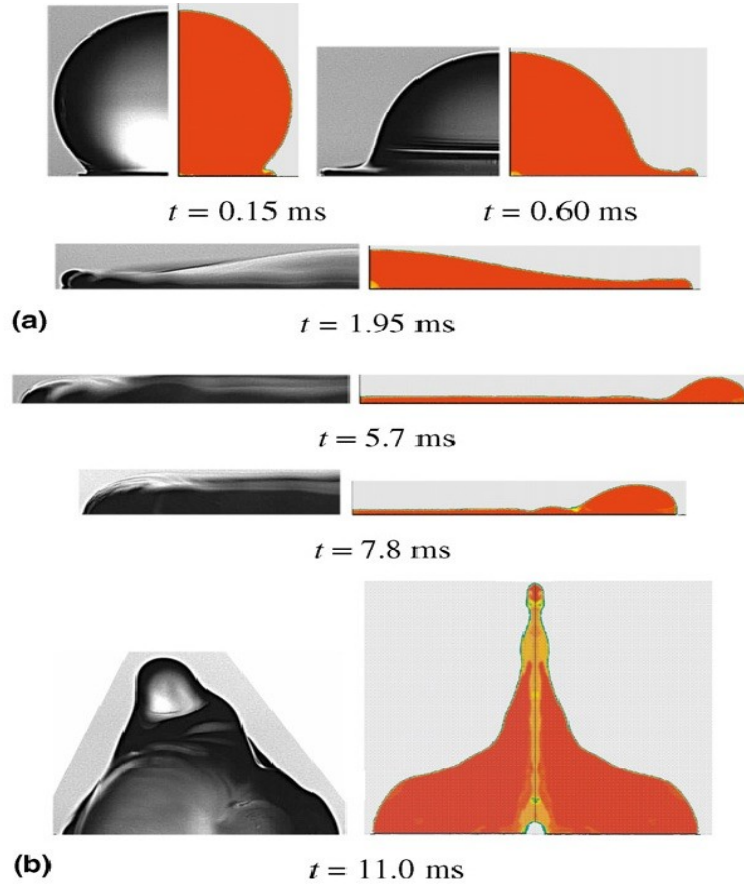
Şekil 2.8: Damlanın katı yüzeye çarpması sonucu oluşabilecek durumların çizimi (Bai ve Gossman, 1995).

Sikalo ve diğ. (2005), yüksek çekim hızlı bir kamera kullanarak düşük viskoziteli bir akışkan (su) ve yüksek viskoziteli bir akışkan (gliserin) kullanılarak çeşitli yüzeyler üzerine çeşitli açılarla damlalar göndererek davranışları incelemişlerdir. Yüzeyin ıslanır ve ıslanmaz olması, pürüzlü olup olmaması göz önüne alınarak deney sonuçları gösterilmiş ve damlacıkların sıçrama yapmaya başladığı kritik çarpma açısının belirlenmesinde en önemli parametrenin Weber sayısı olduğu görülmüştür.



Şekil 2.9: Damlanın katı yüzeye çarpmasıyla ortaya çıkan damla hareketleri (Rioboo ve diğ. 2001).

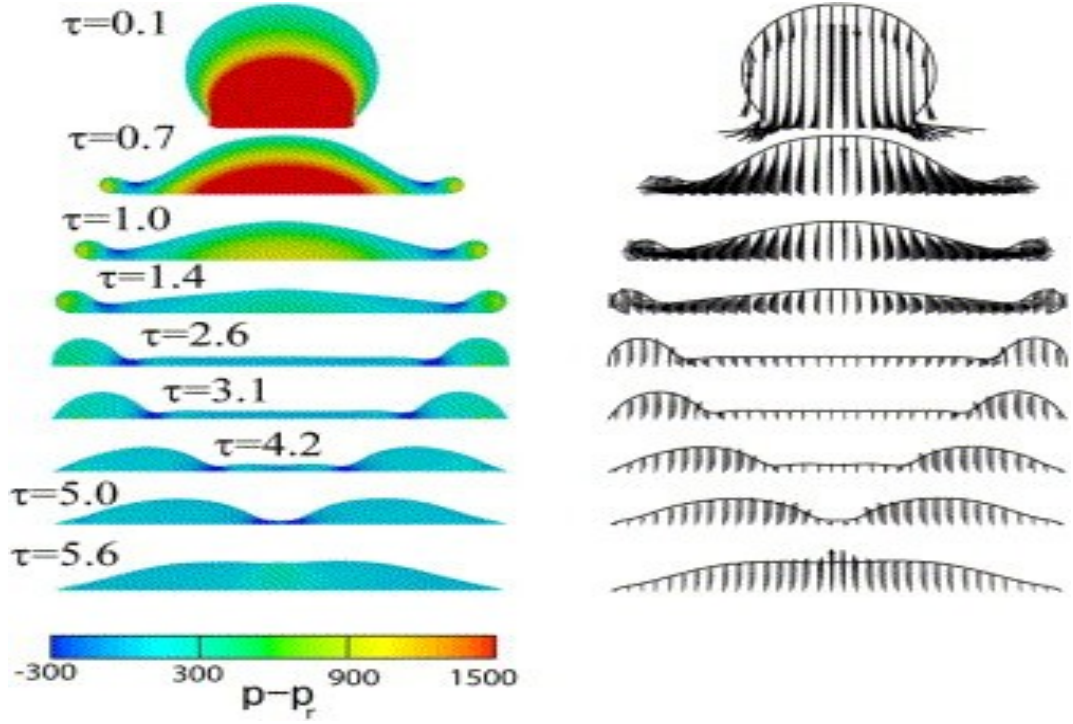
Sikalo ve Ganic (2006), yaptıkları deneysel çalışmaları literatürdeki sayısal çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Katı yüzeye damla çarpmasında Weber sayısının önemli bir parametre olmakla birlikte tek belirleyici olmadığı sonucuna varmışlardır. Şekil 2.10'da deneysel fotoğraflarla sayısal çözümü karşılaştırmışlardır.  $t = 0.15$  ms'de damla yüzeye çarpmakta ve ilerleyen zaman içinde yüzeye yayılmaktadır.  $t = 5.7$  ms'de yayılma en geniş alana ulaşmakta bu noktadan sonra yüzey gerilme kuvvetleri baskın hale geçerek damlacığın tekrar toplanmasını sağlamaktadır.  $t = 11.0$  ms'de ise damlacık toplanmış yüzey alanının azalmasıyla yüzey gerilme kuvvetleri atalet kuvvetlerine dönüşmüş ve damlacık yüzeyden yükselmiştir. Sayısal çözüm aksenal simetrik olarak çözülmüştür. Fakat Şekil 2.10 b'de görüldüğü gibi gerçek durumda simetriklik bir miktar bozulabilmekle birlikte aksenal simetriklik şartının çok büyük hatalara yol açmadığıda görülmektedir.



Şekil 2.10: Su damlasının bir balmumu yüzeye çarpmasının zaman dizisi ( $We=90$ ). Sol yanda deney sağ yanda ise sayısal çözüm görülmektedir. (a) Yayılma evresi, (b) Geri toplanma evresi (Sikalo ve Ganic, 2006).

Fujimoto ve diğ. (2007), eğimli yüzeye çarpan sıvı damlasının yüzeyde oluşturduğu şekilleri araştırmışlardır. Farklı eğimlerde oluşan şekilleri deneysel ve VOF tekniğini kullanarak sayısal olarak incelemiş ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Şekil 2.11'de yüzeye çarpan bir sıvı damlacığının değişik zaman değerleri için basınç ve hız alanlarının çizimi görülmektedir. Çarpma anında temas noktasında en yüksek basınç değeri oluşmakta, sıvının yüzeye yayılmasıyla birlikte basınç azalmaktadır. Hidrolik sıçramanın gerçekleşmesinin ardından düşük basınç bölgeleri koyu mavi olarak görünmektedir. Bu düşük basınç yüzey gerilmeleri ile dengelenmekte ve sıvı tekrar orta noktada toplanmaktadır. Hız alanlarında ise suyun yüzeye çarpmasıyla birlikte ataletin yanlara doğru yayılması ve hidrolik sıçrama bölgelerindeki hız vektörleri görülmektedir.

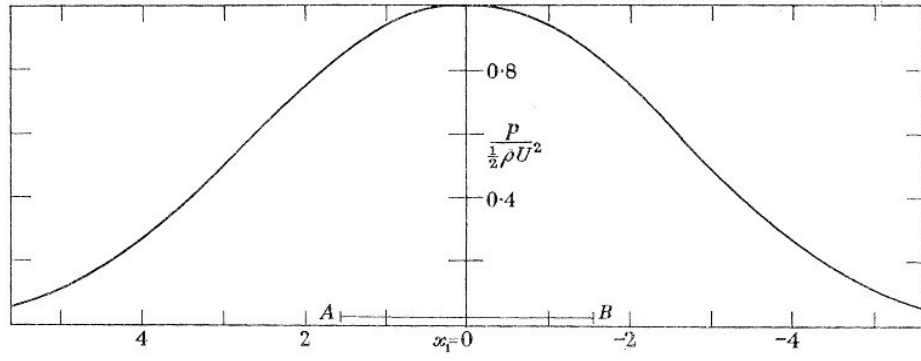




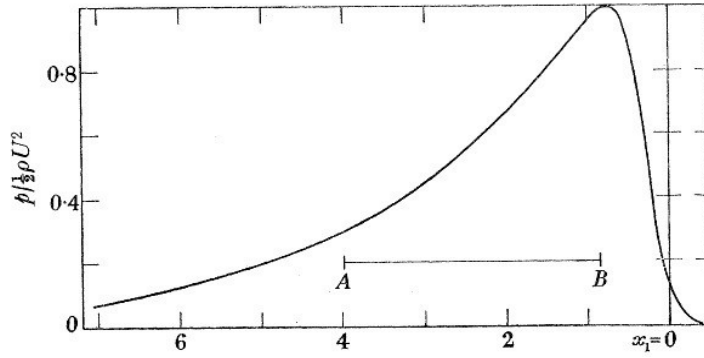
Şekil 2.11: Yatay yüzey üzerine çarpan bir sıvı damlasının içindeki basınç ve hız dağılımının zamanla değişimini gösteren nümerik çözüm (Fujimoto ve diğ. 2007).

#### 2.4.2. Katı yüzeye gönderilen sıvı jetiyle ilgili yapılan çalışmalar

Taylor (1966), katı yüzeye dik ve eğimli olarak çarpan su jetinin yüzeyde oluşturduğu basınç dağılımını incelemiştir. Problemi iki boyutlu olarak ele almış ve teorik bir çözüme gitmiştir. Bu çözüm sonucunda Şekil 2.12'de görülen basınç dağılımlarını elde etmiştir. Şekildeki AB doğrusu jet genişliğini göstermektedir. Yüzeye dik olarak gönderilen su jetindeki basınç dağılımını Şekil 2.12a'da görüldüğü gibi simetrik bulmuştur. Durma noktası olan orta noktada maksimum basınç olduğu görülmektedir. Şekil 2.12b'de ise yüzeye  $30^\circ$  açıyla gönderilen su jetinin basınç dağılımı görülmektedir. Burada maksimum basınç noktası su jetinin geliş yönüne doğru kaymaktadır.



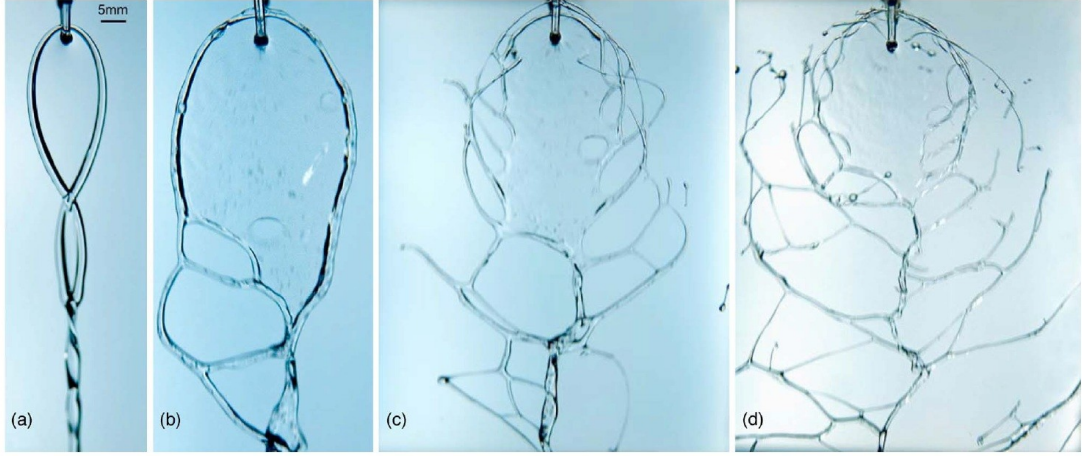
(a)



(b)

Şekil 2.12: Katı yüzeye çarpan su jetinin yüzey üzerinde oluşturduğu basınç dağılımları. (a) Yüzeye dik jetin, (b) yüzeye 30° açıyla gelen jetlerin oluşturduğu basınç dağılımları.

Miller ve diğ. (2005), çeşitli viskoelastik sıvı jetleri çarpıştırmış ve değişik hızlarda oluşturdukları sıvı şekillerini incelemiştir. Düşük hızlarda oluşan sıvı yaprak oluşumu hız yükseldikçe daha büyümekte ve en sonunda kararsız hale gelmesini incelemiştir. Şekil 2.13'te çarpışan sıvı jetlerinin yüksek hızlı kamera ile elde edilmiş görüntüleri verilmektedir. Bu şekilde daha önce Newtonian Ya da non-Newtonian akışkanlarda görülmemiş akış yapılarıyla karşılaşmıştır. Viskozitenin artırılması sıvı ağların stabilitesini arttırdığı gösterilmiştir.

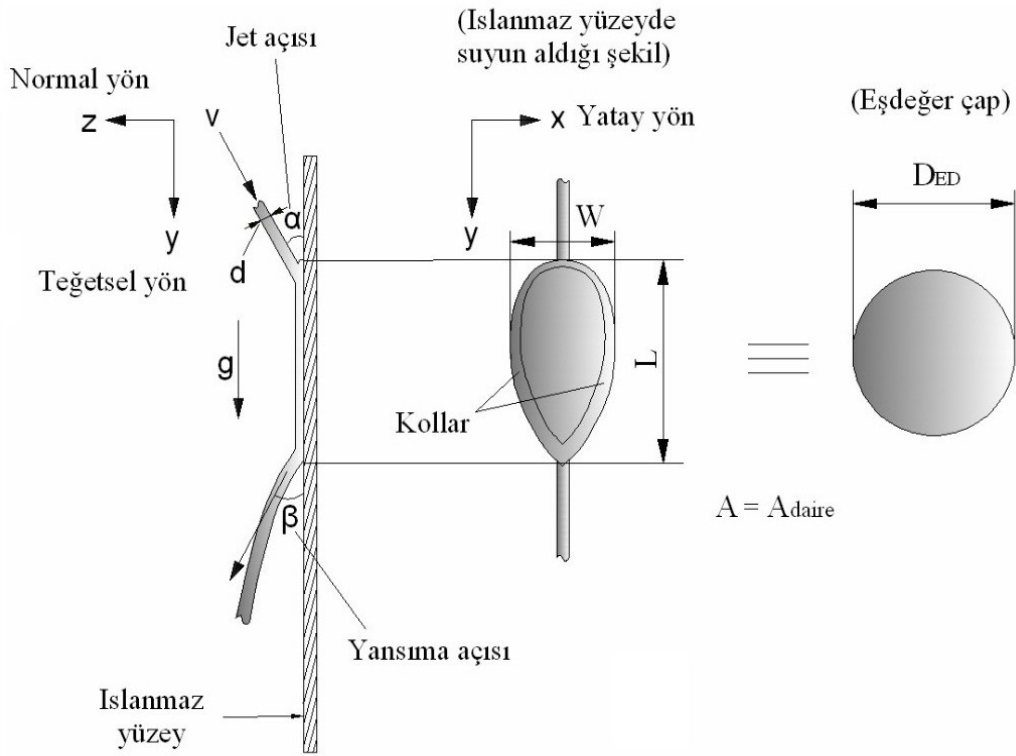


Şekil 2.13: Jetlerin çarpışması sonucu oluşan sıvı yaprakların yüksek hızlı kamerayla elde edilen görüntüleri (Miller ve diğ., 2005).

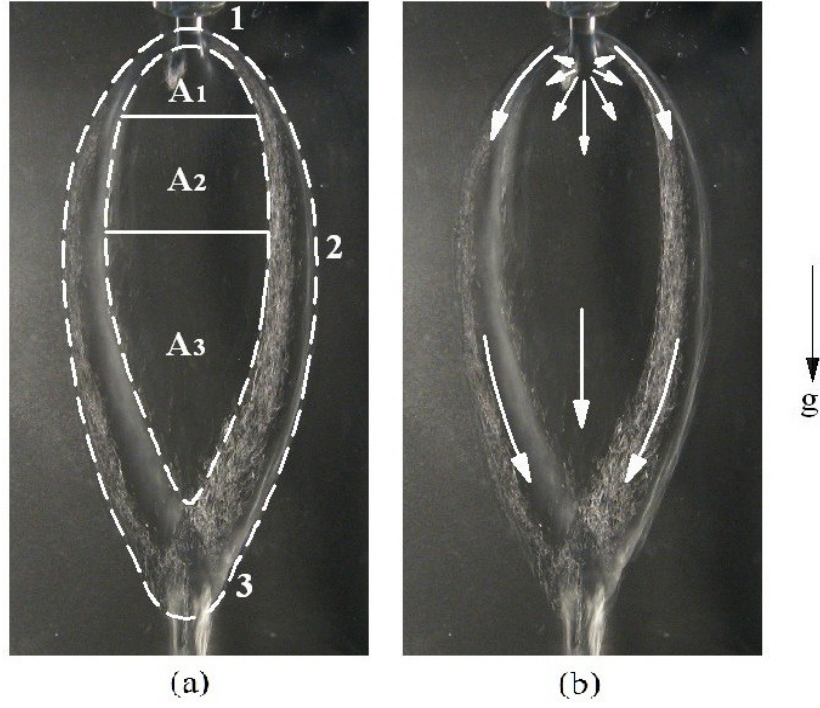
Kibar (2008), ıslanmaz yüzeyler üzerine gönderilen su jetinin davranışını deneysel olarak incelemiştir. Su jetinin plakaya çarptıktan sonraki yansıma şeklinin ve su jetinin plakaya uyguladığı kuvvetin plakanın düşeyle yaptığı açı, kontak açısı, nozul çapı ve su jeti hızıyla değişimini deneysel olarak araştırmıştır. Şekil 2.14'te çalışmada kullanılan sistemin taslağını görülmektedir. Burada  $\alpha$  açısı  $d$  çaplı su jetinin katı yüzeye çarpma açısını göstermektedir.  $\beta$  suyun katı yüzeyden yansıma açısını ifade etmektedir.  $W$  ve  $L$  sırasıyla ıslanmaz yüzey üzerinde suyun aldığı şeklin genişliği ve boyunu temsil etmektedir.  $D_{ED}$  ise eşdeğer çap olarak adlandırılmıştır. Bu çap, su jetinin yüzey üzerinde kapladığı alanla aynı alana eşdeğer dairenin çapı olarak tanımlanmıştır.

Yapılan çalışma da Şekil 2.15 a'da görüldüğü gibi yüzeyde su iki bölgede ilerlediği gösterilmiştir. Birinci bölge,  $A_1$ ,  $A_2$  ve  $A_3$  olarak isimlendirilmiş olan üç alt bölgeden oluşan ince film tabakası şeklindeki bölgedir. İkinci bölge ise ince film tabakasının etrafını saran daha kalın fakat daha düşük hıza sahip su moleküllerinin oluşturduğu kol bölgeleridir. Yayılma yüzeyinin ıslanmaz yüzey olması sebebiyle suyu itmesi ve suyun yüzey gerilimi yüzünden su jetinin yanlara doğru hareketi gitgide yavaşlamaktadır.  $A_1$  ile gösterilmiş olan bölgede suyun hızla ilerlediği ince film tabakası şeklindeki bölge görülmektedir. Yanlara doğru genişleyen su tabakası yüzey alanını da büyütmektedir. Yüzey alanı büyüdükçe su jetinin enerjisi yüzey gerilimi olarak depolanmaktadır. Bunun sonucu olarak yanlara gelen su daha fazla

ilerleyememektedir. Yanal olarak hareket edemeyen su molekülleri kenarlarda birikerek kolları oluşturmakta ve hareketlerini buradan devam ettirmektedir. Şekil 2.15 b'de görülen oklar o bölgedeki su moleküllerinin hareket yönünü göstermektedir.  $A_2$  bölgesinin sonunda artık film tabakası bölgesi en büyük genişliğine ulaşmıştır. Bu noktadan sonra yüzey gerilimi kuvvetleri daha etkin hale gelmekte ve kolları birbirine doğru yaklaştırmaya başlamaktadır.  $A_3$  bölgesinde ise yüzey alanı gittikçe azalmakta ve kollar birleşmektedir.



Şekil 2.14: Dikey olarak duran ıslanmaz yüzeyin şematik görünüşü (Kibar, 2008).



