

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEKİL BİTKİ ELEMANLARI ETRAFINDA YEREL OYULMA DESENLERİ
VE CİVARINDAKİ AKIM KİNEMATİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Can HODOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEKİL BİTKİ ELEMANLARI ETRAFINDA YEREL OYULMA DESENLERİ
VE CİVARINDAKİ AKIM KİNEMATİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Can HODOĞLU

(501121523)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Oral YAĞCI

OCAK 2015

Anneme,

ÖNSÖZ

Bu çalışmayla akarsu hidroliği konusuna bilimsel katkıda bulunmaktan, bunu gerçekleştirmek için deneyler yapmaktan ve sonuçlar elde etmekten dolayı büyük onur duyuyorum. Bana bilim alanında yol gösteren, kendisiyle çalışma fırsatı sunan ve beni sabırla destekleyen değerli tez danışmanım Doç. Dr. Oral Yağcı'ya, bana vakit ayırarak çalışmama katılan ve deneyimlerini aktaran Doç. Dr. V. Ş. Özgür Kırca'ya, çalışmamı destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Mehmet Furkan Çelik'e ve Vasileios Kitsikoudis'e, çalışırken her an yanımda olmaya ve beni keyiflendirmeye çalışan kız arkadaşım Gizem Çelik'e, bu süreçte yol arkadaşım olan Soheil Farazi Majd'e, en zor anlarımda imdadıma yetişen dostlarım Onur Ağma ve Ali Baran Ünalın'a ve son olarak da beni her zaman destekleyen ve rahat bir çalışma ortamına kavuşmamı sağlayan aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ocak 2015

Can Hodoğlu

(Çevre Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
SEMBOL LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
TABLO LİSTESİ	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Konunun Kapsamı	1
1.2 Konunun Önemi	2
2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.....	5
2.1 Akım – Düşey Silindir Etkileşimi	5
2.1.1 Tekil Bir Silindir Etrafında Ayrılma	5
2.1.2 Dengedeki Oyulma Derinliği ve Oyulmanın Zaman Ölçeği.....	13
2.1.3 Hareketli Tabanda ve Hareketli Olmayan Tabanda Yerel Oyulma	14
2.1.4 Yerel ve Genel Oyulma.....	15
2.1.5 Sürüklenme Kuvveti.....	15
2.1.6 Açık Kanallarda Silindir-Akım Etkileşimi.....	18
2.2 Akım – Tekil Bitki Etkileşimi	22
2.2.1 Sürtünme Katsayısı ile Bitki İlişkisi	22
2.2.2 Bitkilerin Çeşitlerine Göre Akım Değişimi	29
2.2.3 Bitkilendirilmiş Kanallarda Hız Profili	30
2.2.4 Bitkilendirilmiş Alanlarda Türbülans	36
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	39
3.1 Deney Kanalı	39
3.2 Pompalar.....	39
3.3 Deney Elemanları	39
3.4 Yatak Malzemesinin Granülometrisi.....	44
3.5 Ölçüm Aletleri	44
3.5.1 Vectrino I	44
3.5.2 Vectrino II	45
3.5.3 Lazer Tarayıcı	46
3.6 Deneylerin Yürütülüşü	46

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	51
4.1 Oyulma Desenlerinin İncelenmesi.....	51
4.1.1 Yapı Tipi Değiştiğinde Oluşan Oyulma Desenlerinin İncelenmesi	51
4.1.2 Geçirimsizliğin Etkisi.....	56
4.1.3 Derinliğin Batık Bitkiler Üzerindeki Etkisi	60
4.1.4 Bitkinin Eğilmesinin Etkisi	60
4.2 Taban Yakınındaki Hız Profilleri	63
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR.....	81
EKLER.....	85
ÖZGEÇMİŞ	127

SEMBOL LİSTESİ

A	: Akımın kesit alanı
A_b	: Kanalda yatak alanı
A_h	: Bitkinin yatay bir düzlemde kapladığı alan
A_w	: Kanalda yan duvarların alanı
A₀	: Yaprığın tek tarafının boyutu
B	: Kanal genişliği
b_{1/2}	: $u_{\max}/2$ olduğu zamanki hız iz genişliğinin yarısı
C_D	: Sürüklenme katsayısı
D	: Silindir çapı
d	: Sediment tanelerinin büyüklüğü
F_{τ}	: Kayma kuvveti
F_D	: Sürüklenme kuvveti
F_f	: Ortalama sürtünme kuvveti
F_G	: Yerçekimi kuvveti
F_p	: Ortalama basınç kuvveti
F_r	: Froude sayısı
F_s	: Yan cidar ve taban sürtünme kuvveti
g	: Yerçekimi ivmesi
h	: Silindir boyu
k	: von Karman sabiti
k_v	: Eğilmiş bitki yüksekliği
L	: Kanal uzunluğu
MAA	: Momentum absorpsiyon alanı
m	: Bir silindire etki eden diğer silindirlerin sayısı
NVDP	: Normalleştirilmiş hız farkı parametresi
NVVP	: Normalleştirilmiş bitki hız farkı parametresi
n_b	: Manning pürüzlülük katsayısı

Q	: Akım debisi
P	: Islak çevre
R	: Hidrolik yarıçap
R_b	: Taban hidrolik eğimi
R_w	: Yan duvarların hidrolik eğimi
Re	: Reynolds sayısı
S	: Dengedeki oyulma derinliği
S_e	: Ortalama cidar kayma gerilmesine göre enerji gradyanı
S_t	: Oyulma derinliği
s	: Sediment tanelerinin özgül ağırlığı
T	: Oyulmanın zamansal ölçeği
t	: Zaman
U	: Akım hızı
U_d	: Akım yönünde akım hızı
U_f	: Kayma hızı
U_d	: Akıma karşı yönde akım hızı
U₀	: Bozulmamış akım hızı
U'	: Türbülans yoğunluğu
u	: Ortalama akım hızı
u'	: Dalgalanma hızı
u_{max}	: En yüksek hız bozulması
V	: Alan ortalama hızı
V_i	: Akım yönünde i'inci bitkideki ortalama hız
V_{veg}	: Bitki hacmi
x_s	: Atnalı çevrintisinin büyüklüğünü gösteren çap
x_v	: Atnalı çevrintisinin silindirin merkezinden uzaklığı
z₀	: Akım derinliği
γ	: Sıvı özgül ağırlığı
δ	: Yatak sınır tabakası kalınlığı
δ*	: Bozulmamış sınır tabakası kalınlığı
θ	: Shields parametresi
θ_{cr}	: Kritik kayma gerilmesindeki Shields parametresi
λ	: Bitkisel alan sabiti
μ	: Sıvının dinamik viskozitesi

ρ	: Suyun özgül kütlesi
σ	: Standart sapma
τ	: Ortalama sınır kayma gerilmesi
τ_w	: Birim alanda cidarda oluşan kayma gerilmesi
ν	: Kinematik viskozite
ξ	: VIP, bitki yoğunluk parametresi
ϕ	: Yaprığın etki alan sabiti

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Tanımlama çizimi. S: Yatak sınır tabakasıyla ilişkilendirilen ayrılma çizgisi (Sümer ve Fredsoe, 2002).	7
Şekil 2.2: Sınır tabakası kalınlığının atnalı çevrintisine etkisi (Sümer ve Fredsoe, 2002)	8
Şekil 2.3: δD 'nin bir fonksiyonu olarak ayrılma uzaklığı (Sümer ve Fredsoe, 2002).	8
Şekil 2.4: Re_D ve D/δ^* 'in bir fonksiyonu olarak ayrılma uzaklığı (Baker, 1979).	9
Şekil 2.5: Silindir yükseliğinin etkisi $Re_{\delta^*} = 9.5 \times 10^3$, $\delta^*/D = 0.066$ (Baker, 1985). ..	10
Şekil 2.6: Silindirin atnalı çevrresi tarafındaki yatak kayma gerilmesi (Sümer ve Fredsoe, 2002).	11
Şekil 2.7: Taban kayma gerilmesi. $D = 7.5$ cm, $V = 30$ cm/s, $\delta = 20$ cm/s, $\delta/D = 2.7$, $Re_D = 2.3 \times 10^4$ (Hjorth, 1975).	11
Şekil 2.8: Oyulma önleyiciler yerleştirilmiş dik silindirin etrafından geçen akım (Petersen 2014).	12
Şekil 2.9: Etrafında oyulma koruması olan silindirin memba tarafının görüntüsü (Petersen 2014).	12
Şekil 2.10: Oyulma derinliğinin zamana göre gelişimi (Sümer ve Fredsoe, 2002)... ..	13
Şekil 2.11: Yatakta hareketin başlaması (Sümer ve Fredsoe, 2002).	14
Şekil 2.12: Silindir içinde, eşitlik durumundaki oyulma derinliğinin Shields parametresi ile değişimi (Mao, 1986).	15
Şekil 2.13: Köprü ayaklarında oyulmanın çeşitleri (Sümer ve Fredsoe, 2002).	16
Şekil 2.14: Pürüzsüz dairesel silindir için sürüklenme katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (Sümer ve Fredsoe, 2006).	17
Şekil 2.15: Li ve Shen (1973)'ün deneylerinde uyguladığı konfigürasyonlar.	19
Şekil 2.16: Silindirin memba tarafındaki oyulma desenleri: $Re = 39000$	20
Şekil 2.17: Akım direnç modeli (Petryk ve Bosmaijian, 1975).	23
Şekil 2.18: Su yüzüne çıkan bitki koşulunda kuvvetler dengesi (Wu ve diğ., 1999). ..	26
Şekil 2.19: Batık bitki koşulunda kuvvetler dengesi (Wu ve diğ., 1999).	27
Şekil 2.20: Üç farklı bölgede ölçülmüş hız profilleri (Carollo ve diğ., 2002).	32
Şekil 2.21: Kanalin kesitsel görünümü, incelenen dört nokta sırasıyla (1, 3, 6, 8). Yang ve diğ. (2007).	33
Şekil 2.22: Akıma batmamış haldeki bitki [<i>Cupressus Macrocapra</i> (üstteki)] ve su tarafından şekillendirilmiş <i>Cupressus Macrocapra</i> (alttaki)'nin akım yönünde derinlik – zaman ortalamalı ortalama hız grafiği (Yağcı ve diğ., 2010).	35
Şekil 2.23: Boyu sudan uzun haldeki <i>Cupressus Macrocapra</i> 'nın zaman ortalamalı dikey ortalama hızlarının akım yönünde dağılım grafiği (Yağcı ve diğ., 2010).	35
Şekil 3.1: Akım kanalı ve pompaların krokisi (Ölçüler mm boyutundadır).	40
Şekil 3.2: Yapay taban ve bitki elemanlarının konumlandırılması (Ölçüler mm boyutundadır).	41
Şekil 3.3: Deneylerde kullanılan silindir	42
Şekil 3.4: Akıma batmış ve batmamış durumdaki bitkilerin görünümü.	42
Şekil 3.5: Altıgen şeklinde dizilmiş silindirler	43
Şekil 3.6: Deney elemanlarının yükseklik-hacim grafiği	43
Şekil 3.7: Elek Analizi	44

Şekil 3.8: Deneylerde kullanılan Vectrino I	45
Şekil 3.9: Deneylerde kullanılan Vectrino II	45
Şekil 3.10: LEICA Lazer Tarayıcı	46
Şekil 3.11: Silindirik kesilen bitkiler.	48
Şekil 4.1: $q = 47.08$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 1).....	51
Şekil 4.2: $q = 62.1$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 2).	52
Şekil 4.3: $q = 85.54$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 3).....	52
Şekil 4.4: $q = 61.18$ L/s-m birim genişlik debisi altında dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 4).....	53
Şekil 4.5: $q = 80.03$ L/s-m birim genişlik debisi altında dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 5).....	53
Şekil 4.6: $q = 61.44$ L/s-m birim genişlik debisi altında altıgen şeklinde dizilmiş silindirler etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 13).	54
Şekil 4.7: $q = 88.36$ L/s-m birim genişlik debisi altında altıgen şeklinde dizilmiş silindirler etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 14).	54
Şekil 4.8: Silindir, altıgen şeklinde dizilmiş silindirler ve dik ve batmamış bitki	55
Şekil 4.9: $q = 56.35$ L/s-m birim genişlik debisi altında etrafı sarılmış batmamış dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 6).....	56
Şekil 4.10: Batmamış dik bitki ile batmamış dik geçirimsiz bitki	57
Şekil 4.11: Geçirimli ve geçirimsiz batık bitkiler.....	58
Şekil 4.12: $q = 57.82$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 9).....	58
Şekil 4.13: $q = 90$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 10).....	59
Şekil 4.14: $q = 58.14$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 11).	59
Şekil 4.15: $q = 81.23$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 12).	59
Şekil 4.16: Daralma nedeniyle bitkinin neden olduğu kanopi-altı ve kanopi-üstü akım.....	60
Şekil 4.17: $q = 55.65$ L/s-m birim genişlik debisi altında eğik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 7).....	61
Şekil 4.18: $q = 79.45$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 8).	61
Şekil 4.19: Batmamış dik bitki ile eğik bitki.	62
Şekil 4.20: Düşük debili akım sırasında batmamış dik bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.	64
Şekil 4.21: Yüksek debili akım sırasında batmamış dik bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.	65
Şekil 4.22: Düşük debili akım sırasında geçirimsiz dik bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.	66
Şekil 4.23: Düşük debili akım sırasında eğik bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.	67
Şekil 4.24: Yüksek debili akım sırasında eğik bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.	68

Şekil 4.25: Düşük debili akım sırasında batmış bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.	69
Şekil 4.26: Yüksek debili akım sırasında batmış bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.	70
Şekil 4.27: Düşük debili akım sırasında batmış ve geçirimsiz bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.	71
Şekil 4.28: Yüksek debili akım sırasında batmış bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.	72
Şekil 4.29: Düşük debili akım sırasında altıgen şeklinde dizilmiş silindirlerin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.	73
Şekil 4.30: Düşük debili akım sırasında altıgen şeklinde dizilmiş silindirlerin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.	74

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1: Deney sonuçları.	49
Tablo 3.2: Oyulmaların sayısal değerleri ve ağırlık merkezleri.....	50
Tablo 4.1: Silindir, altıgen şeklinde dizilmiş silindirler ve dik ve batmamış bitkinin karşılaştırılması.	55
Tablo 4.2: Batmamış dik bitki ile batmamış dik geçirimsiz bitkinin karşılaştırılması	57
Tablo 4.3: Geçirimli ve geçirimsiz batık bitkilerin karşılaştırılması.	58
Tablo 4.4: Batmamış dik bitki ile eğik bitkinin karşılaştırılması.....	62

TEKİL BİTKİ ELEMANLARI ETRAFINDA YEREL OYULMA DESENLERİ VE CİVARINDAKİ AKIM KİNEMATİĞİ

ÖZET

Nehirlerde bulunan bitkiler sucul hayatın en önemli bileşenlerinden biri olmakla birlikte, hidrolik pürüzlülüğün de önemli bir nedenidir. Bu özellikleri sayesinde taşkın yataklarında var olan bitkiler bir yandan şev stabilitesini sağlarken diğer yandan da morfolojik ve ekolojik işlevleri ile sucul hayata katkıda bulunurlar. Gün geçtikçe önemi artan çevre bilinci bitkilerin taşkın yataklarında kullanımına yönelik çalışmalar yapılmasını sağlamıştır. Ancak yapılan bu çalışmalarda bitkilerin şeklinin akım ve akarsu boyunca sediment taşınımını nasıl etkilediği henüz yeterince tam olarak anlaşılamamıştır. Buna ilave olarak şev ve akarsuda oluşan adacıklarda yetişen bitki elemanlarının türbülansa ve oyulmaya nasıl etki ettiği de bilinmemektedir. Ayrıca bu bitkiler bir ölü alan yaratarak bitki türünün yayılmasını ve akarsu morfolojisinin değişimini desteklerler.

Bu çalışmada aynı türde bitki farklı şekillerde, kanal içerisinde konumlandırılarak, akım, türbülans ve oyulma karakteristiklerindeki değişiklikler gözlenmiştir. Bitkiye ek olarak silindir ve altıgen biçiminde yerleştirilmiş küçük silindirlerden oluşan bir yapı ile de deneyler yapılmış ve sonuçları bitkiler ile karşılaştırılmıştır. Deneyler 26 m uzunluğunda, 0.98 m genişliğinde ve 0.85 m derinliğinde olan akım kanalında gerçekleştirilmiştir. Kanal tabanına katı madde konularak yapay bir yatak oluşturulmuş ve kullanılan gerçek bitki fideleri ile silindirler bu yatay yatakta konumlandırılmıştır. Deneylerde kullanılan ilk bitki sırasıyla, akıma batmamış ve dik bir biçimde, etrafı streç folyo ile sarılarak geçirimsiz bir biçimde ve eğik olmak üzere üç farklı biçimde konumlandırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Aynı bitki türünde bir başka fide kesilip suya batmış bir şekilde ve sonrasında ise streç folyo ile sarılarak konumlandırılmıştır. Bitkilerin streç film ile kaplanmasının altında yatan gerekçe bitkinin kanopi kısmının geçirgenliğinin, problemin hidrodinamiğinde oynadığı rolün daha yakından anlaşılmasıdır. Bununla birlikte deneylerde ön deneyler sonucu belirlenen üç karakteristik debi değeri her bir bitki konfigürasyonuna uygulanmıştır. Deneylerin tamamı kararlı akım koşullarında gerçekleştirilmiştir. Hız verileri iki adet Doppler hızölçer ile ölçülmüş, oyulma verileri ise lazer tarayıcı ile elde edilmiştir. Analiz sırasında, yataktaki oyulma şekilleri ve yatak boyunca tabana yakın oluşan akım doğrultusundaki hız bileşenleri araştırılmıştır. Elde edilen oyulma şekillerinden oyulmaların ağırlık merkezleri elde edilmiş, oyulma ve yığılma miktarları enine, boyuna ve derinlemesine olmak üzere hesaplanmıştır. Bunlardan yola çıkarak bitkiler ve diğer yapı tipleri arasındaki farklar araştırılmıştır. Deneyler sonucunda bitkiler etrafında oluşan oyulma desenleri silindir durumuna göre belirgin şekilde farklıdır. Bu desenlerin bitki etrafında oluşan düzenli akım yapılarının bir sonucu olduğu

düşüncesinden yola çıkarak bitki etrafındaki düzenli yapılar her bir bitki durumu için detaylı bir şekilde yorumlanmıştır. Bitki etrafında oluşan akım ile silindir etrafındaki akımın temel farklılıklarından en önemlisi, bitki durumunda bitkinin memba tarafında oluşan düşey yönlü akımın silindir durumuna oranla çok daha düşük olması ve buna bağlı olarak atnalı çevrilerinin çok daha az gelişmesidir. Diğer bir önemli fark ise bitki durumunda kanopi altı jet akımının silindir durumunda var olmamasıdır. Buna ilave olarak bitki etrafında oluşan çevri kopmalarının büyüklüğü silindir durumuna göre oldukça küçüktür.

SCOUR PATTERNS AROUND OF SINGLE PLANTS AND THE FLOW KINEMATICS AROUND THEM

SUMMARY

The bank and floodplain vegetation are not just one of the main resources of aquatic life, but also the reason for hydrolic smoothness. Plants which live in floodplain areas establish slope stability, help aquatic life with thier morphological and ecological services. With the growing importance of the environmental awereness, there are ongoing studies conducted to use the plants on the floodplain areas. However, the effect of vegetation on sediment transport along the river is not fully understood yet. Furthermore, how turbulence and scouring are affected by plants that are growing on slopes and in the island is still unknown as well.

On this study same type of plants positioned in channel with different variations for observing the differences in flows, turbulence and scouring characteristics. Other than the plants the same observations are also made with rigid cylinder, cylinders which are ordered as a hexagonal formation and compared with plants. The experiments are done in 26 m long, 0.98m width and 0.85 depths flow channel. Solid matters placed at the bottom of the channel to create an artificial bed and plants and tubes used in the experiments positioned in this horizontal bed. The first plant used in three different ways: emerged vertical position, covered with stretch wrap (impermeable), leaned. While another same type plant is first submerged and then covered with stretch wrap. The reason of wrapping plants is to understand the role of plant's canopy's permeability in problem's hydrodynamic. On the other hand, three different current flows are selected in pre-experiments, were used for every type of plant configuration. All of the experiments are done in steady flow conditions. The velocity data is measured by two acoustic Doppler velocitymeters and the scour data is obtained by the laser scanner. During the analysis, scour patterns at the bed and velocity components near the bed, through streamline are investigated. From obtained scour patterns, center of gravity of scouring areas were calculated and scour and deposition amount of transverse, longitudinal and depth was calculated. Respectively, differences between flow around the plants and flow around other obstacles of structures were investigated. As a result of experiments, scour patterns around obstacles were found significantly different. Based on the idea of scour patterns are resultant in the steady flows around plants, regular structures around plants are interpreted. The most important difference between flow around cylinder and plant is downflow at the upstream of plant is much smaller then cylinder and correspondingly horseshoe vortices are much weaker. Another important difference is the subcanopy flow of the plant does not form at the cylinder condition. In addition, the size of the separation around plants are weaker then the ones around cylinder.

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı ve Konunun Kapsamı

Geçmişte nehirlerdeki hidrolik pürüzlülüğün önemli nedenlerinden biri olarak nehirlerde bulunan bitkiler gösterilmiştir. Bu nedenle taşkınları önlemek ve azaltmak için taşkın yatağı ve şev bitkileri sık sık sökülüştür. Ancak, günümüzde yapılan araştırmalar ve çalışmalar neticesinde, bitkilerin son derece önemli ekolojik işlevlere sahip olduğu ve nehir sisteminin bütünleştirici parçası olduğu belirlenmiştir.

Her bitki türü sahip olduğu özellikler doğrultusunda ekosistemde farklı katkı sağlar. Taşkın yatağı ve şev bitki türleri farklı akım koşulları altında farklı tepkiler verirler. Ayrıca bitkinin tamamen ya da kısmen batık olmasının da etkisi bitkinin maruz kalacağı sürüklenme kuvveti üzerinde belirleyici etkisi vardır. Bitkinin şekil özellikleri akımın da etkisi ile değiştikçe, bitkinin maruz kaldığı sürüklenme kuvveti ve türbülans özellikleri değişiklik gösterir.

Nehirlerin, nehir ağzlarının ve bunların etrafındaki alanların şekillenmesinde sucul bitkiler pek çok belirleyici etkiye sahiptir. Fiziksel ve biyolojik faktörlerin, anlık veya uzun zaman içerisinde farklı şekillerde birbiriyle etkileşimi sonucu nehirlerin kendilerine özgü karakteristikleri ortaya çıkar. Jeomorfolojik, ekolojik ve hidrolojik bakış açılarıyla bakılarak birlikte incelendiğinde elde edilen sonuçlar ile bu karakteristik durum hakkında tahmin yürütülebilir.

Akım ile bitki alanının karşılıklı etkileşimi konusunu daha iyi kavrayabilmek için öncelikle ortamda yaşayan bitki türlerinin özelliklerinin öğrenilmesi gerekmektedir. Daha sonra akış direncinin karakterizasyonu için uzun vadedeki morfolojik özelliklerin bilinmesi gerekir.

Nehirlere yakın yerleşim birimlerinde özellikle taşkınların etkisiyle insanlar, nehirlere setler çekmişlerdir veya toprak dolgusu yapmışlardır. Böylece taşkın tehlikesini azaltmayı hedeflemişlerdir. Ancak yapılan bu çalışmaların zaman içerisinde akarsu

ekosistemine zararlı sonuçları belirlenmiştir. Bu yüzden nehirlerle ve doğaya karşı değil, nehirlerle ve doğayla birlikte yaşama prensibi günümüzde benimsenmeye başlanmıştır. Bu anlayışın sonucu olarak akarsuların doğallaştırılması yaklaşımı son yıllarda gelişmiş ülkelerde benimsenmektedir. Bu yaklaşım akarsudaki bitki elemanlarının akımın ortalama ve çalkantı bileşenlerini nasıl değiştirdiğini ve buna bağlı olarak akarsu morfolojisi ve sucul yaşam üzerindeki etkisini belirlemeyi gerekli kılar. Buradan hareketle bu çalışma temel amaç olarak bitki etrafında oluşacak yerel oyulmaların bitki formlarına bağlı olarak nasıl değişiklik göstereceğinin anlaşılmasını hedef almaktadır. Bu kapsamda çalışma dahilinde, konunun araştırılmasına yönelik olarak deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Deneysel çalışma neticesinde farklı bitki formlarının kohezyonsuz zeminde neden olduğu yerel oyulmaları ve bunları oluşturan akım yapılarının anlaşılması çalışmanın temel amacıdır.

1.2 Konunun Önemi

Akarsularda akışın kontrolü yapay yollarla yapılabildiği gibi doğal yollarla da yapılabilir. Günümüzde sürekli artan çevre bilinci, çevre dostu yöntemler kullanılmasına önayak olmuştur. Rejimi kontrol altında tutmanın doğal bir yöntemi sucul bitkilerdir.

Bitkilerin akıma karşı gösterdiği direnç (sürüklenme) kuvveti bitkinin dalları, yaprakları ve gövdesinin özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkar. Ancak bu kısımlar aynı tür içinde dahi farklılık gösterdiği gibi bitki türüne bağlı olarak daha belirgin şekilde farklılık gösterir. Bu bakımdan her bitki türünde ortaya çıkan hidrodinamik problem, başka bir ifade ile akım-bitki etkileşimi kendine has, özgün, bir yapı sergiler.

Sucul bitkiler rejimi düzenlemenin yanında, oksijen üretimini sağlayarak su kalitesinin arttırmırlar. Azot ve fosforun sudaki miktarını dengelerler. Ayrıca akarsulardaki sucul bitkiler arsenik, civa gibi zararlı ağır metalleri tutarak, iletilmesini engellerler. Kanallarda akımın hız çeşitliliğini arttırarak, biyolojik çeşitliliğe ve zenginliğe katkıda bulunurlar. Bunun yanında bitkiler su içinde gösterdikleri dirençle sediment taşınımını düzenlerler. Büyük gövdeli bitkilerin faydalarına değinecek olursak; güneş ışımlarına etkiyerek akarsudaki su sıcaklığını düzenlerler, rüzgâr hızını düşürerek buharlaşmayı ve akarsu şevine düşen yağmur damlalarının hızını düşürerek erozyonu azaltırlar. Buna ilave olarak yine söz konusu sucul bitkiler yağmurun yağmasında etkendirler ve

sediment hareketlerini azaltırlar. Bunu yapmak için de; toprak direncini, debiyi ve yüzeysel akış hızını düşürürler. Bununla beraber akış hidrografının geçiş (konsantrasyon) süresini arttırarak suyun zemine sızma oranını arttırırlar ve yeraltı suyunun daha etkin şekilde beslenmesini sağlarlar. Deniz ve okyanus kıyılarında bulunan bazı bitkiler ise dalgalara karşı direnç göstererek bulunduğu kıyısal bölgeleri korurlar ve kıyı stabilizasyonunu sağlarlar.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

2.1 Akım – Düşey Silindir Etkileşimi

2.1.1 Tekil Bir Silindir Etrafında Ayrılma

Silindir etrafındaki oyulma incelendiğinde, genel olarak deniz ortamında silindir etrafında iki çeşit akım rejiminden söz edilir. Birincisinde, silindir boyutu çok küçük, akım etrafında ise çevrilerin etkisi ile ayrılma vardır. Bu rejime narin-silindir (slender-pile) adı verilir. Diğer akım çeşidinde ise gövde çapı büyüktür ve suda ayrılma olmaz. Silindirin etrafındaki yerel oyulmalardan sorumlu olan bu çevri kopmaları olmadığından bir oyulmaz gözlenmez. Ancak başka nedenler dolayı oyulma olur. Bu tip akış rejimine ise büyük-silindir (large-pile) rejimi adı verilir (Sümer ve Fredsoe, 2002).

Eğer silindir çapı, dalga boyuyla karşılaştırıldığında küçük kalıyorsa, narin-silindir rejimi olur. Aksi takdirde silindirin varlığı dalgayı etkileyerek sapmaya yol açar. Bu durum $D/L > 0.1$ olunca geçerlidir (Sümer ve Fredsoe, 2002). Burada D, silindir çapı ve L ise dalga boyudur.

Akım rejimi Reynolds sayısı:

$$Re = \frac{DU}{\nu} \quad (2.1)$$

ile açıklanabilir. Burada, D silindirin çapı, U akım hızı ve ν ise kinematik viskozitedir. Su durgunken $Re = 0$ 'dır. Akım hızı arttıkça önce silindirin arkasında su yüzeyinde iz çevrintisi oluşur. Hız arttıkça ters basınç gradyanlarının etkisi ile çevri kopmaları oluşmaya başlar. İz çevrintisi, çap ile kıyaslanabilir bir büyüklüğe geldiğinde, sınır tabakası çok küçük bir kalınlığa genişler. Reynolds sayısı 5 olduğu zaman ilk kopma başlar. $5 < Re < 40$ ise, çevrintiler iz çevrintisi formunda oluşmaya başlar. Re arttıkça, çevrintilerin uzunluğu da artar. (Batchelor, 1967).

Reynolds sayısı yükselmeye devam ettikçe, iz çevrintisi kararsızlaşmaya başlar. Bu durum da çevri saçıntısını (vortex shedding) meydana getirir. Bu durumda, iz üzerinde bir çevri caddesi oluşur. Reynolds sayısı $40 < Re < 200$ olduğunda ise, çevri caddesi laminerdir. Saçılım iki tarafta da olur (Williamson, 1989). Reynolds sayısı yükseldikçe türbülans oluşmaya başlar. $200 < Re < 300$ olduğunda, silindir etrafında türbülanslı akım görülür (Bloor, 1964).

$Re > 300$ olduğunda, iz çevrintisi tamamen türbülanslıdır. Sınır tabakası, uzun bir aralık boyunca ($300 < Re < 3 \times 10^5$) laminar kalır. Bu aralıktaki akışa kritik altı (subcritical) akış rejimi adı verilir. Re'nin daha fazla artması halinde, sınır tabakasında türbülans görülür. $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ aralığında kopma noktasında sınır tabakası türbülanslı olur. Sınır tabakası ayrılması bir tarafta türbülanslı ve diğer tarafta ise laminerdir. Bu duruma kritik akış rejimi adı verilir. Reynolds sayısı $3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ aralığında olan akıma da sel rejimi adı verilir. Bu akım rejiminde, sınır tabakası kopması iki tarafta türbülanslıdır. Ancak sınır tabakasında tamamen türbülansa dönüşüm süreci tamamlanmamıştır.

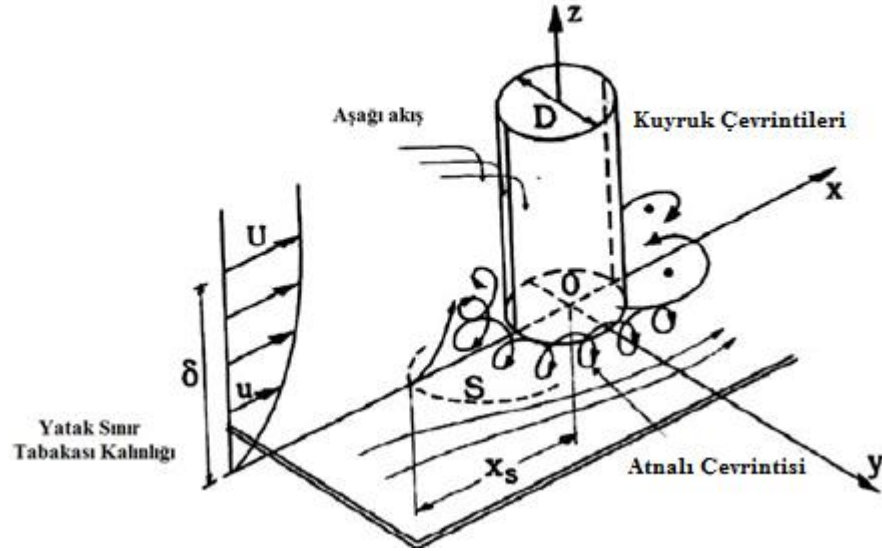
Reynolds sayısı 1.5×10^6 civarına geldiğinde sınır tabakasının bir tarafı tamamen türbülanslı olmuştur. Böylece bir tarafta sınır tabakası tamamen türbülanslıyken, diğer tarafta yer yer laminar yer yer türbülanslıdır. Bu akış rejimi, üst geçiş akım rejimi olarak adlandırılmaktadır. Bu rejimde $1.5 \times 10^6 < Re < 4.5 \times 10^6$ 'dır. Reynolds sayısı 4.5×10^6 'yı geçtiğinde ise, sınır tabakası her yerde türbülanslı olur. Bu akış rejiminin adı da kritikgeçiş (transcritical) akış rejimidir.

Açık kanal akımlarını sınıflandırırken tek kullanılan boyutsuz sayı Reynolds sayısı değildir. Froude sayısı da, F_r , akım sınıflarını belirlemede kullanılır. Froude sayısı, atalet kuvvetlerinin ağırlık kuvvetlerine oranını ifade eden sayıdır:

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{gD}} \quad (2.2)$$

Burada D hidrolik derinlik, u ortalama hız ve g ise yerçekimi ivmesidir. Froude sayısında $F_r = 1.0$ kritik olarak kabul edilir. $F_r < 1.0$ ise nehir rejimi olarak adlandırılır. $F_r > 1.0$ olduğunda ise sel rejimi olarak adlandırılır. Sel rejiminde ortalama akım hızı dalga yayılma hızından fazladır. Nehir rejiminde de dalga yayılma hızı akım hızından fazladır.

Silindire gelen akımın silindirin etrafındaki sınır tabakasına çarpması, silindirin varlığından kaynaklanan ters basınç gradyanı etkisi, ile sınır tabakası üç boyutlu ayrılmaya maruz kalır. Bunun sonucunda silindir etrafında atnalı çevrintisi (horseshoe vortex) meydana gelir (Şekil 2.1).



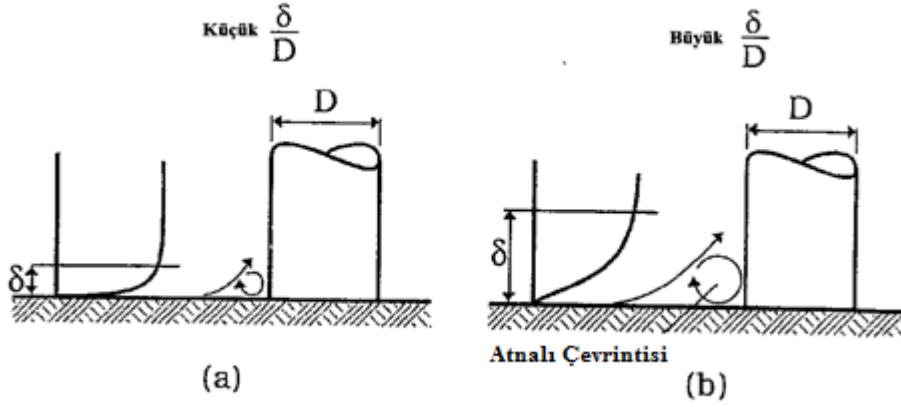
Şekil 2.1: Tanımlama çizimi. S: Yatak sınır tabakasıyla ilişkilendirilen ayrılma çizgisi (Sümer ve Fredsoe, 2002).

Atnalı çevrintisinin oluşması için iki faktör vardır:

- δ kalınlığında bir sınır tabakası
- Silindirin varlığından kaynaklanan ters basınç gradyanı.

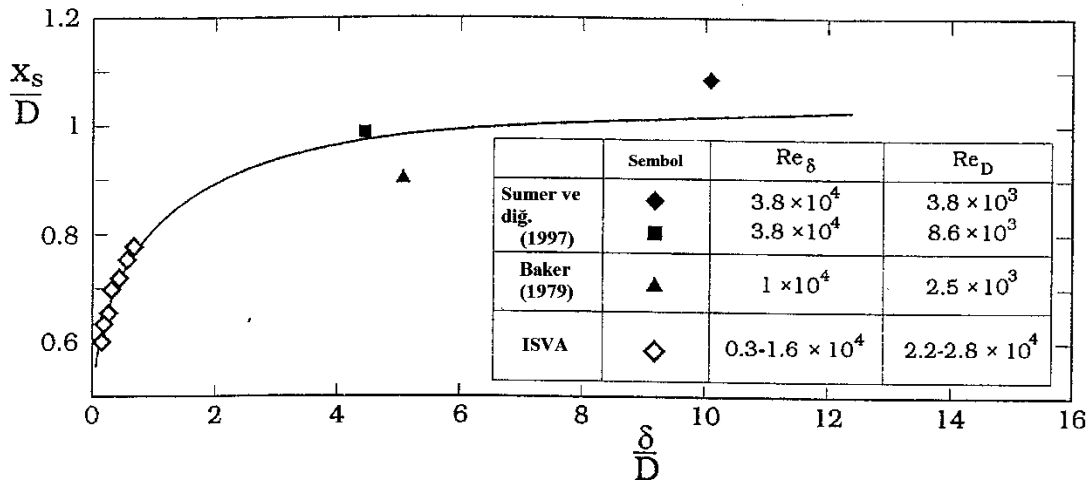
Ters basınç eğrileri çok güçlü olmalıdır ki yatak üzerindeki sınır tabakası ayrılıp atnalı çevrintisini oluşturabilsin (Şekil 2.2). Durgun akım koşullarında atnalı çevrintisi, $\frac{\delta}{D}$ (yatağın sınır tabakası kalınlığının silindir çapına oranı), Re_D (silindir Reynolds sayısı) ve geometriye göre değişir (Baker, 1979)

$\frac{\delta}{D}$ değeri çok küçük olduğunda sınır tabakasında ayrılma hiç olmayabilir ya da çok küçük olabilir. Haliyle hiç atnalı çevrintisi gözlenmeyebilir. Şekil 2.3'te x_s 'in (atnalı çevrintisinin büyüklüğünü karakterize eden çap uzunluğu) $\frac{\delta}{D}$ ile arasındaki ilişki çizilmiştir.



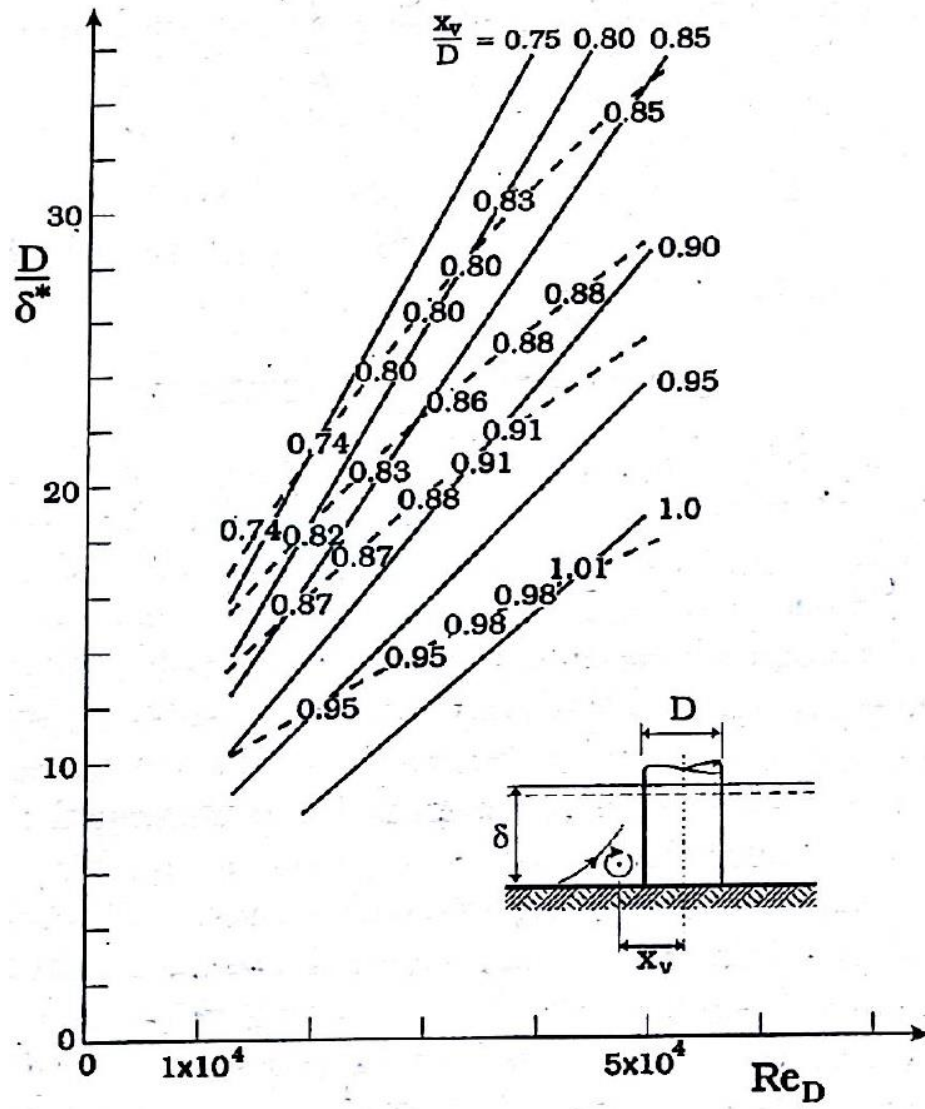
Şekil 2.2: Sınır tabakası kalınlığının atnalı çevrintisine etkisi (Sümer ve Fredsoe, 2002)

$\frac{\delta}{D}$ ile aynı şekilde Reynolds sayısı küçük olursa ayrılma gecikir. Bunun nedeni sınır tabakasının ayrılmaya karşı daha fazla dirençle karşılaşmasıdır. Küçük Reynolds sayıları için ayrılma hiç olmayabilir veya çok küçük olabilir. Baker, 1979 yılında atnalı çevrintisinin silindirin merkezinden uzaklığını (x_v) değişik durumlarda ölçmüştür.



Şekil 2.3: $\frac{\delta}{D}$ 'nin bir fonksiyonu olarak ayrılma uzaklığı (Sümer ve Fredsoe, 2002).

Şekil 2.4'te δ^* bozulmamış sınır tabakasının kalınlığını temsil etmektedir. Silindirin su içerisinde kalan uzunluğu ise atnalı çevrintisinin büyüklüğüne etki eden bir başka etkendir. Silindir su içinde kalan uzunluğu arttıkça ters basınç gradyanı da artar ve bu

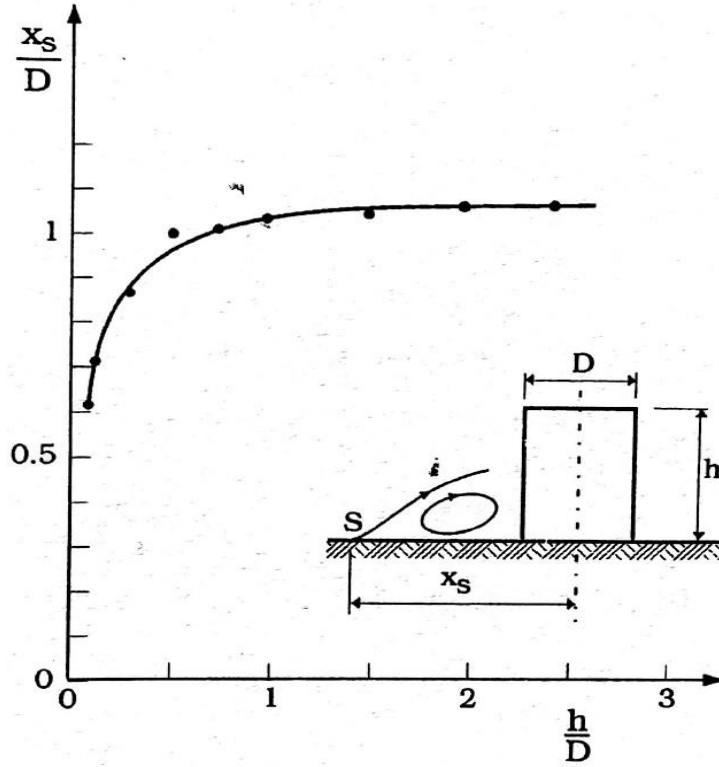


Şekil 2.4: Re_D ve D/δ^* 'in bir fonksiyonu olarak ayrılma uzaklığı (Baker, 1979).

da daha büyük atnalı çevrintisi oluşması anlamına gelmektedir. Şekil 2.5 bu ilişkiyi göstermektedir.

Bunlardan başka atnalı çevrintisne etki eden iki önemli etken daha vardır. Bunlar; atnalı çevrintisinde türbülansa geçiş ve atnalı çevrilerinden kaynaklanan taban kayma gerilmesidir (Sümer ve Fredsoe, 2002).

Laminer atnalı çevrilerinden çok küçük $\frac{\delta}{D}$ ve Re_D değerleri için söz edilebilir. Baker (1991)'de laminer atnalı çevrinti sistemlerinin, türbülanslı olmadan önceki salınımlarla ilgili olduğu söylenmiştir. Burada yapılan deneylerde ilksel salınınımın ilk olarak,



Şekil 2.5: Silindir yükseliğinin etkisi $Re_{\delta^*} = 9.5 \times 10^3$, $\delta^*/D = 0.066$ (Baker, 1985).

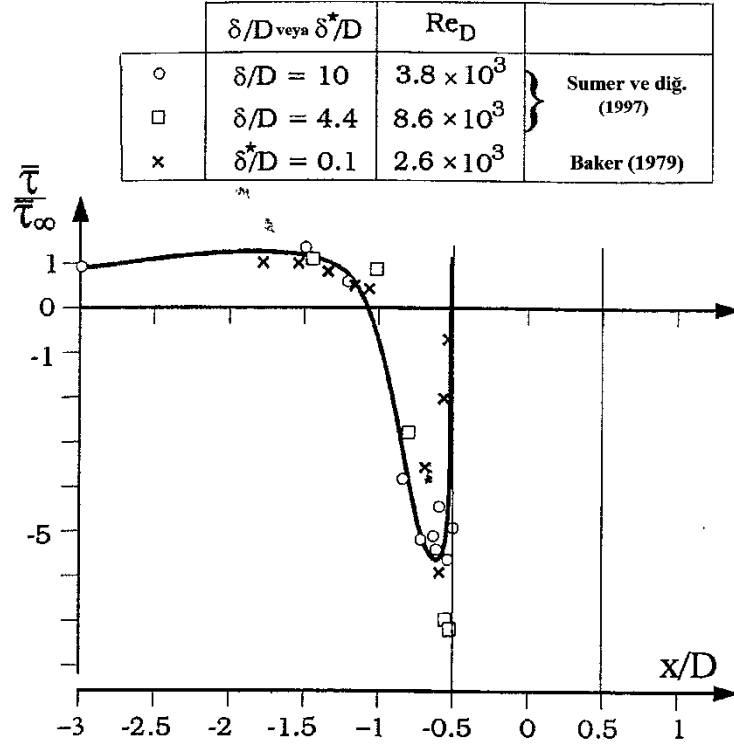
$$Re_D \left(\frac{\delta^*}{D} \right)^{\frac{1}{2}} = 800$$

olduğu zaman görüldüğü ve ikincil salınımın ise,

$$Re_{\delta^*} = 150$$

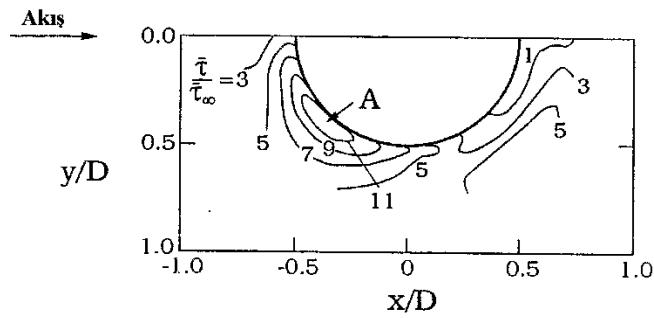
olduğu zaman oluştuğu gözlenmiştir. Burada Re_{δ^*} , sınır tabakası kalınlığı δ^* olduğu zamanki Reynolds sayısını temsil etmektedir. Kısacası pratikte düşünüldüğünde atnalı çevrisi akışı normal olarak türbülanslı rejimdedir.

Şekil 2.6'da bozulmamış ortalama yatak kayma gerilmesiyle x eksenini boyunca normalize edilmiş ortalama yatak kayma gerilmesi gösterilmektedir ($\frac{\bar{\tau}}{\tau_{\infty}}$). Şekil 2.6'dan görüldüğü gibi taban kayma gerilmesi, silindirin hemen önünde bozulmamış kayma gerilmesinden 5 kat ya da daha fazla olmaktadır (Sümer ve Fredsoe, 2002).



Şekil 2.6: Silindirin atnalı çevresi tarafındaki yatak kayma gerilmesi (Sümer ve Fredsoe, 2002).

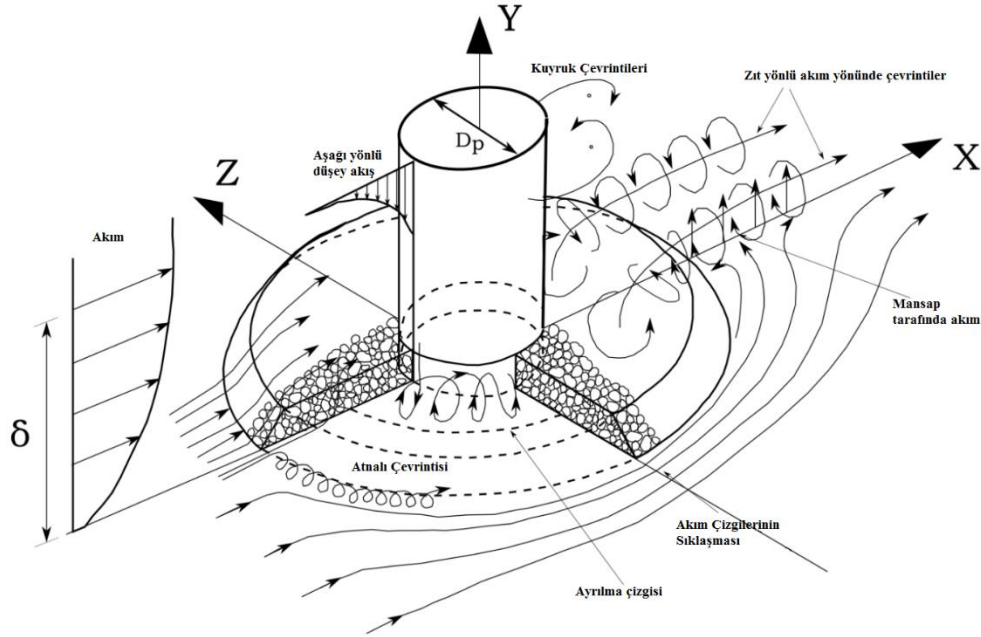
Şekil 2.7’de ise silindir çevresinde yatak kayma gerilmesindeki büyüme ($\frac{\tau}{\tau_\infty}$), bölge gözlenmiştir (Hjorth, 1975). Ön ve kenar uçların arasında bu büyümenin 11 kata kadar çıktığı görülmektedir. Atnalı çevresi ve kenarlardaki akımın birleşmesi dolayısıyla kayma gerilmesi büyümektedir.



Şekil 2.7: Taban kayma gerilmesi. $D = 7.5$ cm, $V = 30$ cm/s, $\delta = 20$ cm/s, $\delta/D = 2.7$, $Re_D = 2.3 \times 10^4$ (Hjorth, 1975).

Petersen (2014)’te yapılan deneylerde hareketli tabanlı bir akım kanalına yerleştirilmiş silindirin hemen memba tarafındaki ön kısmına oyulma önleyiciler

konumlandırılmıştır. Silindirin mansap tarafında yatak boyunca oluşan oyulmanın asıl nedeninin silindirin yanında artan hızın yanında silindirden sonra oluşan zıt yönlü akım yönünde (counter-rotating vortices çevrintiler olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.8). Burada öncelikle aşağı yönlü akış ve atnalı çevrintileri ile oluşan oyulma çukurundan taşınan sediment maddenin kanal boyunca zıt yönlü akım yönünde çevrintilerle taşındığı gösterilmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.8: Oyulma önleyiciler yerleştirilmiş dik silindirin etrafından geçen akım (Petersen 2014).



Şekil 2.9: Etrafında oyulma koruması olan silindirin memba tarafının görüntüsü (Petersen 2014).

2.1.2 Dengedeki Oyulma Derinliği ve Oyulmanın Zaman Ölçeği

Bir cisim etrafında oluşan oyulma belli bir zamandan sonra denge konumuna gelir. Bu denge durumunda değişmeyen oyulma derinliğine dengesdeki oyulma derinliği (equilibrium scour depth) denir (Sümer ve Fredsoe, 2002).

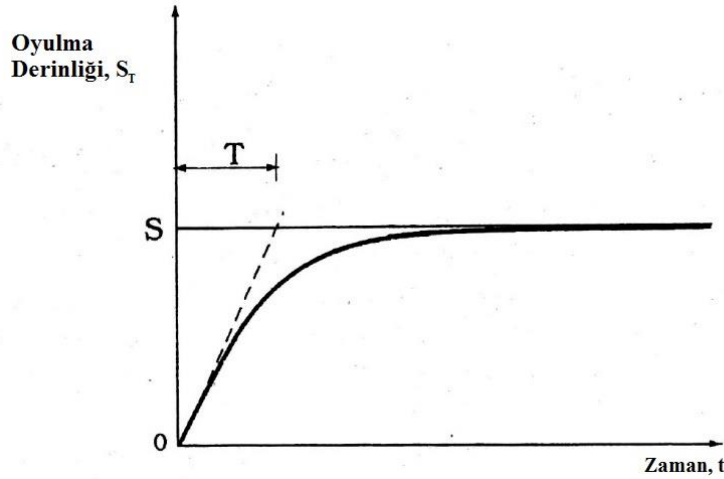
Ayrıca bu denge konumuna gelene kadar belli bir zaman geçer. Bu zaman içerisinde oyulma giderek azalan bir biçimde oluşur. Bu zamana, oyulmanın zaman ölçeği adı verilir (Şekil 2.10). Bu zaman pek çok farklı şekilde tanımlanabilir:

$$S_t = S \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right) \quad (2.3)$$

T = Oyulma sürecinin zamansal birimi

S = Dengedeki oyulma derinliği

S_t = Oyulma derinliği



Şekil 2.10: Oyulma derinliğinin zamana göre gelişimi (Sümer ve Fredsoe, 2002).

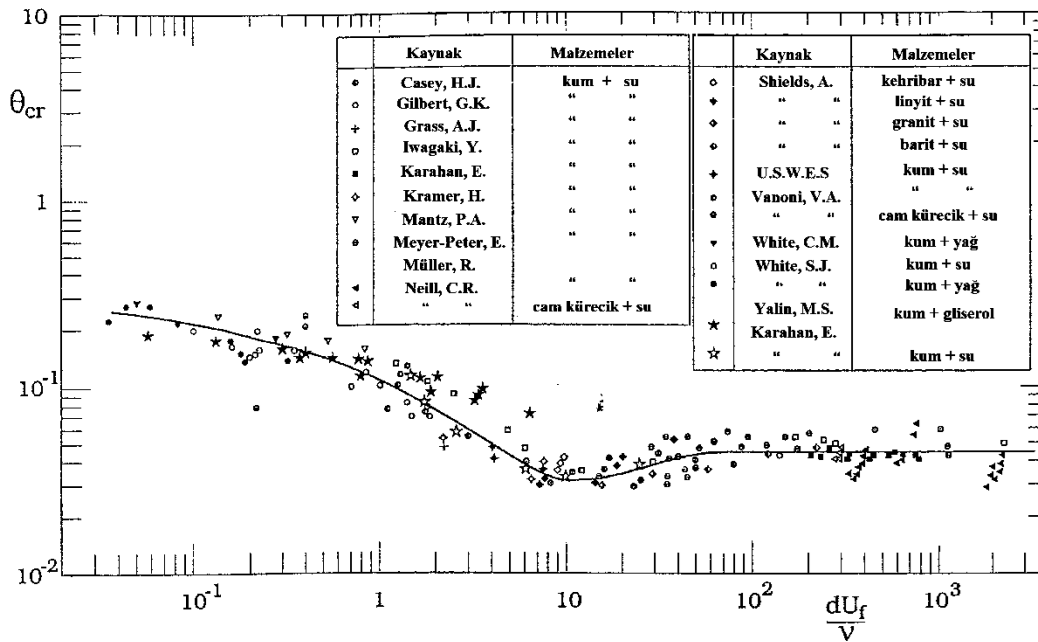
Oyulma derinliği, oyulma potansiyeline etki ettiği için önemlidir. Oyulma derinliğinin belirlenmesi yapının dizaynında ve oyulmanın engellemesi çalışmalarında gereklidir. Oyulmanın zamansal birimi de aynı şekilde önemlidir. Fırtına sonrası açılan bir oyugun, yeniden dolma imkanı vardır. Burada önemli olan soru, bir dahaki fırtınaya kadar yeniden dolan bölgede ne kadar oyulma olacağıdır. Açıkça, oyulma fazla miktarda olacağı için, fırtına, oyulmanın zamansal biriminden daha baskın çıkmak zorundadır. Bunun için de zamansal birimin bilinmesi gerekmektedir (Sümer ve Fredsoe, 2002).

2.1.3 Hareketli Tabanda ve Hareketli Olmayan Tabanda Yerel Oyulma

Oyulma iki türlü sınıflandırılabilir: hareketli tabanda oyulma ve hareketli olmayan tabanda oyulma (Sümer ve Fredsoe, 2002). Hareketli olmayan tabanda yerel oyulmada yapı etrafında hiç sediment hareketi bulunmamaktadır ($\theta < \theta_{cr}$). Hareketli tabanda oyulmada ise sediment taşınımı tüm yatak boyunca görülür ($\theta > \theta_{cr}$). Burada θ , bozulmamış Shields parametresi anlamına gelmektedir ve şu şekilde gösterilir:

$$\theta = \frac{U_f^2}{g(s-1)d} \quad (2.4)$$

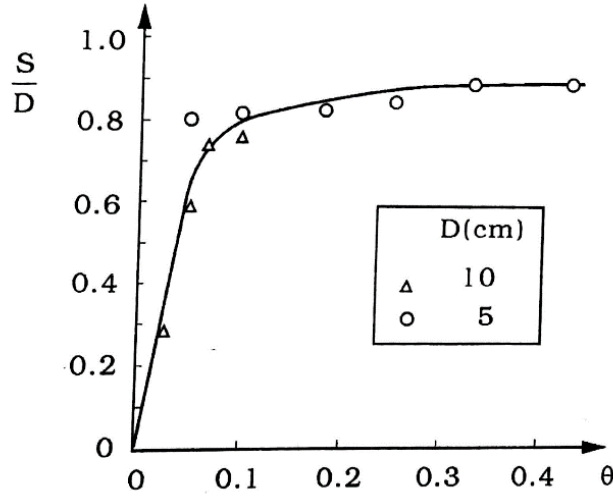
Burada, $U_f = \sqrt{T_{\infty}/\rho}$ bozulmamış yatak kayma hızı, g yerçekimi ivmesi, s sediment tanelerinin özgül ağırlığı ve d sediment tanelerinin büyüklüğüdür. θ_{cr} sediment taşınmasının başladığını gösteren kritik kayma gerilmesi ile tanımlanan Shields parametresidir. Reynolds sayısının, $\frac{dU_f}{\nu}$, bir fonksiyonudur (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: Yatakta hareketin başlaması (Sümer ve Fredsoe, 2002).

Hareketli olmayan taban koşulunda, θ arttıkça daha belirgin bir oyulma derinliği değişimi gözlenir. Çok düşük θ değerlerinde hiç oyulma gözlenmez. Çünkü artan kayma gerilmesi bile sediment taşınımı için yetersiz kalabilir. Ancak hareketli taban koşulunda θ değiştiğinde çok az miktarda oyulma derinliğinde değişim gözlenir. Çünkü bu durumda θ 'daki değişim sediment taşınımına iki taraflı olarak, hem oyulma iç

kısımında hem de dış kısmında, yansır. Sonuç olarak eşitlik durumundaki oyukta çok küçük değişimlere yol açar (Şekil 2.12).



Şekil 2.12: Silindir içinde, eşitlik durumundaki oyulma derinliğinin Shields parametresi ile değişimi (Mao, 1986).

2.1.4 Yerel ve Genel Oyulma

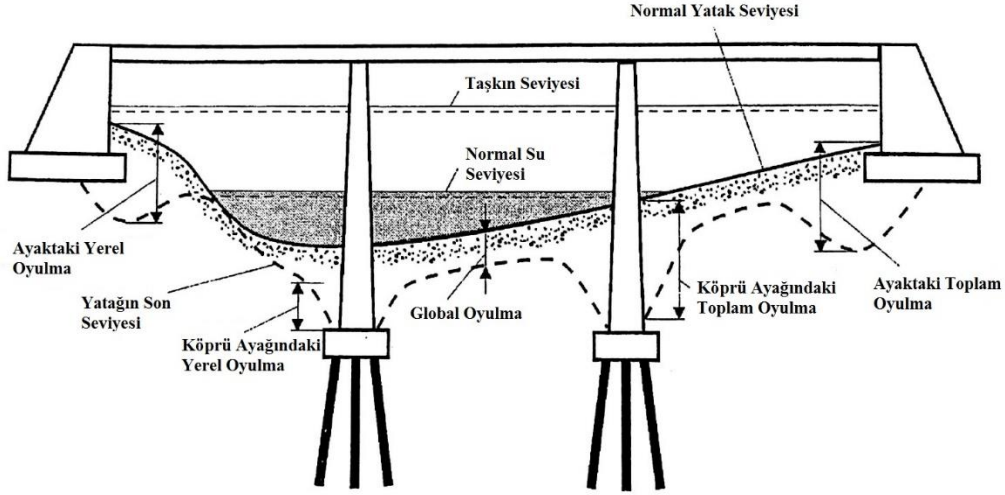
Yerel ve genel oyulmayı açıklamak için ayakları çakılmış çelik bir platform ve köprü ayakları düşünülebilir. Çelik platformu ele alırsak, bir akım bu platforma geldiğinde iki tip oyulma olduğu görülür. Bunların biri platformu oluşturan tekil çelik yapı elemanlarından birinin etrafında oluşan oyulmadır. Buna yerel oyulma adı verilir. Diğeri ise tüm platform etrafında oluşan oyulmadır. Bu genel oyulmanın nedeni tekil yapı malzemelerinin oluşturduğu akım etkileri ve yapı malzemeleri tarafından üretilen türbülanstır (Sümer ve Fredsoe, 2002).

Köprülerdeki yerel ve genel oyulma da aynı şekilde olur. Yerel oyulma köprü ayakları ve çevresinde oluşur. Genel oyulma ise nehir yatağının seviyesini düşürür. Genel oyulma bu nedenden başka, hidrometeorolojik değişiklikler, jeomorfolojik değişiklikler, insan faaliyetleri, kıyı erozyonu gibi nedenlerle de meydana gelir (Şekil 2.13).