Şekil 2.15: Dikey olarak duran ıslanmaz yüzeye su akışının yüzeyde aldığı şeklin geometrisi (Kibar, 2008).

Su jetinin yüzey alanında oluşturduğu yayılmanın dairesellikten ne kadar uzaklaştığının bir ifadesi olarak Uzama Faktörü tanımlanmıştır. Bu ifade yüzeydeki ıslak alanın boyunun en büyük genişliğine oranı olarak ifade edilmiştir. ( $UF = \frac{L}{W}$ )

Elde edilen deneysel verileri kullanarak uzama faktörü için Denklem (2.3) elde etmiştir.

$$UF = 3.28 \cdot 10^{-4} (\ln Re)^{4.727} (We^{\sin \alpha})^{-0.361} (\Phi)^{0.056} (\sin \alpha)^{0.046} \quad (2.3)$$

Kang ve Ng (2006), Kang ve diğ. (2007) katı yüzeye damlanın yayılmasını araştırırken eşdeğer yayılma faktörü (EYF) adı verilen bir boyutsuz sayı kullanmışlardır. Bu çalışmalarda damla çapının, damlanın yüzeye çarptıktan sonraki yayılma çapına oranı olarak kullanılmıştır. Kibar (2008)'nin çalışmasında ise jet çapının, sıvının katı yüzeydeki yayılması sonucu meydana gelen eşdeğer çapa oranı

olarak tanımlanmıştır. Eşdeğer yayılma faktörü Denklem 2.4'te verilmiştir.

$$EYF = \frac{d}{D_{ED}} \quad (2.4)$$

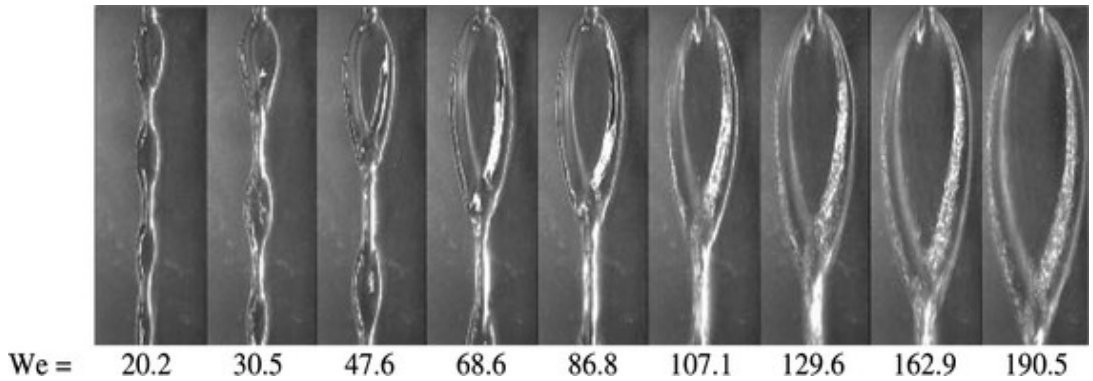
Kibar ve diğ. (2010), yaptıkları çalışma da ıslanmaz yüzeyler üzerine gönderilen su jetinin davranışını deneysel olarak incelemiştir. Kibar (2008) çalışmasındaki parametreleri kullanarak elde edilen deneysel verilerden yola çıkarak eşdeğer çapın hesaplanabilmesi için Denklem (2.5)'teki eşitlik önerilmiştir.

$$EYF = 0.219 Re^{-0.079} [We^\Phi]^{-0.313} [\Phi]^{3.637} [\sin \alpha]^{-0.682} \quad (2.5)$$

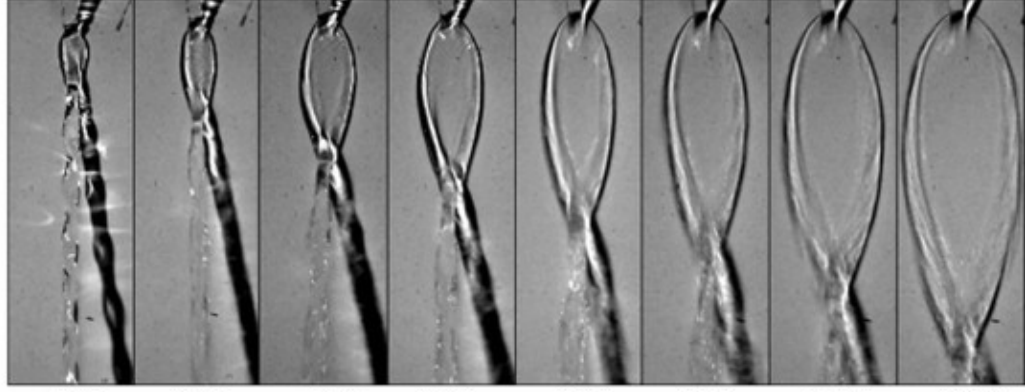
$$\Phi = 1 + \cos(180 - \theta) \quad (2.6)$$

Denklem (2.5)'teki  $\Phi$  ifadesi, Denklem (2.6)'da verilmiştir. Denklem (2.5)'te görüleceği üzere EYF değeri 5 farklı değişkene bağlıdır. Bu değişkenler; nozul çapı, Weber sayısı, Reynolds sayısı, kontak açısı ve jet açısıdır.

Şekil 2.16 ve Şekil 2.17'da yapılan çalışmada görüntülenen yayılma olayı verilmiştir. Burada görüldüğü gibi su jeti hızı arttıkça suyun yüzey alanında yayılması artmaktadır. Bu da eşdeğer çapın artması olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2.16: Su jetinin ıslanmaz yüzey üzerindeki yayılma olayının ve su zinciri oluşumunun We sayısı ile değişimi ( $\theta=112^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $d=1.75$  mm) (Kibar, 2010).



We = 14.6 23.6 43.5 58.3 75.3 94.5 123.4 156.2  
 Şekil 2.17: Su jetinin süper ıslanmaz yüzey üzerindeki yayılımının We sayısı ile değişimi.  
 ( $\theta=167^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $d=1.75$  mm) (Kibar, 2010).

Kibar ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada, süperıslanmaz bir yüzey üzerine gelen su jetinin yüzey üzerin uyguladığı viskoz kuvvetleri de ölçülmüştür. Yapılan deneysel ölçümlerden elde edilen verilerden oluşturulan korelasyon sonucu Denklem (2.7) elde edilmiştir.

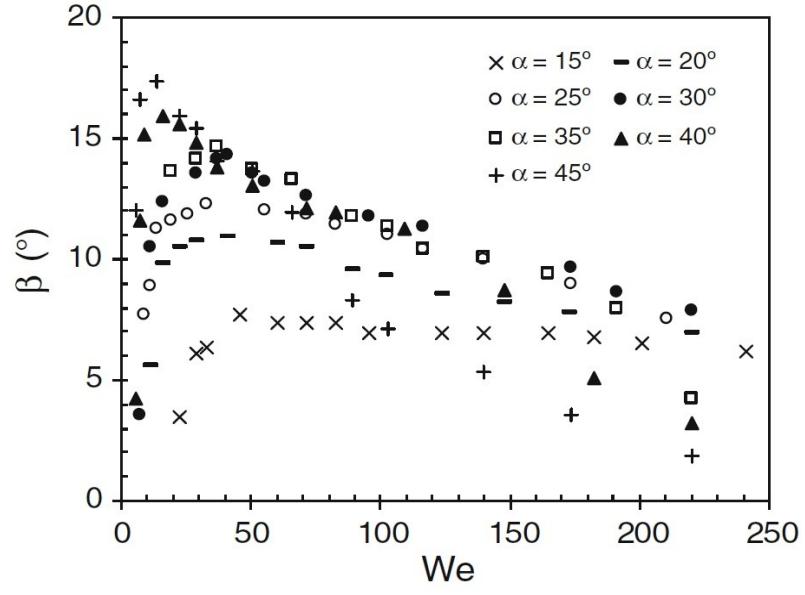
$$\frac{F_y}{M_{jet}} = 0.911 Re^{0.481} We^{-0.524} \Phi^{-7.188} (\sin \alpha)^{0.529} \left( \frac{d^2}{D_{ED}^2} \right)^{-0.690} \quad (2.7)$$

Burada  $M_{jet}$  ifadesi jet momentumunun düşey bileşenini ifade etmektedir ve Denklem (2.8) verilmiştir.

$$M_{jet} = \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \rho V^2 \cos \alpha \quad (2.8)$$

Denklem (2.7)'nin oluşturulması için sadece süper ıslanmaz yüzeydeki ( $\theta = 167^\circ$ ) veriler kullanılmıştır.

Ayrıca bu çalışmada yansıma açısının jet hızı ile yansıma açısı arasında bir ilişki olduğu ortaya konmuştur. Şekil 2.18'den görüldüğü gibi yansıma açısı bir tepe noktasından geçmekte daha sonra Weber sayısının büyümesiyle yansıma açısı azalmaktadır. Jet açısı arttıkça bahsi geçen tepe noktasının Weber sayısı değeri düşmektedir.



Şekil 2.18: Yansıma açısının Weber sayısı ve Jet açısıyla değişim grafiği ( $\theta=167^\circ$ ,  $d=1.75$  mm) (Kibar ve diğ., 2010).



### BÖLÜM 3. SAYISAL MODEL

Bu bölümde sayısal çözümde kullanılan genel denklemler ve modeller tanıtılmıştır. Bunun yanında fiziksel modelin tanıtımı ve ağ yapısı gösterilmiş sınır koşulları ve malzeme özellikleri verilmiştir.

#### 3.1. Akışkan Hareketinin Genel Denklemleri

Akış alanı içerisinde seçilen bir kontrol hacmi  $V$ , kontrol hacminin yüzeyleri  $S$  olarak tanımlansın. Süreklilik denklemi, kontrol hacminin sınırlarından net olarak geçen kütle akısının, kontrol hacmi içindeki madde miktarının değişim hızına eşit olduğunu gösterir. Bu denkleme kütle korunumu adı da verilir. Süreklilik denklemi,  $\vec{V}$  hız alanını ve  $\vec{n}$  kontrol yüzeyine dik birim vektörünü göstermek üzere Denklem (3.1)'de tanımlanmıştır.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS = 0 \quad (3.1)$$

Newton'un ikinci hareket kanununu sonsuz küçük sabit bir kontrol hacmine uygularsak lineer momentumun zamana bağlı olarak değişimi kontrol hacmine etki eden dış kuvvetlerin toplamına eşittir. Bu durum Denklem (3.2) ile ifade edilen momentum denklemdir.

$$\frac{d}{dt} (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \sum \vec{F} \quad (3.2)$$

Kontrol hacmine etki eden kuvvetler hacimsel kuvvetler ve yüzey kuvvetleri olarak ikiye ayrılır. Kontrol hacminin yüzeylerine gelen basınç ve kayma gerilmeleri yüzeysel kuvvetleri temsil etmektedir. Yerçekimi, manyetik alan vb. kuvvetler

hacimsel kuvvetleri temsil etmektedir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlerinde bu denklemlere ek olarak enerji denklemi de çözülmektedir. Fakat bu tez kapsamında ele alınan problemde ısı geçişi gerçekleşmemesi sonucunda bu denklemi çözmeye gerek kalmamaktadır.

### 3.2. Kullanılan Çözüm Metodları

HAD çözümlerinde, çözücü aşamasında gerekli denklemlerin sayısal hesaplanabilmesi için bu denklemlerdeki diferansiyel terimler basit aritmetik işlemlere dönüştürülür. Süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin iteratif olarak çözülmesi gerekmektedir. Bu işlemin yapılabilmesi için bazı çözüm algoritmaları ile ilgili belirlemeler yapılmalıdır.

Bu tez kapsamında ele alınan problemde basınç ayrıklaştırması için *body force weighted* yöntemi kullanılmıştır. Çünkü ele alınan konuda iki fazlı bir akış incelendiğinden yoğunlukta ani bir değişim bulunmaktadır. Bu tür basınç ve yoğunlukta ani değişim görülen problemlerde ve iki fazlı akışın bulunduğu problemlerde *body force weighted* önerilmektedir (Başyazıcı, 2007). Basınç hız eşleştirmeleri için *PISO* algoritması kullanılmıştır. *PISO* algoritması zamana bağımlı olmayan sıkıştırılamaz akışların iteratif olmayan hesaplamaları için geliştirilmiş, daha sonra zamana bağlı akışların iteratif çözümlerine uygulanmıştır (Versteeg ve Malalasekera, 1995). Momentum denklemlerinin ayrıştırılması için *Third Order MUSCL* kullanılmıştır. İki fazlı akışı modellemek için *Volume of Fluid (VOF)* modeli kullanılmıştır. Akışın laminar olduğu kabul edilmiştir.

### 3.3. Volume of Fluid (VOF) Modeli

VOF (Volume of Fluid) modeli birden fazla akışkanın birbiriyle karışmadan aktıkları durumlarda ara yüzeyi modellemek için geliştirilmiş bir yöntemdir. VOF metodunda her faz için her kontrol hacminde bir hacimsel fraksiyon katsayısı tanımlanır. Her hücre için bu oranların toplamı bire eşittir. Böylelikle hücre ya tek bir fazdan oluşur

veya fazların bir arada bulunduğu ara yüzey bölgesini temsil eder. Şekil 3.1'de görülen bir ağ sisteminde mavi renk q akışkanını temsil etsin. Bu akışkanın her bir hücredeki hacimsel fraksiyon katsayısı da  $\alpha_q$  ile gösterilirse ortaya üç koşul çıkmaktadır.  $\alpha_q=0$  ise o hücrede q akışkanı bulunmamaktadır.  $\alpha_q=1$  ise hücre tamamen q akışkanı ile doludur.  $0 < \alpha_q < 1$  ise hücre kısmen q akışkanı ile doludur ve başka bir akışkanla ara yüzeyi temsil etmektedir. Burada  $\alpha_q$ 'nin değerine bağlı olarak her bir kontrol hacmi için fiziksel özellikler belirlenir (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009).

1	1	1	.68	0	0
1	1	1	.42	0	0
1	1	.92	.09	0	0
1	.85	.35	0	0	0
.31	.09	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

Şekil 3.1:  $\alpha_q$  değerinin sayısal ağ içindeki konumu

Çözümde kullanılacak özellikler, her bir kontrol hacminde bulunan fazların özellikleri kullanılarak belirlenir. Örnek olarak iki fazlı bir denklemde akışkanları 1 ve 2 olarak adlandıırırsak her bir hücre için yoğunluk Denklem (3.3) ile hesaplanır.

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (3.3)$$

Genelleme yapacak olursak, n fazlı bir sistem için hacimsel fraksiyona göre ortalama yoğunluk (volume-fraction-averaged density) Denklem (3.4)'te verilmiştir.

$$\rho = \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \quad (3.4)$$

Herhangi bir diğler özellik (örn. Viskozite) Denklem (3.5)'te verilen genel denklemden hesaplanır. Burada  $\phi$  hesaplanmak istenen fiziksel özelliği belirtmektedir.

$$\phi = \sum_{i=1}^n \alpha_i \phi_i \quad (3.5)$$

VOF modeli ile her bir hücre için bir adet momentum ve bir adet enerji denklemi çözülr. Aynı hücre de birden fazla faz bulursa bile Denklem (3.5) kullanılarak o hücre için fiziksel özellikler belirlenir ve momentum ve enerji denklemleri bu özellikler üzerinden çözülr.

#### **3.4. Arayüzey Geometrisinin Tespiti**

VOF modeli kullanılırken gerekli özelliklerin hesaplanması için arayüzeyin geometrisi bilinmelidir. Bu arayüzeyin oluşturulması için FLUENT iki model kullanmaktadır. Bunlar: Geometrik yeniden yapılandırma (Geometric Reconstruction Scheme – Geo-Reconstruct) ve Alıcı – verici şeması (Donor Acceptor Scheme).

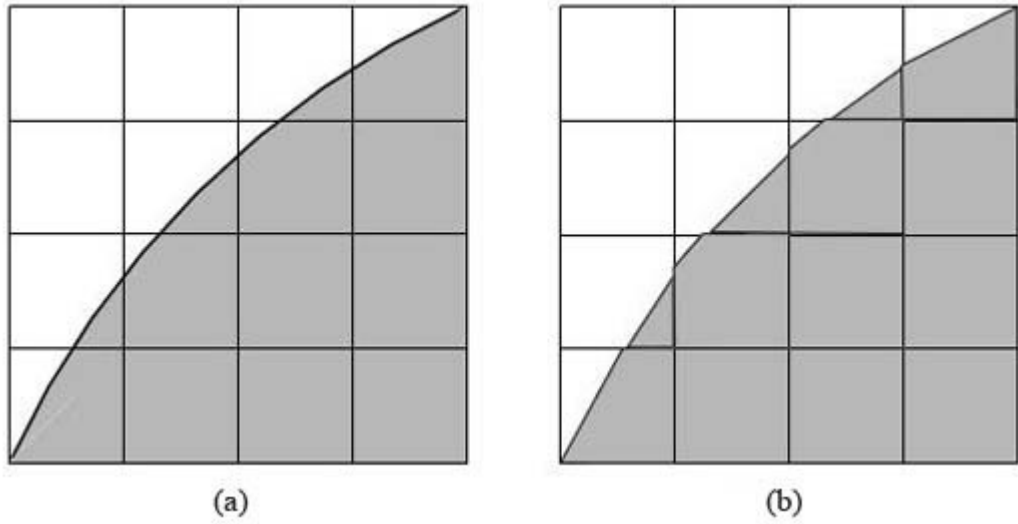
Sayısal çözümlerinde bir hücre sadece tek bir akışkanla dolu ise bu hücreye giren ve çıkan akışkanların özelliklerini hesaplamak için standart denklemler kullanılır. Eğer hücre iki akışkanın beraber bulunduğu bir hücre ise bu hücreleri birbirinden ayıran yüzeyi bulmak için Geometrik yeniden yapılandırma şeması kullanılır. Geometrik yeniden yapılandırma şeması ile oluşturulan yüzey gerçek arayüzeyi lineer parçalı şekilde modeller. Bu şema kullanılan paket programın yapısal olmayan sayısal çözümlerinde geometri için önerdiği ve en çok kullanılan şemadır. Bu şema Youngs'ın 1982 yılında yayınladığı “Time-Dependent Multi-Material Flow with Large Fluid Distortion” çalışmasından genellenmiştir.

Bu yöntem kullanılırken ilk adım her bir parçalı şekilde dolmuş olan hücrenin merkezine göre lineer arayüzey çizgisinin hesaplanmasıdır. Bu hesaplama hacimsel fraksiyon ve ondan türetilen değerler kullanılarak yapılır. İkinci adım hücre

yüzeyinden olan adveksiyonun arayüzeyin lineer geometrisi ile hücredeki teğetsel ve normal hız dağılımı kullanılarak belirlenmesidir. Üçüncü adım ise bir önceki zaman adımındaki değerler ile her bir hücredeki akış dengesi yazılarak hacimsel fraksiyon oranının yeniden hesaplanmasıdır.

Geometrik yeniden yapılandırma şemasının kullanılabilmesi için çözümün zamana bağlı olması gereklidir, aksi halde çözüm yapılamaz.

Şekil 3. 2 a'da gerçek bir arayüzey görülmektedir. Şekil 3. 2 b'de ise bu arayüzeyin geometrik yeniden yapılandırma şeması kullanılarak oluşturulmuş hali gösterilmektedir.



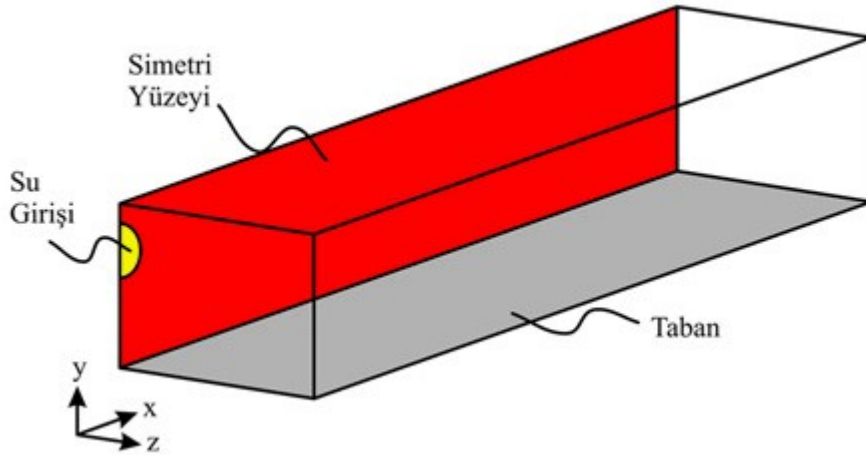
Şekil 3.2: Arayüzey Hesaplamaları. (a) Gerçek arayüzey geometrisi. (b) Geometrik yeniden yapılandırma şeması kullanılarak doğrusal parçalı arayüzey düzenlemesi.

### 3.5 Sınır Koşulları ve Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Kibar ve diğ. (2010)'nin yapmış olduğu deneysel çalışmaların sonuçları ışığında sayısal çözümlerin elde edileceği modelin geometrik büyüklükleri Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, 40 mm boyunda, 8 mm genişliğinde ve 6 mm yüksekliğinde seçilmiştir. Şekil 3.3'te gösterilen geometri problemin akış doğrultusunda simetrik olduğu kabulüyle elde edilmiş geometridir. Şekilde gösterilen geometri çözülmek

istenen problemin yarı hacmini göstermektedir. Bu kabul problem çözümünü kolaylaştırmak ve hızlandırmak amacıyla yapılmıştır. Şekil 3.3'te gösterilen simetri yüzeyinde bütün fiziksel özelliklerin türevleri sıfır olarak alınmıştır.

Şekilde sarı renkli olarak çizilmiş, yarım elips şeklindeki yüzey su girişi olarak adlandırılmıştır. Su jetinin çıktığı boru dairesel olmakla birlikte 30°'lik açıyla gelmesi sonucu kesişim bölgesi eliptik şekil almaktadır. Su girişi olarak tanımlanmış bölgede sınır koşulu olarak suyun giriş hızı (velocity inlet) tanımlanmıştır. Su giriş hızları için Tablo 3.1'de verilen 13 farklı değer kullanılmıştır. Şekil 3.3'te gri renkle gösterilmiş olan taban kısmı katı yüzey olarak tanımlanmış ve su – hava arayüzeyinin katı ile temas noktası için bu yüzeyde kontak açısı tanımlanmıştır. Islanmaz yüzeylerden kontak açısı için iki farklı değer (112° ve 167°) seçilmiştir. Kırmızı renkle görülen yüzey ise simetri yüzeyi olarak tanımlanmıştır. Bu yüzeyler dışında kalan yüzeylerde ise sınır koşulu tipi ise atmosfere açık serbest yüzey olarak tanımlanmış ve etkin basınç değeri 0 olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.3: Sayısal çözüm için oluşturulan model

Kullanılan VOF modelinde zaman adımları küçük tutulması çözümün doğruluğunu etkilemektedir. Bu sebeple çözüm sırasında her bir zaman adımı,  $\Delta t = 10^{-5}$  s olarak alınmıştır.

Tablo 3.1: Hesaplama da kullanılan hız değerleri (m/s)

	112°	167°
1	0.901	0.763
2	1.109	0.971
3	1.387	1.317
4	1.664	1.525
5	1.872	1.733
6	2.08	1.941
7		2.218

Probleme etkili olan parametrelerden biri de yüzey gerilimidir. Yüzey gerilme değeri Tablo 3.2'de verildiği gibi tanımlanmıştır. Taban yüzeyi duvar olarak tanımlanmış ve diğer önemli parametre olan kontak açısı Tablo 3.2'de verildiği gibi tanımlanmıştır. Tablodaki değerler Kibar ve diğ. (2010) çalışmasındaki deneysel koşullarda ölçülen değerlerdir. Suyun fiziksel özelliklerindeki değişim deneylerin farklı zamanlarda yapılmış olmasından kaynaklanmaktadır. Sayısal sonuçlardaki değerlerin, deneysel sonuçlardaki değerlerle sağlıklı olarak karşılaştırılabilmesi amacıyla o deney grubunda kullanılan suyun özellikleri kullanılmıştır. Başlangıç durumunda bütün hacmin hava ile dolu olduğu tanımlanmıştır. Havanın yoğunluğu  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , viskozitesi ise  $1.7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$  olarak alınmıştır.

Tablo 3.2: Sayısal çözümde kullanılan fiziksel özellikler

$\theta$	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$\mu \text{ (kg/ms)}$	$\sigma \text{ (n/m)}$
112°	999.2	0.00148	0.0706
167°	999.2	0.00162	0.0697

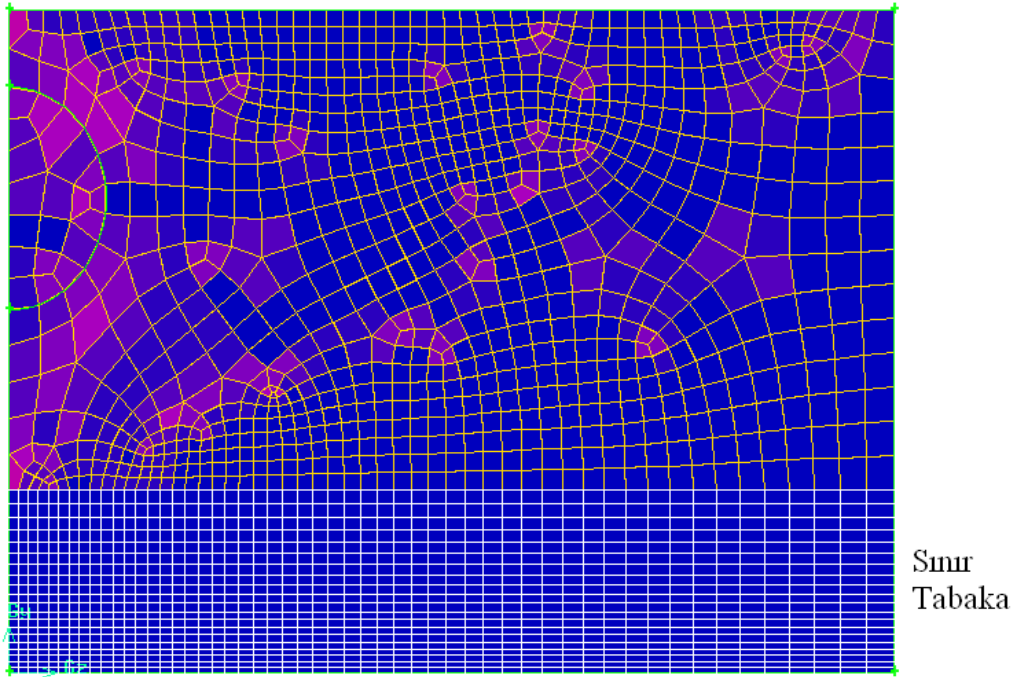
Analiz zamana bağlı olarak yapılmaktadır. Zamana bağlı analizlerde çözümün doğru olabilmesi için zaman adımının doğru seçilmesi gereklidir. Courant sayısı zaman adımı ile ağ boyutu arasında bir bağlantı kurulmasını sağlar. Courant sayısı Denklem (3.9)'da verilmiştir. Courant sayısı boyutsuz bir sayıdır ve problemdeki ağ yapısı ile seçilen zaman adımının uygunluğunu belirler. Courant sayısının 0.25 olması tavsiye edilmekle birlikte birden küçük olması yeterlidir.

$$C = \frac{V \Delta t}{\Delta x} \quad (3.6)$$

V akışkan faz hızını,  $\Delta x$  en küçük mesh boyunu,  $\Delta t$  ise zaman adımını belirtmektedir.

### 3.6. Sayısal Çözüm Ağının Oluşturulması

Problem geometrisi için oluşturulan sayısal ağ 538005 adet hexahedral hücre içermektedir. Çözüm hassasiyetini arttırmak amacıyla Şekil 3.4'te görüldüğü gibi bir sınır tabaka ağı oluşturulmuştur. Sınır tabaka oluşturulacak kenar üzerinde 53 nokta belirlenmiştir. Aradaki mesafeler, herbir aralık bir öncekinin 0.98 katı olacak şekilde, simetri yüzeyine doğru sıklaşacak biçimde seçilmiştir. İlk ağ elemanının yüksekliği 0.05 mm olup 1.05 büyütme faktörü ile 20 elemanlık bir sınır tabaka oluşturulmuştur. Geri kalan ağ yapısı ortalama kenar uzunluğu 0.2 mm olacak şekilde seçilmiştir. Bunun sonucunda oluşan ağ yapısında en küçük ağ hacmi  $3.77 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3$ , en büyük ağ hacmi ise  $2.08 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3$  olarak meydana gelmiştir.

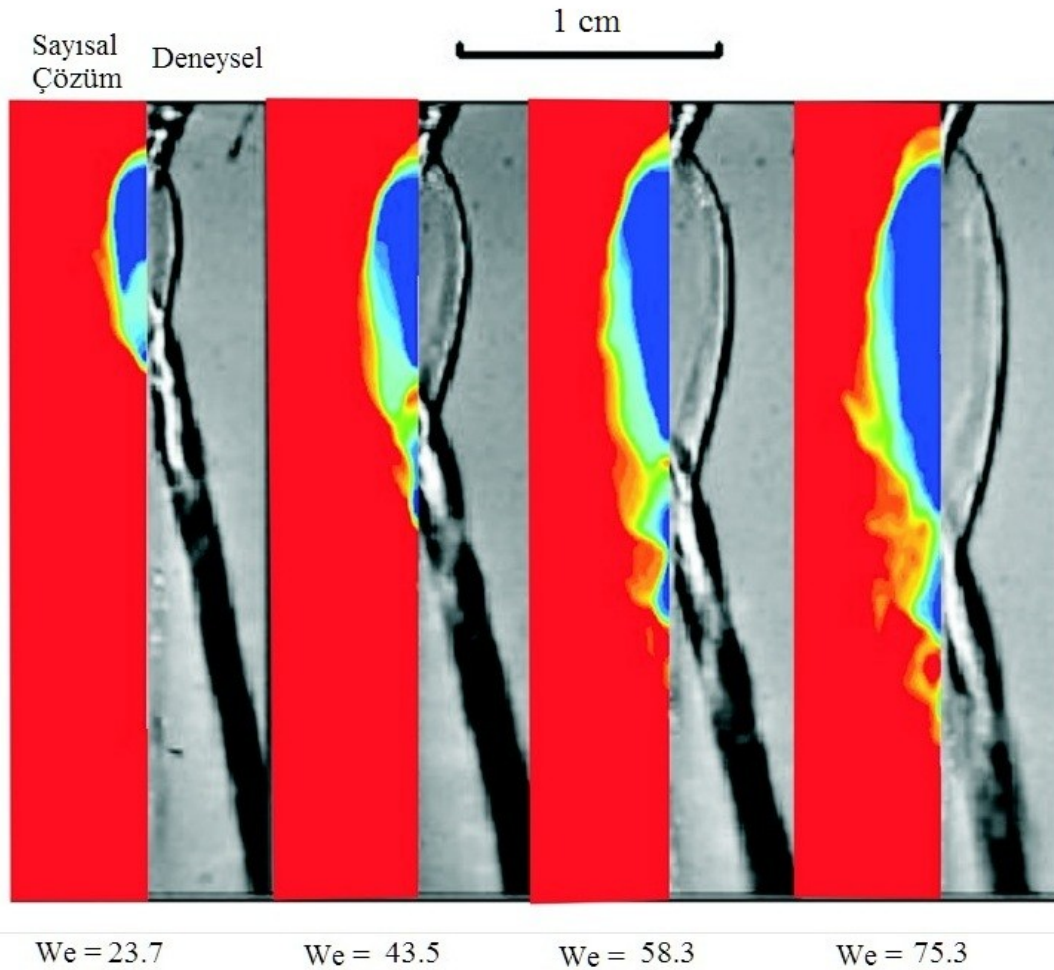


Şekil 3.4: Modelin giriş kesitindeki ağ yapısı görünümü



#### BÖLÜM 4. ANALİZ SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMA

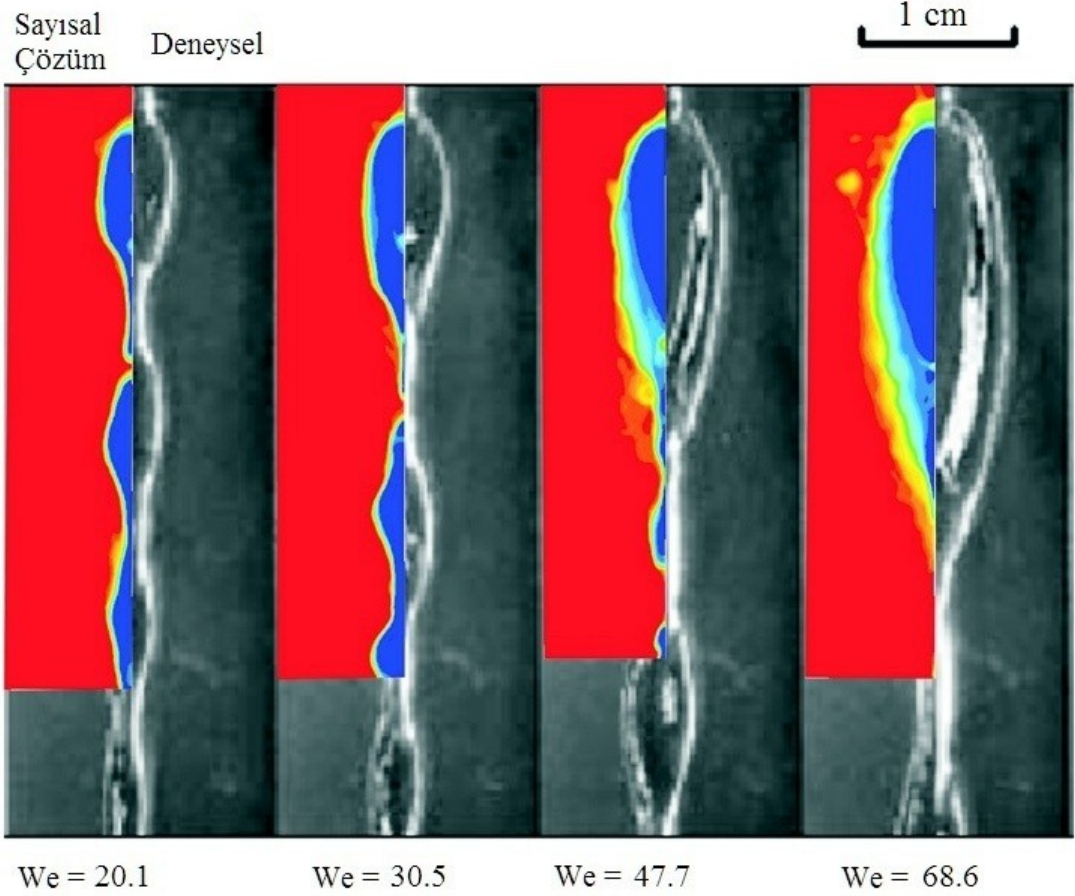
Bu tez çalışması kapsamında Şekil 2.4'te gösterildiği gibi düşey olarak tespit edilmiş ıslanmaz yüzey üzerine gönderilen su jetinin davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Su jeti  $\alpha = 30^\circ$  sabit açıyla yüzeye çarpmıştır. Hesaplamalar kontak açısı  $\theta$ ,  $112^\circ$  ve  $167^\circ$  olan iki farklı yüzey için yapılmıştır. Jet çapı  $d = 1.75$  mm'dir. Tablo 3.1'de verildiği gibi 13 farklı hız değeri için hesaplamalar yapılmıştır. Daha sonra bu sonuçlar literatürdeki deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.1: Su jetinin yayılımının sayısal çözümünün deneysel verilerle karşılaştırılması ( $\theta=167^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $d=1.75$  mm)

Şekil 4.1'de kontak açısı  $167^\circ$  olan bir yüzey üzerine gönderilen dört farklı su jetinin sayısal olarak elde edilen yayılma görüntüleri, literatürdeki deneysel çalışmalardan (Kibar ve diğ. 2010) elde edilen görüntülerle birlikte verilmektedir. Burada sayısal çözümden elde edilen görüntülerde su jetinin yüzeye çarparak yüzeyde yayıldığı, daha sonra toplanarak yüzeyden yansıdığı görülmektedir. Yansıma olayı ıslanmaz olmayan sıradan yüzeylerde görülmeyen bir olaydır. Aynı şekilde deneysel sonuçlarda da benzer bir davranış görülmektedir. Sayısal olarak elde edilen yayılma alanları ile literatürde deneysel olarak elde edilen yayılma alanlarının tutarlı olduğu görülmektedir. Weber sayısının artmasıyla, akışkanın yüzeyde kapladığı alanın hem deneysel hem de sayısal sonuçlarda birbiriyle uyumlu olarak arttığı görülmektedir.

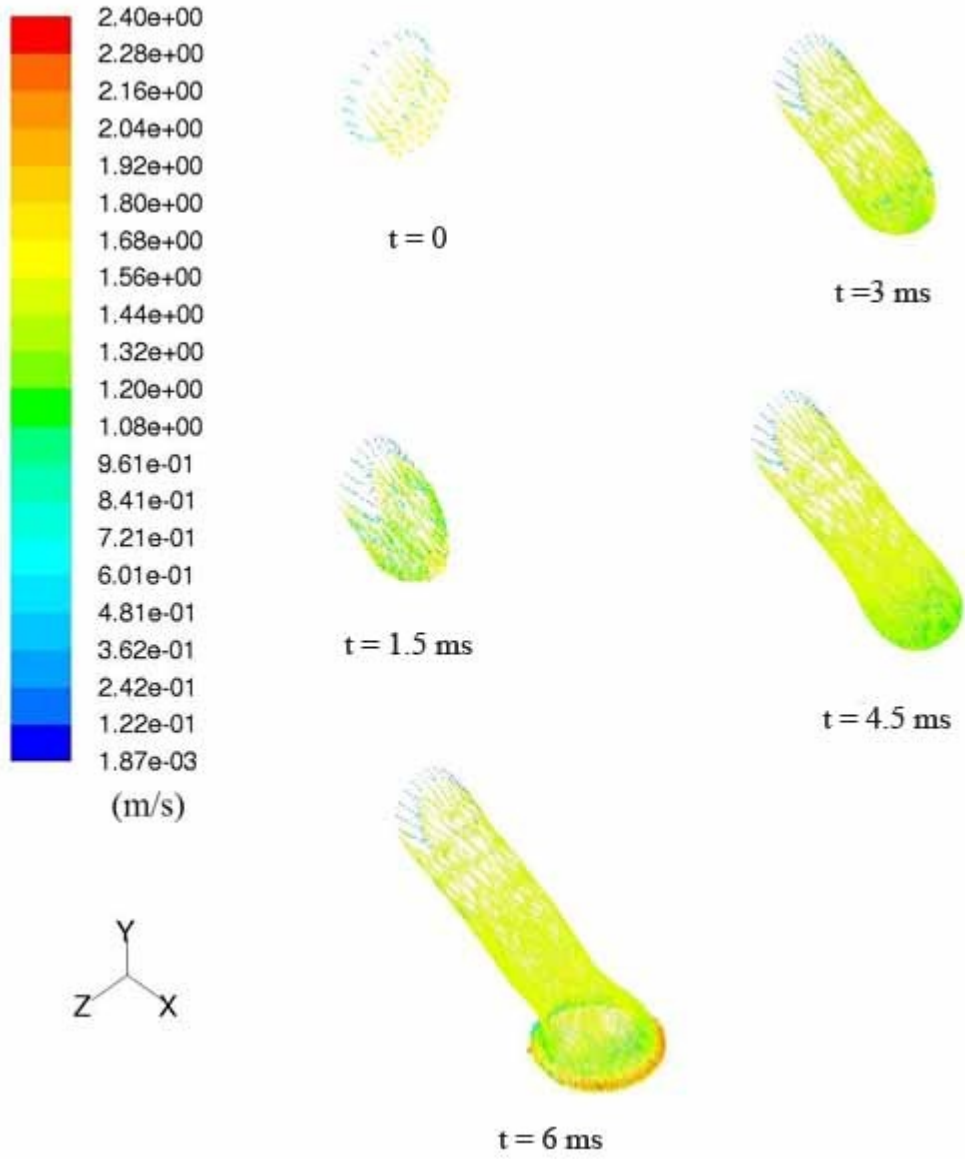
Şekil 4.2'de ise daha düşük kontak açılı ( $\theta = 112^\circ$ ) bir yüzey üzerine gönderilen su jetinin davranışı gösterilmiştir. Şekil 4.2'de de sayısal ve deneysel sonuçlar (Kibar ve diğ. 2010) dört farklı Weber sayısı için birlikte verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi su jeti yüzeye çarptıktan sonra yüzey üzerinde yayılmaktadır. Fakat kontak açısı  $\theta = 167^\circ$  için elde edilmiş sonuçlardan farklı olarak bu yüzeyde yansıma gerçekleşmemektedir. Yüzeyin ıslanmazlık özelliği sayesinde Şekil 4.2'de görüldüğü gibi yüzeyde yayılan su jeti yeniden toplanarak yüzeyden yükselmeye çalışmakta fakat yüzeyden yansımak için yeterli enerjisi olmayan su jeti tekrar yüzeye çarpmakta ve ikinci defa ve hatta tekrarlayan yayılmalar yaptığı görülmektedir. Akışkanın yüzeyde kapladığı alanın Weber sayısıyla arttığı görülmektedir.