2.1.5 Sürükleme Kuvveti

Silindir etrafındaki akımın silindire uyguladığı bir kuvvet vardır. Bu kuvvet, basınç kuvveti ve sürtünme kuvveti olmak üzere başlıca iki başlık altında incelenebilir.

Silindir üzerinde birim uzunluk başına ortalama basınç kuvveti,



Şekil 2.13: Köprü ayaklarında oyulmanın çeşitleri (Sümer ve Fredsoe, 2002).

$$\overline{F_p} = \int_0^{2\pi} \overline{p} \cos(\phi) r_0 d\phi \quad (2.5)$$

Ortalama sürtünme kuvveti ise,

$$\overline{F_f} = \int_0^{2\pi} \overline{\tau_0} \sin(\phi) r_0 d\phi \quad (2.6)$$

Burada, $\overline{p}$ basıncı ve $\overline{\tau_0}$ ise silindir üzerindeki cidar kayma gerilmesini göstermektedir. Üst çizgiler ise zamansal ortalama olduğunu belirtmektedir.

Toplam kuvvet ise bu iki kuvvetin toplamına eşittir:

$$\overline{F_D} = \overline{F_p} + \overline{F_f} \quad (2.7)$$

Burada ise $\overline{F_p}$ terimi şekil direnci ve $\overline{F_f}$ ise yüzeysel sürtünme kuvveti olarak tanımlanmaktadır.

Sürtünme kuvvetinin ortalama sürüklenme kuvvetine olan katkısı Reynolds sayısı 10^4 'ten büyük ise %2-3 civarındadır. Bu koşulda sürtünme kuvveti dahil edilmeden sürüklenme kuvveti hesaplanabilir.

$$\overline{F_D} = \int_0^{2\pi} (\overline{p} \cos(\phi) + \overline{\tau_0} \sin(\phi)) r_0 d\phi \quad (2.8)$$

Potansiyel akım teorisinden yararlanılarak bu ifade,

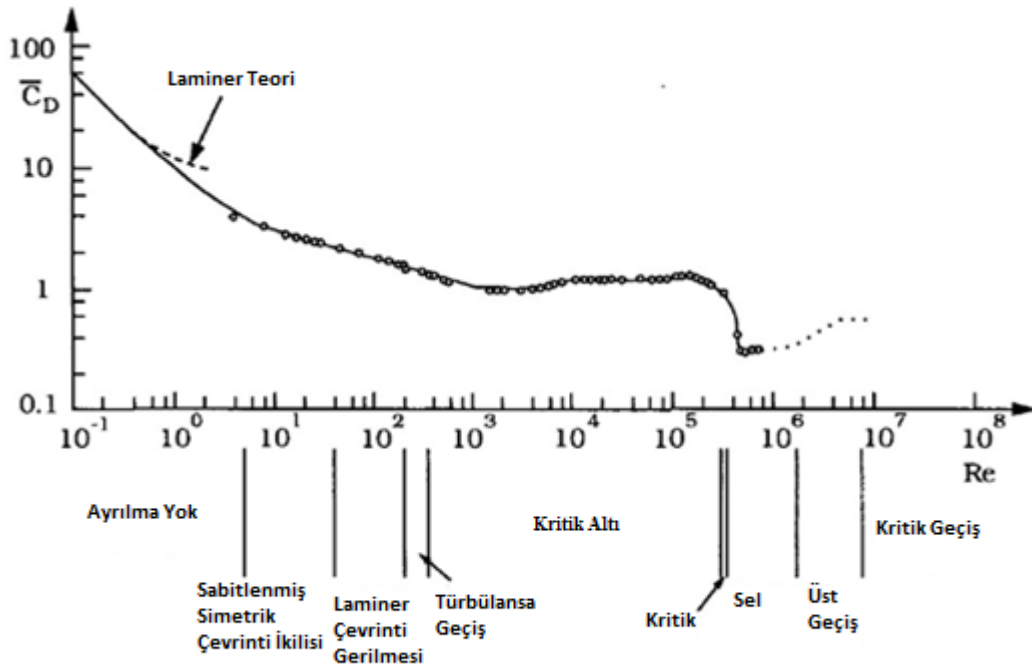
$$\frac{\overline{F_D}}{\frac{1}{2}\rho DU^2} = \int_0^{2\pi} \left[\left(\frac{\overline{p}-p_0}{\rho U^2} \right) \cos(\phi) + \left(\frac{\overline{\tau_0}}{\rho U^2} \right) \sin(\phi) \right] \quad (2.9)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $D = 2r_0$ yani silindir çapıdır. Denklemin sağ tarafı Reynolds sayısının bir fonksiyonudur. Bu kısma $\overline{C}_D$ denir ise,

$$\frac{\overline{F}_D}{\frac{1}{2}\rho DU^2} = \overline{C}_D \quad (2.10)$$

$\overline{C}_D$ ortalama sürüklenme katsayısı olarak ya da kısaca sürüklenme katsayısı olarak adlandırılır.

Sürüklenme katsayısı, $Re = 300$ seviyesine gelene kadar monoton azalandır. $300 < Re < 3 \times 10^5$ arası ise sabit bir değer (1.2) alır (Şekil 2.14). Reynolds sayısı 3×10^5 'i geçtiğinde ise (sel rejimi) sürüklenme katsayısı 1.2'den aniden 0.25 seviyesine düşer. Bu düşüşe sürüklenme krizi (drag crisis) adı verilir.



Şekil 2.14: Pürüzsüz dairesel silindir için sürüklenme katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (Sümer ve Fredsoe, 2006).

Pürüzlü silindirlerde sürüklenme katsayısı sadece Reynolds sayısının bir fonksiyonu olmaktan çıkar. Reynolds sayısının yanında $\frac{k_s}{D}$ 'nin de bir fonksiyonu olur. k_s burada Nikuradse eşdeğer kum pürüzlüğüdür (Sümer ve Fredsoe, 2006).

Düşük Reynolds sayıları için $\overline{C}_D$ pürüzsüz silindirdeki gibi alınabilir (1.4). Pürüzlülük arttıkça $\overline{C}_D - Re$ değişiminin daha düşük Re seviyelerinde bittiği görülmektedir. Bunun başlıca nedeni de pürüzlülük arttıkça sınır tabakasındaki türbülanslıya daha erken

geçişidir. Sürüklenme krizi ise pürüzsüz silindirdeki kadar yoğun değildir. Bu durumun başlıca nedeni ayrılma noktasının açılma konumudur. Süperkritik durumda ayrılma noktası pürüzsüz silindirde 140° iken, $k_s/D = 4.5 \times 10^{-5}$ olan bir pürüzlü silindirde 115° 'dir (Çünkü sınır tabakası daha kalın olduğundan duvar yakınında daha zayıf bir momentum değişimi olur).

2.1.6 Açık Kanallarda Silindir-Akım Etkileşimi

Petryk (1968)'de açık kanallarda sürüklemeye etki eden durumlar: açık kanal türbülansı; serbest yüzey etkileri; düzensiz hız profilinin etkisi, tıkanmanın etkisi olarak sıralanmıştır. Bununla birlikte suda oluşan izin genişleme ve daralmasını aşağıdaki formüllerle tanımlamıştır:

$$u_1 = \frac{u_{max}}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi z}{2b_{1/2}} \right) \right] \quad (2.11)$$

$$\frac{u_{max}}{U_o} = -0.90 \left(\frac{x}{C_d d} \right)^{-0.7} \quad (2.12)$$

$$\frac{2b_{1/2}}{C_d d} = 0.48 \left(\frac{x}{C_d d} \right)^{0.59} \quad (2.13)$$

Burada, u_1 iz bölgesinde oluşan hızdaki bozulma, u_{max} akım derinliği üzerinden izin merkezindeki en yüksek hız bozulması, U_o akımın ortalama hızı, C_d sürüklenme katsayısı, d silindir çapı, $b_{1/2}$ hız bozulmasının $u_{max}/2$ olduğu zamanki iz genişliğinin yarısı, x ve z ise boylamsal ve çapraz yönlerdir.

Petyk (1968)'de geliştirilen bir yöntemde ise bir kanaldaki pek çok silindirden dolayı n 'inci silindirde oluşan akım hızındaki azalma bulunabilmektedir. Bunun için $U_{o1} = U_o$ (bozulmamış akım hızı) kabul edilerek, n 'inci silindir için:

$$U_{on} = U_o(x_n) + \sum_{i=1}^m u_i [(x_n - x_i), (z_n - z_i)] \quad (2.14)$$

$$U_o(x_n) = U_o - \frac{1}{W} \sum_{i=1}^m \int_W u_i [(x_n - x_i), (z_n - z_i)] dz \quad (2.15)$$

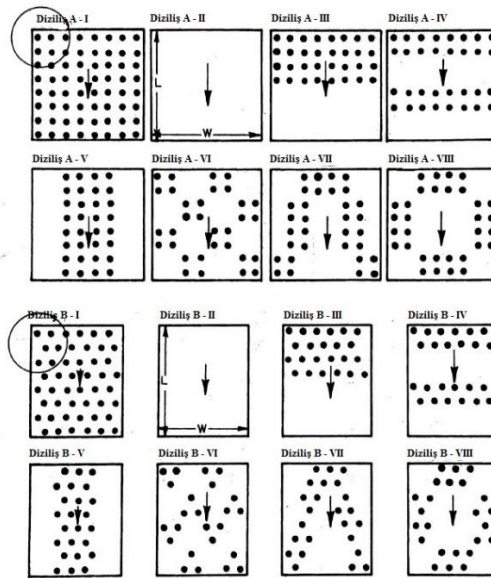
Burada; m n 'inci silindire etki eden silindir sayısı ($x_n > x_i$ ve $u_{imax}/U_{oi} \geq 0.02$ koşullarında).

Tekil bir silindir için iki boyutlu sürüklenme kat sayısı en iyi tahminle 1.2 değeridir. Bu durum, silindirin arkasında havalanmanın olmadığı, tıkanma etkilerinin olmadığı ve kritik altı akım koşullarında bulunan akışlarda geçerlidir. Ancak pek çok silindirin

arasında bulunan tekil bir silindir için bu durum daha farklı olabilmektedir (Li ve Shen, 1973).

Li ve Shen (1973)'te yapılan deneylerde eşit çaptaki silindirleri paralel ve çapraz bitki etkileşimini deneysel olarak modellemişlerdir (Şekil 2.15). Buna göre:

- Bitkilerin çeşitli şekillerde desen veya grup biçiminde konumlandırılması sonucu debilerin değişiminde gözle görülür bir farklılık yaşanmaktadır.
- Çapraz konumlandırılmada altıncı diziliş sediment taşınımını en fazla azaltan ve üçüncü diziliş ise ikinci olarak en fazla azaltan diziliştir.
- Altıncı çapraz diziliş uzun bitkilerin ekimi için tavsiye edilmektedir.
- Altıncı çapraz diziliş bitkilerin hasat zamanı için fazla ekonomik olmayacağından üçüncü diziliş kabul edilebilir.

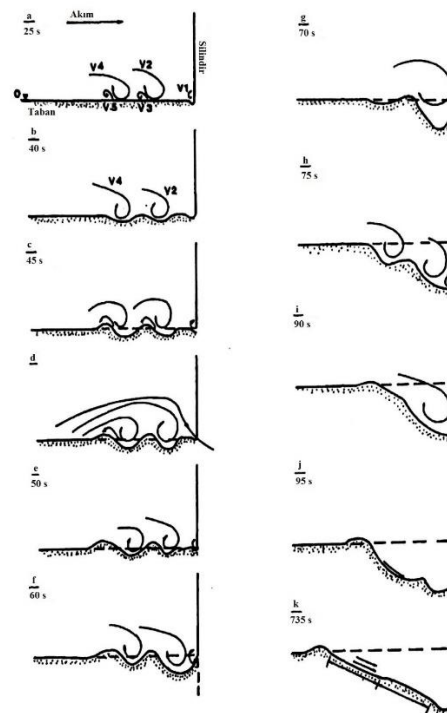


Şekil 2.15: Li ve Shen (1973)'ün deneylerinde uyguladığı konfigürasyonlar.

Bu çalışmalarda genel olarak çapraz dizilişlerde suyun debisinde daha fazla azalma olduğu görülmektedir. Yine burada yapılan deneylerde yataktaki ortalama sınır kayma gerilmesinin bitkilerin büyüklüğü ve taban eğiminden, suyun debisindeki değişim ve sediment boyutuna göre daha fazla etkilendiği görülmüştür. Yataktaki sınır kayma gerilmesindeki gecikmenin bitki büyüdükçe arttığı gözlemlenmiştir.

Çoğunlukla yapılan çalışmalarda oyulma derinliğinin değişiminde silindirin çapının ve şeklinin en önemli etken olduğu vurgulanmıştır. Akım hızı, suyun derinliği,

sediment çapı gibi etkenlerin silindir şekli kadar etkilemediği varsayılmıştır. Ama bazı durumlarda tanecikli yapılar silindirin etrafında tabaka oluşturabilmektedir. Bu durumda sediment dizilişi önem kazanmaktadır (Dargahi, 1982).



Şekil 2.16: Silindirin memba tarafındaki oyulma desenleri: $Re = 39000$.

iki çukur oluşumu gözlemlenmiştir. İki ve dört numaralı çevrintilerden üç ve beş numaralı çevrintilere sediment taşınımı olmuştur. Böylece çevrintiler arasında kalan tanecikler tepecik oluşturmuştur. Bu sırada da birinci çevrinti oymaya devam etmiştir. Çevrintiler arasında kalan tanecikler taşınarak mansap tarafına ilerlemişlerdir. 60. saniyeden sonra birinci ve ikinci çevrintiler arasında buluna tepecik düzleşerek iç bükey bir görünüm oluşturmuştur. İkinci ve dördüncü çevrintiler arasındaki tepecik ise ikinci bir eğimli yüzey oluşturmaya başlamıştır. 735. saniyede ise alttaki ve üstteki eğimli bölgeler aynı uzunluğa ulaşmışlardır. Çevrinti iki ve üçün birlikte etki etmesiyle, alt ve üst eğimli bölgenin birleşme noktasında sediment saçılımı meydana gelmektedir.

Dargahi (1990)'da ayrıca ilk oyulmanın silindirin arka tarafında gerçekleşmesinin nedeni olarak silindirin arkasında oluşan birinci çevrintiyi ve silindirin yanında hızlanan akımı gösterilmiştir. Oyulmaya etki eden ve oyulmayı şekillendiren koşulların, sıklıkla periyodik olarak oluşan sediment taşınımı ve tepecikler olduğu belirtilmiştir. Silindirin etrafında oluşan atnalı çevrintileri sayesinde silindirin ön ve arka tarafındaki oyulma yüzeyleri etkileşime girdiği anlatılmıştır.

Kumar ve Kothiyari (2012)'de yapılan deneylerde 4 çeşit farklı deney düzeneği kullanmışlar ve değişken çaplı temeli olan bir kazığın etrafında oyulma problemini deneysel olarak çalışmışlardır. İlk deneyde silindir olarak çapı 114 mm olan bir silindir kullanmışlardır. Diğer deneylerde de alt kısmı 210 mm ve üst kısmı 114 mm çaplı iki katlı bir silindir kullanmışlardır. Ancak silindirin bu kat noktası yatak seviyesinin altında, yatak seviyesinde ve yatak seviyesinin üstünde olmak üzere üç farklı şekilde konumlandırılmıştır. Bu deneylerde: hız profilleri, türbülans yoğunlukları ve Reynolds kayma gerilmeleri ölçülmüş ve tüm deneylerdeki sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır. Ancak, kat noktası yatak yüzeyine göre değiştikçe silindire yakın yerlerde hız profillerinin dikine değerlerinde belirgin değişiklikler olduğu görülmüştür. Ölçülen hız değerleri çevrinti boyutlarının çeşitliliğini ölçmek için elverişli sonuçlardır. Çünkü, kat noktası yatak seviyesinin üstünde bulunan silindir ve düzgün silindirle yapılan deneyler karşılaştırıldığında katlı silindirde oluşan çevrintilerin büyüklüğünün %11 daha fazla olduğu görülmüştür. Kat noktasının yatak seviyesinin altında kaldığı silindir ile düzgün silindir karşılaştırıldığında ise çevrinti genişliğinin katlı silindirde 0.85'i kadar olduğu görülmüştür. İz bölgesinde u bileşenin düzgün silindir için hepsinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak türbülans yoğunluğunun büyüklüğü en fazla

kat noktasının yatak seviyesinin üstünde bulunduğu silindirin olduğu deneyde fazla olduğu görülmüştür. Diğerlerinde ise türbülans yoğunluğu büyükten küçüğe sıralandığında, yatak seviyesi ile kat noktasının eşit olduğu silindir, düzgün silindir ve kat noktasının yatak seviyesinin altında olduğu silindir olduğu görülmüştür. Ayrıca, oyulan bölgedeki yatak kayma gerilmesinin gelen akım yönündeki yatak kayma gerilmesi ile karşılaştırıldığında daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, katlı silindirlerde katın olduğu yüzeylerde, oyulmanın mümkün olmadığı yerlerde, kayma gerilmesinin, gelen akım yönündeki yatak kayma gerilmesinden daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

2.2 Akım – Tekil Bitki Etkileşimi

2.2.1 Sürtünme Katsayısı ile Bitki İlişkisi

Akımın bitkilerin arasında geçtiği bölgelerde suyun karakteristiği suyun hızı ve derinliğinin yanı sıra bitkilerin tipi ve sıklığı ile de belirlenir. Özellikle batmayan bitkiler akımdan büyük oranda enerji ve momentum çeker ve genellikle en çok pürüzlülüğün olduğu bölgeler bu tip bitkilerin bulundukları yerlerdir.

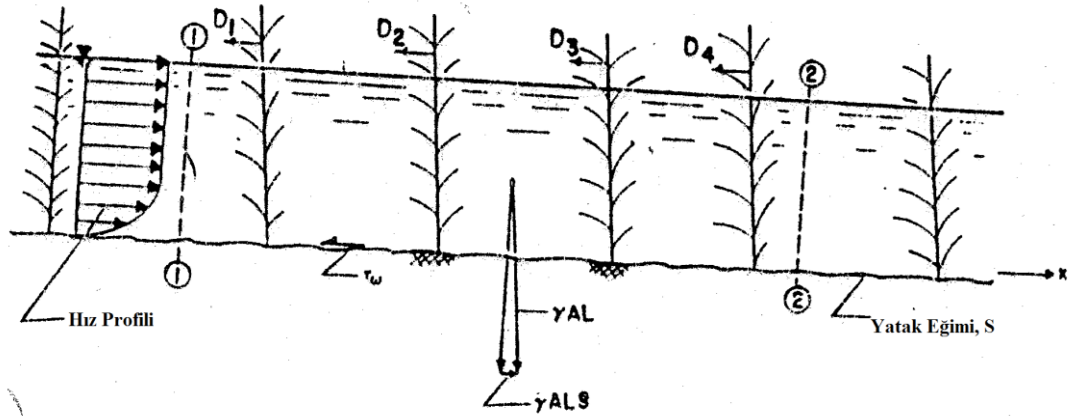
Petryk ve Bosmaijan (1975)'te yapılan çalışmalarda boyu su yüzeyini aşan bitkilerin akım direncini hesaplanmıştır. Bunun için de bitkinin eğilmesine yol açmayacak kadar küçük bir akım kullanılmıştır. Sonuç olarak, sürüklemenin, hızın karesi ile orantılı olduğu gösterilmiştir.

Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı ve Manning'in n değeri bitkinin eğilmesiyle değişen akımın hızına göre değişir. Ayrıca momentum absorpsiyon alanı (MAA) da aynı duruma etkir. Momentum absorpsiyon alanı bitkinin dal, yapraklar gibi uzuvlarını temsili bir alandır. Momentum absorpsiyon alanının artmasıyla sürtünme katsayısında da büyüme gözlenir. Fathi-Maghadam ve Kouwen (1997)'de yapılan çalışmada bitki eğilmesi ile değişen hız ve bitkideki sürtünme kuvveti arasında doğru orantılı bir değişim olduğunu gözlemlenmiştir.

Tamamı su altında kalmamış bitkilerde batan kısmın momentum absorpsiyon alanı akım derinliğine orantılı olduğundan bitkinin türüne, yapraklarının şekline bakmaksızın, bitkinin sıklığı bu bitkilerde baskın parametredir.

Esnek bitkilerde bitkilerin yapraklarının alanlarının yön değiştirmesi ve sürüklenme katsayısının akış hızının artması üzerine azalmasıyla, sürüklenme kuvvetinin akım hızı ile doğrusal bir ilişkisi olduğu görülmüştür.

Tamamı suyun altında kalan bitkiler sürüklenme kuvvetine karşı direnmek zorundadırlar. Bu nedenle esnek yapıda olan bitkiler değişen akım koşullarına göre akıma karşı duruşlarını değiştirirler. Yeniden yapılanma hareketi, bitkiye, yüksek hızla karşılaşan maruziyet yüzeyini düşürerek yardım eder. Bunun sonucunda bitki akım yönünde bir şekil kazanır. Böylece sürüklenme kuvvetinin iki bileşeni olan yüzey sürtünmesi ve basıncı da minimize edilmiş olur (şekil 2.17).



şekil 2.17: Akım direnç modeli (Petryk ve Bosmajian, 1975).

Petryk ve Bosmajian (1975), momentumu dikkate alarak x yönündeki kuvvetlerin toplamını sıfıra eşitmişlerdir.

$$\sum F_x = 0 \quad (2.16)$$

Bu durumda, x yönündeki basınç kuvvetleri ortadan kaldırılmış ve geriye yerçekimi kuvveti, viskoziteden dolayı sınır tabakasında oluşan gerilim kuvvetleri, cidar pürüzlülüğü ve bitkilerin sürüklenme kuvvetleri kalmıştır. Buradan:

$$\gamma ALS - \sum D_i - \tau_w PL = 0 \quad (2.17)$$

elde edilmiştir. γ sıvı özgül ağırlığı; A akımın kesit alanı; L kanalın uzunluğu; S = kanalın taban eğimi; F_D i'nci bitkideki sürüklenme kuvveti; τ_w birim alanda cıarda oluşan kayma kuvveti; ve P kanalın ıslak çevresi olarak belirtilmiştir.

Bitki başına sürüklenme kuvveti,

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \frac{\gamma}{g} V_i^2 A_i = \frac{1}{2} C_D \rho V_i^2 A_i \quad (2.18)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada C_D bitkiler için sürüklenme katsayısı; V_i akım yönünde i'nci bitkideki ortalama hız; ve g yerçekimi sabitidir. τ_w , ortalama cidar kayma gerilmesi ise,

$$\tau_w = \gamma \left(\frac{A}{P} \right) S_e \quad (2.19)$$

olarak bulunmaktadır. Burada S_e ortalama cidar kayma gerilmesine göre enerji gradyanıdır. Manning formülünde yerine konulduğunda,

$$V = \frac{1.49}{n_b} \left(\frac{A}{P} \right)^{2/3} S_e^{1/2} \quad (2.20)$$

Böylece,

$$\tau_w = \gamma \left(\frac{A}{P} \right) V^2 \left(\frac{n_b}{1.49} \right)^2 \left(\frac{P}{A} \right)^{4/3} \quad (2.21)$$

$$\tau_w = \gamma V^2 \left(\frac{n_b}{1.49} \right)^2 \left(\frac{P}{A} \right)^{1/3} \quad (2.22)$$

elde edilmiştir. Burada V alan ortalama hızı ve n_b bitkisel etki hariç Manning'in cidar pürüzlülük katsayısıdır.

Buradan 2.18 ve 2.22, 2.19'de yerine konulursa,

$$\gamma ALS - \frac{\gamma C_d V^2 \sum A_i}{2g} - \gamma V^2 \left(\frac{n_b}{1.49} \right)^2 \left(\frac{P}{A} \right)^{1/3} PL = 0 \quad (2.23)$$

olur. Bu formül γAL ifadesine bölünürse, V^2 değeri için,

$$V^2 = \frac{S}{\frac{C_d \sum A_i}{2gAL} + \left(\frac{n_b^2}{1.49} \right) \left(\frac{P}{A} \right)^{4/3}} \quad (2.24)$$

Ortalama hız Manning formülüne eşitlenirse,

$$V^2 = \left(\frac{1.49}{n} \right)^2 \left(\frac{A}{P} \right)^{4/3} S = \frac{S}{\frac{C_d \sum A_i}{2gAL} + \left(\frac{n_b^2}{1.49} \right) \left(\frac{P}{A} \right)^{4/3}} \quad (2.25)$$

elde edilir. Burada n cidar ve bitki etkilerini de kapsayan toplam pürüzlülük katsayısıdır. n bu formülden çekilirse,

$$n = n_b \sqrt{1 + \frac{C_d \sum A_i}{2gAL} \left(\frac{1.49}{n_b} \right)^2 \left(\frac{A}{P} \right)^{4/3}} \quad (2.26)$$

$$n = n_b \sqrt{1 + \frac{C_d \sum A_i}{2gAL} \left(\frac{1.49}{n_b} \right)^2 R^{4/3}} \quad (2.27)$$

elde edilir. Burada R hidrolik yarıçapı göstermektedir.

2.27 eşitliğinde n değeri, cidar pürüzlülüğü, n_b , hidrolik yarıçap, R ve bitki karakteristiği, $C_d \sum A_i / (AL)$, olarak tanımlanmıştır. $C_d \sum A_i / (AL)$ ifadesi, akımdaki birim alan başına düşen, kanaldaki bitkisel alanın birim uzunluğudur.

Petryk ve Bosmajian (1975)'da bu eşitliği sınırlamak için iki koşul verilmiştir:

Bitkinin olmadığı kabul edilerek, $C_d \sum A_i / (AL) = 0$, $n = n_b$ elde etmek.

Akım direncinin büyük bir kısmının bitkiler tarafından sağlandığı düşünülerek,

$$\frac{C_d \sum A_i}{2gAL} \left(\frac{1.49}{n_b} \right)^2 R^{4/3} \gg 1 \quad (2.28)$$

sağlanır ve 2.29 eşitliği,

$$n = n_b \sqrt{\frac{C_d \sum A_i}{2gAL} \left(\frac{1.49}{n_b} \right)^2 R^{4/3}} \quad (2.29)$$

ya da

$$n = 1.49 R^{2/3} \sqrt{\frac{C_d \sum A_i}{2gAL}} \quad (2.30)$$

haline getirilebilir. 2.30, Manning formülünde yerine konularak ortalama hız,

$$V = \sqrt{\frac{2gAL}{C_d \sum A_i}} S^{1/2} \quad (2.31)$$

elde edilir ve görüldüğü gibi ortalama hız akımın derinliğinden bağımsızdır.

Wu ve diğ. (1999)'da boyu su yüzeyini aşan ve batık durumda olan bitkilerin pürüzlülüğünü araştırırken bir metot önermiştir. Bu metoda göre kuvvetler dengesini esas alarak bitkisel elemanlar için sürüklenme katsayısı geliştirilmiştir. Manning eşitliği ise sürüklenme katsayısını pürüzlülük katsayısına çevirmek için kullanılmıştır.

Wu ve diğ. (1999)'da kesit alanı yan duvarlar (A_w) ve yatak (A_b) olmak üzere ikiye ayrılmıştır:

$$A = A_w + A_b \quad (2.32)$$

$$A = BD \quad (2.33)$$

burada, B kanal genişliği ve D dikdörtgen kanallar için akım derinliğidir.

Ortalama hız bütün kesit alanı boyunca üniform olarak kabul edilmiştir. Bu durumda Manning eşitliği aşağıdaki gibidir:

$$V = \frac{1}{n_w} R_w^{2/3} S^{1/2} \quad (2.34)$$

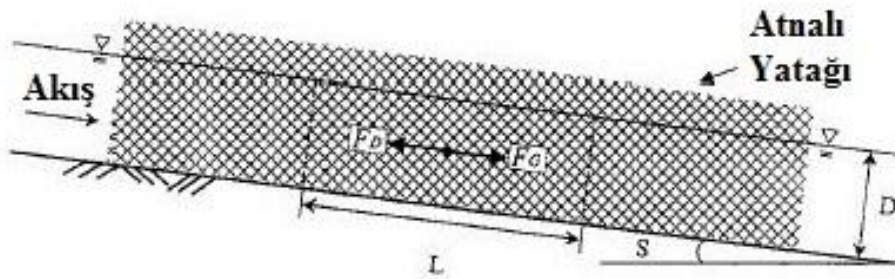
$$V = \frac{1}{n_b} R_b^{2/3} S^{1/2} \quad (2.35)$$

Bu formüllerde, $V = Q/A$ ortalama hız; Q akım debisi; S yatak eğimi; n_w ve n_b sırasıyla yan duvar ve taban dirençleri; ve R_w ve R_b sırasıyla yan duvar ve taban hidrolik eğimleridir.

$$R_w = \frac{A_w}{2D} \quad (2.36)$$

$$R_b = \frac{A_b}{B} \quad (2.37)$$

Wu ve diğ. (1999)'da boyu akım kalınlığını geçen bitkilerde sürüklenme katsayısını hesaplamak için kuvvetler dengesi akım yönünde yazılmıştır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18: Su yüzüne çıkan bitki koşulunda kuvvetler dengesi (Wu ve diğ., 1999).

$$F_G = F_D + F_S \quad (2.38)$$

ve,

$$F_G = C_D (TBL) \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.39)$$

Burada, F_D bitkideki sürüklenme kuvveti; F_S yan duvarlar ve tabandaki yüzey sürtünmesi; F_G yerçekimi kuvveti; ρ suyun kütle yoğunluğu; g yerçekimi sabitidir.

Wu ve diğ. (1999)'da daha sonra Fenzl (1962) çalışması ele alınarak F_S ihmal edilmiştir. Bu durumda, yerçekimi kuvveti ile bitkideki sürtünme kuvveti eşitlenmiştir:

$$F_G = F_D \quad (2.40)$$

Wu ve diğ. (1999)'da klasik bitkiler için sürüklenme kuvveti formülleştirilmiştir:

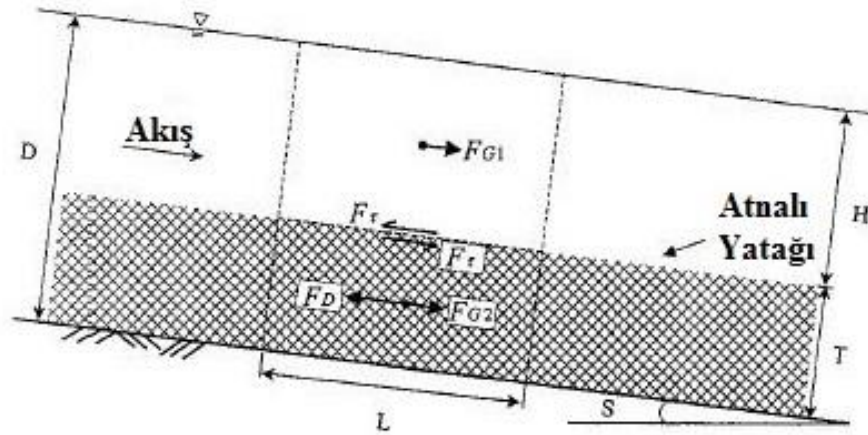
$$F_D = C_D(\lambda LA) \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.41)$$

burada, C_D sürüklenme katsayısı; λ bitkisel alan sabiti (kanalın birim uzunluğu başına düşen bitki alanı), λ 'nın büyüklüğü bitkinin tipine, yoğunluğuna ve biçimine göre değişmektedir; ve λAL kanalda L uzunluğu boyunca uzanan bölgedeki bitkilerin ön cephe alanı. F_G ve F_D hesaplanınca,

$$C'_D = \frac{2gS}{V^2} \quad (2.42)$$

elde edilir. Burada $C'_D = \lambda C_D$ 'dir.

Wu ve diğ. (1999)'da ayrıca, batık bitkiler için de sürüklenme katsayısı hesaplaması elde edilmiştir (Şekil 2.19). Bu hesaplama aşağıdaki gibidir:



Şekil 2.19: Batık bitki koşulunda kuvvetler dengesi (Wu ve diğ., 1999).

$$F_\tau = \rho g(BHL)S \quad (2.43)$$

Burada F_τ , kayma kuvveti vardır. Üniform akım için bitkilendirilen alan ve bitki üzerinden geçen akımın arasında dengeyi sağlayan yerçekimi kuvveti, F_{G1} bulunmaktadır.

Öte yandan, bitkisel kuvvetten etkilenen akım için,

$$F_D = F_{G2} + F_\tau \quad (2.44)$$

olur ve,

$$F_D = C_D(TBL\lambda) \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.45)$$

elde edilir. Burada T, bitkinin boyunu göstermektedir.

Kuvvetler dengesi kullanılarak,

$$C'_D = \left(\frac{D}{T}\right) \frac{2gS}{V^2} \quad (2.46)$$

elde edilmiştir.

Wu ve diğ. (1999) çalışmasında pek çok deneyde kullanılan kanalların genişlik-derinlik oranı 10'dan daha fazladır. Bu da A_b/A' 'nin A_w/A' 'dan çok daha büyük olduğu anlamına gelmektedir. Oranın böyle olması da $R_b \approx D$ anlamına gelmektedir. Eşitlik 2.35, 2.42 ve 2.46 kullanılarak bitkisel sürüklenme katsayısı C'_D , pürüzlülük katsayısına, n_b , dönüştürülmüştür:

$$n_b = \left(\frac{D^{2/3}}{\sqrt{2g}}\right) \sqrt{C'_D} \quad (2.47)$$

$$n_b = \left(\frac{D^{1/6} T^{1/2}}{\sqrt{2g}}\right) \sqrt{C'_D} \quad (2.48)$$

Fathi-Maghadam ve Kouwen (1997)'de taşkın yataklarında bulunan, rijit ve batık olmayan bitkilerin pürüzlülüğü hakkında bilgi verilerek, taşkın yatakları konusunda çalışılırken bitki yerine rijit silindir kullanımının hız ve sürüklenme kuvveti arasındaki ilişkide çok büyük hatalar oluşturabileceğini ileri sürmüştür. Bunu desteklemek için boyutsal analiz yapıp deneysel veri sunmuşlardır:

$$f = (C_D, A_0, V, \rho, y_n, J, g, \mu, h, \phi, l_1, \dots, l_n) \quad (2.49)$$

burada, C_D sürüklenme katsayısı; A momentum absorpsiyon alanı (MAA); A_0 yaprağın tek tarafının boyutu; V kanaldaki ortalama akış hızı; ρ suyun özgül kütlesi; y_n akımın derinliği; J eğilme rijitliği; g yerçekimi sabiti; μ sıvının dinamik viskozitesi; h bitkilerin ortalama boyu; ϕ yaprağın etki alanı nedeniyle olan sabit ve l_n bitkilerin aralığını belirten karakteristik uzunluktur.

ϕ ve C_D zaten boyutsuz parametrelerdir. Boyutsal analizde y_n, V ve ρ boyutsuz hale getirilmiştir:

$$f_1 \left(C_D, \phi, \frac{A_0}{y_n^2}, \frac{l_1}{y_n}, \frac{l_2}{y_n}, \frac{h}{y_n}, \frac{\rho V^2 y_n^2}{J}, \frac{V^2}{g y_n}, \frac{\rho V y_n}{\mu} \right) = 0 \quad (2.50)$$

A_0/y_n^2 , l_1/y_n ve l_2/y_n ifadeleri C_D 'den bağımsızdır. Bu çalışmada A/a olarak ikinci bir boyutsuz parametre elde edilmiştir. Böylece, bu üç parametreyi de Φ ile birleştirerek, bitkinin yoğunluğunun etkisi de ele alınmıştır. Sonra bitkinin MAA'sı hesaba katılarak $A = A_0$ elde edilmiştir. Böylece 2.50,

$$f_1 \left(C_D, \frac{A}{a}, \frac{h}{y_n}, \frac{\rho V^2 y_n^2}{J}, \frac{V^2}{g y_n}, \frac{\rho V y_n}{\mu} \right) = 0 \quad (y_n < h \text{ için}) \quad (2.51)$$

haline getirilmiştir.

Fathi-Maghadam ve Kouwen (1997)'de daha sonrasında sürtünme katsayısının, MAA'nın yatay düzlemdeki birim alanda oranından (A/a) çok, MAA'nın bitki tabakasından geçen akımın biri hacmiyle olan oranıyla (A/ay_n) ilgili olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak 2.51'deki ilk üç boyustuz parametre çarpılıp $C_D \left(\frac{A}{\nabla} \right) h$ elde edilmiştir ($\nabla = ay_n$).

Son olarak Fathi-Maghadam ve Kouwen (1997)'de, çalışma kritik altı ve türbülanslı akım koşullarında sınırlandırılarak ve Reynolds sayısı ile Froude sayısını aradan kaldırarak son boyutsuz parametrelerini elde etmişlerdir ve böylelikle batık olmayan, uzun ve yoğun bitkilerle bitkilendirilmiş kanalda direnç hesabını yapmışlardır:

$$C_D \left(\frac{A}{\nabla} \right) h = f_4 \left(\frac{\rho V^2 y_n^4}{J} \right) \quad (2.52)$$

2.2.2 Bitkilerin Çeşitlerine Göre Akım Değişimi

Esnekliklerine göre iki tip uç bitki türü vardır (Nikora, 2010). Bunlar gerilebilen bitki ve bükülebilen bitkilerdir.

Gerilebilen bitkiler çok esnek bitkilerdir ve kolaylıkla akım yönünde şekillenirler. Karışan sınır tabakası ile akım desene yüzeylerinde oluşur. Bükülebilen bitkiler ise daha yüksek sertliğe sahiptirler. Çoğunlukla geniş çaplı türbülans izlerine neden olurlar. Sucul ortamda bulunan doğal bitkilerin bahsi geçen iki uç tür arasında olması beklenir.

Siniscalchi ve Nikora (2012) yaptığı çalışmalarda, farklı türde bitkilerin akımla ilişkisine bakmıştır. Çalı filizli bitkilerde akıma çok yüksek direnç göstermekte ve yüksek sürüklenme katsayılarında akımı geri yansıtmaktadır. Basit şekilli, uzun ve esnek sargıya benzer yapraklı bitkilerde düşük sürüklenme katsayısına sahiptir. Bu türlü bitkilerde akımla birlikte sürüklenme katsayısında da azalma olur. Çünkü yeniden yapılanma görülür. Filiz uçlarında az yaprak bulunan bitki türlerinde ise sürüklenme katsayısı hız değiştikçe neredeyse hiç değişmez. Çok yüksek esneklik payına sahip bitkilerde ise akış hızı arttıkça sürüklenme katsayısında küçülme gözlenir. Zaten tabana düşük bir hızda bile iyice yaklaşmış olan bu bitkilerde hız arttıkça şeklinde belirgin bir değişiklik olmaz.

Bitkilerin etrafındaki türbülans, sürüklenme gücü dalgalanmalarına neden olur. Her bitkide farklı bir dalgalanma gözlenmektedir. Çok yüksek esneklikteki bitkiler için sürüklenme kuvvetinde daha düşük dalgalanma olur. Böylelikle bu bitkiler daha fazla ortamda yaşamlarını sürdürebilirler.

Akım türbülansı ve bitkilerde sürüklenme kuvveti dalgalanması da birbiriyle ilişkilidir. Ancak basit şekilli (sargı tipi yapraklı) bitkiler için söz konusu ilişki azdır. Bu bitkilerin yaprakları akımla birlikte uyumlu hareket ettiğinden fazla direnç göstermezler. Türbülansa da fazla etkileri olmaz. Çevrintiler bitki boyunca fazla değişmeden ilerlerler.

Bitkilerden dolayı akışın alt tarafında türbülanslı enerji oluşumu ise bitkinin morfolojisi ile değişiklik gösterir. Çalı tipi bitkiler, akımı yüksek ölçülerde etkileyip türbülanslı enerji oluştururken, fazla direnç göstermeyen sargı tipi yapraklı bitkiler türbülanslı enerji oluşturmazlar. Akımı çok az etkilerler.

2.2.3 Bitkilendirilmiş Kanallarda Hız Profili

Akım ile tekil bir bitki arasında her bitki türüne göre değişen farklı etkileşimlerin yanında, akımın bitki toplulukları ile daha da farklılaşan bir etkileşimi söz konusudur. Bitkilerin türüne, sıklığına, konumuna göre değişiklik gösterir.

Palmer (1945)'te bitkilendirilmiş akımlarda üç farklı akım koşulunun yaşandığı belirtilmiştir:

Düşük akım, akımın bitki topluluğundaki eğilmemiş ve batmamış bitkilerin gövde ve yapraklarından geçtiği durumdur.

Orta düzeyli akım, bitkilerin batık bulunduğu, eğildiği ve yatağa yaklaştığı durumdur. Debi değişimleri gözlenir. Haliyle burada akım direnci ani değişikliklere uğrar.

Yüksek akım, bitkiyi neredeyse tamamen yatağa yaklaştıran durumdur. Bitkilerin bazı gövde ve yaprakları hareket edebilir ancak bu durum göz ardı edilebilecek kadar etkisizdir.

Eastgate (1969) 'de ölçülen hız profilleri neticesinde yerel hızın (u), kanal yatağının y kadar uzaklığının logaritmasına olan oranına göre çeşitlilik gösterdiği görülmüştür. Gourley (1970)'te bu deneylerin bazıları yeniden analiz edilmiştir. Bu analiz sırasında kanal eğimini 0.005 ile 0.07 arasında değiştirilmiştir. Eğimin 0.05'ten küçük olduğu durumlarda akım içerisinde 3 katman olduğu gözlemlenmiştir. İlk katman, akımın bitkiler arasında yatağa en yakın olduğu yerlerdir. Burada hız, kayma hızına (u^*) orantılı olarak kabul edilmektedir. İkinci katman, akım hızının aniden yükselme gösterdiği katmandır. Bitkilerin üst kısımlarından geçen akımın oluşturduğu tabakadır. Üçüncü katman ise, akım hızının ikinci katman kadar ani olmasa da artış gösterdiği bitkilerin üstünden geçen akımın oluşturduğu katman olarak adlandırılmıştır. Eğimin 0.05'ten fazla olduğu durumlarda ise ikinci ve üçüncü tabaka bir arada görülür.

Kouwen ve diğ. (1969)'da laboratuvar ortamında esnek bitkiler etrafından geçen akımın hız profilleri gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda hız esnek sertlikteki bitkiler boyunca aşağıdaki gibi formüleleştirilebileceği gösterilmiştir:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_{kv}}{u_*} + \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{k_v}\right) \quad (2.53)$$

Burada, k von Karman sabiti; y kanal yatağından uzaklık, k_v eğilmiş bitki yüksekliğidir.

Logaritmik hız profili teorik olarak belli bir referans noktasının üzerinde ($y \leq k_v$) uygulanabilir. Bu nokta sabit hızın alt tabakası ile kayma gerilmesinin karşılaştığı noktadır. Ancak bu nokta akım rejimine göre bitkilerin arasında veya tepe noktasında bulunabilir. Ölçme zorluklarından dolayı bitkilerin arasındaki hız verileri sınırlı olmaktadır.

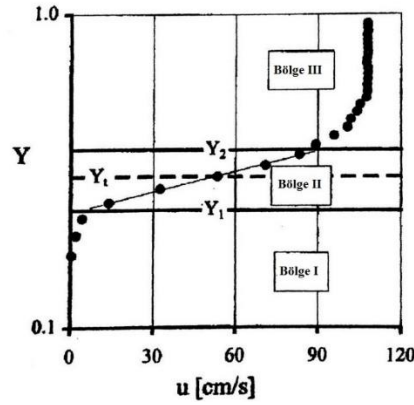
Carollo ve diğ. (2002)'de değişik yoğunluklarda (gövdelerin ve yaprakların belirli bir alana olan oranı) bitkilerden geçen akımların hız profilleri incelenmiştir. Yataktan uzaklığına göre bakıldığında tüm yoğunluktaki bitkilerde S biçiminde bir hız profili

çıkıştır. Profilin kırılma noktalarının yatağa olan uzaklığına Y_1 ve Y_2 denilerek akım 3 bölgede sınıflandırılmıştır (Şekil 2.20):

Bölge 1, bağıl derinlik değerleri $Y < Y_1 < k_v/h$ olan bölgedir ($Y=y/h$). Burada hızlar en düşük seviyededir. Akım hızlarının burada sabit bir değer değil, yukarı doğru artan değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Bölge 2, $Y_1 \leq Y \leq Y_2$ olduğu bölgedir. Burada logaritmik hız profili olduğu gözlenmiştir.

Bölge 3, $Y > Y_2$ olan bölgedir. Bu bölgede giderek azalan bir ivmeyle artan akım bulunmaktadır.

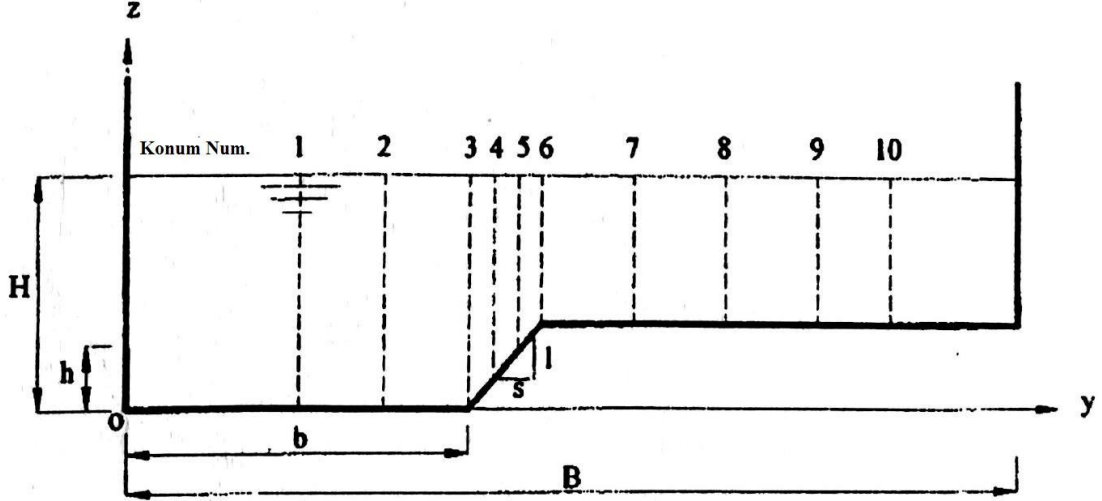


Şekil 2.20: Üç farklı bölgede ölçülmüş hız profilleri (Carollo ve diğ., 2002).

Bu deneyde yapılan tüm analizler sonucu, bitki yoğunluklarının logaritmik bölgenin konumuna etki etmediği görülmüştür. Bu bölgenin konumu sadece derinlik/bitki yüksekliği oranına göre değişmektedir. Ancak bitki yoğunluğu hız profilinin şeklini değiştirmektedir. Yapılan deneylerde bitki yoğunluğu azaldıkça, bitkilerin arasındaki akım hızının arttığı, bitkilerin üzerindeki akım hızının ise azaldığı görülmektedir. Bu nedenle serbest akış bölgesinin kalınlığı düşmekte ve hem bitkisel bölgenin içinde hem de dışında hız profilinin eğrilik derecesi azalmakta olduğu görülmüştür.

Yang ve diğ. (2007)'de birleşik kanal içinde taşkın yatağı kısmında farklı bitki toplulukları konumlandırılmıştır. Burada yapılan deneylerde farklı bitkiler aynı sıra aralıklarıyla ancak bitkiler arası mesafe değiştirilerek yapılmıştır. 30 cm genişliğinde olan bu birleşik kanalda enlemesine değişen özellikle 4 farklı nokta incelenmiştir. Bu noktalar ana kanalın tam ortası (en koordinatının başlangıç noktasından 4 cm ileride), ana kanalın bitiş noktası (başlangıç noktasından 8 cm ileride, eğimden önceki nokta),

taşkın yatağının başlangıç noktası (başlangıç noktasından 17 cm ileride, bitkilendirmenin başladığı nokta) ve bitkilendirilen bölgenin orta noktası (başlangıç noktasından 22 cm ileride)'dır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21: Kanalın kesitsel görünümü, incelenen dört nokta sırasıyla (1, 3, 6, 8). Yang ve diğ. (2007).

Yapılan deneylerde bitkilendirilen alanda, ağaç, çimen ve bodur bitki kullanılmıştır. Her bitki topluluğu türü için üç farklı debide akım verilmiştir. Zaman ortalamalı hız dağılımına bakıldığında, ana kanalda akımın daha bitkilendirilmemiş duruma göre daha hızlı aktığı gözlemlenmiştir. Taşkın yatağında ise tam tersi durum mevcuttur. Bitkilendirilmiş kısım akıma direnç gösterdiği için ana kanal hızlarında artış olmuştur. Çimenler ve bodur bitkilerin suyu, ağaçlara göre daha fazla yavaşlattığı gözlemlenmiştir. Tüm bitki türlerinde hız profillerinin logaritmik değil S-şeklinde değiştiği gözlemlenmiştir. Yatak eğimi değiştirildiğinde de hız dağılımlarının fazla değişmediği ve en çok bitkilerin sertliğine göre değiştiği belirtilmiştir.

Yağcı ve Kabdaşlı (2008)'de üç farklı bitki türü (*Pinus Pinea*, *Thuja Orientalis* ve *Cupressus Macrocarpa*) bir kanalda konumlandırılıp farklı derinliklerde ve farklı debilerde hız ölçümleri alınmıştır. Verileri analiz etmek için normalleştirilmiş hız farkı parametresi (NVDP) tanımlanmıştır:

$$NVDP = 1 - \frac{U_d}{U_u} \quad (2.54)$$

burada, U 'lar zaman ortalamalı akım doğrultusundaki hızlardır (u , akıma karşı ve d , akım yönünde). Bunun yanında, bitki yoğunluk parametresi (VIP , ξ) tanımlanmıştır. Bitkinin karakterize eden bu parametre:

$$\xi = \frac{\left(\frac{V_{veg}}{z_0}\right)}{A_h} \quad (2.55)$$

şeklinde olup burada, V_{veg} belirli bir derinlik için tanımlanmış bitki tarafından kaplanan hacim; z_0 su derinliği; ve A_h bitkinin yatay bir düzlemde kapladığı tahmini alandır.

2.54 ve 2.55'ten normalleştirilmiş bitki hız farkı parametresi (NVVDP) oluşturulmuştur:

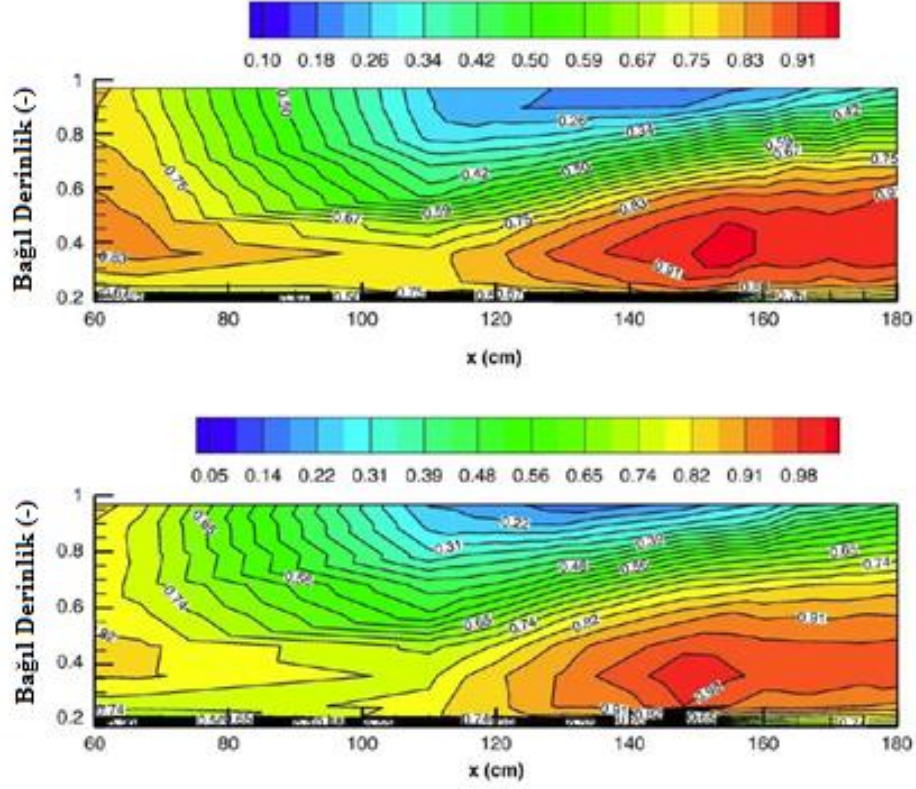
$$NVVDP = \frac{\left(1 - \frac{U_d}{U_w}\right)}{\xi} \quad (2.56)$$

Su yüzeyindeki NVDP'ler incelendiğinde, *Pinus Pinea* akımı %50 oranında geciktirirken, *Thuja Orientalis*'in akımı %110 oranında geciktirdiği görülmüştür. Bu durumun başlıca nedeni VIP parametresinin bu bitki türü için en fazla olmasıdır. *Cupressus Macrocarpa* ise akımı %70-90 civarında geciktirmiştir. Ancak, tabana yakın bölgelerdeki akım gecikmesine bakıldığında en yüksek değeri *Pinus Pinea*'nın elde ettiği görülmüştür.

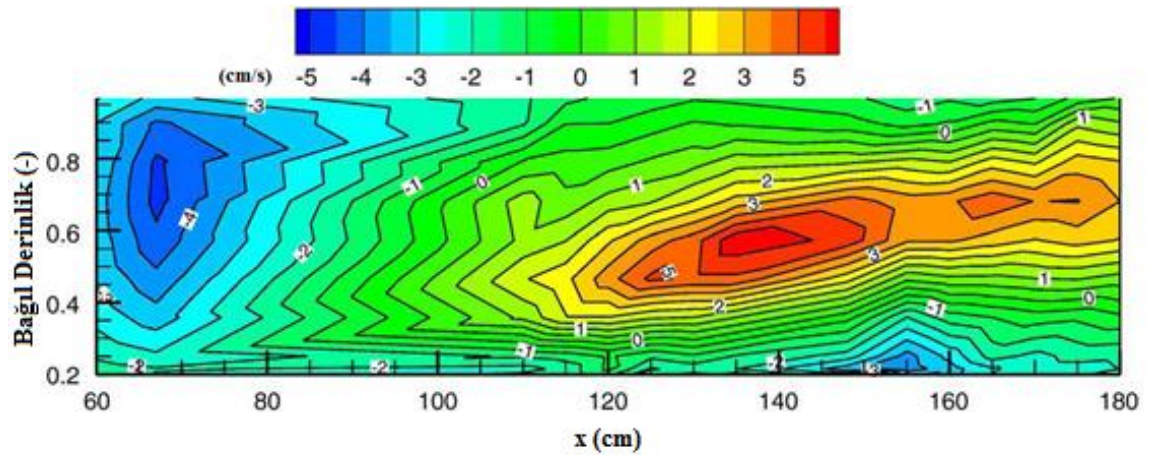
Yağcı ve diğ. (2010)'da yine bir kanalda *Pinus Pinea* (tip 1), *Thuja Orientalis* (tip 2) ve *Cupressus Macrocarpa* (tip 3) olmak üzere üç farklı tür bitki konumlandırılmıştır. Bu bitkiler diklikleri, su tarafından şekillendirilmiş olması ve tamamen eğilmiş olması koşulları göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. Farklı debilerde sisteme su verilip hız ölçümleri yapılmıştır. Suyun şekillendirme etkisine bakıldığında, şekillendirilmiş olan bitkinin, dik bitkiye göre suyu engelleme kapasitesinin daha az olduğu görülmüştür.

Zaman-ortalama hız karakteristikleri *Cupressus Macrocarpa*'nın dik durumu için incelenmiştir. Bitkinin varlığı suda, bitkinin türüne özgü bir akım çeşitliliği oluşturmuştur ve bitkinin arka tarafında yüzeye yakın bir noktada ölü bölge oluşturmuştur. Ancak bu ölü bölge bitkinin hemen arkasında değil bitkiden 60 cm akış yönünde ileride oluşmuştur. Ayrıca batık bitki akım rejimi (en yüksek hızlara ulaşılan alan) de bitkinin hemen ardından oluşmamıştır. Zaman-ortalama hız karakteristiklerinin dikey bileşenine bakıldığında ise, ölü bölge ile batık bitki akımı

karakteristikleri farklı akımlar içerdği için bitkinin arkasında momentum değişimi olduğu gözlemlenmiştir. Bu koşul dolayısıyla da en yüksek dikey hız bileşeni bu bölgeler arasında ve yukarı yönlü olmuştur (Şekil 2.22, Şekil 2.23).



Şekil 2.22: Akıma batmamış haldeki bitki [*Cupressus Macrocapra* (üstteki)] ve su tarafından şekillendirilmiş *Cupressus Macrocapra* (alttaki)'nin akım yönünde derinlik – zaman ortalama hız grafiği (Yağcı ve diğ., 2010).



Şekil 2.23: Boyu sudan uzun haldeki *Cupressus Macrocapra*'nın zaman ortalama dikey ortalama hızlarının akım yönünde dağılım grafiği (Yağcı ve diğ., 2010).

2.2.4 Bitkilendirilmiş Alanlarda Türbülans

Ikeda ve Kanazawa (1996)'da bir kanal'da bitkilendirilmiş bölge boyunca olan akım hızını incelenmiştir. Bunun sonucunda zaman ortalamalı hız profilinin bitki tabakasının tepesinde kritik noktaya ulaştığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde, türbülans yoğunluğu (U') ve kayma gerilmesinin (τ) bitki tabakasının tepesinde en yüksek değere ulaştığı anlatılmıştır.

Yang ve diğ. (2007)'de yapılan deneyde kanal boyunca dikey ve yanal türbülans yoğunlukları incelendiğinde bitkilendirilmiş taşkın yatağında S-şeklinde olduğu bulunmuştur. Akım doğrultusunda bu durum değişiktir. Ancak, akım doğrultusundaki türbülans yoğunlukları ile yanal oluşan türbülans yoğunluklarının aynı olduğu görülmüştür. Dikey türbülans yoğunluğu ise en zayıftır.

Özellikle ana kanal/taşkın yatağı sınırında, Reynolds geriliminin bitkilendirmeden dolayı etkilendiği görülmüştür. Bitkilendirilmiş koşullarda, τ_{yx} 'in dikey bileşenleri ana kanalda sıfıra yakındır. Ancak özellikle yatağa yakın bölgelerde τ_{zx} büyük oranda değişiklik göstermiştir. Taşkın yatağı bölgesinde hızların birinci ve ikinci sınır tabakası arasında düşük olduğu ele alındığında, dikey ve yanal kayma gerilmelerinin sıfıra yakın olduğu bulunmuştur. Ana kanalda yan eğime yakın bölgede τ_{zx} ve τ_{yx} 'in bitkiler tarafından negatif hale getirildiği görülmüştür. τ_{zx} ve τ_{yx} taşkın yatağının başında en düşük değere ulaşırken, bodur bitki sertliği için τ_{yx} taşkın yatağı ortasında en büyük değerine ulaşmaktadır.

Yağcı ve diğ. (2008)'de normalleştirilmiş dikey türbülans yoğunluk parametresinin kullanılan bitki türlerinin göreceli su derinliğine göre değiştiği gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarından, dikey türbülans yoğunluğunun, akım yönündeki türbülans yoğunluğundan çok daha büyük olduğu çıkarılmıştır. Deney sonuçlarından çıkarılabilir bir diğer sonuç ise, akım hızı arttıkça, bitkilerden dolayı oluşan dikey türbülans yoğunluğu artış göstermektedir. Normalleştirilmiş dikey türbülans yoğunluğu ve göreceli derinlikler karşılaştırıldığında, *Pinus Pinea*'nın ek olarak %220 dikey türbülans yoğunluğu oluşturduğu görülmektedir. *Thuja Orientalis*'te ise %200 daha dikey türbülans yoğunluğu olduğu saptanmıştır. *Cupressus Macrocapra*'da ise bu durum %100-200 arasındadır.

Yağcı ve diğ. (2010)'da elde edilen sonuçlarda dik ve su tarafından şekillendirilmiş bitkilerde Reynolds gerilimleri arasında çok da fark olmadığı görülmüştür. Ancak,

Reynolds gerilimlerinin göreceli derinliğe göre değişime uğradığı belirtilmiştir. Türbülans karakterlerini belirlemek için normalleştirilmiş türbülanslı kinetik enerji (NTKE) birimi kullanılmıştır. NTKE, birim kütle başına düşen türbülanslı kinetik enerji “k” ile zaman-ortalamalı ortalama hız “U”nun oranlanması sonucu ortaya çıkmıştır:

$$u = U + u' \quad (2.57)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\overline{var(u)}} = \overline{u'^2} = u_{rms} \quad (2.58)$$

$$k = \frac{1}{2}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \quad (2.59)$$

$$NTKE = \frac{k^{0.5}}{U} \quad (2.60)$$

burada, u anlık hız; u' dalgalanma hızı; σ standart sapmadır. NTKE değerleri incelendiğinde, büyük ölçüde değişiklikleri görülmüştür. Bu değişim ölü bölgede %50-60 arasıken, batık bitki akım bölgesinde %15 arasındadır.