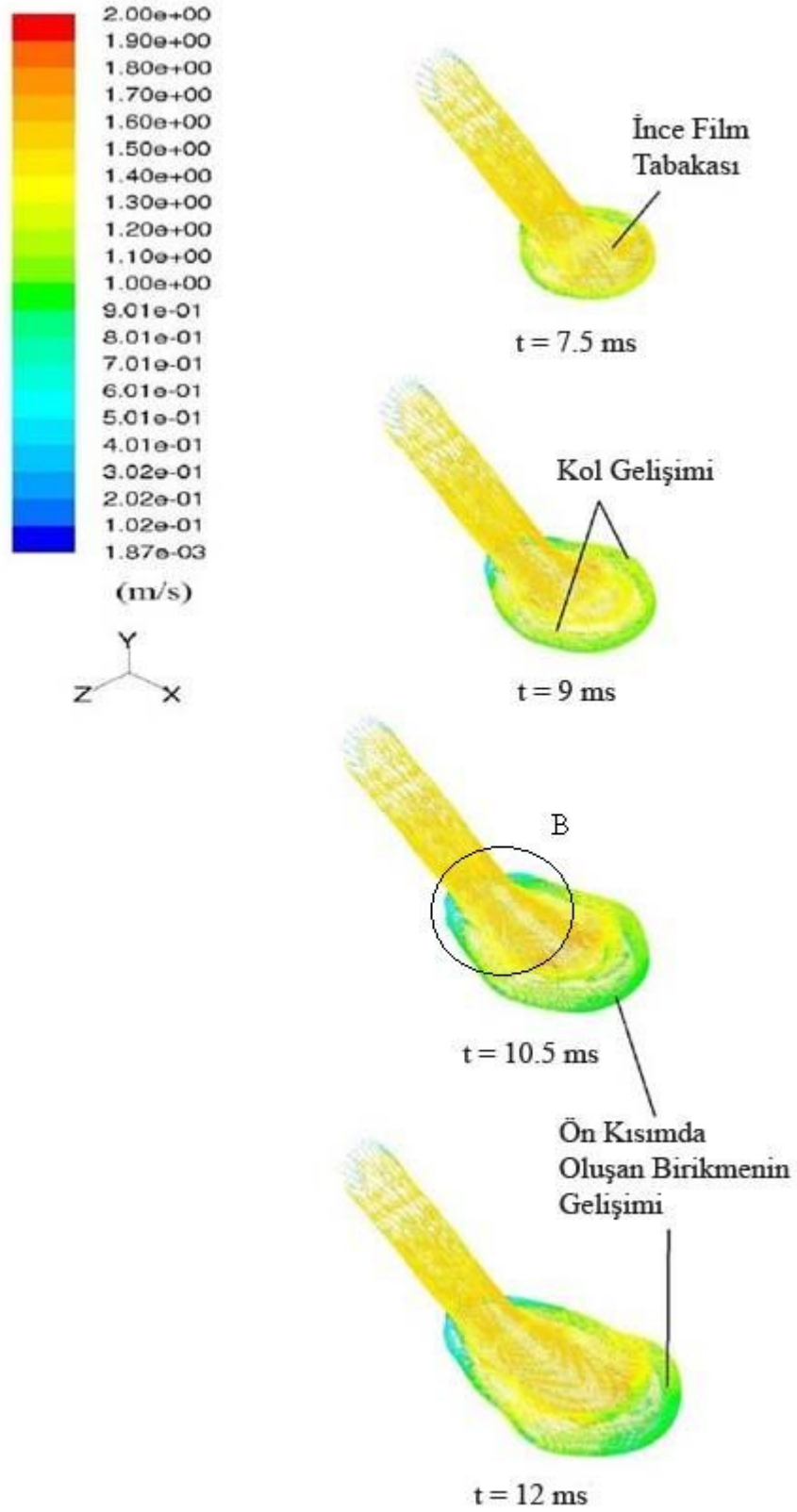
Şekil 4.2: Su jetinin yüzeydeki yayılımının sayısal çözümünün deneysel verilerle karşılaştırılması ( $\theta=112^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $d=1.75$  mm)

Islanmaz malzemeyle kaplı yüzeye su jeti gönderildiği takdirde suyun davranışı atalet kuvvetleri, yüzey gerilim kuvvetleri ve viskoz kuvvetlerinin etkisi altında değişmektedir. Yüzeye  $30^\circ$  açıyla gönderilen su jetinin, yüzeye dik yönde sahip olduğu atalet sayesinde yüzeye çarparak radyal şekilde yayılmaktadır. Bu hareketin zamanla değişimi sayısal olarak incelenmiştir. Şekil 4.3'te kontak açısı  $167^\circ$  olan yüzey üzerine gönderilen  $1.525$  m/s hızındaki su jetinin yüzey üzerindeki hareketinin zamanla gelişiminin üç boyutlu görüntüsü görülmektedir. Su jetinin Şekil 3.3'te gösterilen su giriş kısmındaki hız dağılımının üniform şekli, Şekil 4.3'te  $t = 0$  ms'de görülmektedir. Zaman ilerledikçe yüzey gerilmesi sebebiyle su jetinin ön kısmı  $t = 1.5$  ms'den itibaren Şekil 4.3'te görüldüğü gibi küresel bir şekil almaktadır. Su tabana  $t = 6$  ms anında çarpmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi yere çarpma anında yanlara doğru radyal olarak genişleyen suyun hızı  $2.4$  m/s mertebelerine ulaşarak geliş hızından ( $1.525$  m/s) daha büyük değerlere ulaştığı görülmektedir. Şekil 4.4'te t

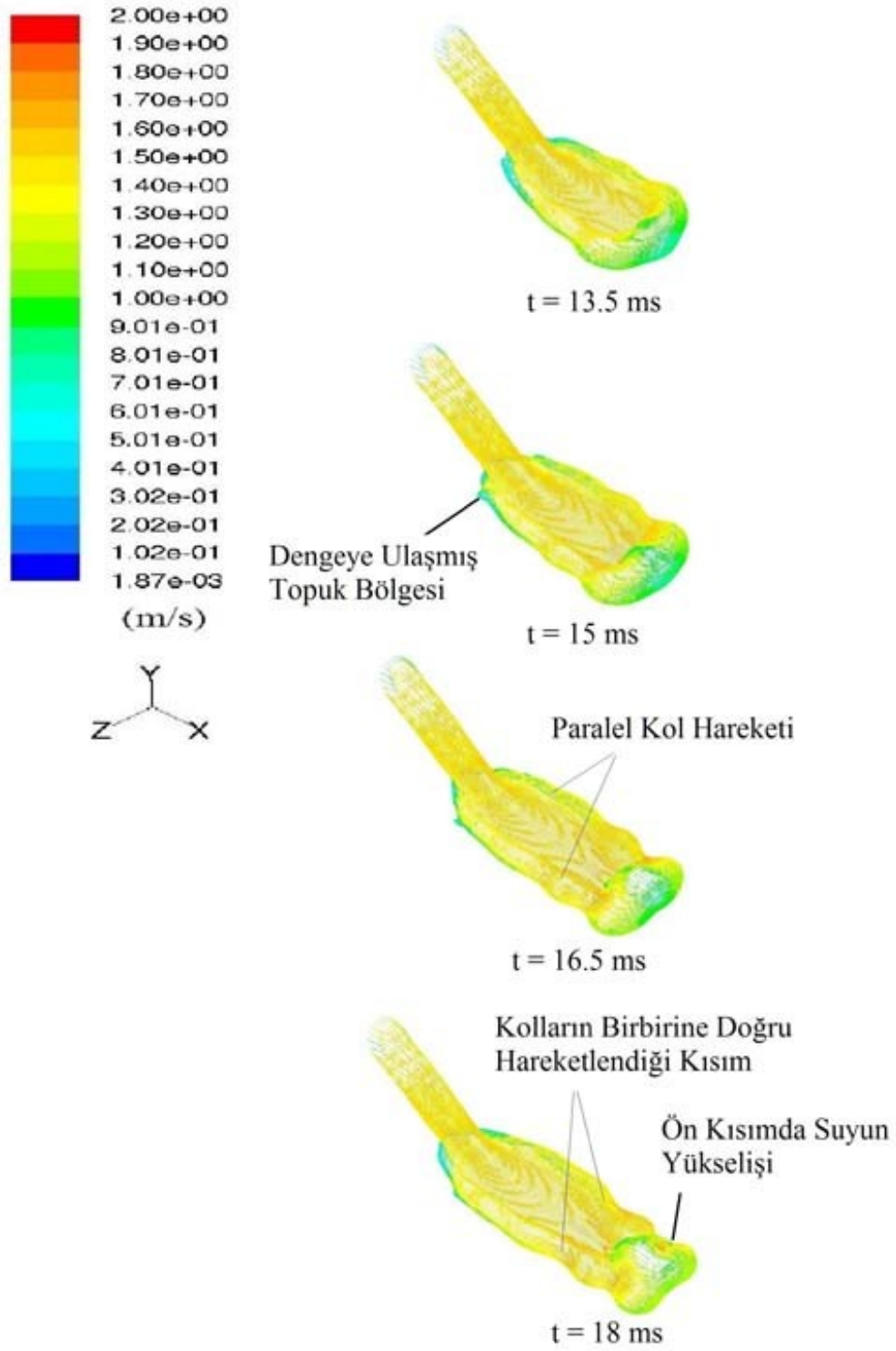
= 7.5 ms'de su jetinin yüzey üzerindeki yayılması genişledikçe çarpma anında ulaşılan hız değerleri düşmektedir. Yüzeyin süper ıslanmaz olması sebebiyle su jeti yüzey üzerinde kolaylıkla yayılamamaktadır. Örneğin  $t = 9$  ms için verilmiş sonuçlarda görüleceği gibi su jetinin ön bölgesinde su hızının 0.9 m/s mertebelerine düştüğü görülmektedir. Su jetinin yüzeye çarptığı bölgede, jetin gidiş yönünün tersi yönünde de su hareketi vardır. Bu ilgili şekillerde jetin arka kısmındaki topuk şeklindeki su birikiminden görülebilir. Fakat bu geri yöndeki hareket, yüzey gerilmesi ve yüzeyin ıslanmazlık özelliği sayesinde çok ilerleyemeden geri dönmekte ve kollara katılarak ana akımla birlikte akmaktadır. Yüzey üzerinde kolaylıkla ve üniform olarak ilerleyemeyen su jetinin etrafında Bölüm 2.4.2'de bahsedilen kollarin oluşmaya başladığı görülmektedir. Su akıntısının ön kısmı  $t = 10.5$  ms'den itibaren yükselmeye başlamaktadır. Şekil 4.4'te  $t = 12$  ms'de B çemberi içerisindeki su akıntısının davranışı bundan sonraki süreçlerde değişim göstermemektedir. İlerleyen zamanla birlikte söz konusu bu bölgede yani Bölüm 2.4.2'de bahsedilen A<sub>1</sub> bölgesinde bir değişim görülmeyecektir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi  $t = 15$  ms'de birbirine paralel olarak ilerleyen kollar arasında oluşmuş ince film tabakası görülmektedir. Kollar  $t = 16.5$  ms'den itibaren birbirlerine doğru hareketlenerek ince film tabakasının genişliğini azaltmaya başlamaktadırlar. Aynı şekilde  $t = 18$  ms'de su jetinin kollarının birbirine yaklaşmasıyla yüzey gerilimi olarak depolanan enerjinin atalet dönüşmesi sonucu su jetinin ön bölgesindeki suyun yükseldiği görülmektedir. Şekil 4.6'da  $t = 19.5$  ms ve  $t = 21$  ms karşılaştırıldığında kolların birleşmesiyle su jetinin ilerleyemediği ve ön kısımda biriken su kütesinin yüzey üzerinde yükselmesinin arttığı görülmektedir. Aynı şekilde  $t = 24$  ms'de ise su jetinin yüzey üzerine ilerlemesi durmaktadır. Ön kısımda biriken su kütlesi yansıma için yeterli enerjiye sahip olduğundan yüzeyden ayrılarak yalnızca ıslanmaz yüzeylerde görülen yansıma olayını gerçekleştirmektedir.



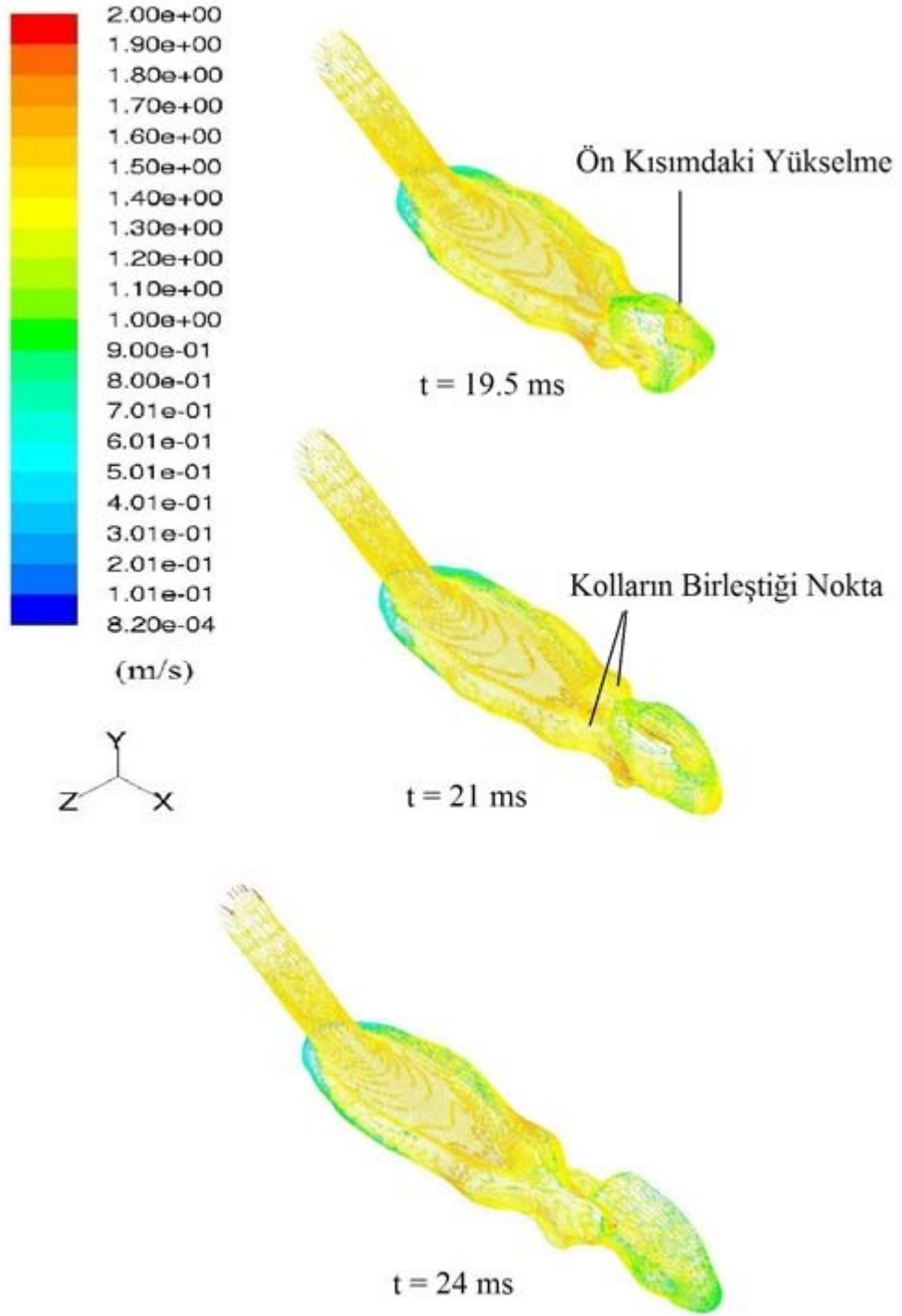
Şekil 4.3: Kontak açısı  $167^\circ$  olan yüzeye gönderilen  $1.525 \text{ m/s}$  hızındaki su jetinin yüzey üzerindeki hareketinin zamanla gelişimi



Şekil 4.4: Kontak açısı 167° olan yüzeye gönderilen 1.525 m/s hızındaki su jetinin yüzey üzerindeki hareketinin zamanla gelişimi.



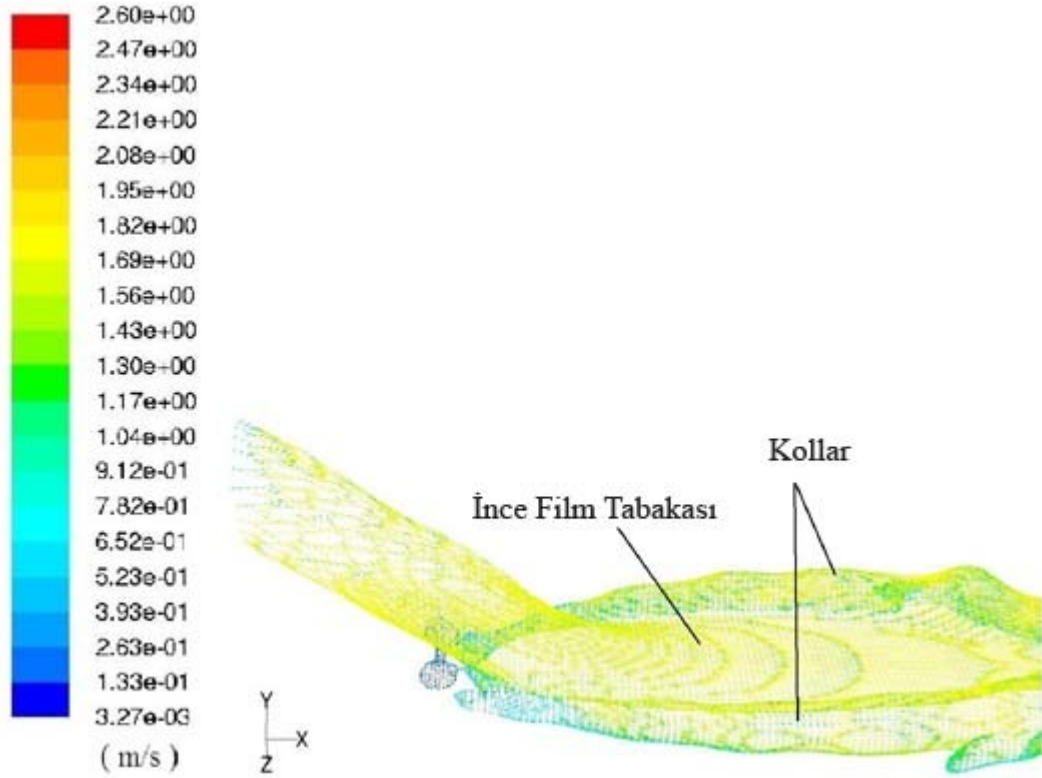
Şekil 4.5: Kontak açısı  $167^\circ$  olan yüzeye gönderilen  $1.525$  m/s hızındaki su jetinin yüzey üzerindeki hareketinin zamanla gelişimi.



Şekil 4.6: Kontak açısı  $167^\circ$  olan yüzeye gönderilen  $1.525 \text{ m/s}$  hızındaki su jetinin yüzey üzerindeki hareketinin zamanla gelişimi.

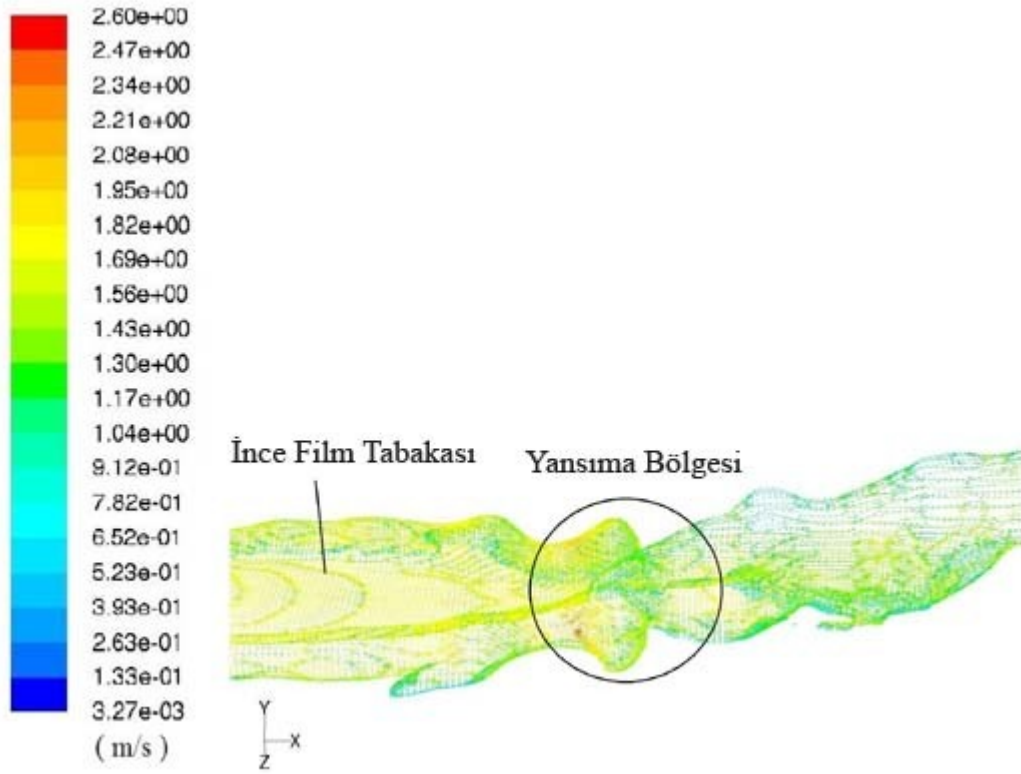


Şekil 4.7'de ise kontak açısı  $167^\circ$  olan yüzey üzerine gönderilen  $1.733 \text{ m/s}$  hızındaki su jetinin ıslanmaz yüzeydeki hareketinin, sayısal olarak elde edilmiş su – hava arayüzündeki hız vektörleri üç boyutlu olarak görülmektedir. Şekil 4.7'de verilen sonuçlar bir önceki şekillerdeki gibi zamanla değişmemektedir. Yüzey üzerindeki akışın kararlı hale ulaştıktan sonraki elde edilmiş çözümlere aittir. Şekilde görüldüğü gibi ıslanmaz bir yüzeye çarpan su jeti sıradan yüzeylerde olduğu gibi ( $\theta < 90^\circ$ ) yüzeye yayılmadan ilerlemekte ve akabinde yüzeyden yansımaktadır. İleri doğru hareket eden su jeti iki yan koldan ve arasında ince bir film tabakası içinden akmaktadır. Yüzeyin ıslanmazlık özelliği sayesinde ince film tabakasından yanlara doğru akışın genişlemesini engelleyerek yan kolları oluşmasına sebep olmaktadır. Eğer yüzey normal bir yüzey olsaydı su jeti yanlara doğru daha fazla genişleyerek akabinde hidrolik sıçrama gerçekleştirerek aniden kalın ve durağan bir tabaka oluşturacaktı.

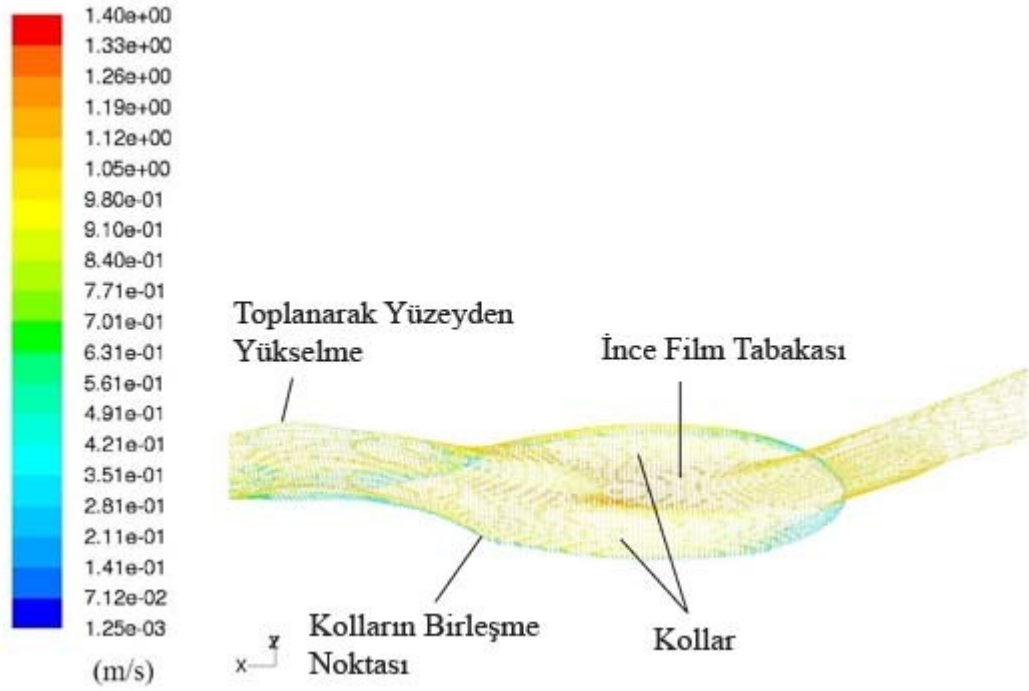


Şekil 4.7: Kontak açısı  $167^\circ$  olan  $1.733 \text{ m/s}$  hıza sahip su jetinin çarpma ve hidrolik sıçrama bölgesi detay görüntüsü.

Islanmaz yüzeyde gerçekleşen kenar kollar ince film tabakası tarafından beslenerek büyümektedir. İlerleme yönünde genişleyen film tabakası ile akışkanın yüzey gerilme enerjisi artmaktadır. Şekildeki kolları gösteren oklar aynı zamanda maksimum genişleme bölgesini yani Bölüm 2.4.2'de bahsedilen  $A_2$  bölgesinin sonu işaret etmektedir. Bu noktadan itibaren kollar birbirine yaklaşmakta ve birleşmektedir. Bu süreçte daha  $A_1$  ve  $A_2$  bölgesinde yüzey gerilimine aktarılan enerji geri alınmaktadır. Şekil 4.8'de ise kolların birleşerek yüzeyden yansıdığı bölge gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kollar birleştikten sonra su jeti yüzeyden yansıyarak ayrılmaktadır.

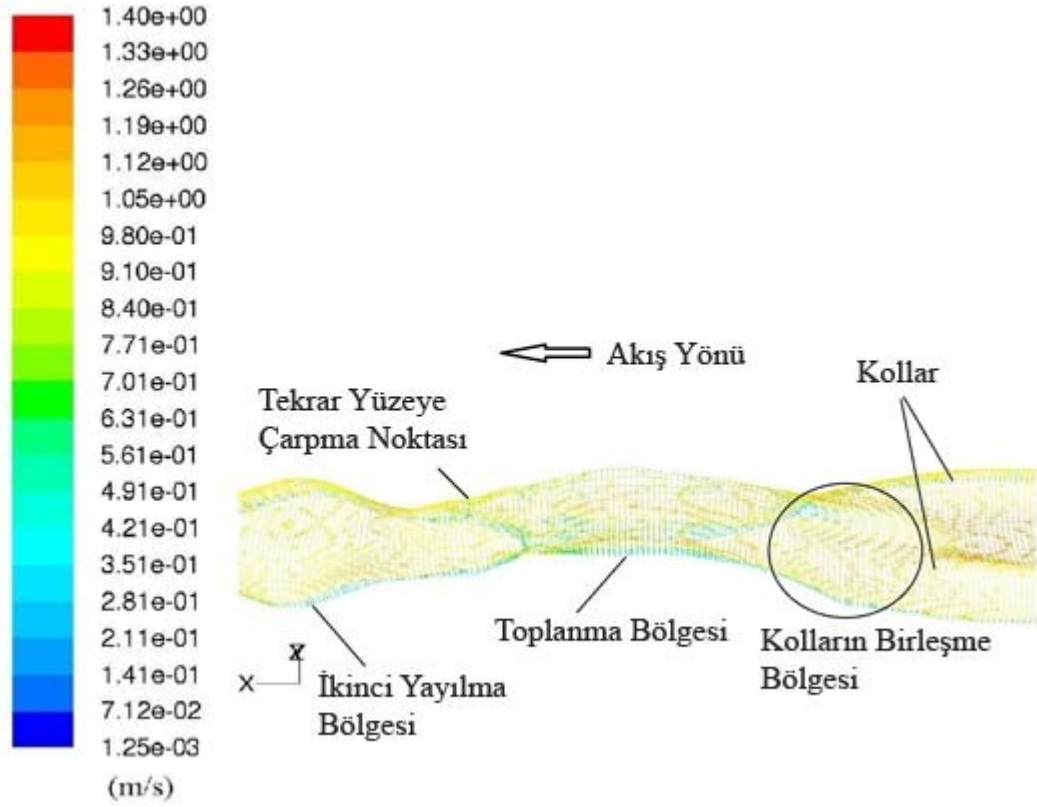


Şekil 4.8: Kontakt açısı  $167^\circ$  olan  $1.733 \text{ m/s}$  hızı sahip su jetinin yüzeyden ayrılma noktasının detay görüntüsü.



Şekil 4.9: Kontak açısı  $112^\circ$  olan  $1.109 \text{ m/s}$  hıza sahip su jetinin su – hava arayüzeyindeki hız alanının detay görünümü

Benzer sonuçlar kontak açısı  $112^\circ$  olan yüzey için Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu halde yüzey üzerine gönderilen jet hızı  $1.109 \text{ m/s}$ 'dir.  $\theta = 167^\circ$  için elde edilmiş sonuçlara benzer olarak düşük kontak açılı bu yüzeyde de su jeti yüzeye çarptıktan sonra yanlara doğru genişlemekte, orta kısımda ince film tabakası bölgesi oluşturarak tekrar toplanmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi film tabakasının orta kısımlarındaki hız vektörleri  $1.4 \text{ m/s}$  mertebelerine ulaşmaktadır. Bu bölgedeki hız, geliş hızı olan  $1.109 \text{ m/s}$ 'nin üzerine çıkmaktadır. Yüzey gerilme enerjisinin artması ile kollar birleşmekte ve jetin yüzey alanı küçülmektedir. Yüzey alanının küçülmesi yüzey gerilimi olarak depolanan enerjinin azalması anlamına gelmektedir. Bu sebeple yüzey geriliminden geri kazanılan enerji suyun ataletine aktarılarak yüzeyden yükselmektedir. Fakat yükselen su jeti yüzeyden yansımak için yeterli enerjiye sahip olmadığından Şekil 4.10'da gösterilen toplanma bölgesinde tekrar yüzeye çarpmakta ve akabinde ikinci bir yayılma gerçekleştirmektedir. Şekil 4.11'de bu bölgenin deneysel olarak elde edilmiş görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.11'deki kolların birleşme noktaları, yüzeyden yükselme ve tekrar yüzeye çarpma bölgeleri belirgin bir şekilde sayısal çözümlerle benzerlik göstermektedir.



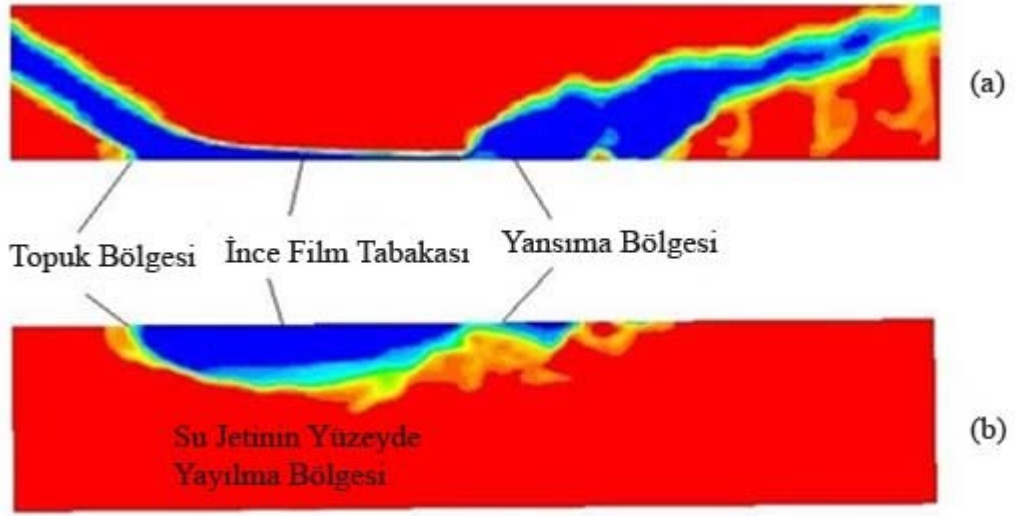
Şekil 4.10: Kontak açısı  $112^\circ$  olan  $1.109 \text{ m/s}$  hızı sahip su jetinin yüzeyden ayrılmayıp tekrar yüzeye çarparak yayılması



Şekil 4.11: Islanmaz yüzeye çarptıktan sonra yayılarak tekrar birleşen akışkanın birleşme noktasındaki görüntüsü (Kibar, 2008).

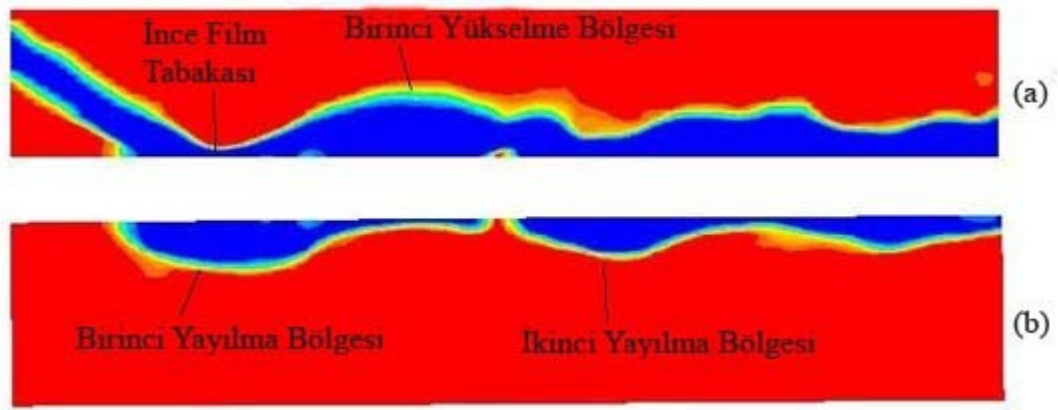
Şekil 4.12'de ise kontak açısı  $167^\circ$  olan bir yüzeye gönderilen su jetinin yandan ve üstten görünüşü görülmektedir. Yandan diye bahsedilen görünüş Şekil 3.3'te simetri yüzeyi olarak bahsedilen yüzeydeki çözümlerdir, üstten görünüş ile ilgili çözümler ise aynı şekilde taban diye isimlendirilen yüzeydeki değerlerdir. Şekilde mavi bölgeler suyu, kırmızı bölgeler ise havayı göstermektedir. Su jeti yüzeye çarptıktan Şekil 4.12'de topuk bölgesi ve yayılma bölgesi olarak gösterilen bölgelerinde olduğu gibi

yayılmaya çalışmaktadır. Akış topuk bölgesinde bir miktar geri gitmektedir. Fakat daha sonra topuk bölgesindeki ters yöne (sağdan sola) giden su molekülleri yüzey gerilimi ve yerçekiminin katkısıyla genel hareket yönüne (soldan sağa) dönmektedirler. Su jeti ince bir film tabakası şeklinde yayılmakta ve daha sonra yansıma bölgesinde yüzeyden yansıyarak ayrıldığı görülmektedir. Şekil 4.12 b'de su jetinin taban üzerindeki genişlediği yayıldığı alan görülmektedir.



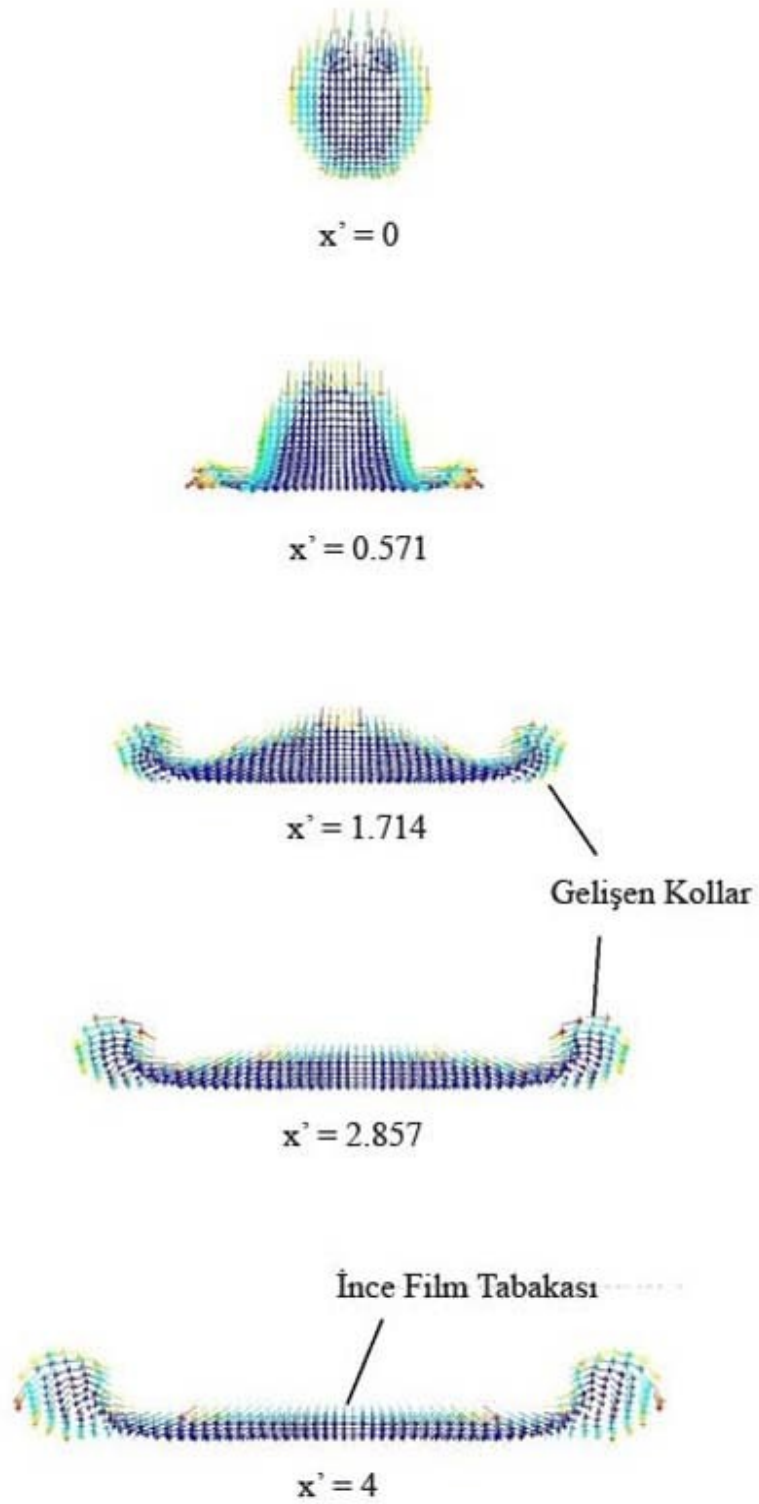
Şekil 4.12: Kontakt açısı  $167^\circ$  olan yüzey üzerine gönderilen sıvı jetinin sıçramasının (a) yandan, (b) üstten görünüşü ( $We = 75.3$ ).

Şekil 4.12'deki sonuçların benzerleri Şekil 4.13a'da kontakt açısı  $112^\circ$  ve Weber sayısı 20.4 olan su jeti için verilmiştir. Yüzeye çarpan su jeti yüksek kontakt açılı yüzeydekine benzer şekilde  $\theta = 112^\circ$  olan yüzeyde de akışkan ince film tabakası halinde yayılmakta daha sonra toplanarak yüzeyde yükselmektedir. Fakat yüksek kontakt açılı yüzeyin aksine birinci yükselme bölgesinde biriken su jetinin enerjisi yüzeyden ayrılmaya yetmediği için su jeti ikinci kez yüzeye çarpmakta ve ikinci yayılma bölgesini Şekil 4.13 b'de görüldüğü gibi oluşturmaktadır.

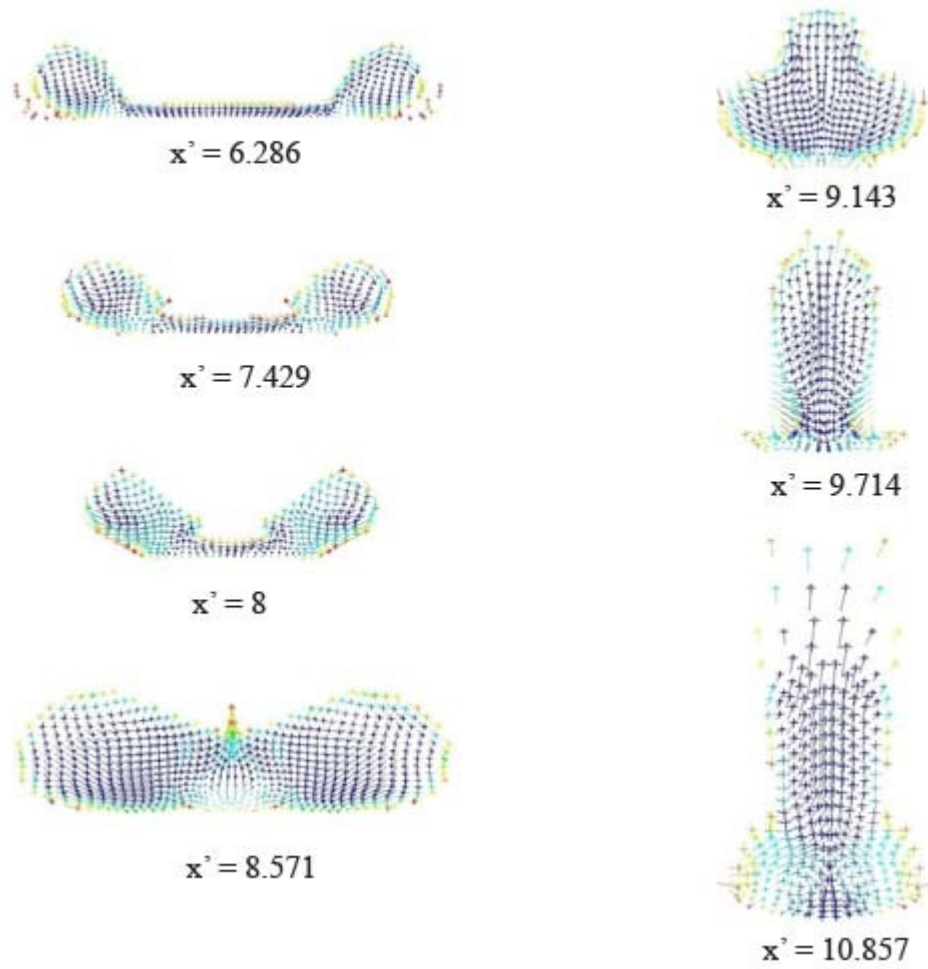


Şekil 4.13: Kontak açısı  $112^\circ$  olan yüzey üzerinde sıvı zinciri şeklinde hareket eden su jetinin (a) yandan, (b) üstten görünüşü ( $We=20.4$ ).