Yağcı ve diğ. (2010)'da boyutsuz türbülanslı kinetik enerji de tanımlanmıştır (DTKE):

$$DTKE = \frac{k^{0.5}}{V_m} \quad (2.61)$$

burada V_m , Q'nun debi ve A'nın ıslak alan olarak düşünüldüğü Q/A oranındaki ortalama hız verisidir. DTKE'nin ise ölü bölge ve batık bitki akım bölgesi arasında en yüksek değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

Yağcı ve diğ. (2010)'da ayrıca bitkiler ile bitkinin eşdeğer hacmine sahip bir silindir karşılaştırılmıştır. $z/z_0 \geq 0.84$ hariç, geri kalan kısımlarda silindirin, bitkilere göre daha fazla türbülanslı akım oluşturduğu görülmüştür. Bunun sonucunda da bitki-akım etkileşimini anlamak için silindirle yapılan deneylerde gerçek bitkiler kullanılırsa farklı sonuçlar çıkabileceği görülmektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Deney Kanalı

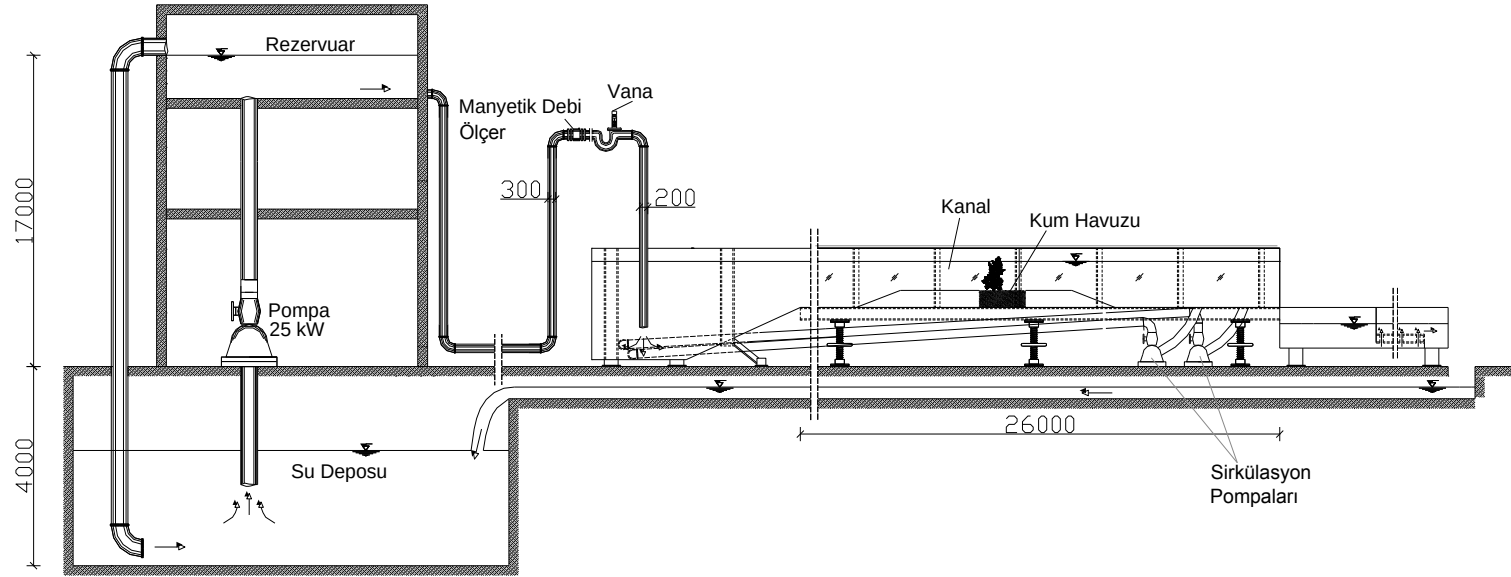
Deneyler, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi'ndeki Hidrolik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kanal 26 m uzunluğunda, 0.98m genişliğinde ve 0.85 m derinliğindedir (Şekil 3.1). Kanalin tabanında 2.20 m uzunluğunda, kanal genişliğinde ve 0.20 m kalınlığında yapay bir yatay (kum) konumlandırılmıştır. Kumun öncesine ve sonrasına, akımın bu bölgeye tam gelişmiş olarak varması için, çelik plakalar konulmuştur. Bu çelik plakalar belirli bir açıyla yerleştirilmiştir. Bu sayede suyun kum havuzuna yüzeyden temas etmesi sağlanmıştır. Kanalin yan duvarları pleksiglastan yapılmıştır. Tabanı ise düzgün bir beton yüzey ile kaplıdır (Şekil 3.2). Ana pompadan kanala gelen kısımda açıklığı dişliler yardımıyla ayarlanan bir vana bulunmaktadır. Buradaki borudan akan su, sakinleştirme havuzunda toplanmaktadır. Sakinleştirme havuzunda yükselen su kanalı doldurmaktadır.

3.2 Pompalar

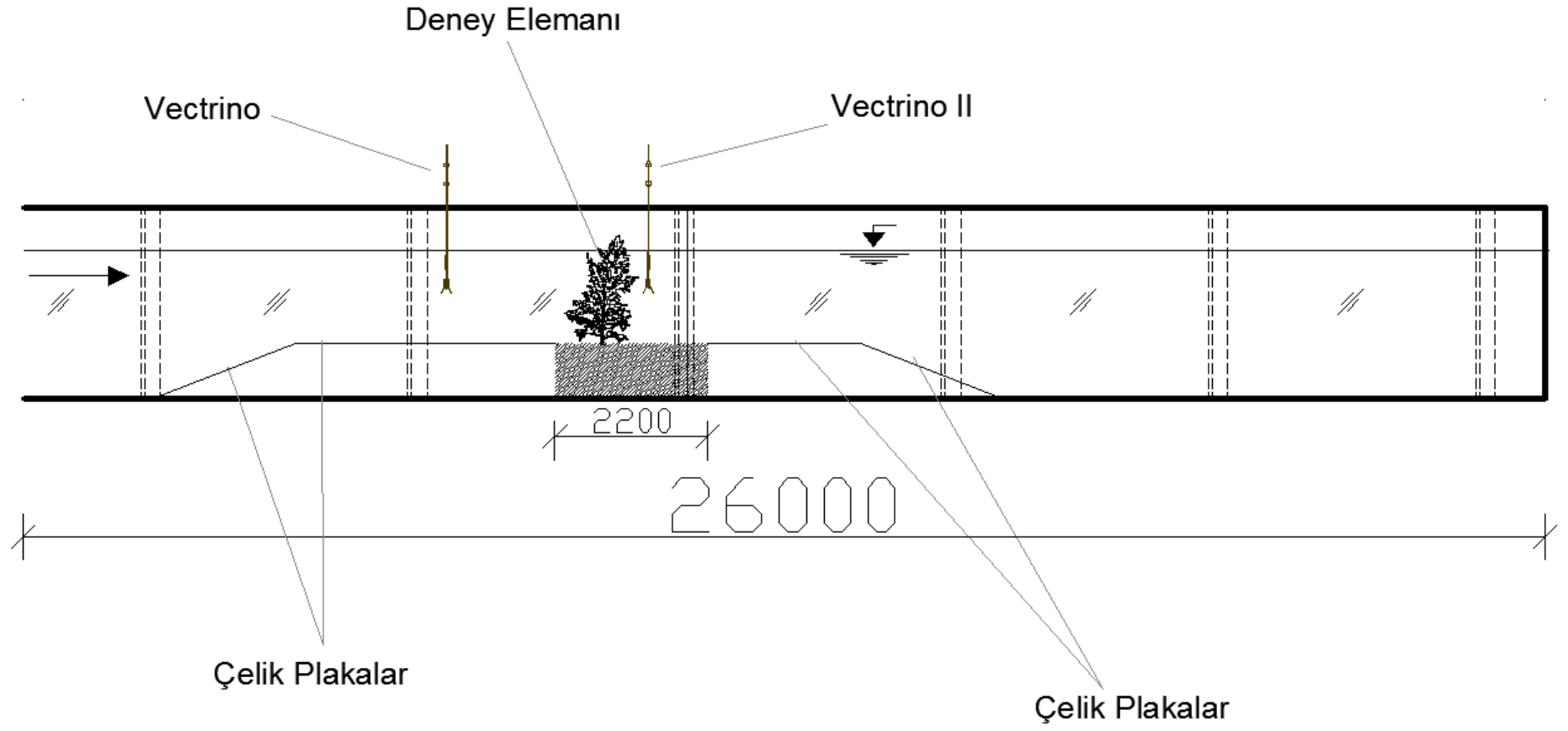
İstanbul Teknik Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı'nda kullanılan ana pompa 25 kW gücündedir. Deneylerde, bu pompa aracılığı ile laboratuvarın üst kısmında bulunan rezervuara çekilen su, cazibe ile akıtılarak kullanılmıştır. Ayrıca kanalın yanında bulunan iki tane devir daim pompası devreye sokularak daha yüksek debi elde edilmiştir. Bu pompalar suyu kanalın sonundan alıp başına iletmektedir.

3.3 Deney Elemanları

Deneyler üç farklı deney elemanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir:



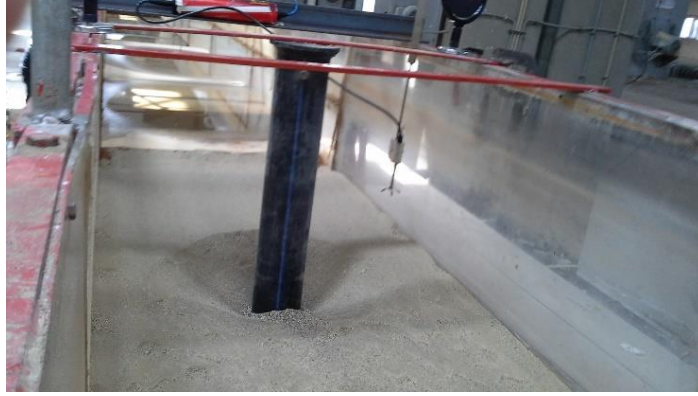
Şekil 3.1: Akım kanalı ve pompaların krokisi (Ölçüler mm boyutundadır).



Şekil 3.2: Yapay taban ve bitki elemanlarının konumlandırılması (Ölçüler mm boyutundadır).

- Silindir:

Silindir deneylerinde, 1 m boyunda ve 16 cm çapında bir rijit silindir kullanılmıştır (Şekil 3.3). Silindirin pürüzlülük oranı oldukça düşüktür. Plastikten yapılmıştır.



Şekil 3.3: Deneylerde kullanılan silindir

-Model Bitkiler:

Deneylerde model bitki olarak, *Cupressus Macrocapra* bitkisi kullanılmıştır (Şekil 3.4). Bu bitki sırasıyla; 1) akıma batmamış dik haliyle, 2) etrafı streç film ile sarılarak geçirimsiz şekle gelmiş halde, 3) misina yardımıyla çelik plakaya bağlanarak suni olarak eğilmiş halde, kesilerek batık bitki halinde ve etrafı alüminyum folyo ile çevrili batık bitki halinde kullanılarak ölçümler alınmıştır.

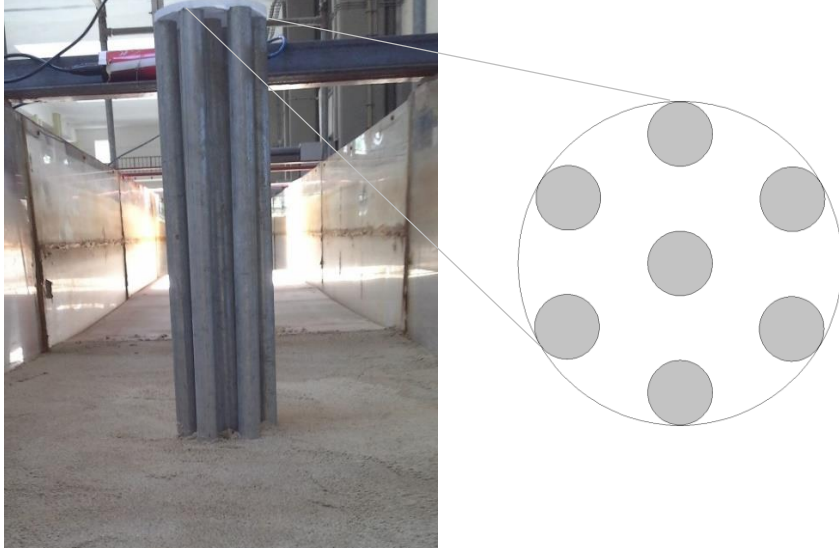


Şekil 3.4: Akıma batmış ve batmamış durumdaki bitkilerin görünümü

Halk arasındaki bilinen adı Limoni Servi olan bu bitki dayanıklı bir çam türüdür. Fakir topraklara uyumlu ve Türkiye’de rahat yetiştirilebilen bir bitkidir. Dona karşı hassastır ve özellikle geçirgen topraklarda iyi gelişirler.

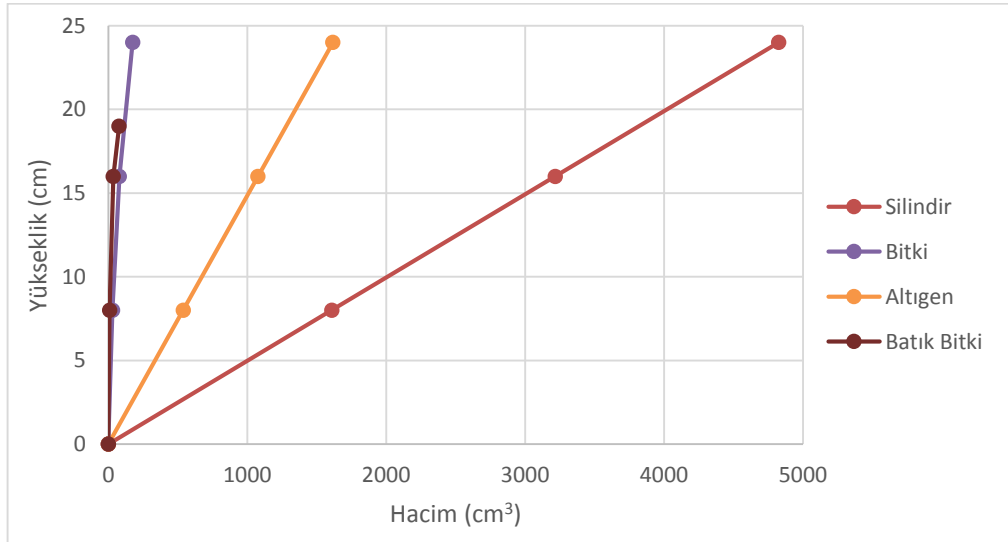
-Altıgen Silindir:

Deneylerin son aşamasında 3.5 cm çapında 6 tane silindir, 16 cm çapındaki bir silindirin iç çeperine teğet olacak şekilde eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Buna ek olarak bir de tam ortasında aynı çapta ve boyutta bir silindir daha konumlandırılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Altıgen şeklinde dizilmiş silindirlere

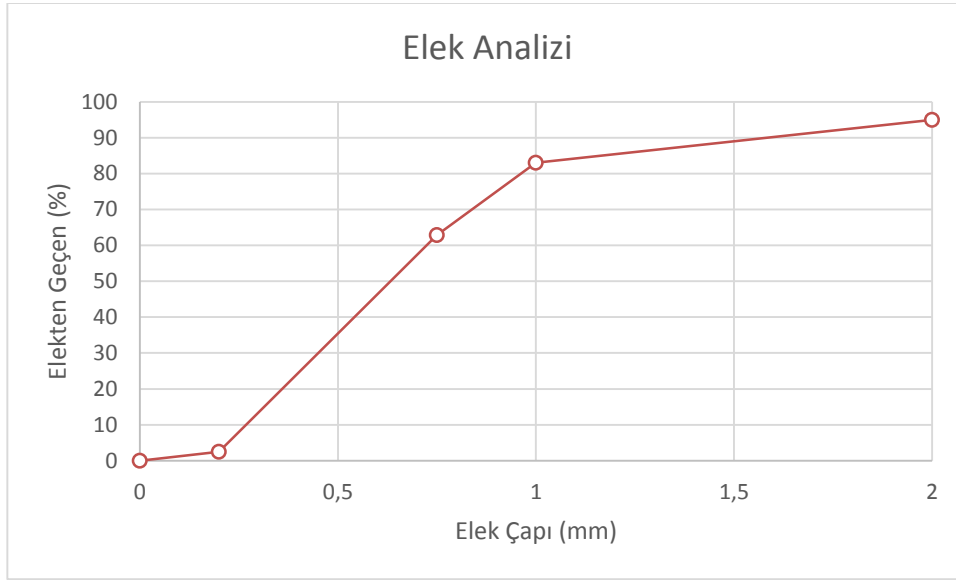
Silindir, suya batmamış bitki, batık bitki ve altıgen şeklinde dizilen silindirlerin hacim yükseklik oranları Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Deney elemanlarının yükseklik-hacim grafiği

3.4 Yatak Malzemesinin Granülometrisi

Deneylerde yatak malzemesi olarak kuvars kumu kullanılmıştır. Kuvars kumları sırasıyla 2 mm, 1 mm, 0.75 mm ve 0.2 mm'lik eleklerden geçirilmiştir. Elek analizinden oluşan granülometri eğrisi ise Şekil 3.7'deki gibidir.



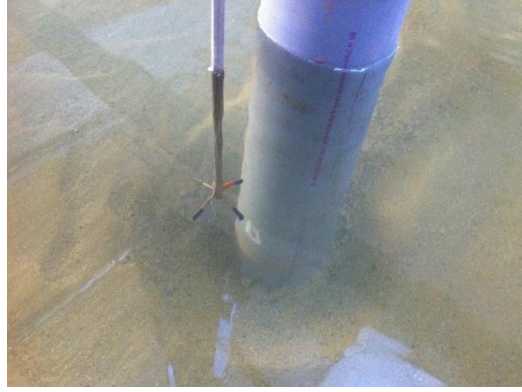
Şekil 3.7: Elek Analizi

3.5 Ölçüm Aletleri

3.5.1 Vectrino I

Vectrino, suyun içinde akım hızını ölçmek için kullanılan ve NORTEK firması tarafından geliştirilen bir cihazdır (Şekil 3.8). Hızı, Doppler Etkisi'ni kullanarak hesaplar. Bunu yapmak için de suya kısa bir ses sinyali yollar ve bu sinyalin yankısını dinleyerek seviyedeki ve frekanstaki değişimi ölçer. Böylece buradan bir hız verisi elde etmiş olur.

Vectrino Plus yazılımı ile birlikte 200 Hz örnekleme hızına sahiptir. Alınan ses örneklemesinin çapı 6 mm'dir. Kullanıcı tanımına göre probdan 50 mm uzaklıkta, 3-15 mm arasında bir veri alabilir. Vectrino, dört tane alıcı kullanır (x yönünde bir, y yönünde bir ve z yönünde iki tane). Alıcılarda topladığı veri ile üç boyutlu bir hız verisi elde eder. Alıcıların ana proba arasındaki açı 30°'dir (Vectrino User Guide, 2004).



Şekil 3.8: Deneylerde kullanılan Vectrino I

3.5.2 Vectrino II

Vectrino ile aynı çalışma prensibini yani, Doppler Etkisi'ni kullanarak hız ölçmeye yarayan Vectrino II, NORTEK firması tarafından üretilmiştir (Şekil 3.9). Vectrino ile kıyaslandığında en çok öne çıkan özelliği tek bir noktada değil de örnekleme hacmi içerisinde dikey doğrultuda 36 noktaya kadar aynı anda hız verilerini okuyabilmesidir. Bu yönü ile hareketli taban akım ortamına son derece uygun bir ölçüm cihazı olduğu söylenebilir.

Vectrino II yazılımı ile kullanılmaktadır ve 100 Hz arası örnekleme hızına sahiptir. Probdan 40-70mm arasındaki noktaların hız profilini aktarabilmektedir. Dört alıcıdan oluşmakta ve üç boyutlu hız verisi elde etmektedir. Alıcıların proba arasındaki açı 30° 'dir (Vectrino II User Guide, 2011).



Şekil 3.9: Deneylerde kullanılan Vectrino II

3.5.3 Lazer Tarayıcı

Yersel lazer tarayıcılar yüksek hız ve doğrulukla üç boyutlu nokta ölçme kapasitesine sahip cihazlardır. Birkaç dakika içerisinde toplayabildiği yüksek yoğunluktaki verilerle elde edilen üç boyutlu model sayesinde, ölçülmek istenilen obje çeşitli açılardan bilgisayar ortamınca incelenebilmekte ve üzerine her türlü mühendislik hesapları çeşitli yazılımlar sayesinde yapılabilmektedir.

Deneylerimizde puls bazlı bir lazer tarayıcı olan ve LEICA firması tarafından üretilen Scanstation C10 modeli kullanılmıştır. Puls bazlı lazer tarayıcılar, cihazdan gönderilen ışının, çıkış ve geri dönüş süresine göre uzaklık belirlemesi yaparlar ve nokta koordinatlarını rölatif olarak hesaplarlar. Scanstation C10, yatay olarak 360°lik ve dikey olarak da 270°lik tarama yapabilmektedir. Ölçme mesafesi en fazla 300m ve en düşük 0.1m olabilmektedir. Tarama hızı saniyede 50000 noktadır. Görüntüleme sistemi olarak da dahili 4 megapiksel renkli kamera bulundurur (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: LEICA Lazer Tarayıcı

3.6 Deneylerin Yürütülüşü

Kum havuzunun başlangıç noktasından 104 cm sonra deney elemanları (silindir, bitki, altıgen şeklinde dizilmiş silindirler) yerleştirilen düzenekten farklı debilerde akım geçirilmiştir.

Yapılan 14 deneyin ilk 3 tanesi rijit silindir ile yapılmıştır. Kanaldan üç farklı debi geçirilerek, mansap tarafında bulunan Vectrino II ile taban oyulması kaydedilmiş ve aynı zamanda yine aynı ölçüm aleti ile kinematik karakteristikler ölçülmüştür. Denge durumuna kadar ölçülen bu hız verisinin ardından silindire göre memba yönünde 102 cm ileride bulunan Vectrino ile düşey doğrultuda belirli aralıklarla bozulmamış akımın hız verisi (200 Hz frekansla) alınarak bozulmamış akıma ait hız profili elde edilmiştir. Deneyin tamamlanmasının ardından kanalda bulunan su oyulma yaratmaması için son derece düşük hızla boşaltılmış ve lazer tarayıcı ile tarama yapılacak alanın tamamen kuruması ve taramaya elverişli hale gelmesi için bir gün boyunca beklenmiştir. Kum havuzunun oluşturulması aşamasında kum havuzunun oyulma olmayacak boyuna iki köşesine delikli drenaj boruları yerleştirilmiş ve böylece kuruma süresi kısa tutulmuştur. Aksi takdirde lazer tarayıcıda olabilecek olası bir yansıma taramaların yanlış sonuçlanmasına yol açabilmektedir. Zeminin lazer tarayıcı ile taranmaya uygun hale gelişinin ardından LECIA lazer tarayıcı ile oyulma/birikme bölgesi taranmıştır.

Bir sonraki aşamada rijit silindir kaldırılıp yerine *Cupressus Macrocapra* bitkisinin fidanı yerleştirilmiştir. Bu bitkiyle, silindirle aynı şekilde yapılan deneylerde sadece iki debi kullanılmıştır. Zira kullanılması planlanmış en düşük debi, uygulanması durumunda dolgu maddesinde oyulma gerçekleşmediği ön deneylerce belirlenmiştir. Bu bitkiyle sırasıyla akıma batmamış hal için (bitkinin boyu suyun derinliğinden fazla olması durumu) iki deney, etrafı sarılı bitki ile bir deney, bitki suni olarak eğik konuma getirilerek iki deney gerçekleştirilmiştir. Daha sonra akıma batmamış bitkin kaldırılmış ve aynı konuma benzer bir bitki yerleştirilerek üst kısmı kesilerek batık bir form verilmiştir. Bu batık bitkiye iki farklı debi ve batık bitkinin etrafı sarılarak bu debilere yakın iki debi uygulanmıştır.

Her deneyde bitkiden mansap tarafına yapı koşulları elverdiğince bitkiye yakın noktalarda sistem denge durumuna gelinceye kadar Vectrino II ile hız profili ölçülmüştür. Taban koşullarının denge durumuna erişmesinin ardından Vectrino II, x eksenini boyunca mansap yönünde ilerletilerek 5cm’de bir (geçirimsiz bitkide 3cm’de bir) tabanda kanal orta çizgisi boyunca 30 saniyelik hız ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde örnekleme hacminin tabanının zemin tabanına temas etmesine özel özen gösterilmiştir. Ardından ise ilk üç deneyde yapıldığı gibi memba tarafında Vectrino 1 ile derinlik boyunca bozulmamış akıma ait hız profili ve dolayısı ile birim genişlik

debisi elde edilmiştir. Elde edilen hız verileri Goring ve Nikora (2002)'de verilen filtreleme yöntemi ile filtrelenmiştir.

Deneyler tamamlandıktan sonra bitkinin su içerisinde kalan kısmı yaprakları ve diğer tüm uzantılarıyla beraber üç eşit paraya ayırarak silindir biçiminde kesilmiştir. Kesilen parçalar dereceli silindire konularak hacimleri ölçülmüştür (şekil 3.11).

Son iki deneyde ise altıgen şeklinde dizilmiş silindirler kullanılmıştır. Bu deneylerde de q_1 ve q_2 debilerinden yararlanılmıştır. Bu altıgen şeklinde dizilmiş silindirlerle yapılan deneylerin amacı, rijit bir yapıyla, bitki ve rijit silindir arasında bitkiye silindirden daha yakın (boşluklu yapıya sahip) bir şekilde, bitkiyi karakterize edecek bir sonuç elde etmektir. Diğer deney serilerinde de olduğu gibi denge durumuna gelinceye kadar söz konusu yapının mansap tarafında Vectrino II ile hız profili ölçülmüş ve ardından Vectrino I ile memba tarafında bozulmamış akıma ait hız profili elde edilmiştir. Ayrıca bitki deneylerinde olduğu gibi x doğrultusunda (akım doğrultusunda) mansap tarafına doğru 5 cm'de bir Vectrino II ile taban yakınında hız profilleri okunmuştur.



Şekil 3.11: Silindirik kesilen bitkiler.

Tablo 3.1'de tüm deneyler için hesaplanan akımların Reynolds sayıları, Froude sayıları, kayma hızları, Shields parametreleri ve boyutsuz oyulma derinliği verilmektedir. Reynolds ve Froude sayılarından görüldüğü üzere deneylerin tamamı kritik altı rejimde gerçekleştirilmiştir. Kayma hızı, derinlik ve hız profilinin logaritmik ekseninde çizilmesiyle elde edilmiştir. Boyutsuz oyulma derinliği ise boyutsuz oyulma derinliğinin karakteristik çapa olan oranıdır. Silindirle ilgili daha önce pek çok çalışma yapıldığı için tabanda yalnızca bir noktada ölçüm alınmıştır. Tablo 3.2 ise lazer tarayıcı ile bilgisayar ortamına aktarılan veriler üzerinde alan ve hacim hesabı yapılarak oluşturulmuştur.

Tablo 3.1: Deney sonuçları.

Deney Numarası	q(L/s-m)	Derinlik h (cm)	Yapı Tipi	Derinlik Ortalamalı Bozulmamış Akım Hızı (cm/s)	Karakteristik Çap (m)	Re	Fr	Tabanda Ölçülen Hız Profili Sayısı	Uf, Kayma Hızı (cm/s)	Shields Parametresi	Boyutsuz Oyulma Derinliği (S/D)
1	47.085	21.5	Silindir	21.9	0.160	35040	0.15	1	1.2	0.015	0.173
2	62.1	23.0	Silindir	27.0	0.160	43200	0.18	1	1.4	0.020	0.698
3	85.54	23.5	Silindir	36.4	0.160	58240	0.24	1	1.9	0.037	0.884
4	61.18	23.0	Dik Bitki	26.6	0.030	7980	0.18	11	1.4	0.020	1.857
5	80.028	22.8	Dik Bitki	35.1	0.030	10530	0.23	13	1.9	0.037	3.830
6	56.35	23.0	Geçirimsiz Bitki	24.5	0.030	7350	0.16	21	1.3	0.017	3.277
7	55.647	22.9	Eğik Bitki	24.3	0.030	7290	0.16	9	1.3	0.017	1.587
8	79.45	22.7	Eğik Bitki	35.0	0.030	10500	0.23	9	1.9	0.037	3.547
9	57.82	24.5	Batık Bitki	23.6	0.023	5428	0.15	14	1.3	0.016	1.983
10	90.005	23.5	Batık Bitki	38.3	0.023	8809	0.25	14	2.0	0.041	3.917
11	58.14	22.8	Geçirimsiz Bitki	25.5	0.023	5865	0.17	14	1.4	0.020	3.017
12	81.225	22.5	Batık Geçirimsiz Bitki	36.1	0.023	8303	0.24	14	1.9	0.037	4.000
13	61.44	24.0	Altıgen Silindir	25.6	0.093	23808	0.17	17	1.4	0.020	0.730
14	88.36	23.5	Altıgen Silindir	37.6	0.093	34968	0.25	17	2.0	0.041	1.034

Tablo 3.2: Oyulmaların sayısal değerleri ve ağırlık merkezleri

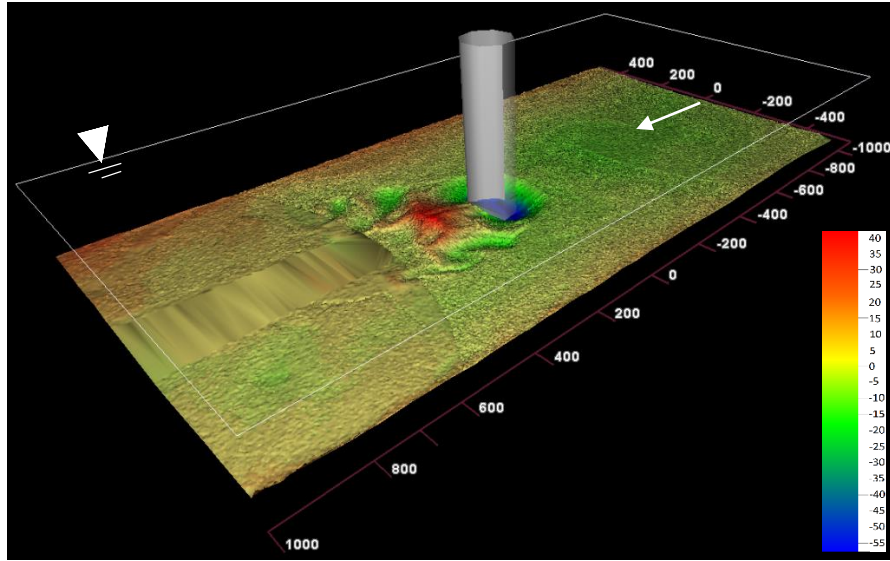
Deney Numarası	Oyulma alanı (cm ²)	Oyulma hacmi (cm ³)	Membada oyulma alanının merkezinin cisimden düzlemsel çapraz yönde uzaklığı (cm)	Mansapta oyulma alanının merkezinin cisimden düzlemsel çapraz yönde uzaklığı (cm)
1	1611	1700	6.7	8.8
2	5542	12900	11.0	13.0
3	7980	26000	12.1	12.9
4	6218	12400	5.4	13.0
5	7559	38000	7.6	19.6
6	4720	8900	8.1	11.6
7	4321	6500	1.9	1.7
8	7802	34300	6.0	12.0
9	3850	1800	-	4.9
10	8369	19900	6.5	13.1
11	5721	5100	4.1	8.6
12	9125	18700	6.8	13.7
13	6358	8000	5.4	11.2
14	8712	26800	10.9	11.3

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Oyulma Desenlerinin İncelenmesi

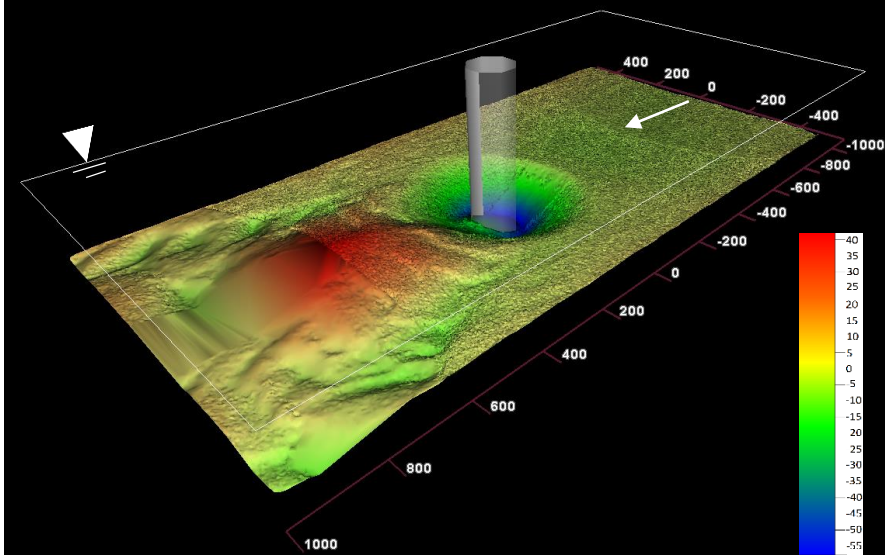
4.1.1 Yapı Tipi Değiştiğinde Oluşan Oyulma Desenlerinin İncelenmesi

Düzgün silindirle yapılan deneylerde silindirin etrafındaki alanda derin oyulma olduğu görülmüştür. Bu durumun temel nedeni silindirin etrafında oluşan Şekil 2.1’de görülen aşağı yönlü düşey akım ve buna bağlı olarak ortaya çıkan ve yine Şekil 2.1’de görülen atnalı çevrintileridir. Bu büyük oyulma çukurundan taşınan sediment akım yönünde ve yanal yönde geniş bir şekilde yayılarak taban kayma gerilmesinin kritik kayma gerilmesinin altına düştüğü bölgede yığılmıştır (Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3).