Rejime girmiş ve Weber sayısı 75.3 olan su jeti hareketinin kontak açısı  $167^\circ$  olan yüzeye ait farklı kesitlerde alınmış hız vektörleri Şekil 4.14'te verilmiştir, hız vektörlerinin gösterildiği düzlemler taban ve simetri yüzeyi olarak adlandırılan yüzeye dik kesitlerdir. Şekilde verilen  $x'$ , boyutsuz uzunluğu göstermektedir. Boyutsuz uzunluk, çözümlü gösterilen kesitin, su jetinin yüzeye çarpma noktasından itibaren olan mesafesinin jet çapına bölünmesi ile elde edilmiştir. Şekil 4.14'te  $x' = 0$ , yüzeye çarpma noktasındaki hız dağılımının uniform olduğu görülmektedir.  $x' = 0.571$  noktasında ise yüzeye çarpan su jetinin ataleti sebebiyle yanlara doğru genişlemesi görülmektedir. Yüzey üzerinde yayılan su jetinin yüzey alanı genişlemektedir. Bu genişleme sebebiyle akışkanın yüzey gerilimi enerjisi artmaktadır. Yüzey gerilimi ve yüzeyin ıslanmaz özellikleri sebebiyle su yanlara doğru genişlemekte zorlanmaktadır. Yüzey üzerinde kolayca yayılamayan akışkan her iki tarafta da birer kol oluşturmaktadır. Şekil 4.14'te  $x' = 1.714$  ve  $x' = 2.857$  orta kısımdaki akışkan tabakasının yan kollara doğru incilmesi ile büyüyen kollar görülmektedir. Şekil 4.14'te  $x' = 4$  kesiti film tabakasının en geniş bölgesini göstermektedir, bu kesit Bölüm 2.4.2'de bahsedilen  $A_2$  bölgesinin sonunda film tabakası en geniş olduğu kesiti göstermektedir.



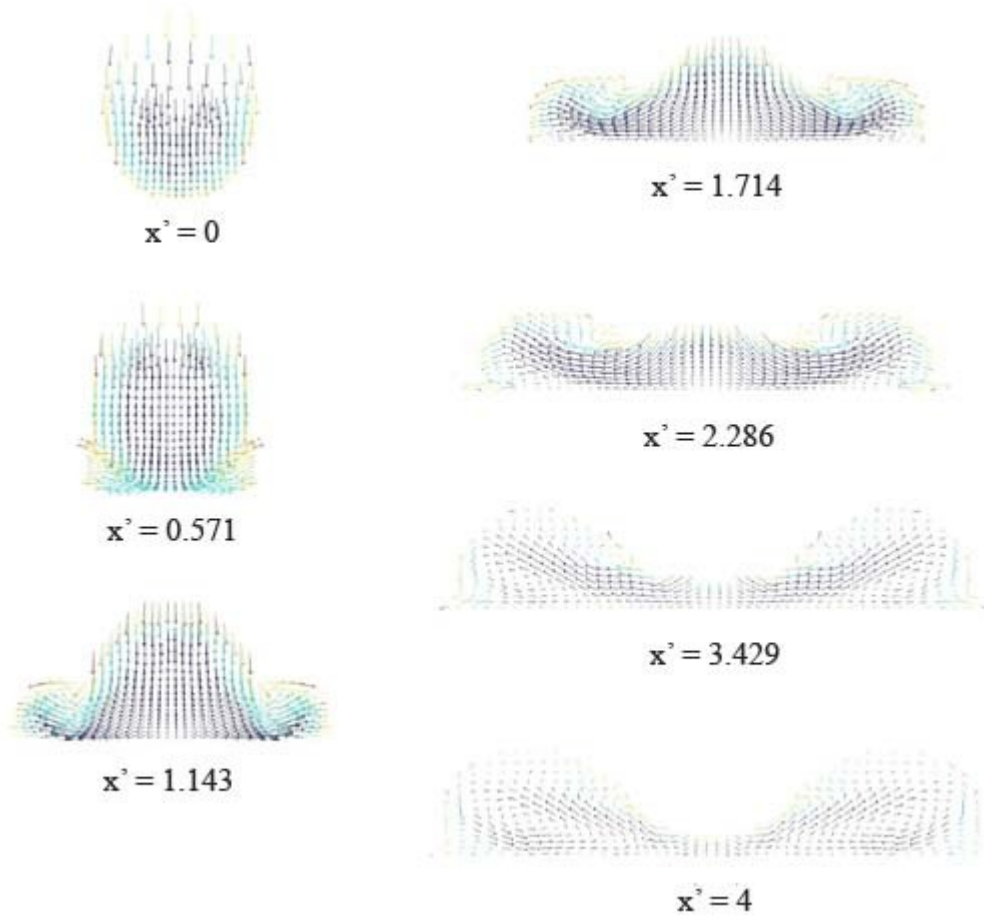
Şekil 4.14: Su jetinin harekete dik olan çeşitli kesitlerindeki hız vektörü alanları ( $\theta = 167^\circ$ ,  $We = 75.3$ ).



Şekil 4.15: Su jetinin harekete dik olan çeşitli kesitlerindeki hız vektörü alanları ( $\theta = 167^\circ$ ,  $We = 75.3$ ).

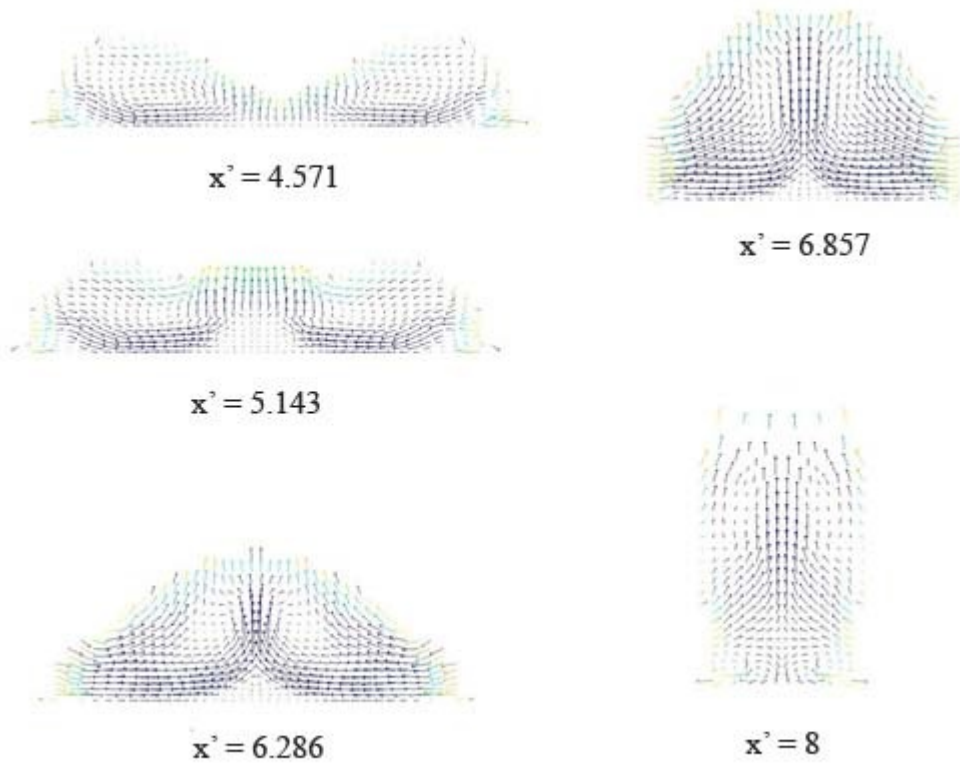
Film tabakası en büyük genişliğe ulaştıktan sonra yüzey gerilim ve ıslanmaz yüzey etkisiyle geri toplanmaktadır. Bu aşamadan sonra ince film tabakasını genişliği küçülterek gerçekleşen toplanma hareketi Şekil 4.15  $x' = 6.286$ 'dan  $x' = 8$ 'e kadar görülmektedir. Bu süreçte söz konusu film tabakasının genişliği azalmasına rağmen kalınlığı artmadığı görülmektedir. Film tabakasındaki su molekülleri kollara geçmekte ve kolları genişletmektedir. Yüzey alanının küçülmesiyle ataleti artan su jeti  $x' = 9.143$  mesafesinden itibaren yüzeyde yükselmeye başlamakta ve takip eden süreçte yüzeyden yansiyarak ayrılmaktadır.





Şekil 4.16: Su jetinin harekete dik olan çeşitli kesitlerindeki hız vektörü alanları ( $\theta = 112^\circ$ ,  $We = 30.5$ ).

Şekil 4.14'te verilen sonuçlara benzer olarak daha düşük kontak açılı yüzey için ( $\theta = 112^\circ$ ) olan yüzey için kesitlerdeki hız vektörleri Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir. Burada Weber sayısı 30.5'tir. Süper ıslanmaz yüzeyde olduğu şekilde yüzeye çarpan su jeti yüzey üzerinde yayılmaktadır. Yayılma  $\theta = 167^\circ$  olduğu gibi  $x' = 4$  en geniş halini almaktadır. Film tabakası genişliği  $167^\circ$  göre daha dar görülmekle beraber bunun Weber sayısından da kaynaklanabileceği söylenebilir. Yüzey gerilim ve yüzeyin ıslanmaz özelliği sayesinde toplanan su jeti kolları birleşmekte ve süper ıslanmaz yüzeyde olduğu gibi yüzeyden yükselmektedir.

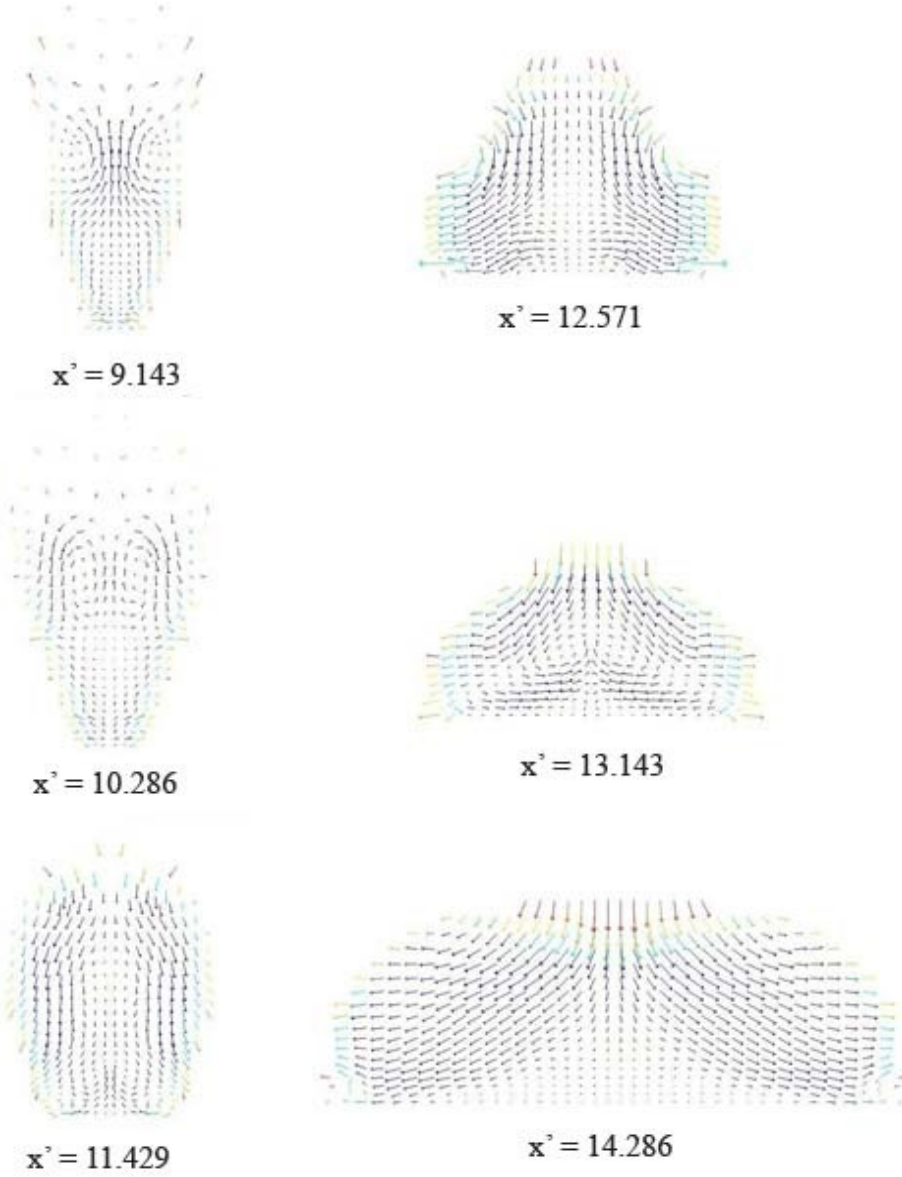


Şekil 4.17: Su jetinin harekete dik olan çeşitli kesitlerindeki hız vektörü alanları ( $\theta = 112^\circ$ ,  $We = 30.5$ ).

Süper ıslanmaz yüzey ile ıslanmaz yüzey arasındaki fark bu noktadan sonra ortaya çıkmaktadır. Yüzeyde yükselen su, Şekil 4.18'de  $x' = 9.143$ 'te görüldüğü gibi en yükseğe ulaşmakta ve  $x' = 11.429$  noktasından itibaren tekrar yüzeye doğru yönelmektedir. Süper ıslanmaz yüzeyde görülen yansıma bu şartlarda gerçekleşmemiştir. Tekrar yüzeye çarpan su jeti ikinci bir yayılma gerçekleştirmektedir.

Su jetinin tekrar yüzeye çarptığı anda, hareket esnasındaki kayıplar sebebiyle yüzeye dik ataleti daha düşük olmaktadır. Böylece ikinci yayılma alanı ilk yayılmadan daha küçük olmakta ve ince film tabakası şeklindeki bölge görülmemektedir. Suyun yüzeye çarpmasıyla yayılma ve toplanma hareketi tekrar görülmektedir. Bu hareket akışkanın kinetik enerjisi ve yüzey gerilimi arasındaki enerji dönüşümünün duruncaya kadar tekrarlanarak devam eder. Su jetinin bu davranışına sıvı zinciri

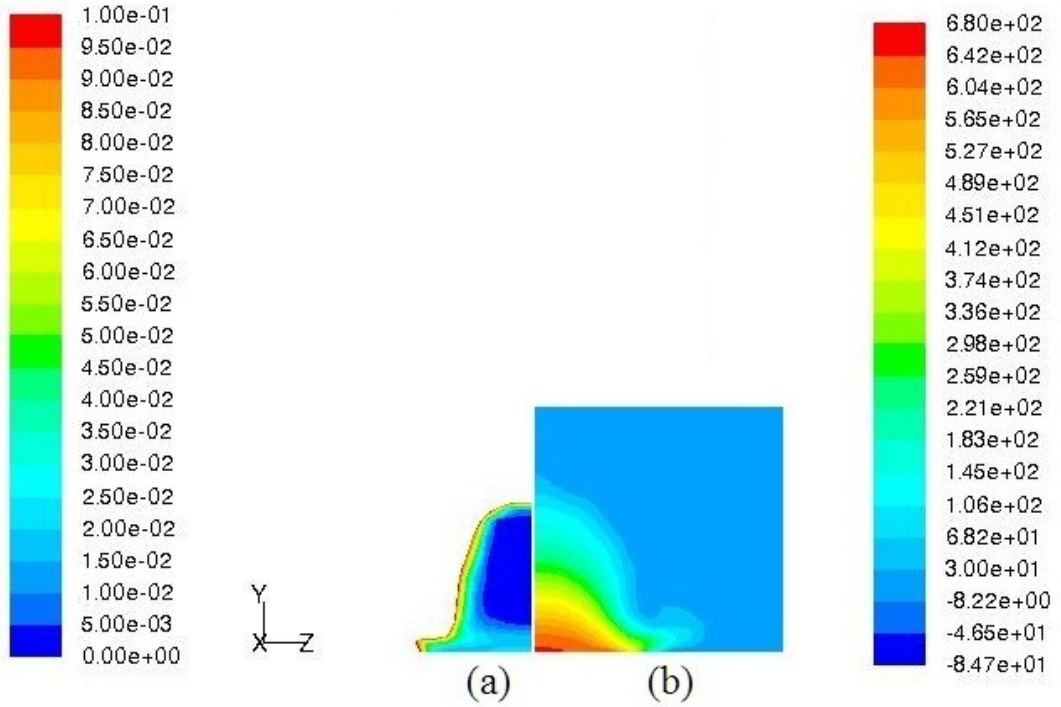
(braiding) adı verilir. Yüzeyde yayılma ve toplanma olayı devam ettikten sonra yüzey gerilim ve kinetik enerji arasındaki enerji dönüşümü durunca sıvı zinciri hareketi son bulur ve su yüzeye kontak açısı yapacak şekilde akar.



Şekil 4.18: Su jetinin harekete dik olan çeşitli kesitlerindeki hız vektörü alanları ( $\theta = 112^\circ$ ,  $We = 30.5$ ).

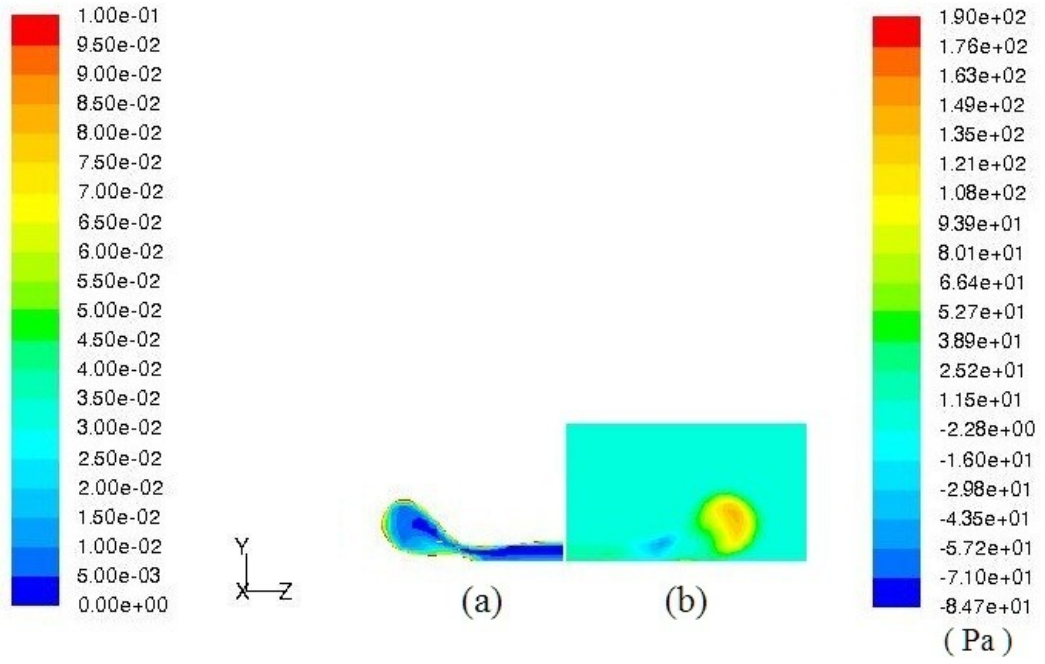
Akışkan yüzeye yaklaşık olarak ilk çarptığı kesitteki ( $x' = 0.571$ ) basınç dağılımı Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Şekil 4.19a'da çözüm yapılan iki fazlı akış alanındaki suyun kapladığı bölge gösterilmiştir, mavi renk ve tonları suyun yayıldığı alanı

göstermektedir , kırmızı ise hava fazını göstermektedir. Şekil 4.19b'de ise söz konusu kesitteki basınç dağılımı verilmektedir. Su jeti bu kesitte yüzey gerilimi sebebiyle atmosfer basıncının üzerinde basınca sahiptir. Suyun katı yüzeye yakın bölümünde ise basınç en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu basınç farkından dolayı katı yüzeye yakın bölgedeki su, atmosfer basıncındaki havayı itererek yanlara doğru yayılmaktadır.

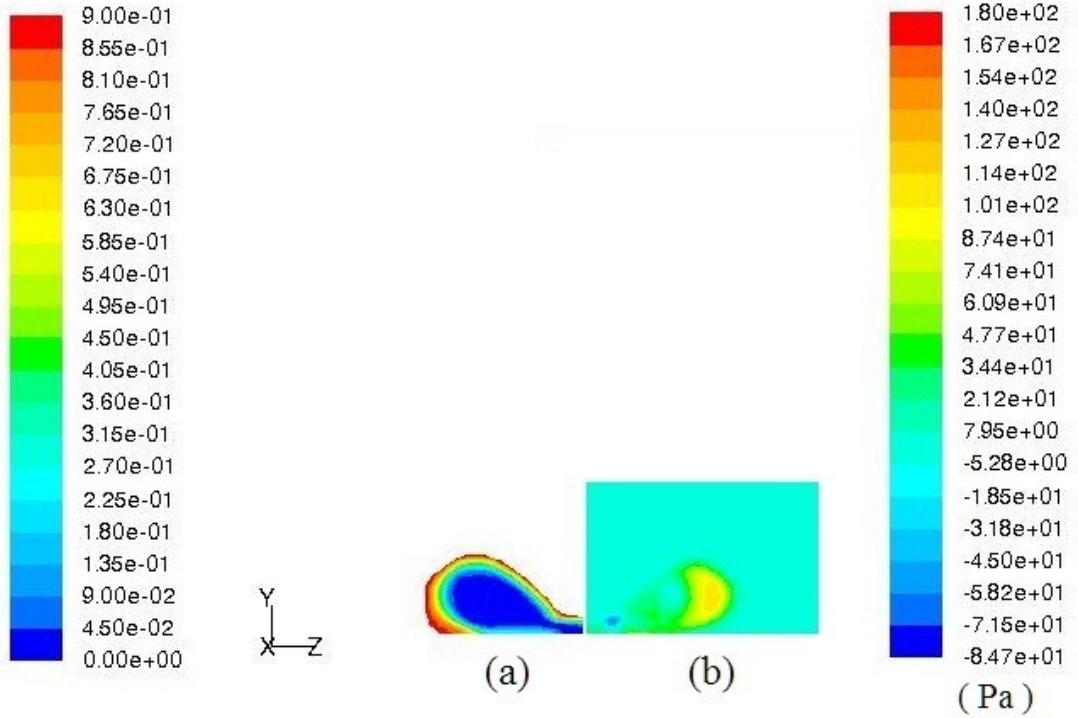


Şekil 4.19:  $x' = 0.571$  kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 167^\circ$ ,  $We = 58.3$ )

Benzer sonuçlar  $x' = 4$  için Şekil 4.20'de verilmektedir. Şekil 4.20a'da yüzey üzerinde yayılarak kolları oluşturduğu görülmektedir. Şekil 4.20b'de ise ince film tabakası şeklindeki yayılmanın içindeki düşük basınç bölgesi görülmektedir. Buna karşılık ise kol bölgelerindeki yüksek basınç bölgeleri bulunmaktadır. Basınç farkı ve yüzey gerilme etkileri altında su, jetin akış eksenine doğrultusunda toplanmaya zorlanmaktadır. Şekil 4.21'de  $x' = 6.286$  kesitindeki basınç dağılımı verilmiştir. Şekil 4.21, Şekil 4.20 ile karşılaştırıldığında ince film tabakasındaki düşük basınç bölgesinin küçüldüğü, kol bölgesindeki yüksek basınç bölgesinin azaldığı görülmektedir. Buna karşılık ince film tabakasının genişliği azalmış ve kollar birbirine yaklaşmıştır.

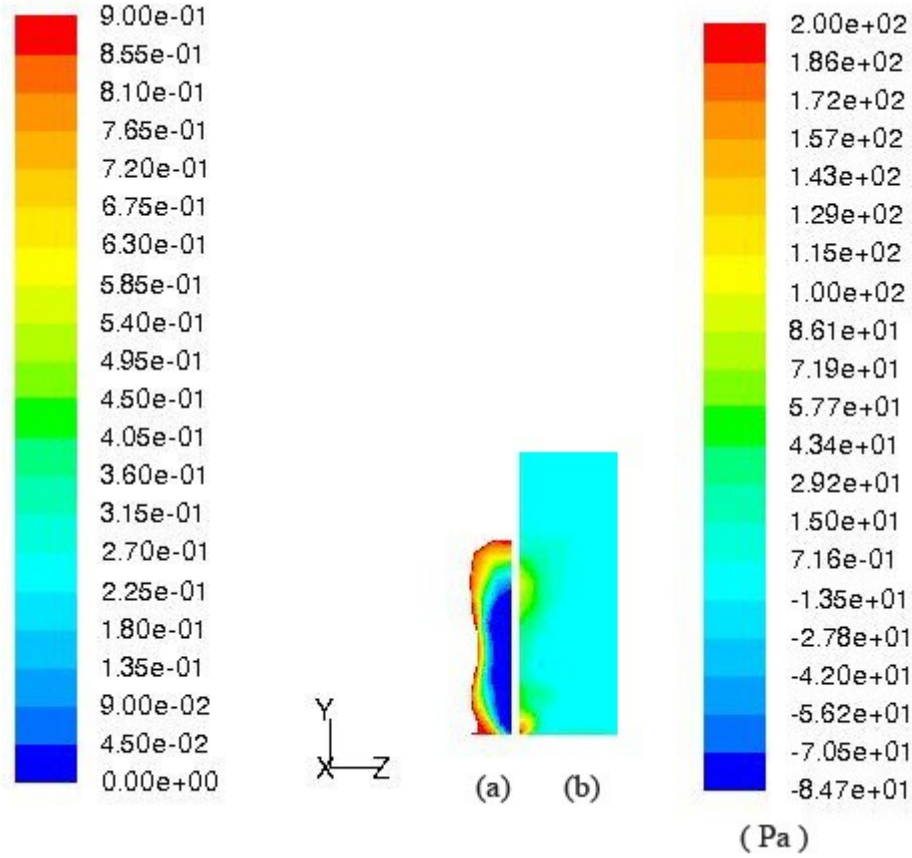


Şekil 4.20:  $x' = 4$  kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 167^\circ$ ,  $We = 58.3$ ).



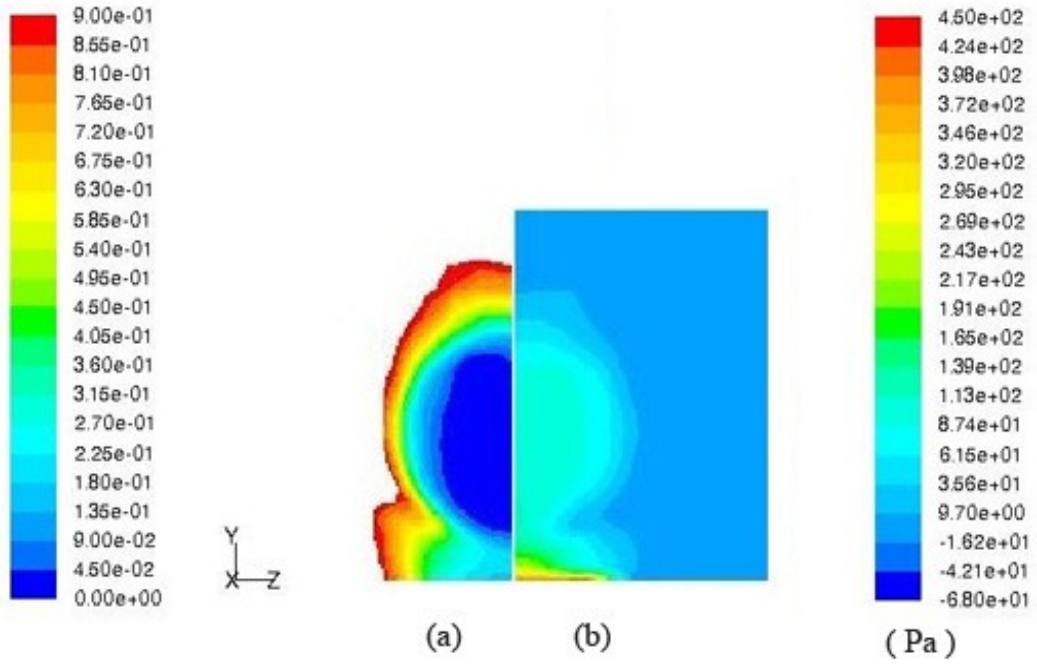
Şekil 4.21:  $x' = 6.286$  kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 167^\circ$ ,  $We = 58.3$ ).

Şekil 4.22'de ise kollar birleştikten sonra yüzeyden yükselme görülen  $x' = 9.714$  kesitindeki sonuçlar gösterilmiştir. Bu şekilde su ile katı yüzeyin temas ettiği bölgede bir yüksek basınç bölgesi bulunmaktadır.

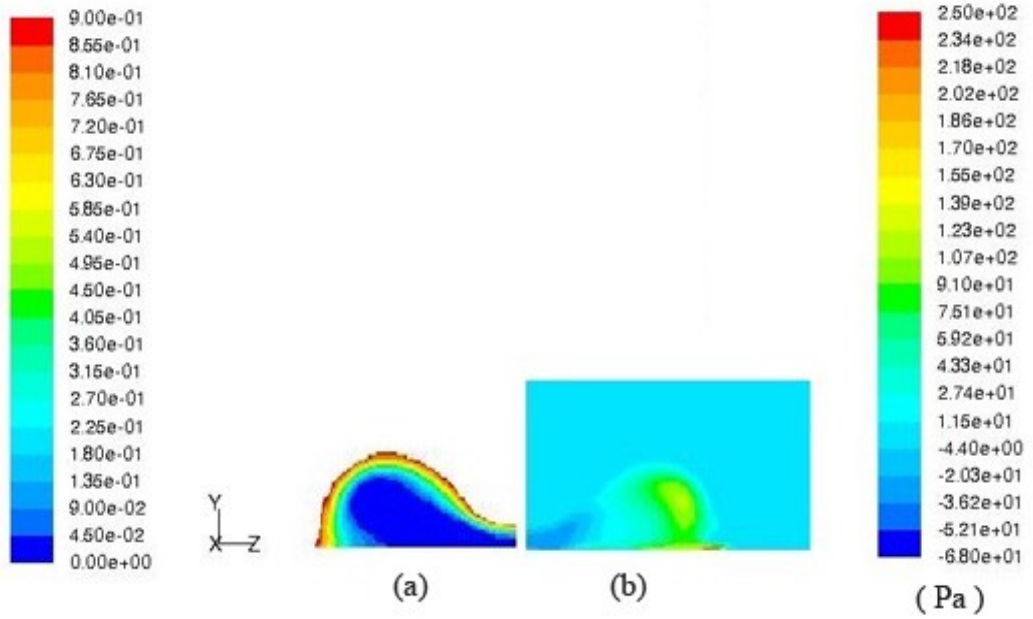


Şekil 4.22:  $x' = 9.714$  kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 167^\circ$ ,  $We = 58.3$ )

Benzer sonuçlar kontak açısı  $112^\circ$  olan yüzey Şekil 4.23 ile 4.19 arasında verilmiştir. Buradaki jet hızı diğer çözümlerden daha düşüktür, Weber sayısı 30.5'tir. Su kesitinin büyük bölümü yüzey gerilimi sebebiyle atmosfer basıncının üzerinde basınca sahiptir. Yüksek kontak açılı yüzeylerde görüldüğü gibi  $\theta = 112^\circ$  için elde edilen kesitte de suyun katı yüzeye yakın bölümünde ise basınç en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu basınç farkından dolayı katı yüzeye yakın bölgedeki su, atmosfer basıncındaki havayı itererek yanlara doğru yayılmaktadır.

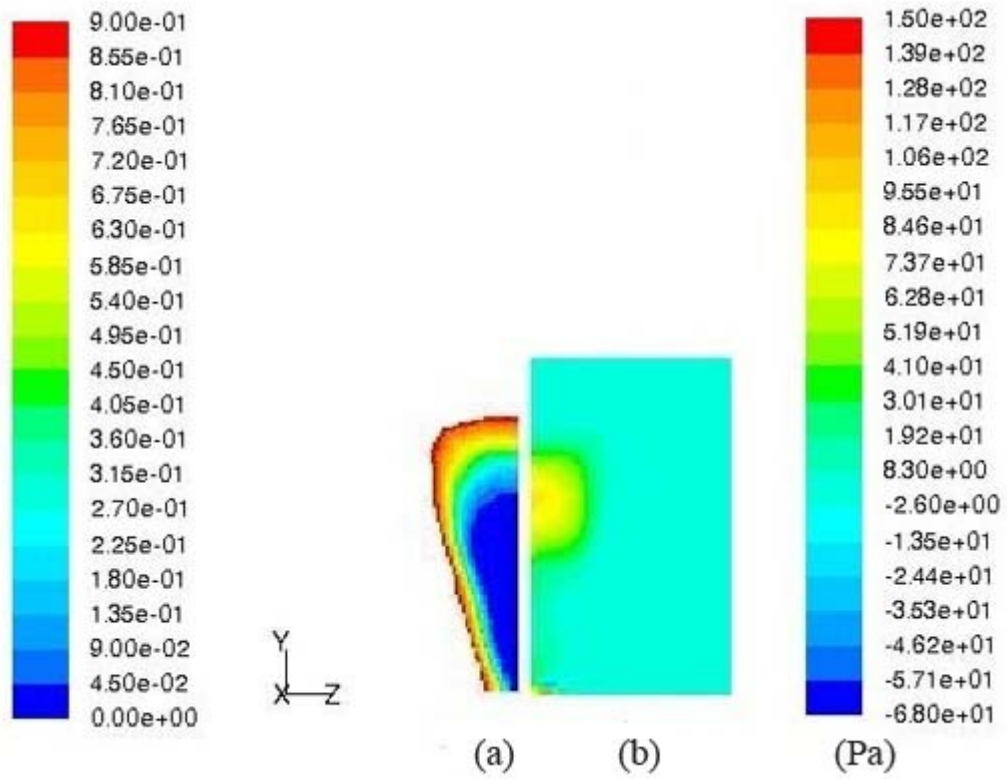


Şekil 4.23:  $x' = 0.571$  kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 112^\circ$ ,  $We = 30.5$ )



Şekil 4.24:  $x' = 4$  kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 112^\circ$ ,  $We = 30.5$ )

Şekil 4.24'te ise ince film olarak yayılan su yüzeyinin içinde basıncın atmosfer basıncının altına düştüğü görülmektedir. Eğer yüzey gerilmesi yeteri kadar büyük olmasaydı, sıvı jeti bu düşük basınç bölgesinden itibaren iki kola ayrılarak hareketine devam edecekti. Yüzey gerilmesi sebebiyle bu bölgeye dışarıdan hava girememekte, negatif basınç ve yüzey gerilimi etkileri suyun geri toplanmasına destek sağlanmaktadır.



Şekil 4.25:  $x' = 9.714$  kesitindeki sıvı jetinin (a) Hacimsel fraksiyon, (b) Basınç alanı dağılımları ( $\theta = 112^\circ$ ,  $We = 30.5$ )

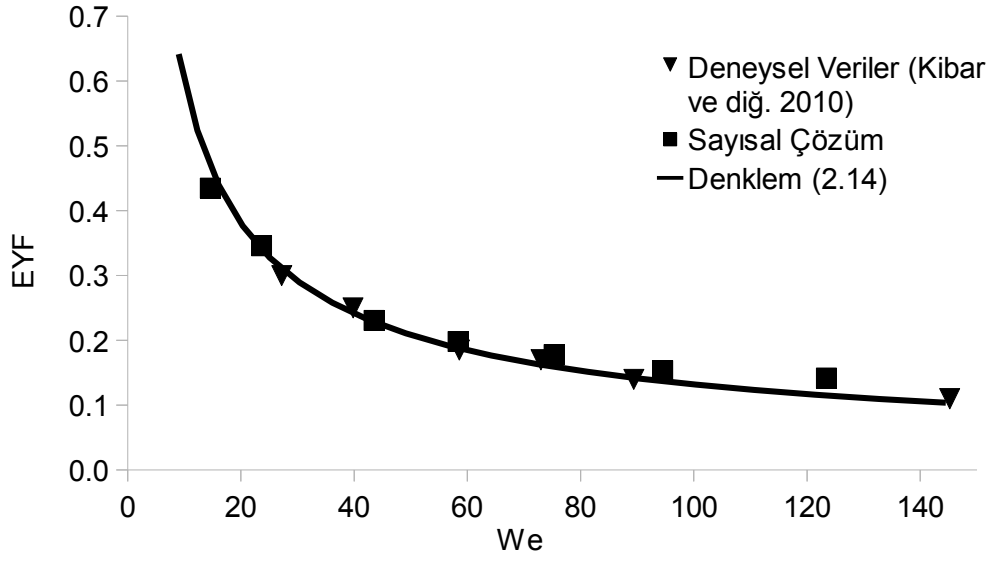
Yüzeyde oluşan iki yan kolun birleşmesi sonucu yüzeyden uzaklaştığı bölgedeki basınç dağılımı Şekil 4.25'te verilmektedir. Şekil 4.25 b incelendiğinde yüzeyden uzaklaşan su jetinin, yüzeye yakın kısmındaki basıncın atmosfer basıncına düştüğü görülmektedir. Şekil 4.25 a'da görüldüğü gibi su jeti hala katı yüzey ile temas halinde olduğundan su jeti yüzey gerilmesi sebebiyle yüzeye doğru çekilmektedir. Şekil 4.22 ile Şekil 4.25 karşılaştırıldığında su – katı temas bölgesinde süper ıslanmaz yüzeyde yüksek basınç bölgesi bulunurken ıslanmaz yüzeyde aynı bölgedeki basınç atmosfer



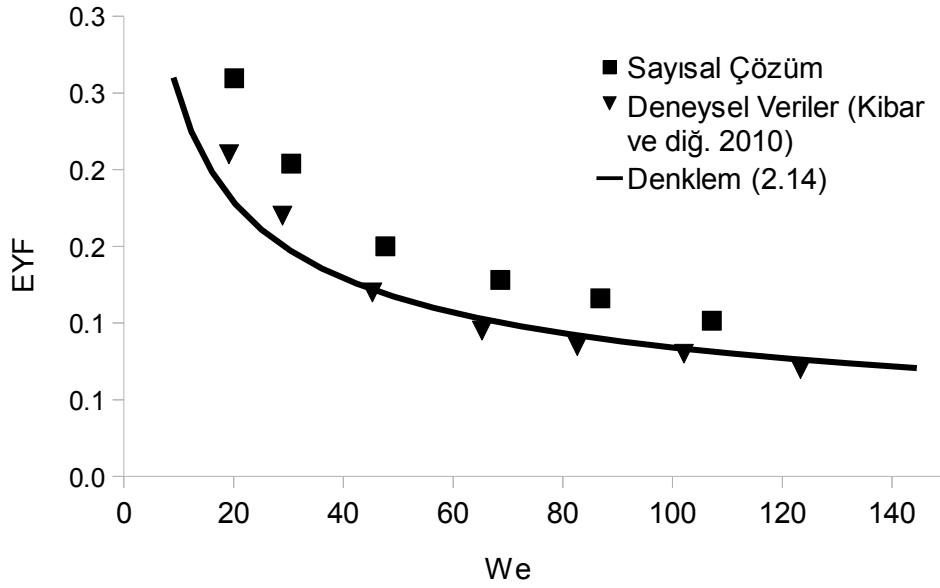
basıncı mertebesinde. Bu yüksek basınç bölgesi süper ıslanmaz yüzeyden yansıma olayının gerçekleşmesine katkıda bulunurken, yüksek basınç bölgesine rastlanmayan ıslanmaz yüzeydeki su jeti yansıma yapamamaktadır.

#### **4.1. Eşdeğer Yayılma Faktörü (EYF)**

Su jetinin yüzeye çarptığında yayıldığı alan grafik programla hesap edilerek bu alana tekabül eden dairenin çapı ( $D_{ED}$ ) hesaplanmıştır. Bu değer, nozul çapı ile bölünerek boyutsuzlaştırılarak eşdeğer yayılma faktörü,  $d/D_{ED}$ , elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen değerler literatürde verilen deneysel verilerle birlikte Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Bu şekillerde iki farklı yüzey için sırasıyla  $167^\circ$  ve  $112^\circ$  için Weber sayısı ile değişimi verilmektedir. Bu çalışma da elde edilen sonuçların deneysel verilerle  $167^\circ$  kontak açılı yüzey için neredeyse birebir uyduğu görülmektedir.  $112^\circ$  için yapılan hesaplamalarda bulunan değerler deneysel verilerden biraz yüksek çıkmakla birlikte genel eğilimi yakalamaktadır. Eşdeğer yayılma faktörü her iki halde de Weber sayısı ile azaldığı görülmektedir. Yani akışkanın atalet kuvvetleri arttıkça akışkanın yüzey üzerinde kapladığı alanın arttığı veya yüzey gerilimi azaldıkça akışkanın yüzey üzerinde kapladığı alanın arttığı görülmektedir. Aynı Weber sayısı için  $167^\circ$  ve  $112^\circ$  kontak açılı yüzeyler için karşılaştırıldığında yüksek kontak açılı yüzeyde EYF değerlerinin, düşük kontak açılı yüzeylere oranla çok daha büyük olduğu görülmektedir. Bu da yüzeyin kontak açısının büyümesiyle akışkanın yüzey üzerinde kapladığı alanın ciddi şekilde azaldığını göstermektedir.