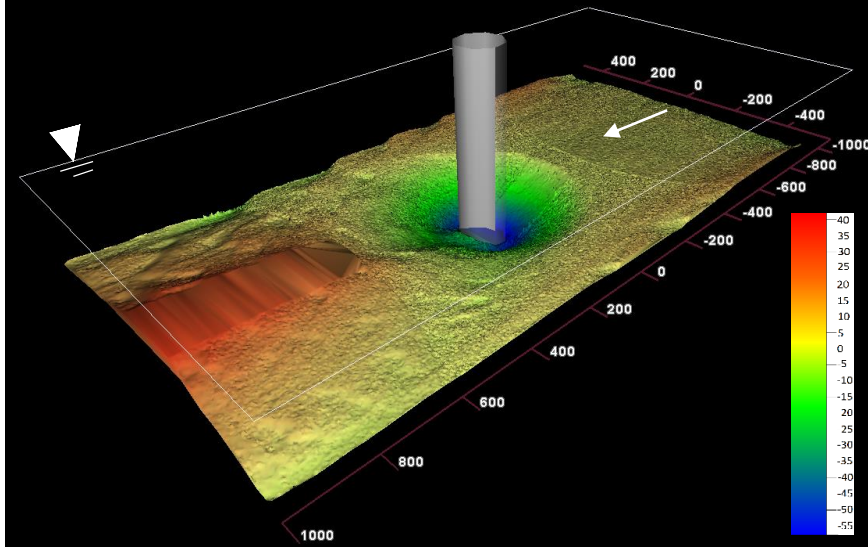


Şekil 4.1: $q = 47.08$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 1).

Dik ve batmamış bitkiyle yapılan deneylerde (Şekil 4.4, Şekil 4.5), oyulmanın silindirde olduğu gibi cismin hemen etrafında değil de kanal boyunca mansap tarafına doğru ilerledikçe oluştuğu gözlenmiştir. Bu durumun başlıca nedeni bitkinin altında oluşan jet akımlarıdır. Jet akımının etkisiyle taban kayma gerilmesinin kritik kayma gerilmesini aşması sonucunda bitkinin daha çok mansap tarafında oyulma meydana



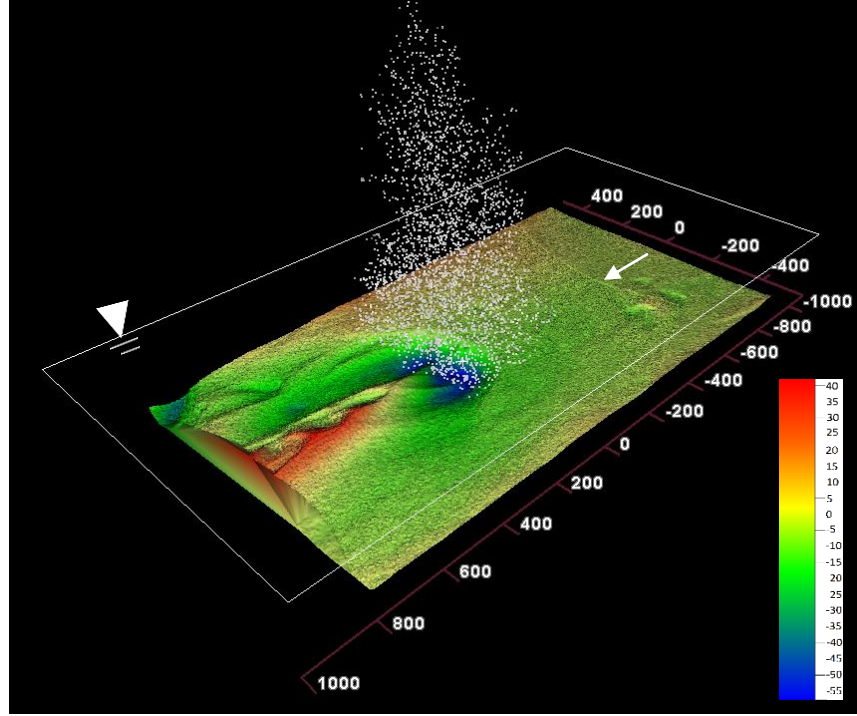
Şekil 4.2: $q = 62.1$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 2).



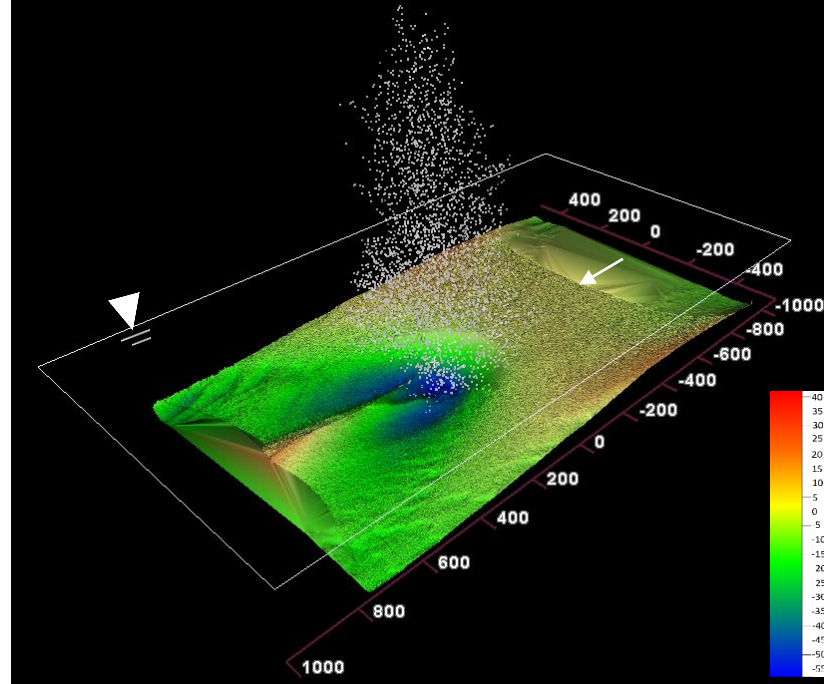
Şekil 4.3: $q = 85.54$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 3).

gelir. Silindirden farklı olarak bitkinin memba kısmındaki oyulmalar ise oldukça az bir alanda etkili olup derinliği oldukça sınırlıdır. Bunun temel nedeni bitkinin membaında oluşan aşağı yönlü düşey akımın silindire oranla çok daha az olmasıdır. Aşağı yönlü düşey akımın silindire oranla çok daha zayıf olmasının temel nedeni bitkinin kanopi kısmının silindir ile kıyaslandığında oldukça geçirimli olmasıdır. Bu geçirimlilik nedeni ile bitki önünde kabarma yüksekliği muhtemelen daha az olmakta ve buna bağlı olarak aşağı yönlü düşey akım gelişmemektedir. Düşey akımın gelişmemesi neticesinde, normal koşullarda silindirin membaında gelişen ayrılma

bölgesi oldukça sınırlıdır. Buna bağlı olarak da atnalı çevrileri silindir ile kıyaslanamayacak kadar zayıf mertebededir. Dolayısıyla bitkinin yan kısımlarındaki oyulma silindire oranla daha az bir alanda etkilidir.

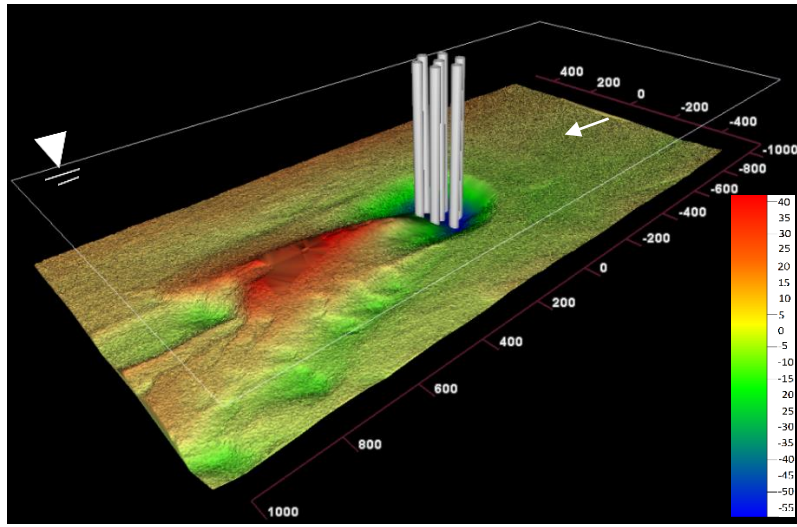


Şekil 4.4: $q = 61.18$ L/s-m birim genişlik debisi altında dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 4).

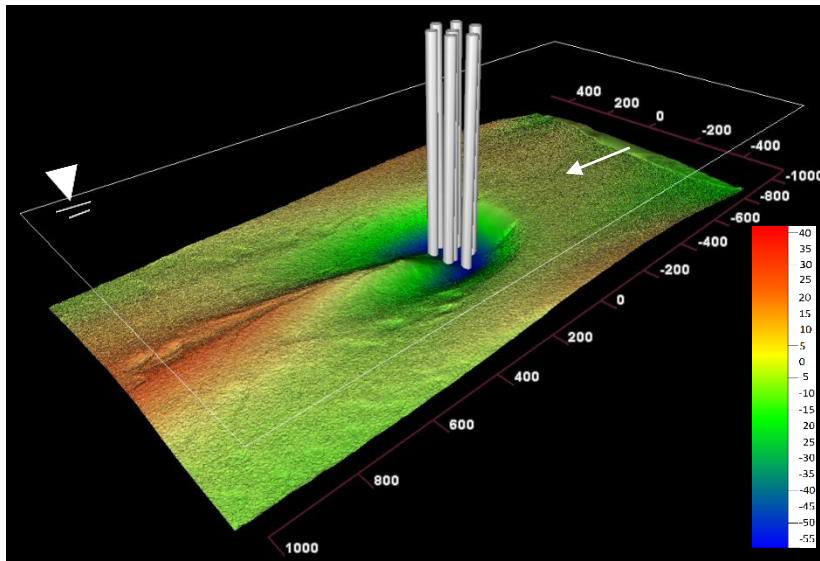


Şekil 4.5: $q = 80.03$ L/s-m birim genişlik debisi altında dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 5).

Altıgen şeklinde dizilmiş silindirlerin oyulma desenine bakıldığında ise (Şekil 4.6, Şekil 4.7) ortaya dik bitki ile silindir arasında bir sonuç çıktığı görülmektedir. Hem silindirlerin etrafında oyulma çukuru oluşmuştur, hem de kanal boyunca ileriye doğru oyulma gözlenmiştir. Silindirlerin memba tarafında oluşan aşağı yönlü düşey akımın etkisi ile bu oyulma çukurunun oluştuğu düşünülmektedir. Ancak burada bulunan aşağı yönlü düşey akım tekil silindirde oluşandan az, bitkide oluşandan fazladır. Bunun başlıca nedeni oyulma bölgesinde silindire göre akım geçirirliliği daha çok, bitkiye göre daha azdır. Silindirlerin arasında daralma etkisiyle oluşan hızlanan akım ise akım doğrultusunda oyulma sağlamıştır (Şekil 4.6, Şekil 4.7).



Şekil 4.6: $q = 61.44$ L/s-m birim genişlik debisi altında altıgen şeklinde dizilmiş silindirler etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 13).

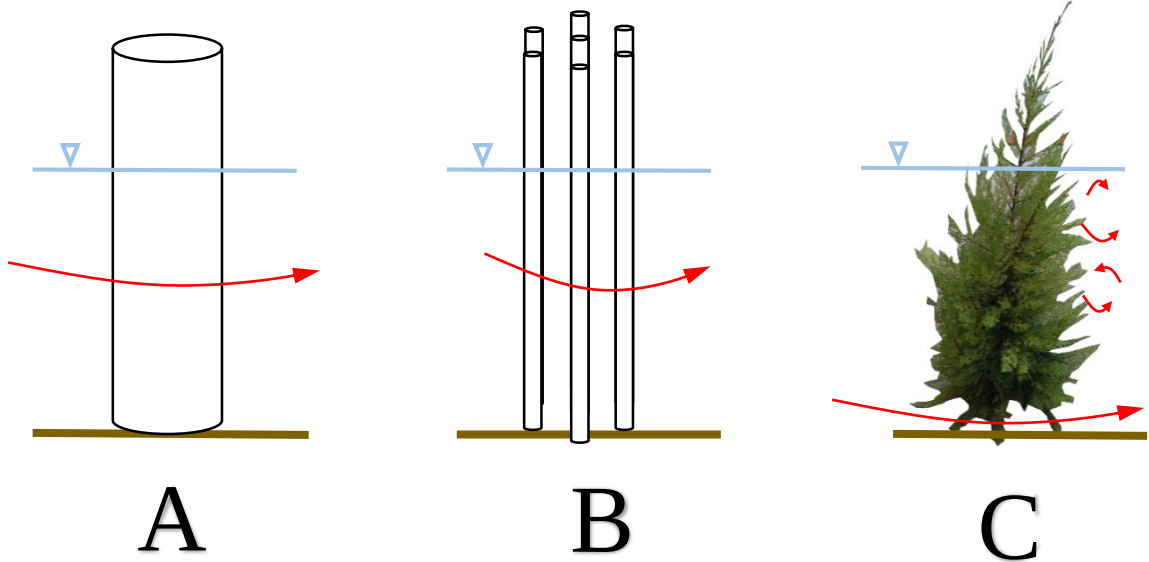


Şekil 4.7: $q = 88.36$ L/s-m birim genişlik debisi altında altıgen şeklinde dizilmiş silindirler etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 14).

Aşağı yönlü düşey akımı etkileyen ana faktör, yapı tipinin geçirirliılığıdır. Yapı tipinin geçirirliılığı arttıkça, akımı daha az engelleyeceğinden en büyük aşağı yönlü düşey akış hızı silindirde görülür (Tablo 4.1). Sürüklenme kuvveti ve ayrılma mesafesi ise aşağı yönlü düşey akışla doğru orantılı olarak değişeceğinden en büyük silindirde gözlenir. Kuyruk çevrıntıleri sadece silindir ve altıgen biçiminde yerleştirilmiş silindirlerde görülürler. Bitkilerde kuyruk çevrıntisi yerine dal ölçeğinde çevri kopmaları mevcuttur (Şekil 4.8). Silindirik yapılarda büyük kuyruk çevrıntıleri

Tablo 4.1: Silindir, altıgen şeklinde dizilmiş silindirler ve dik ve batmamış bitkinin karşılaştırılması.

Aşağı yönlü düşey akış hızı	$A > B > C$
Sürüklenme Kuvveti	$A > B > C$
Ayrılma Mesafesi	$A > B > C$
Kuyruk Çevrıntisi	$A > B > C$
Kanopi altı akım hızı	$C \gg A, B$
Oyulma Çukuru	$A > B > C$

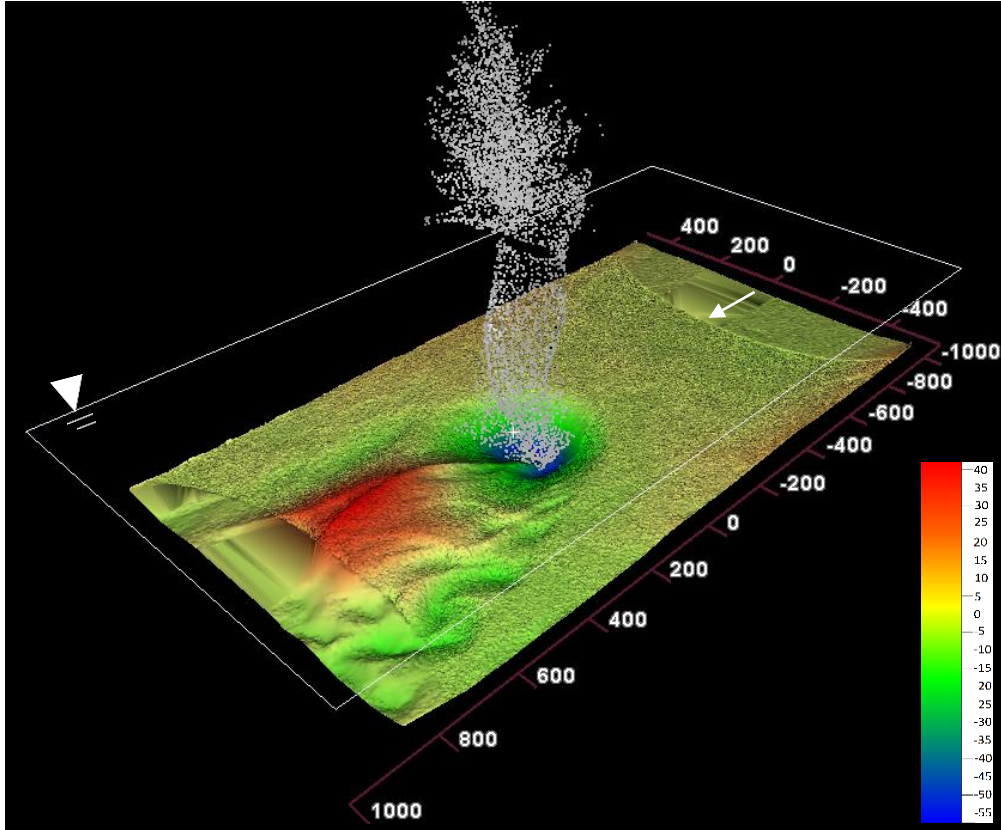


Şekil 4.8: Silindir, altıgen şeklinde dizilmiş silindirler ve dik ve batmamış bitki oluşurken, bitkide ise her dal parçası kendi küçük çevrıntisini oluşturacağından bu çevriler silindirlere göre daha küçük olur. Silindirler düz yapı oldukları için alt kısımlarında ani hacim değişiklikleri görülmez. Ancak bitkinin kanopi kısmından

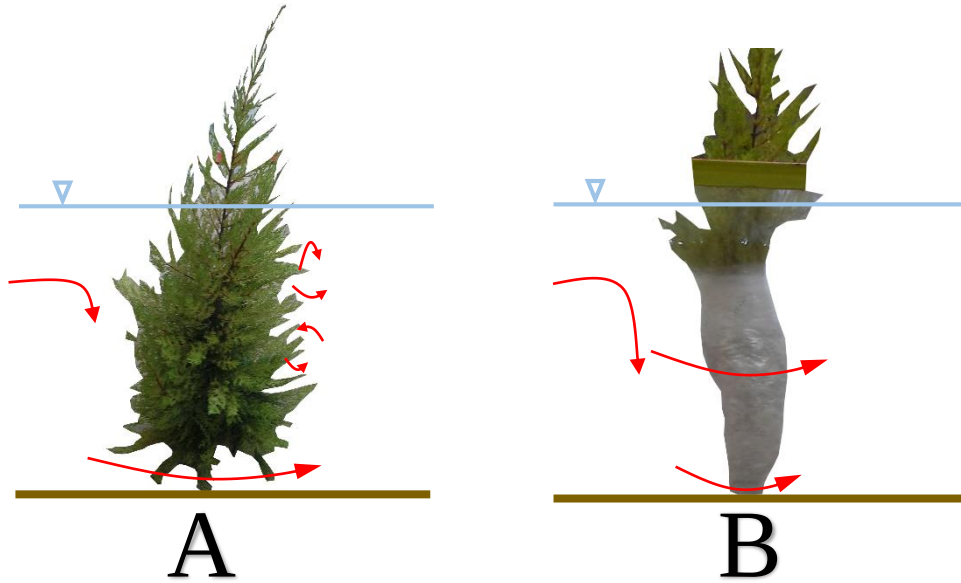
sonra gelen gövde bölgesinde suyun engellenme miktarı birden azalır. Böylece bitki altındaki akım, silindirlere göre daha hızlı olur. Oyulma çukuru ise atnalı çevrıntilerinin bir sonucudur. Silindirlerde daha büyüktür.

4.1.2 Geçirimsizliğin Etkisi

Etrafı sarılmış, geçirimsiz bitkilerle yapılan deneylerde oyulmanın bitkilerle yapılan deneylerden çok silindirle yapılan deneylere benzediği görülmektedir (Şekil 4.9). Çünkü bitkinin etrafı çevrildiğinde ve geçirimsiz hale getirildiğinde bitkinin kanopi bölgesinin geçirimliliği azalır. Böylece bitkinin memba tarafında aşağı yönlü düşey akım daha şiddetli bir şekilde meydana gelir ve devamında ise atnalı çevrıntıleri daha belirgin bir şekilde oluşur (Şekil 4.10).



Şekil 4.9: $q = 56.35$ L/s-m birim genişlik debisi altında etrafı sarılmış batmamış dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 6).



Şekil 4.10: Batmamış dik bitki ile batmamış dik geçirimsiz bitki.

Etrafı sarılmış geçirimsiz bitkinin akım geçirimsizliği, etrafı sarılmamış bitkiye göre daha azdır. Bu nedenle aşağı yönlü düşey akış oluşumu da daha fazla olmaktadır. Sürüklenme kuvveti ve ayrılma mesafesi de buna bağlı olarak daha fazladır. Etrafı sarılı bitki kanopi bölgesinde silindire benzer bir yapı olduğundan, kuyruk çevrintisi oluşumu gözlenir. Çevri kopmaları, geçirimli bitkide oluşan dal ölçeğindeki çevri kopmaları ile karşılaştırıldığında bunların ölçeğinin daha büyük olduğu söylenebilir. Aşağı yönlü düşey akış geçirimsiz bitkide daha fazla olduğundan da kanopi altı akım hızı ve oyulma çukuru büyüklüğünün daha fazla olduğu görülmüştür (Tablo 4.2).

Tablo 4.2: Batmamış dik bitki ile batmamış dik geçirimsiz bitkinin karşılaştırılması.

Aşağı yönlü düşey akış hızı	$A < B$
Sürüklenme Kuvveti	$A < B$
Ayrılma Mesafesi	$A < B$
Kuyruk Çevrintisi	$A < B$
Kanopi altı akım hızı	$A > B$
Oyulma Çukuru	$A < B$

Batık bitkilerde bitki üzerinde oluşan hızlı akım, geçirimsiz bitkide daha büyüktür. Çünkü kanopi bölgesinde akıma karşı direnç daha yüksektir, geçirimsizlik daha azdır.

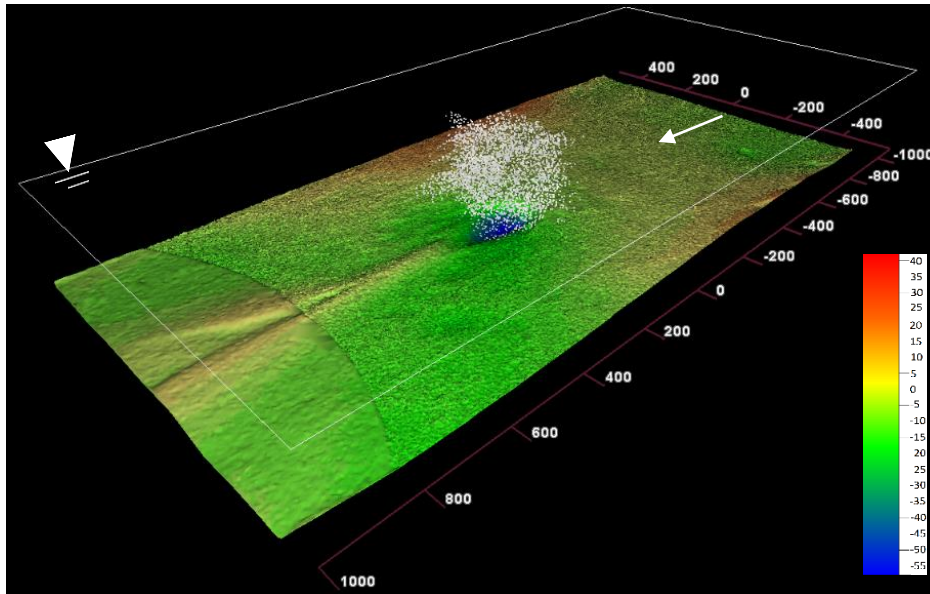
(Şekil 4.11, Tablo 4.3). Batık bitkilerde ise, batmamış bitkilerdeki koşullar geçerlidir (Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15).



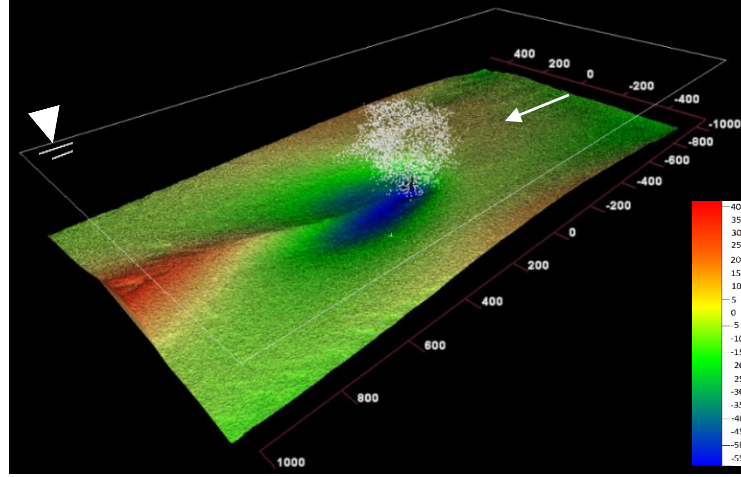
Şekil 4.11: Geçirimli ve geçirimsiz batık bitkiler

Tablo 4.3: Geçirimli ve geçirimsiz batık bitkilerin karşılaştırılması.

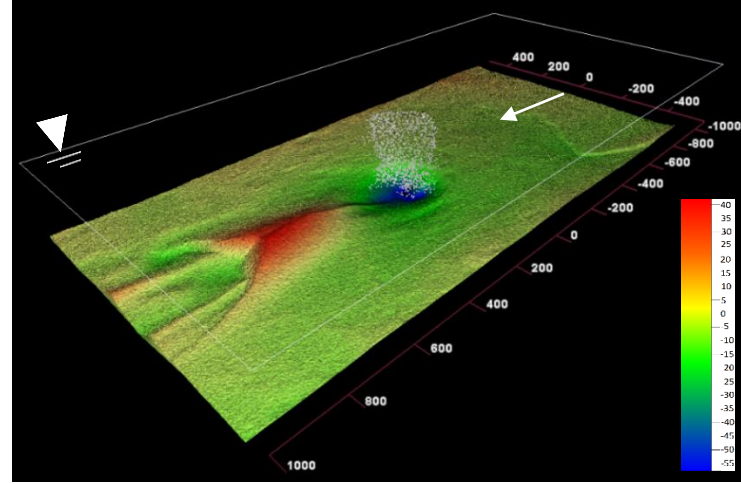
Bitki Üstü Akım Hızı	$A < B$
----------------------	---------



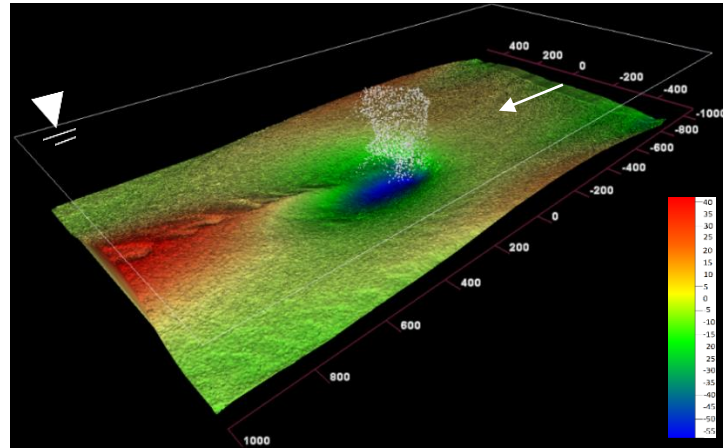
Şekil 4.12: $q = 57.82$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 9).



Şekil 4.13: $q = 90$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık bitki etrafında meydana gelen oylulma desenleri (Deney 10).



Şekil 4.14: $q = 58.14$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oylulma desenleri (Deney 11).



Şekil 4.15: $q = 81.23$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oylulma desenleri (Deney 12).

4.1.3 Derinliğin Batık Bitkiler Üzerindeki Etkisi

Batmış bitki ile batmamış bitki arasındaki temel fark, batmış bitki akıma gösterilen direncin daha az oluşudur. Bununla birlikte, batmış bitki durumunda kanopi altı akımına ilave olarak kanopi üstü akım da oyulma deseninin ortaya çıkmasında belirleyici rol oynar. Kanopi altı akım ile kanopi üstü akım bitkinin mansabında etkileşmekte ve bu durum ortalama akım kinetik enerjisini, türbülans kinetik enerjisine dönüştürmektedir. Batıklık derecesinin artmasına bağlı olarak artan kanopi üstü akım ile kanopi altı akım zayıflamakta, bu da oyulma miktarını azaltmaktadır.

Bu deneylerde batık bitkinin altında oluşan jet akımından dolayı, batmamış bitki deneylerinde olduğu gibi hem akım yönünde hem de yanal yönde oyulma oluşu gözlenmiştir. Ancak oyulma batmamış bitkideki kadar geniş olmamıştır. Batık bitki olarak kullanılan bitki, batmamış bitkiye göre daha az hacimli bir bitkidir. Su altında bulunan hacimleri karşılaştırılınca dik bitkinin batık bitkiye göre daha büyük hacimde olduğu görülmüştür. Bu nedenle oyulma alanı dik bitkiye göre daha sınırlı kalmıştır. Dolayısıyla oluşan akım daha az bozulmuştur. Bitkinin mansap tarafında oluşan yığılma ise dik ve batmamış bitkiye kıyasla çok farklıdır. Bitinin üst kısmında oluşan jet akımı sayesinde bu bölgede akım hızı yüksektir (Şekil 4.16).