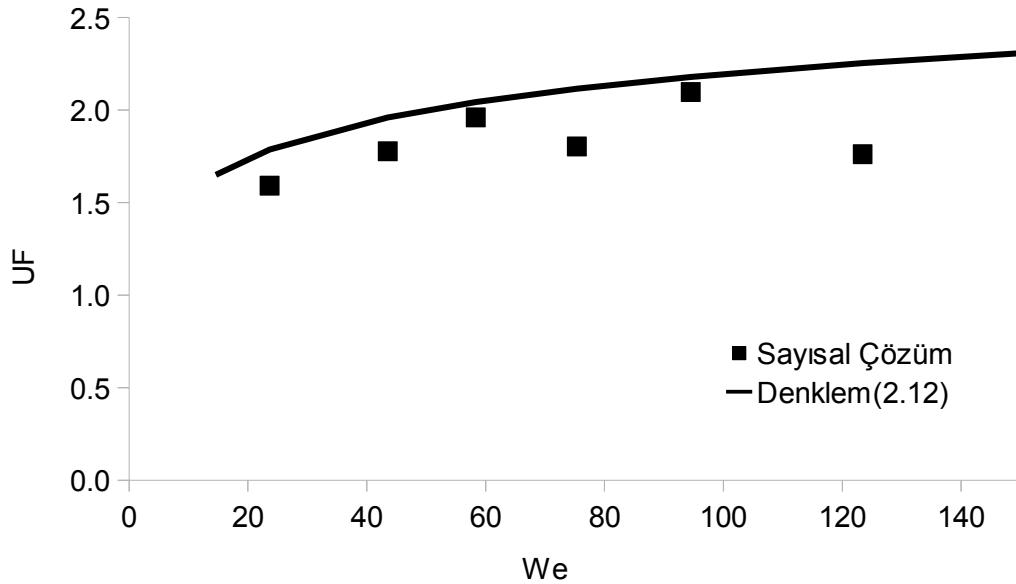
Şekil 4.26: Eşdeğer Yayılma Faktörü (EYF) değerlerinin Weber sayısı ile değişimlerinin deneysel, sayısal ve Denklem 2.5'e göre karşılaştırılması ( $\theta = 167^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ).



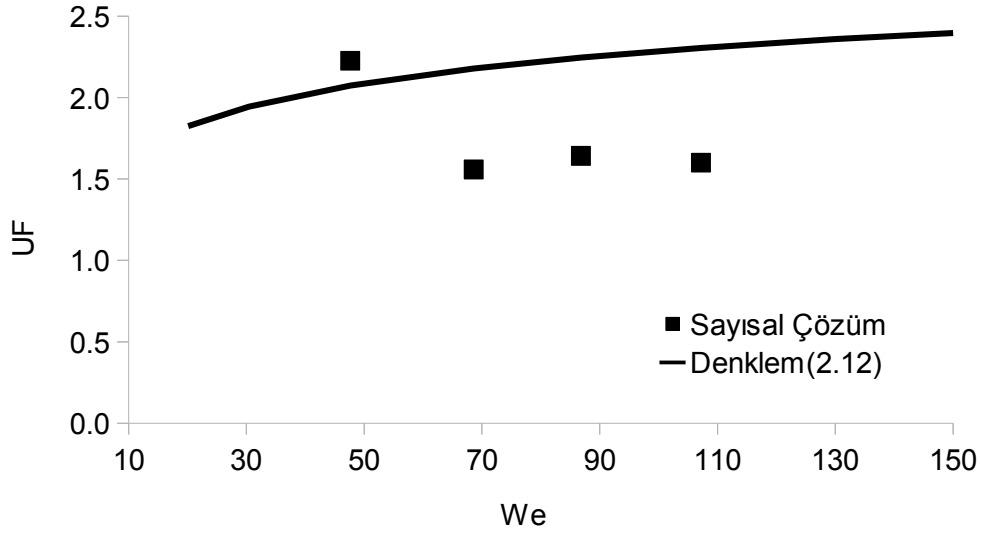
Şekil 4.27: Eşdeğer Yayılma Faktörü (EYF) değerlerinin Weber sayısı ile değişimlerinin deneysel, sayısal ve Denklem 2.5'e göre karşılaştırılması ( $\theta = 112^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ).

## 4.2. Uzama Faktörü

Uzama faktörü, yüzeyde jetin yayılan alanının dairesellikten uzaklaşmasının bir ölçüsüdür. Akışkanın yayıldığı uzunluğun, genişliğine oranı olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.14). Su jetinin hızı arttıkça su jetinin ıslanmaz yüzey üzerindeki yayılması da dairesellikten uzaklaşmaktadır. Uzama faktörlerinin Weber sayısı ile değişimi Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da kontak açısı sırasıyla  $167^\circ$  ve  $112^\circ$  olan yüzeyler için gösterilmiştir. Bu şekillerde, çalışmada elde edilen sonuçlar literatürden alınan verilerle birlikte verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi Weber sayısının artmasıyla uzama faktörü artmaktadır. Bu da atalet kuvvetlerinin artmasıyla veya akışkanın yüzey gerilimi kuvvetlerinin azalmasıyla sağlanabilir. Bu oran yüksek Weber sayılarında sabitlenme eğilimi göstermektedir. İlgili şekillerde görülen deneysel ve sayısal sonuçlar arasında uyum gözlenmektedir. Bu uyum  $112^\circ$  kontak açılı yüzeyde biraz daha kötüleşmektedir. Uzama faktörü değerleri mertebe olarak her iki kontak açılı yüzeyde de aynı mertebede olduğu görülmektedir.



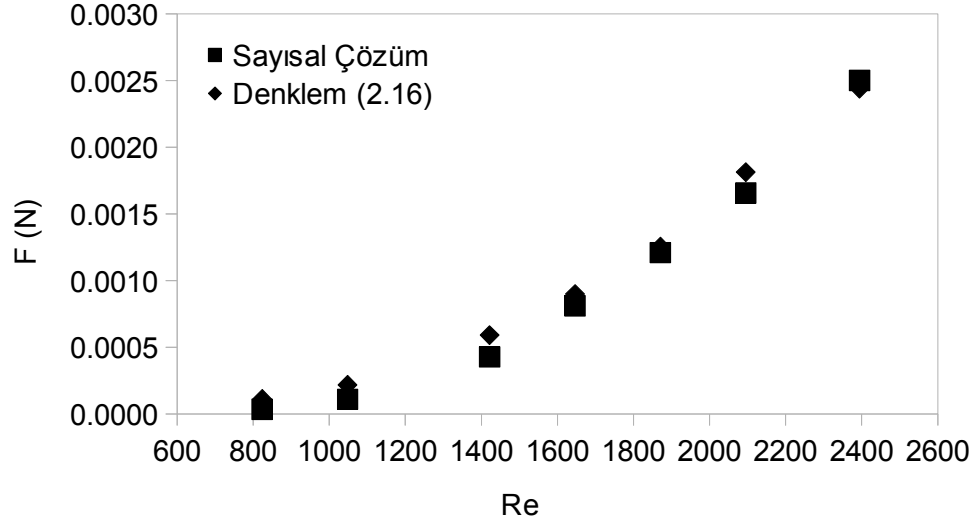
Şekil 4.28: Uzama Faktörünün We sayısı ile değişimi ( $\theta = 167^\circ$ ).



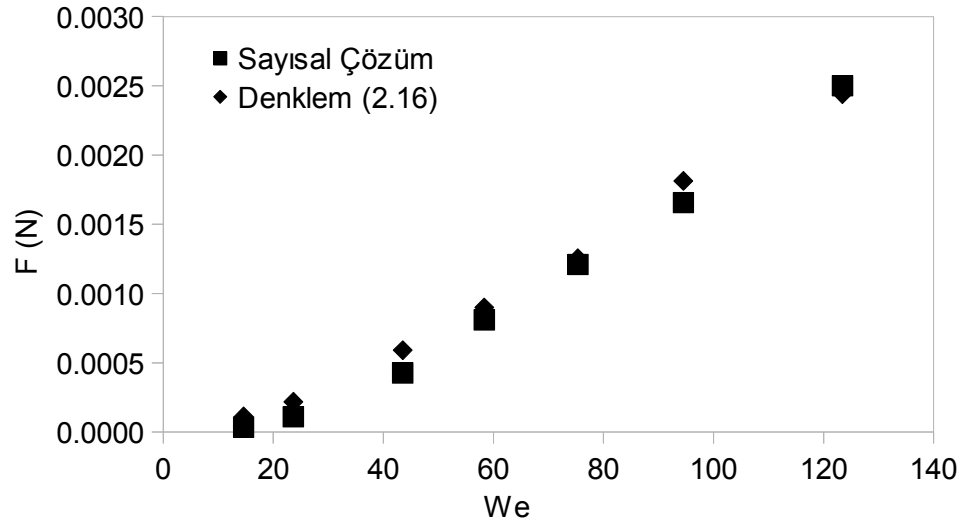
Şekil 4.29: Uzama Faktörünün We sayısı ile değişimi ( $\theta = 112^\circ$ ).

### 4.3.Yüzeğe Uygulanan Teğetsel Kuvvet

Bu çalışmada süper ıslanmaz bir yüzey üzerine gelen su jetinin, yüzey üzerine teğetsel olarak uyguladığı viskoz kuvvetler de hesaplanmış ve Kibar ve diğ. (2010) deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır. Adı geçen çalışmada verilen Denklem (2.7) kullanılarak hesaplanan kuvvetler, sayısal çözüm ile bulunan kuvvetlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.30'da teğetsel gerilmelerin Re sayısı ile değişimi verilmektedir. Şekil 4.31'de ise teğetsel gerilmelerin We sayısı ile değişim verilmektedir. Düşük Weber sayıları için  $10^{-4}$  N mertebelerinde bulunan teğetsel gerilmeler, Weber sayısının yükselmesiyle  $10^{-3}$  N mertebelerine kadar çıkmaktadır. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki uyum, yüksek Reynolds ve Weber sayılarında, şekillerde görüldüğü gibi daha iyi olmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçların Denklem 2.7 ile uyum sağladığı görülmektedir. Erbil ve diğ. (2003)'te gösterildiği ve Denklem 2.7'den elde edilebileceği gibi yüksek kontak açılı yüzeylerin kullanılmasıyla söz konusu viskoz kuvvetlerde ciddi azalışlar sağlanabilir.



Şekil 4.30: Teğetsel kuvvetlerin Re sayısı ile değişiminin deneysel ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması ( $\theta = 167^\circ$ ).

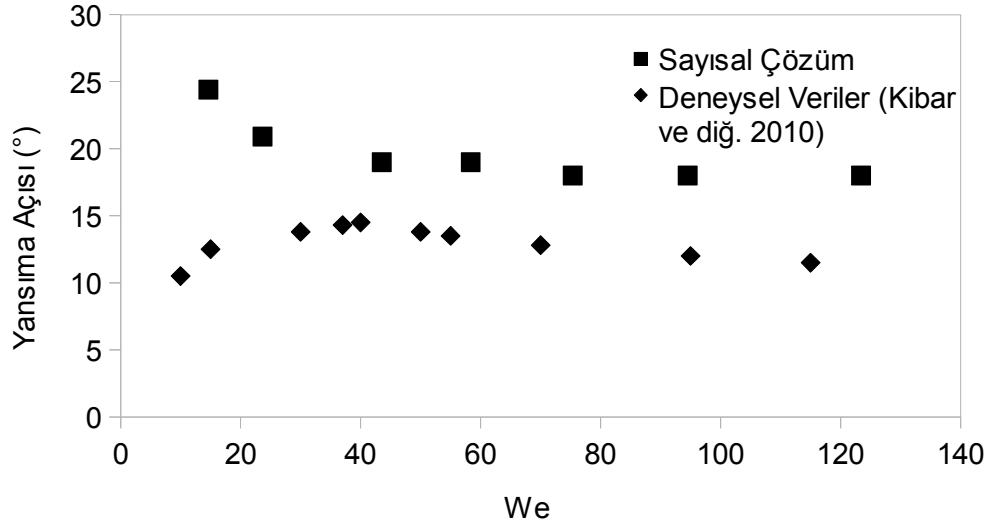


Şekil 4.31: Teğetsel kuvvetlerin We sayısı ile değişiminin deneysel ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması ( $\theta = 167^\circ$ ).

#### 4.4. Yansıma Açısı

Yansıma açıları, su jetinin simetri yüzeyi üzerindeki dağılımının görüntüsü üzerinden grafik olarak ölçülmüştür. Sayısal hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerde yansıma açısının su jetinin hızının değişimi ile çok zayıf bağlantılı olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.32). Weber sayısının artmasıyla yansıma açısı azalmakta ve

Weber sayısının değeri 40'ı geçtikten sonra sabit kabul edilebilecek şekilde kalmaktadır. Yansıma açısı deneylerde olduğu gibi bir pik noktasından geçmemektedir. Ayrıca deneylerde ölçülen yansıma açıları sayısal olarak bulunanlardan daha düşük mertebededir.



Şekil 4.32: Sayısal çözüm ile bulunan yansıma açılarının Weber Sayısı ile değişiminin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

## BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, düşey tutulan ıslanmaz yüzey üzerine 30°lik açıyla gönderilen su jetinin davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla kontak açıları 167° ve 112° olan iki farklı yüzey üzerinde toplam 13 farklı hız için çözüm elde edilmiştir. Bu çalışmada süreklilik ve momentum denklemlerinin sayısal çözümleri sonlu hacim metodu esasına dayalı ticari bir paket program (Fluent) kullanılarak elde edilmiştir. Akış laminer kabul edilmiştir. Hesaplamalar  $10^{-5}$  s zaman aralıklarıyla zamana bağlı olarak yapılmıştır. Katı yüzeye gönderilen jet 50 ms mertebelerine kararlı rejime ulaşmaktadır. Bu zaman dilimlerine ulaşmak için 5000 zaman adımı ve herbir zaman adımı için çoğunlukla 60 iterasyon yapılmıştır. Bu şartlar altında herbir problemin çözümü Intel(R) Core (TM) i7 950 işlemcide herbir problem kesintisiz çalıştırılarak 10 gün mertebelerinde sürmektedir. Çözüm RAM'de 5 GB mertebelerinde yer işgal etmektedir. Sayısal çözümü yapılan akışkan ortam hava ve su olmak üzere iki fazdan oluşmaktadır. Birbirine karışmayan ve çözünmeyen iki fazlı akışkan ortamın çözülmesi için VOF modeli kullanılmıştır. Akışkanların fiziksel özellikleri ve yoğunlukları sabit kabul edilmiştir.

Bu şartlar altında elde edilen sayısal çözümlerde ıslanmaz ve süper ıslanmaz yüzeylerde sonuçlar eşdeğer çap, eşdeğer yayılma faktörü, uzama faktörü, teğetsel gerilme ifadelerinin Weber sayısı, Reynolds sayısı ve kontak açısıyla değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Yapılan sayısal çözümler ile literatürdeki deneysel veriler iyi uyum göstermiştir.
- Islanmaz yüzeye çarpan su jeti önce yüzey üzerinde bir miktar yayılarak iki ana kola dağılmakta ve kollar arasında ince bir film tabakası gelişmektedir. Yüzeyde ilerlemeye çalışan akışkan film tabakasındaki yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisiyle

birleşerek yüzeyden dışarıya doğru yükselmeye çalışmaktadır. Yüzeyler yüksek kontak açılı ise yükselen bu akışkan yüzeyden kurtularak yüzeyden dışarı doğru yansımaktadır. Yüzeyin kontak açısı düşük ise kolların birleşmesiyle yükselen akışkan yüzeyden ayrılamamakta ve tekrar yüzeye yönelerek çarpmakta ve ikinci bir yayılma hareketi yapmaktadır. Bu olay ilerleyen safhalarda kendini tekrarlayarak sıvı zinciri adı verilen yapıyı oluşturmaktadır.

- Islanmaz ( $112^\circ$ ) ve süper ıslanmaz ( $167^\circ$ ) yüzeylere çarpan su jetinin atalet kuvvetlerinin artmasıyla suyun yüzey üzerinde kapladığı alan artmaktadır.
- Islanmaz ve süper ıslanmaz yüzeylerde Weber sayısının artmasıyla suyun kapladığı alan artmaktadır. Düşük Weber sayılarında bu artış daha belirgin olmaktadır. Weber sayısı yükseldikçe suyun yayıldığı alan üzerindeki etkisi azalmaktadır.
- Yüksek kontak açısına sahip süper ıslanmaz yüzeyde gerçekleşen yayılma alanı, aynı şartlarda daha düşük kontak açılı yüzeylerdeki yayılma alanından daha az olmaktadır. Yani yüzeyin kontak açısı arttığında akışkanın yüzey üzerinde yayıldığı alan azalmaktadır.
- Su jetinin hızının artmasıyla uzama faktörü de artmaktadır.
- Weber ve Reynolds sayılarının artmasıyla yüzey üzerine viskoz etkilerden dolayı gelen teğetsel kuvvetin arttığı gözlenmiştir.
- Yüksek kontak açılı yüzeyler kullanılarak katı yüzeye çarpan suyun yüzeyde meydana getireceği viskoz dirençler ciddi oranda azaltılabileceği görülmüştür.
- Islanmaz yüzeylerde özellikle süper ıslanmaz yüzeylerde yüzeye çarpan su jeti geliş açısından daha düşük bir açıyla yüzeyden geri yansımaktadır.



## KAYNAKLAR

Ansyst, “Ansys Fluent 12.0 Theory Guide”, 16-13 - 16-22, (2009)

Barthlott, W., Neinhuis, C., “Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces”. *Planta*, 202, 1-8, (1997).

Başyazıcı, İ. U., “İki fazlı akışlara sayısal yöntemlerin uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2007).

Bai, C., Gosman, A., D., “Development of methodology for spray impingement simulation”, *Society Automot. Engng.*, 950283, (1995).

Beyaz S., Yüzey gerilimi, [online], Balıkesir Üniversitesi, (<http://w3.balikesir.edu.tr/~sedacan/yuzey.html>), (**Ziyaret saati:30 Mayıs 2011**).

Çengel, Y., A., Cimbala, J., M., “Akışkanlar Mekaniği” Çeviri Editörü, Tahsin ENGİN, *İzmir Güven Kitabevi*, , İzmir, Sayfa 51-53, (2008)

Erbil, H. Y., Demirel, A. L., Avcı, Y., Mert, O., “Transformation of a simple plastic into a superhydrophobic surface”, *Science*, Vol. 299. No. 5611, 1377-1380, (2003).

Fujimoto, H., Shiotani, Y., Tong, A., Y., Hama, T., Takuda, H., “Three-dimensional numerical analysis of the deformation behavior of droplets impinging onto a solid substrate” *International Journal of Multiphase Flow*, 33, 317–332, (2007).

Kibar, A., Islanmaz yüzeyler üzerine gönderilen su jetinin davranışının deneysel olarak incelenmesi”, Doktora Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, (2008).

Kibar, A., Karabay, H., Yiğit, K. S., Uçar, İ. O., Erbil, H. Y., “Experimental investigation of inclined liquid water jet flow onto vertically located superhydrophobic surfaces”, *Experiments in Fluids*, 49, 1135-1145, (2010).

Miller, E., Gibson, B., McWilliams, E., Rothstein, J., P., “Collision of viscoelastic jets and the formation of fluid webs”, *Applied Physics Letters* 87, 014101, (2005).

Moumen, N., “Motion of a drop on a horizontal solid surface with a wettability gradient.” Ph. D. Thesis in Chemical Engineering, **Clarkson University**, (2006).

Rioboo, R., Tropea, C., Marengo, M., “Outcomes from a drop impact on solid surfaces”, *Atomization and Sprays*, Vol. 11, pp. 155-165, (2001).

Sikaló, S., Tropea, C., Ganic, E., N., “Impact of droplets onto inclined surfaces” *Journal of Colloid and Interface Science*, 286, 661-669, (2005).

Sikaló, S., Ganic, E., N., “Phenomena of droplet–surface interactions”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31, 97–110, (2006).

Taylor, S., G., “Oblique impact of a jet on a plane surface” *Proc. Roy. Soc.* Vol. 260, No. 1110, 96-100, (1966).

Watanabe, K. Yanuar, Udagawa, H. “Drag reduction of Newtonian fluid in a circular pipe with a highly water-repellent wall”, *J. Fluid Mech.* Vol. 381, pp. 225-238, (1999).

Versteeg, H.K., W. Malalasekera, “An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method”, Longman Scientific & Technical, Essex, (1995).

Yu, X., Wang, Z., Jiang, Y., Shi, F., Zhang, X., “Reversible pH-responsive surface: From superhydrophobicity to superhydrophilicity”, *Adv. Mater.*, 17, 1289-1293, (2005).

Zengerle R, Metz T, 2005, Microfluidics 1 [online], [http://www.imtek.de/anwendungen/content/upload/vorlesung/2005/mikrofluidik\\_i\\_5\\_-\\_surface\\_tension.pdf](http://www.imtek.de/anwendungen/content/upload/vorlesung/2005/mikrofluidik_i_5_-_surface_tension.pdf) (ziyaret saati: 4 Nisan 2011).

## ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 1998 yılında girdiği Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2002 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2003 – 2004 yılları arasında askerlik hizmetini yerine getirdi. 2004 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2008 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2009 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.