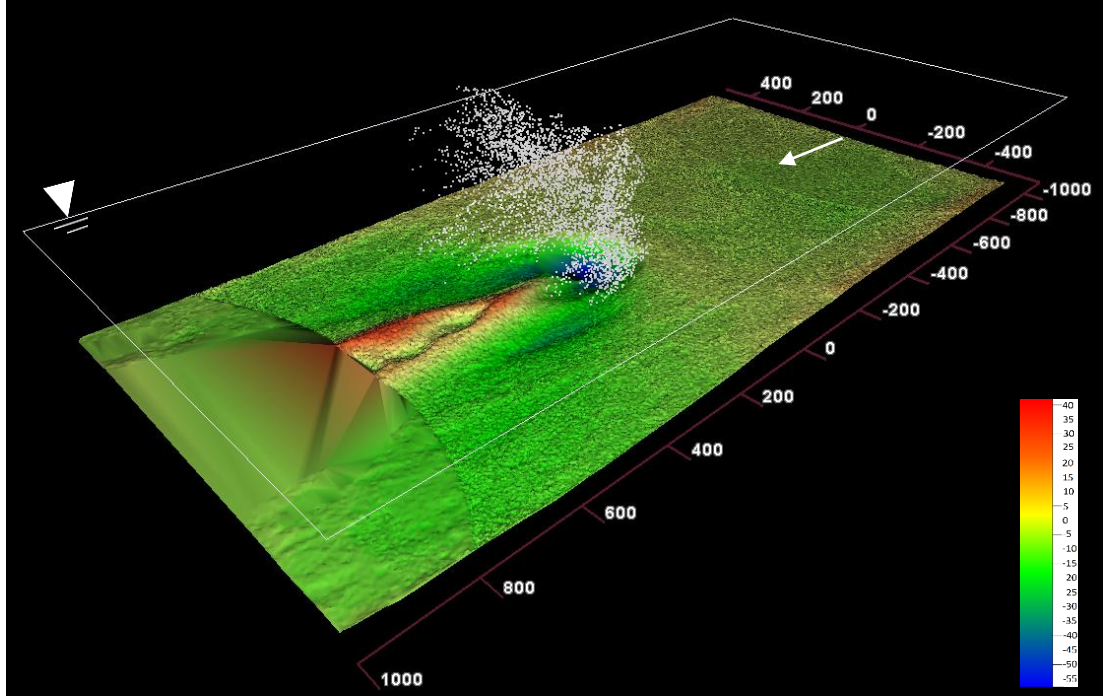


Şekil 4.16: Daralma nedeniyle bitkinin neden olduğu kanopi-altı ve kanopi-üstü akım

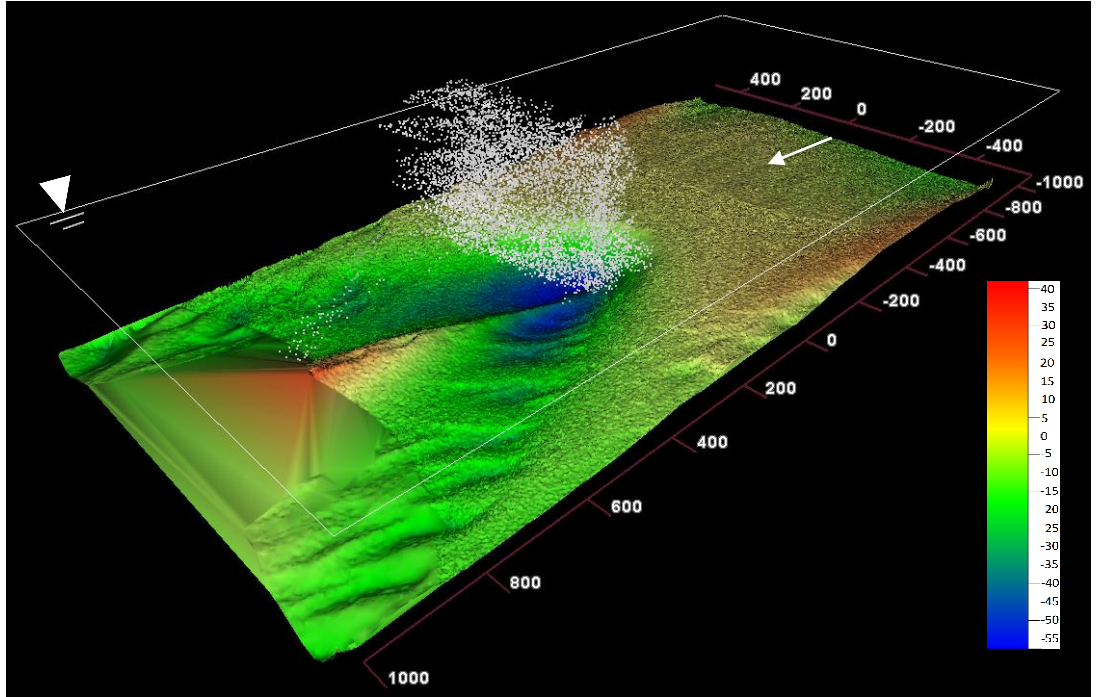
4.1.4 Bitkinin Eğilmesinin Etkisi

Eğik konumdaki bitkinin oluşturduğu oyulmaya bakıldığında dik bitki ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Ancak dik bitkiye kıyasla oyulma miktarı hacimce daha az olmuştur. Bitki eğik konumdayken geçirimsizliği azalmaktadır. Oyulma hacminin

azalmasındaki temel neden, bitki eğilince aşağı yönlü akımın, su altında kalan bitki hacmi azalmasına rağmen azalmasıdır (Şekil 4.17, Şekil 4.18).



Şekil 4.17: $q = 55.65$ L/s-m birim genişlik debisi altında eğik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 7).



Şekil 4.18: $q = 79.45$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 8).

Eğik bitkide geçirgenlik, dik bitkiye göre daha azdır. Bu nedenle aşağı yönlü düşey akış hızının daha büyük olması beklenir. Ancak eğik bitkide, bitkinin eğikliğinden dolayı yukarı yönlü düşey akım bileşeni devreye girer. Bu da oyulma alanını ve çapını azaltmaktadır (Şekil 4.19, Tablo 4.4).



Şekil 4.19: Batmamış dik bitki ile eğik bitki.

Tablo 4.4: Batmamış dik bitki ile eğik bitkinin karşılaştırılması.

Aşağı yönlü düşey akış hızı	$A > B$
Sürüklemeye Kuvveti	$A < B$
Ayrılma Mesafesi	$A > B$
Yukarı yönlü düşey akış hızı	$A < B$
Kanopi altı akım hızı	$A < B$
Oyulma Çukuru	$A > B$

Verilen oyulma desenlerinin Surfer programı yardımıyla yüzey interpolasyonu yapılmış hali Ek A bölümünde verilmiştir. Aynı renklendirmenin farklı açıdan görünüşleri ise Ek B'de mevcuttur. Ayrıca deneyler sonucunda oluşan desenlerin eş yükselti eğrileri Ek C'de ve deney sonrası fotoğrafları Ek D'de gösterilmiştir.

Oluşan desenlerde deney elemanının arkasında oluşan yığılmanın asıl nedeni Baykal ve diğ. (2014)'te de bahsedilen büyük ölçekli zıt yönlü akım yönünde çevrintilerdir. Şekil E1'de gösterildiği gibi silindirden sonra boylamasına uzanan iki oyulma çukuru ve aralarında ise yığılma bölgesi gözlenmektedir.

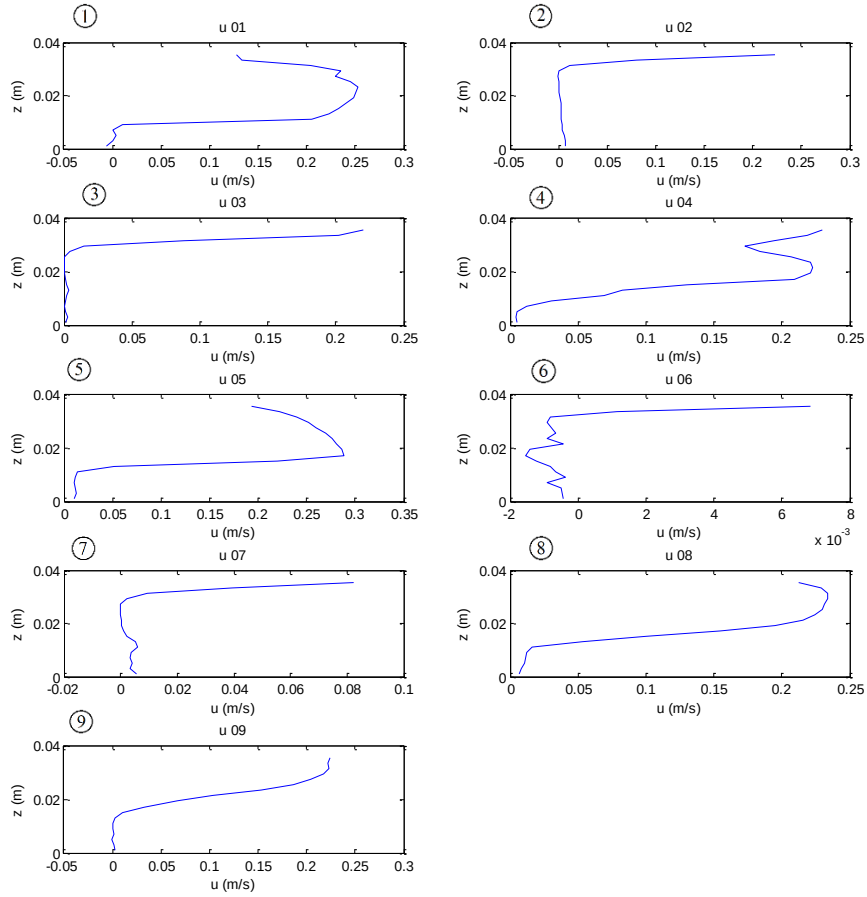
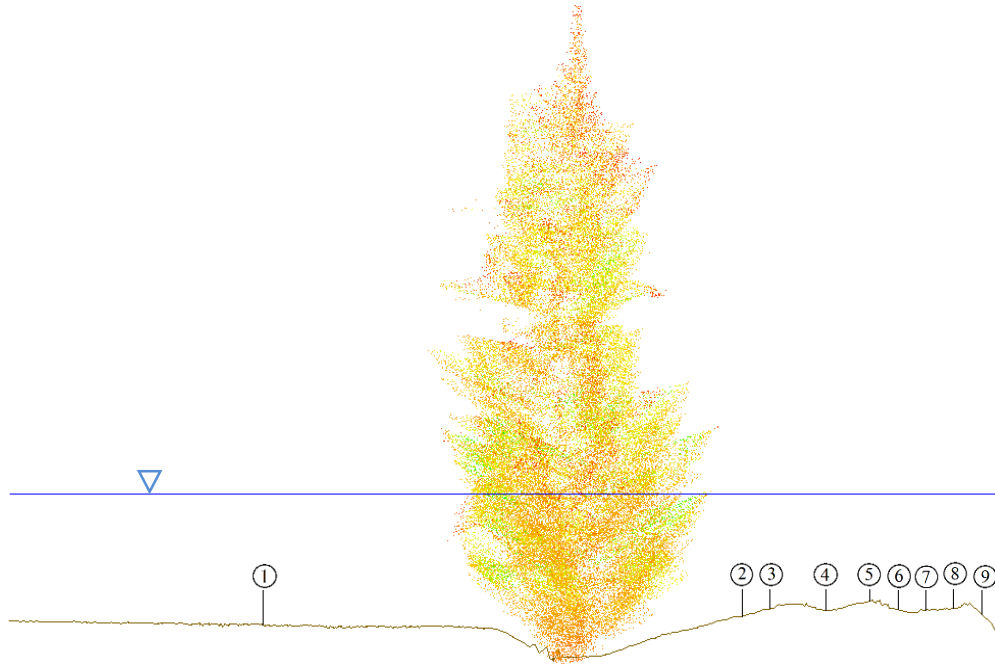
4.2 Taban Yakınındaki Hız Profilleri

Şekil 4.20'de akıma batmamış bitki durumu için, taban yakınında ölçülen hız profilleri ölçüm konumlarına bağlı olarak verilmiştir. 2. ölçüm noktasında görüldüğü üzere, 1 numaralı konumda taban yakınında akım hızı genelde pozitif olarak gözlenmiştir. Ters basınç gradyanlarının oluşumunun beklenebileceği konumlar olan, 6 numaralı konumda çok daha şiddetli olmak kaydıyla, 6 ve 9 numaralı konumlarda negatif hızlar olduğu görülmüştür. Buna paralel olarak akım çizgilerinin sık olmadığı 6 numaralı noktada genel anlamda en düşük hızlar gözlenmiştir. Buna karşılık en yüksek hız ise yığılmanın tepe noktası olan 5 numaralı noktada ortaya çıkmaktadır.

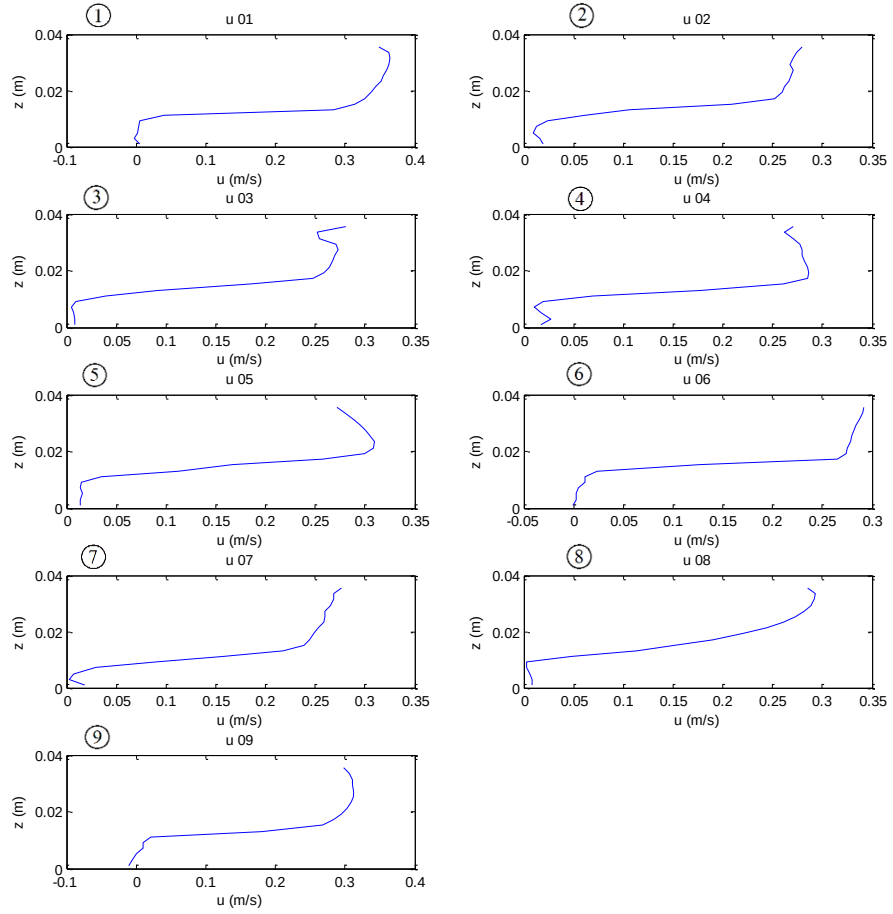
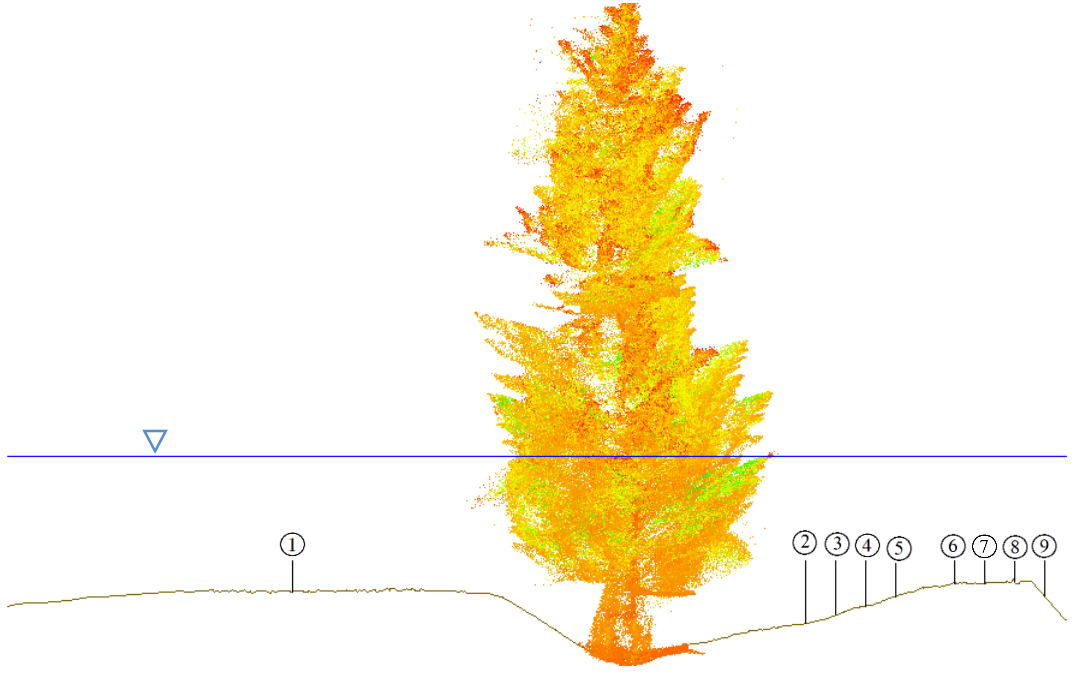
Şekil 4.21'de sadece 9 numaralı noktada çok düşük olmakla birlikte negatif hızlar gözlenmiştir. Bunun nedeni ters basınç gradyanının oluşacağı tek noktanın bu nokta olmasıdır. Genel olarak hız değerleri birbirine çok yakındır. Ancak oluşan yığılmanın üst kısmındaki noktaların çukurda kalan noktalara göre daha büyük olduğu görülmüştür. Burası akım çizgilerinin birbirine en yakın olduğu noktalardır.

Şekil 4.22'de etrafı sarılmış, geçirimsiz, akıma batmamış bitki durumu için taban yakınında ölçülmüş hız profilleri verilmiştir. 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 numaralı noktalarda negatif hız değerleri görülmektedir. Öte yandan akım çizgilerinin daralma nedeniyle sık olması beklenen 9, 10, 11, 12, 13 noktalarında hız değerlerinin diğer noktalara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Çünkü bu bölge yığılmanın olduğu bölgedir ve akım çizgileri burada sıklaşmaktadır. Negatif hızın en büyük olduğu nokta ise 3. noktadır.

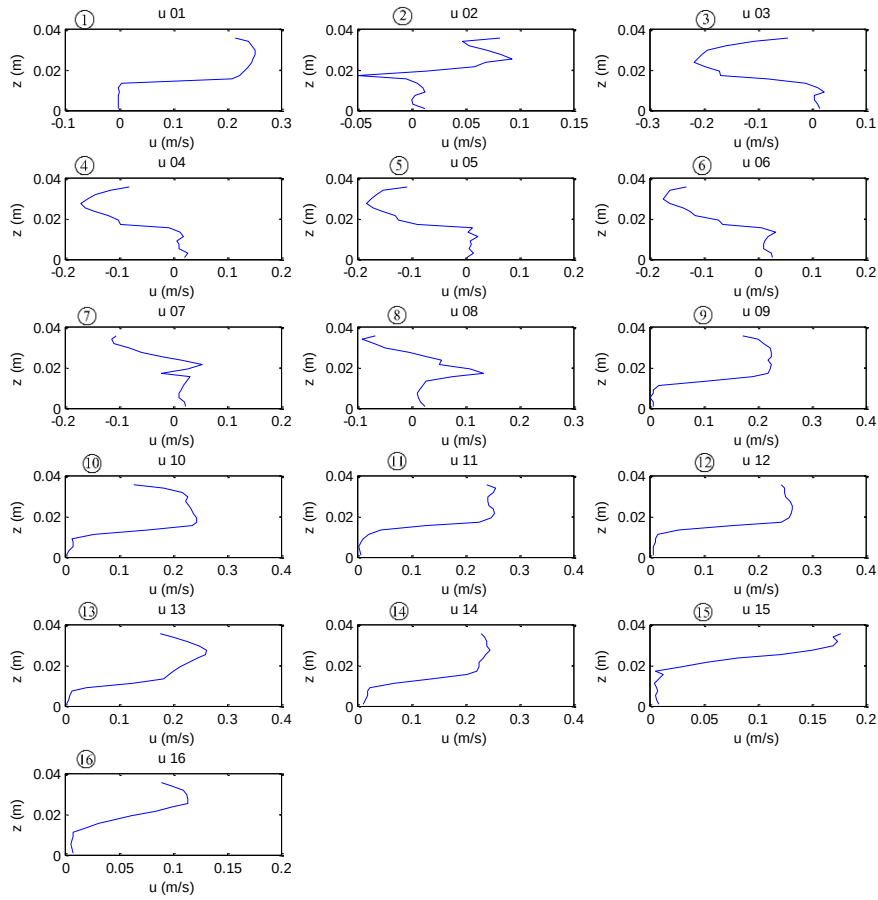
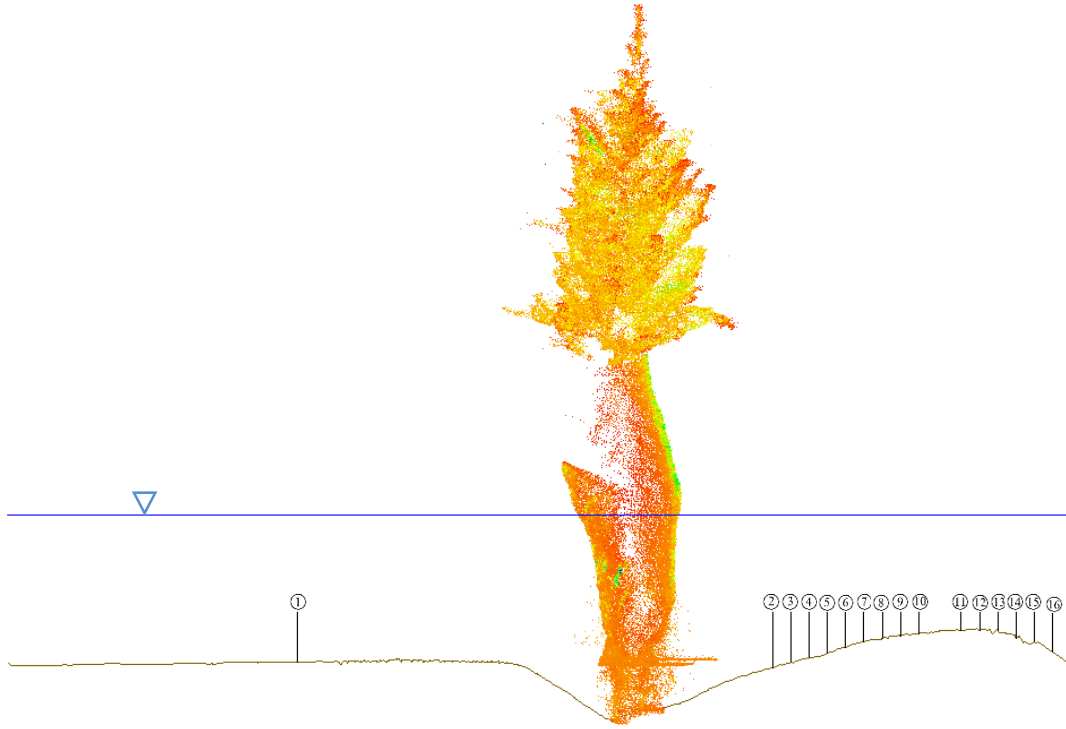
Şekil 4.23'te eğik bitki ile yapılan deneylerde ölçülen hız profilleri görülmektedir. Oyulmuş alanlarda bitki engel teşkil ettiğinden hız ölçümü yapılamamıştır. Ölçülen noktalarda ise ters basınç gradyanının oluşabileceği bir nokta bulunmamaktadır. En yüksek hız 3 numaralı noktada görülmektedir. Çünkü bu nokta yığılmanın olduğu yerdedir. Dolayısı ile akım çizgilerinin birbirine en yakın olduğu noktadır.



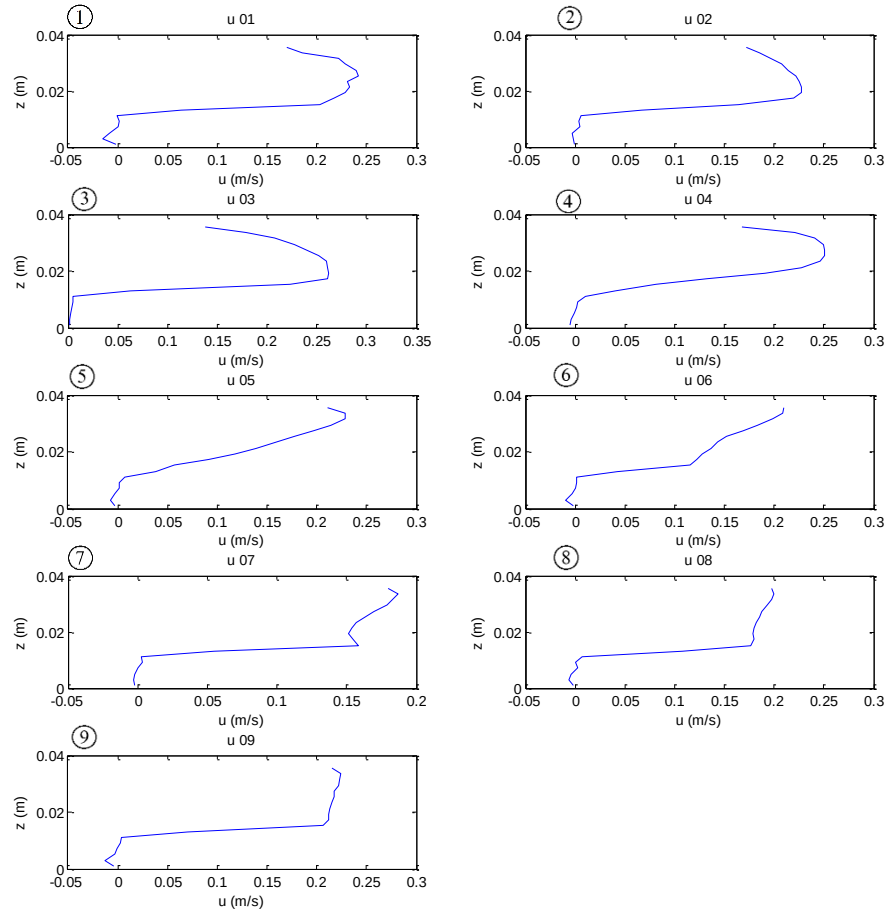
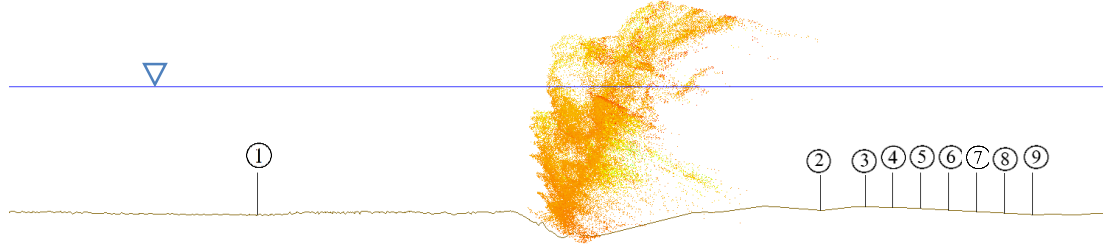
Şekil 4.20: Düşük debili akım sırasında batmamış dik bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.



Şekil 4.21: Yüksek debili akım sırasında batmamış dik bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.

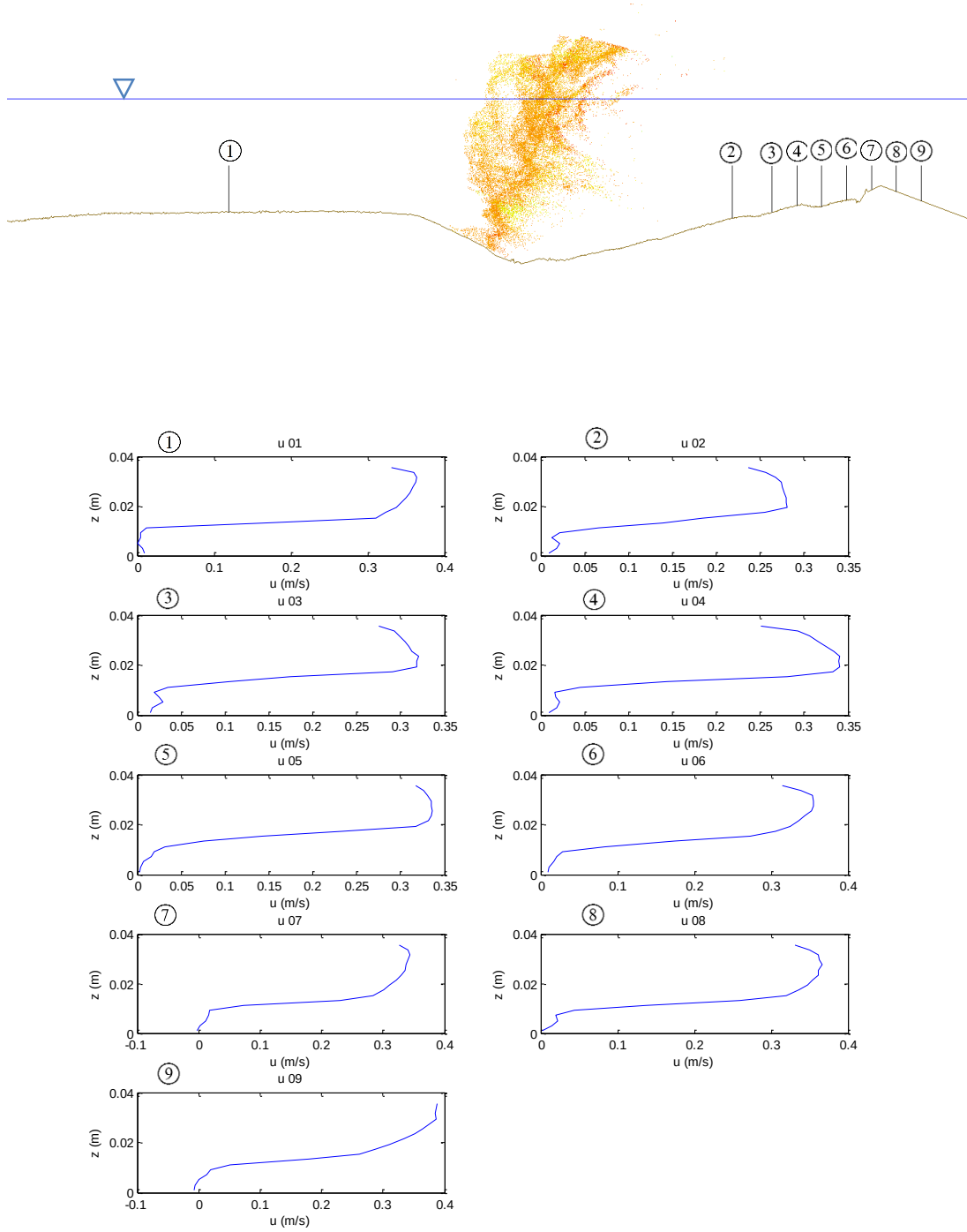


Şekil 4.22: Düşük debili akım sırasında geçirimsiz dik bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.



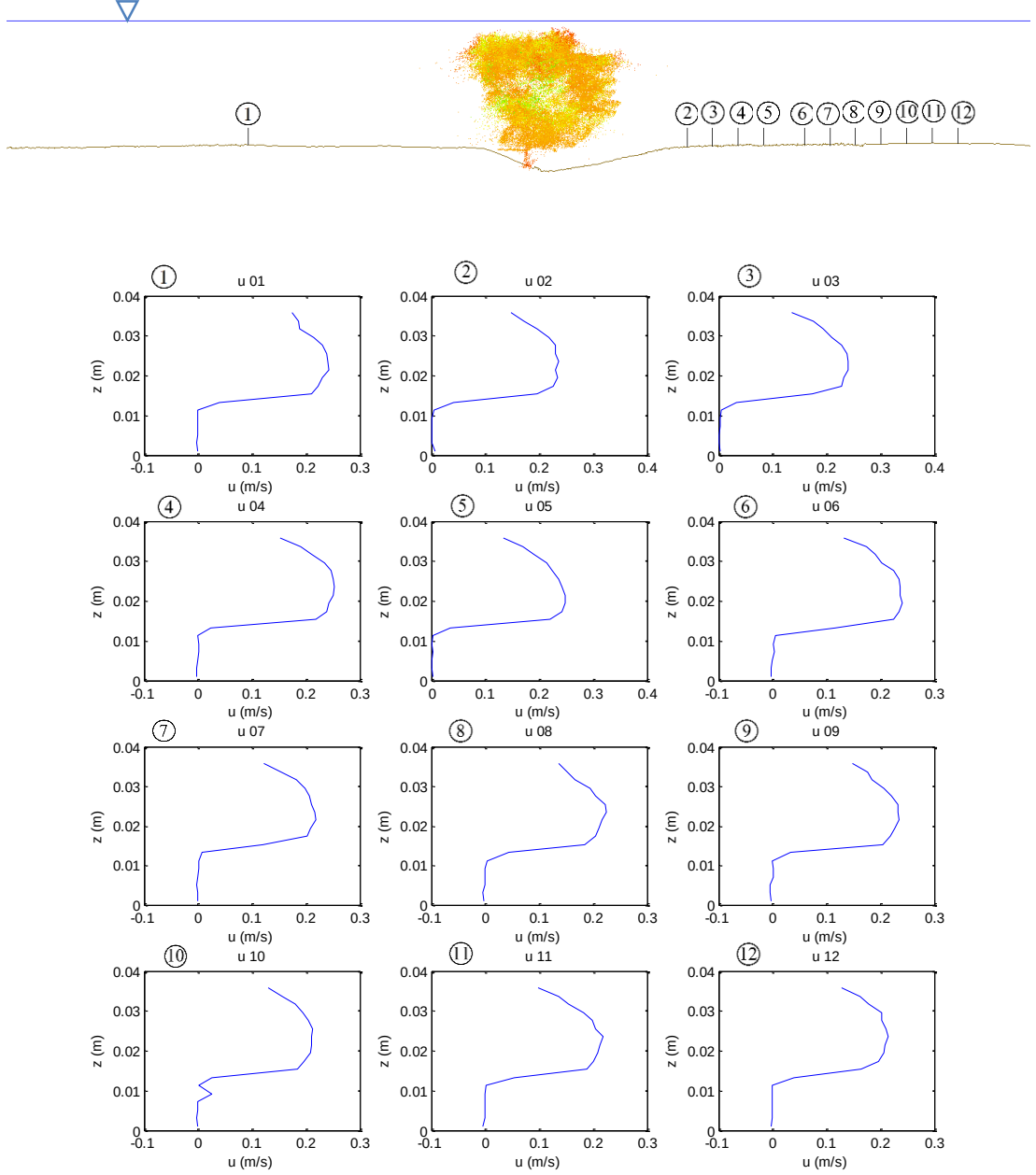
Şekil 4.23: Düşük debili akım sırasında eğik bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.

Şekil 4.24'te ters basınç gradyanının 9. noktada görülmesi beklenmektedir. Dolayısıyla çok küçük de olsa negatif hız değeri sadece 9. noktada görülmüştür. Yığılmanın olduğu 7 ve 8 noktalarında ise akım çizgileri birbirine yaklaşacağından en yüksek hızların görülmesi beklenmektedir. Ölçüm sonuçlarının bunu doğruladığı görülmektedir.



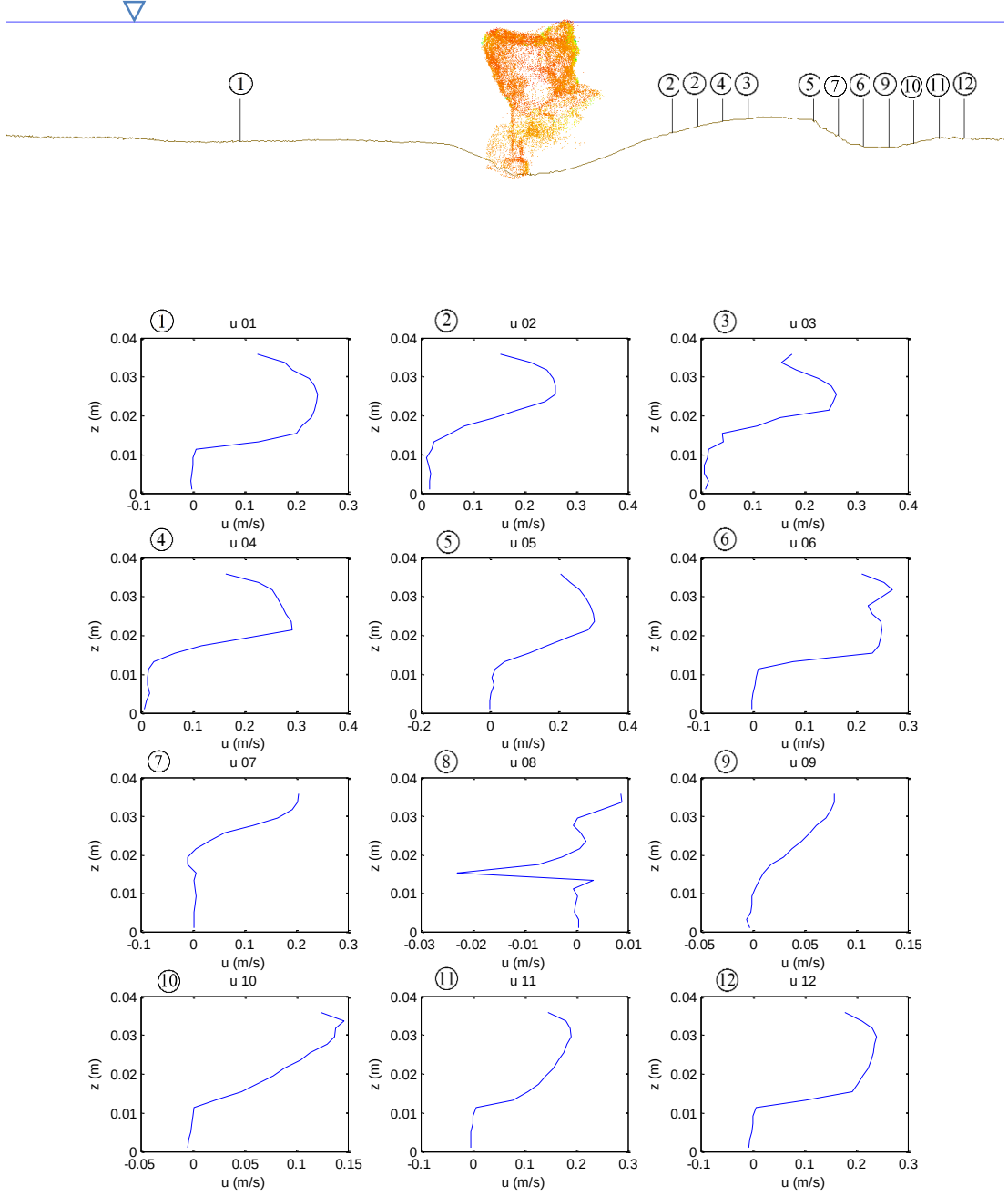
Şekil 4.24: Yüksek debili akım sırasında eğik bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.

Şekil 4.25'te batık bitkiyle yapılan deneylerde tabana yakın ölçülen hız profilleri gösterilmiştir. Oyulmanın olduğu noktalar ölçülemediğinden ve yatağın genelinde fazla değişiklik olmadığında tüm noktadaki hız değerleri birbirine yakın çıkmıştır.



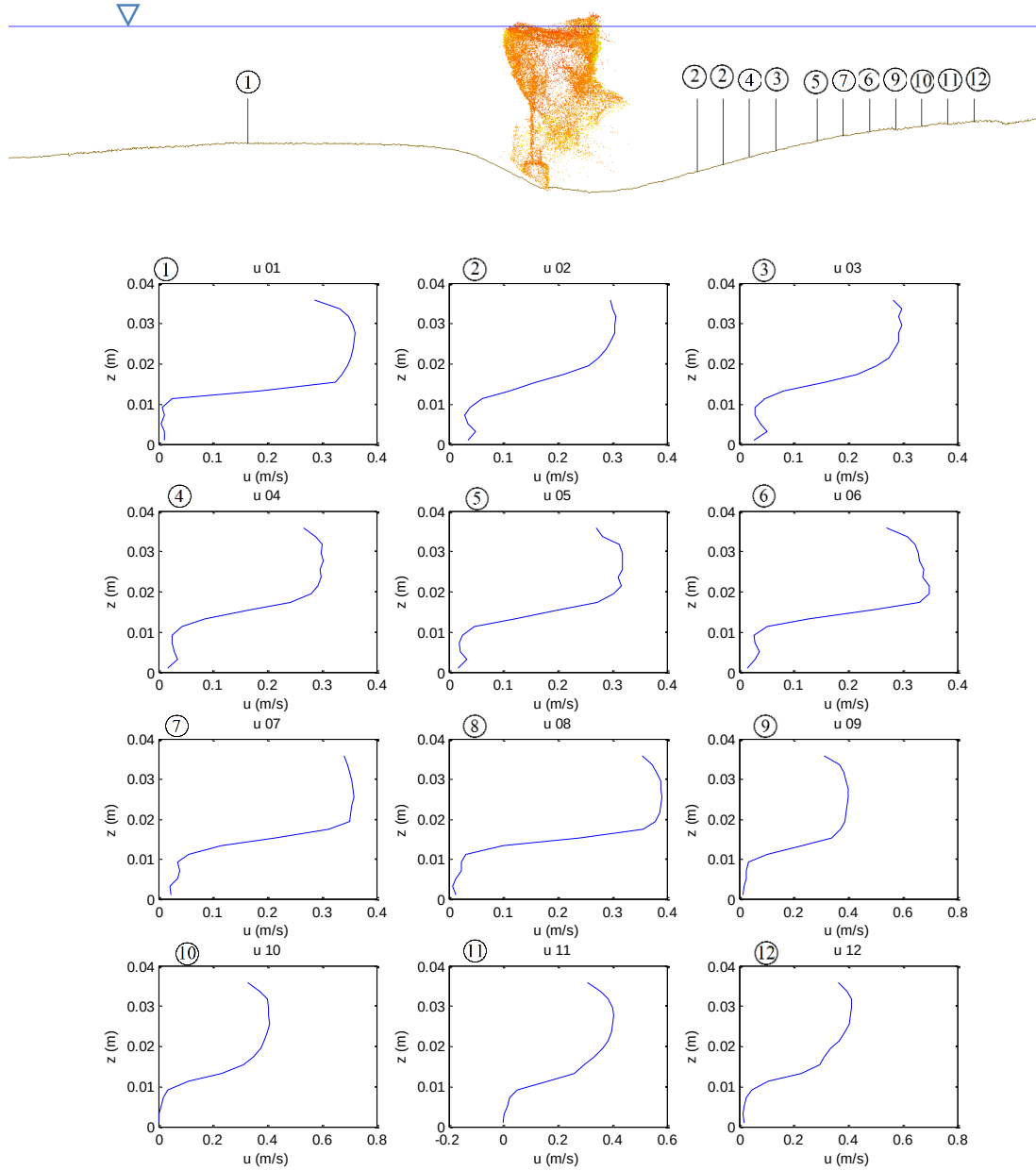
Şekil 4.25: Düşük debili akım sırasında batmış bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.

Geçirimsiz batık bitki ile yapılan deneylerdeki tabana yakın hız ölçümleri Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Yığılmadan sonraki noktalar olan 6, 7, 8, 9, 10 ve 11’de ters basınç gradyanlarından dolayı negatif hız değerleri gözlemlenmiştir. Yığılmanın tepe noktasına en yakın olan noktalarda (4. ve 5. noktalar) akım çizgileri birbirine yaklaştığından en yüksek hızlar bu noktalarda gözlenmiştir.



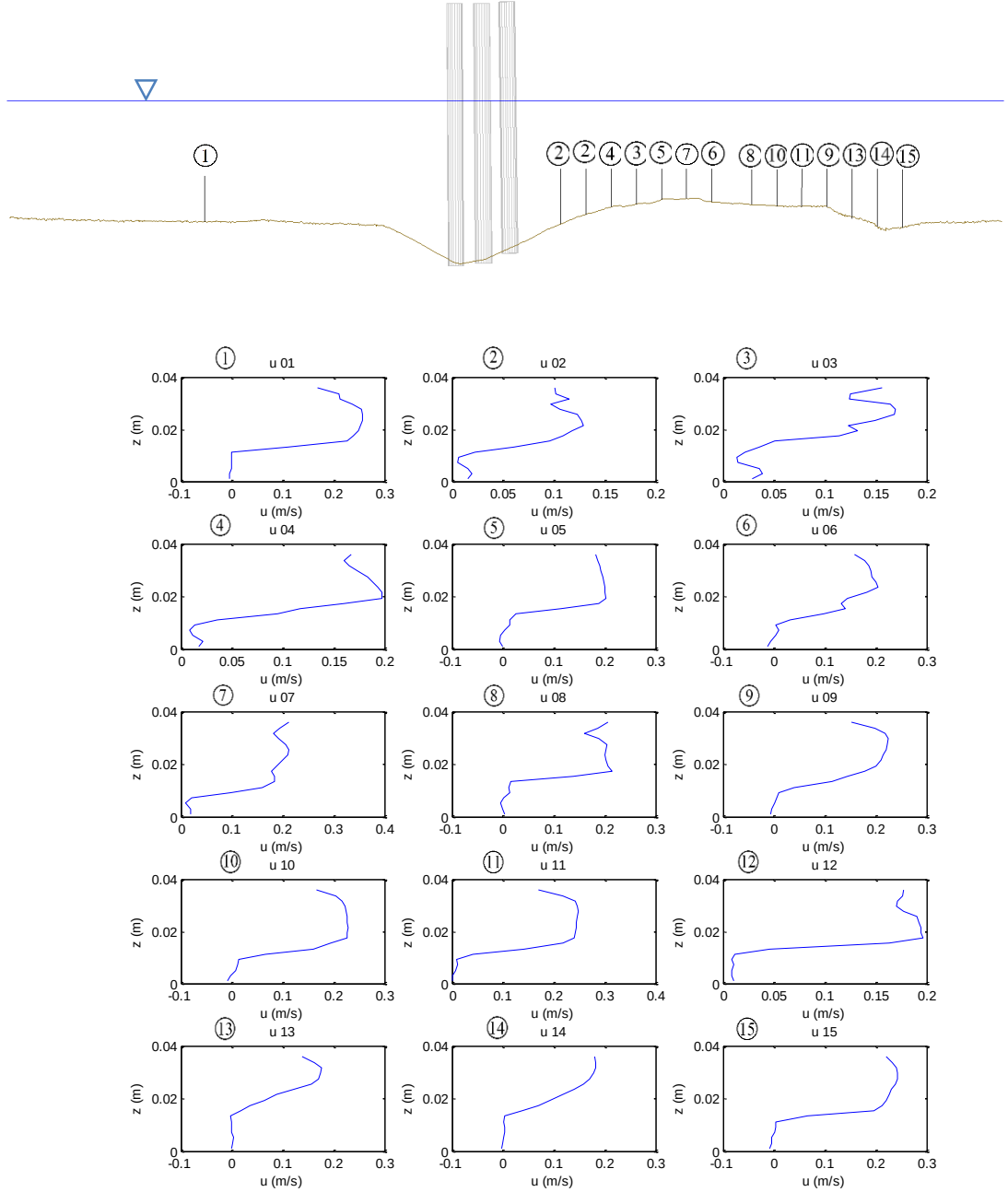
Şekil 4.27: Düşük debili akım sırasında batmış ve geçirimsiz bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.

Şekil 4.28’te ters basınç gradyanı oluşturacak bir durum bulunmamaktadır. Bundan dolayı negatif hız verileri hiçbir noktada gözlenmemiştir. Akım çizgilerinin birbirinden en uzak olduğu 2. noktada beklendiği gibi en düşük hız, akım çizgilerinin birbirine en yakın olduğu 12. noktada ise en yüksek hız verileri elde edilmiştir.



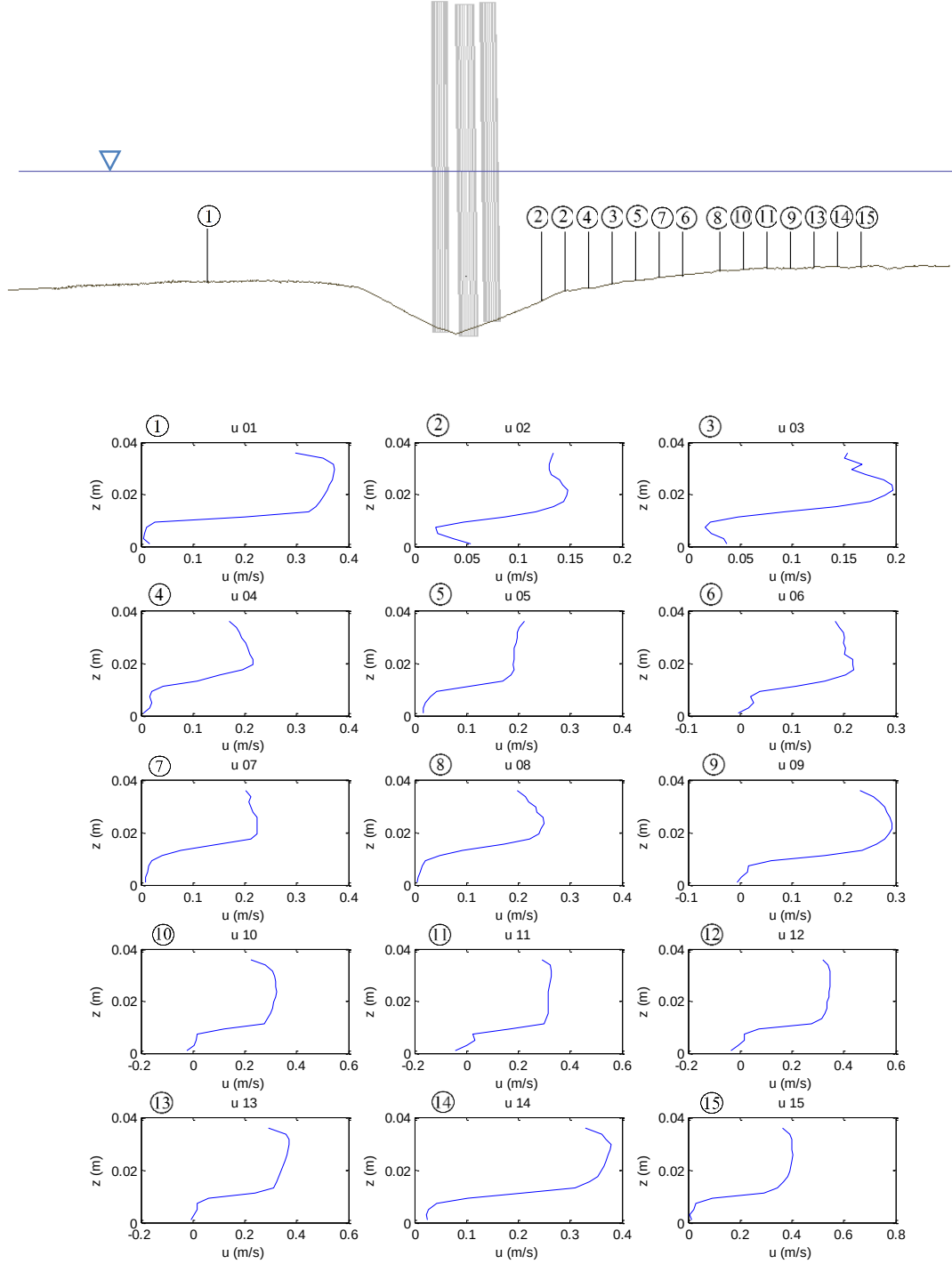
Şekil 4.28: Yüksek debili akım sırasında batmış bitkinin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.

Şekil 4.29’da altıgen şeklinde dizilen silindirlerle yapılan deneydeki tabana yakın akım çizgileri gösterilmiştir. Ters basınç gradyanının etki etmesi tahmin edilen 8, 9, 10, 13 ve 14 noktaları incelendiğinde negatif hız değerlerinin olduğu gözlenmiştir. 11. noktada ise en yüksek hız değerine rastlanmıştır.



Şekil 4.29: Düşük debili akım sırasında altıgen şeklinde dizilmiş silindirlerin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.

Şekil 4.30’da verilen tabana yakın hız verileri incelendiğinde, ölçülen noktalar ters basınç gradyanı oluşabilecek bir noktaya denk gelmemiştir. Yığılma olan kısma doğru gidildikçe akım çizgileri sıklaştığından, bu yöndeki noktalarda daha yüksek hızlara rastlanmıştır.



Şekil 4.30: Düşük debili akım sırasında altıgen şeklinde dizilmiş silindirlerin memba ve mansap tarafındaki tabana yakın hız profilleri.

Tüm deney sonuçları incelendiğinde, kullanılan deney elemanının yapısındaki boşluk oranı yükseldikçe, burada oluşan kanama akımı adı verilen akımın hızının arttığı görülmektedir. Aynı nedenden olayı deney elemanının etrafındaki hızın artmasına neden olan daralma etkisi de azalmaktadır. Ancak bitkinin suyla birlikte hidrodinamik bir şekil alması ve kanopi altı bölgesinde oluşan hızlı akım nedeniyle oluşan oyulma desenleri diğerlerinden ayrılmaktadır. Bitki geçirimsiz hale getirildiğinde oluşan yapı silindirde oluşan yapıya benzemektedir. Altıgen şeklinde dizilmiş silindirlerin ise bitki ve silindir arasında sonuç verdiği görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmanın amacı taşkın yatağı ve şevlerde akımın gelişmemiş olduğu koşullarda belli bir akıma maruz kalmış tekil bitkilerin hareketli yatak üzerinde oluşturduğu etkiyi gözlemlemek, bitkinin şekli ve boyu değişince bu etkinin nasıl değiştiğini anlamak ve elde edilen oyulma desenlerine bağlı olarak engel etrafında oluşan ikincil akımları silindir etrafında görülen akımla karşılaştırmaktır. Bu amaçla deneylerin sonucunda, kullanılan deney elemanı (silindir, bitki vs.) etrafında oluşan oyulma çukurları incelendiğinde silindirde oluşan oyulma çukurunun diğerlerine göre daha büyük olduğu görülmüştür. Silindir etrafındaki oyulma çukurunun temel nedeni atnalı çevrintileridir. Atnalı çevrintilerinin şiddetini belirleyen en önemli etken ise aşağı yönlü düşey akıştır.

- Suya batmamış dik bitkinin geçirimsizliği fazla olduğundan aşağı yönlü düşey akış hızının fazla yüksek olması beklenmemektedir. Zaten bu deney elemanı ile yapılan deneylerin sonuçlarına bakıldığında oyulma çukurunun engelin memba tarafında çok küçük olduğu saptanmıştır. Aynı durum batık bitkide de geçerli olduğundan bu bitki elemanın da oluşturduğu oyulma benzeri şekildedir.

- Eğik bitki ile yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde dik bitkiye benzer bir oyulma deseni ile karşılaşmıştır. Ancak sadece, bitkinin geçirimsizliğine etki eden bir faktör olan bitkinin akım içerisinde kalan hacmi ele alındığında, eğik bitkinin daha büyük bir oyulma çukurunun oluşumuna neden olması gerektiği düşünülmektedir. Ama bitki eğildiğinde hidrodinamik bir şekil almakta ve yukarı yönlü akımın oluşmasına neden olmaktadır. Yukarı yönlü akım, aşağı yönlü akımı negatif etkilediğinden atnalı çevrintilerinin şiddeti azalmakta, bitki altından geçen kanopi altı akım şiddeti düşmekte ve oyulma çukuru küçük çaplı olarak oluşmaktadır.

- Altıgen şeklinde dizilmiş silindirler ele alındığında geçirimsizliğin dik bitkiden daha az, rijit silindirden daha çok olduğu düşünülmüştür. Oyulma çukuru desenlerine bakıldığında bu düşünce desteklenmiştir. Aşağı yönlü düşey akım silindirdeki kadar

kuvvetli olmasa da belirgin büyüklükte bir oyulma çukuru ortaya çıkarmıştır. Ancak kanopi altı akım olmadığından oyulma deseni silindir ile bitki deseninin bir sentezi niteliğindedir.

- Etrafı sarılıp geçirimsiz hale getirilen bitkiyle yapılan deney sonuçları incelendiğinde, sonuçların dik bitki ile yapılan deneyler sonucu elde edilen oyulma çukurundan çok silindirle yapılan deneylerdekine benzeyen bir oyulma çukuru elde edildiği görülmüştür. Çünkü, burada çevri kopmaları oluşumunda dal ölçeği değil bitki ölçeği rol oynamaktadır. Bu sayede aşağı yönlü düşey akım artmaktadır. Artan düşey yönlü akım, ters yönlü akım oluşmasına ve atnalı çevrintilerinin gelişimine neden olmaktadır.

- İncelenilen alanın oyulma çukuru dışında kalan oyulma desenlerine bakıldığında ise dik bitkide ve eğik bitkide akım doğrultusunda büyük oranda oyulma olduğu gözlenmiştir. Bu durumun temel nedeni bitkinin yatağa yakın bölgesinde oluşan ve hızlı bir akım olan kanopi altı akımının oluşmasıdır. Bu akım yatağa yakın ve şiddetli olduğundan akım yönü boyunca yüksek miktarda oyulma oluşturmaktadır.

- Tek silindir ve etrafı sarılmış geçirimsiz bitki ile yapılan deneylerde ise akım yönü boyunca bir oyulma gözlenmemiştir. Çünkü bu yapı elemanlarının yatağa yakın bölgelerinde jet akımı oluşturacak bir etken bulunmadığından oyulma deseni genel olarak sadece oyulma çukuru ile sınırlı kalmaktadır.

- Altıgen şeklinde dizilmiş silindirlerin oluşturduğu akım desenine bakıldığında geçirimli bitkiler kadar olmasa da akım yönünde oyulma olduğu görülmüştür. Çünkü akım silindirler arasında hızlanmakta ve akım yönünde oyulmaya neden olmaktadır. Sonuç olarak bu tip bitki elemanının oluşturduğu oyulma desenleri incelendiğinde hem oyulma çukuru hem de akım yönünde oyulma belirgin bir şekilde oluşmaktadır.

- Silindirlerin arkasında zıt yönlü akım yönünde oluşan çevrintilerden dolayı yığılma olduğu bilinmektedir. Deney sonuçları da bu yığılmayı doğrular niteliktedir. Bu yığılmaların genel olarak yüksek ve geniş olduğu görülmüştür. Batmamış bitkilerde ise kanopi altı akım oyulmayı sağlayıp sedimenti sürüklediğinden yığılmalar dar ve alçak olarak görülmektedir. Ayrıca bu tip yığılmalar silindir nedeniyle oluşan yığılmalara göre akım boyunca daha uzundur. Batık bitkilerdeki yığılmalarda ise, batık olmayan bitkilere benzeyen yığılma şekilleri görülmüştür. Çünkü bu tip bitkiyle yapılan deneylerde yığılmanın akım yönünde yayılmasını sağlayan kanopi altı akıma

ek olarak kanopi üstü akım oluşumu da gözlemlenmiştir. Altıgen silindirle yapılan deneyler sonucunda da yığılma silindirler arası hızlanan akımın etkisiyle akım yönünde yayılmıştır. Geçirimsiz bitkiyle yapılan deneyler sonucu olan yığılma ise beklendiği gibi silindirin oluşturduğu yığılma desenlerine benzer bir şekilde oluşmuştur.

Altıgen olarak yerleştirilmiş silindirlerin akım üzerinde yarattığı etki ile bitkilerin akım üzerinde yarattığı etki karşılaştırıldığında görülen benzerliklerden yola çıkılarak, bitkilerde oluğu gibi boşluklu ve silindir gibi rijit bir sabit model geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Baker, C. J.** (1979). The laminar horseshoe vortex. *Journal of Fluid Mechanics*, 347-367.
- Baker, C. J.** (1985). The position of points of maximum and minimum shear stress upstream of cylinders mounted normal to flat plates. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 263-274.
- Baker, C. J.** (1991). The oscillation of horseshoe vortex systems. *Journal of Fluids Engineering*, 489-495.
- Batchelor, G. K.** (1967). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
- Baykal, C., Sümer, B. M., Fuhrman, D. R., Jacobsen, N. G., ve Fredsoe, J. (2014).** Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder. *Philosophical Transactions of The Royal Society*.
- Bloor, M. S.** (1964). The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 290-304.
- Carollo, F. G., Ferro, V., ve Termini, D.** (2002). Flow Velocity Measurements in Vegetated Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 664-673.
- Dargahi, B.** (1982). *Local scouring around bridge piers - A review of practice and theory*. Stockholm: R. Inst. Tech. Hydr. Lab.
- Dargahi, B.** (1990). Controlling Mechanism of Local Scouring. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1197-1214.
- Eastgate, W. I.** (1969). Vegetated stabilization of grassed waterways and dam bywashes. *Water Research Foundation of Australia*.
- Fathi-Maghadam, M., ve Kouwen, N.** (1997). Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains. *Journal of the Hydraulic Engineering*, 51-57.

- Goring, D. G., ve Nikora, V. I.** (2002). Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117-126.
- Gourley, M. R.** (1970). Discussion of 'Flow resistance in vegetated channels' by N. Kouwen, T. E. Unny, and H. M. Hill. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 351-357.
- Hjorth.** (1975). *Studies on the Nature of Local Scour*. Institute of Technology, Department of Water Resources, Lunds Universitet.
- Ikeda, S., ve Kanazawa, M.** (1996). Three-dimensional organized vortices above flexible water plants. *Journal of Hydraulic Engineering*, 634-640.
- Kouwen, N., Unny, T. E., ve Hill, H. M.** (1969). Flow retardance in vegetated channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 329-342.
- Kumar, A., ve Kothyari, U. C.** (2012). Three-dimensional flow characteristics within the scour hole around circular uniform and compound piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 420-429.
- Li, R. M., ve Shen, H. W.** (1973). Effect of tall vegetation on flow and sediment. *Journal of Hydraulic Division*, 793-814.
- Mao, Y.** (1986). *The interaction between a pipeline and an erodible bed*. Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark.
- Nikora, V.** (2010). Hydrodynamics of aquatic ecosystems: An interface between ecology, biomechanics and environmental fluid mechanics. *River Research and Applications*, 367-384.
- Nortek AS.** (2004). Vectrino User Guide. Norveç.
- Nortek Scientific Acoustic Development Group Inc. (tarih yok). Vectrino II User Guide. Kanada.
- Palmer, V. J.** (1945). A method for designing vegetated waterways. *Journal of Agricultural Engineering*, 516-520.
- Petersen, T. U.** (2014). *Scour around offshore wind turbine foundations*. Copenhagen: Technical University of Denmark.

- Petryk, S., ve Bosmajan, G.** (1975). Analysis of flow through vegetation. *Journal of the Hydraulics Division*, 871-884.
- Siniscalchi, F., ve Nikora, V.** (2012). Flow-plant interactions in open-channel flows: A comparative analysis of five freshwater plant species. *Water Resources Research*.
- Sümer, B. M., ve Fredsoe, J.** (2002). *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*. World Scientific.
- Sümer, B. M., ve Fredsoe, J.** (2006). *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*. World Scientific.
- Williamson, C. H.** (1989). Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular at low Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 579-627.
- Wu, F. C., Shen, H. W., ve Choue, Y. J.** (1999). Variation of roughness coefficient for unsubmerged and submerged vegetation . *Journal of Hydraulic Engineering*, 834-942.
- Yağcı, O., ve Kabdaşlı, M. S.** (2008). The impact of single natural vegetation elements on flow characteristics. *Hydrological Processes*, 4310-4321.
- Yağcı, O., Tschiesche, U., ve Kabdaşlı, M. S.** (2010). The role of different forms of natural riparian vegetation on turbulence and kinetic energy characteristics. *Advances in Water Resources*, 601-614.
- Yang, K., Cao, S., ve Knight, D. W.** (2007). Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148-159.

EKLER

EK-A: Deney sonrası yapı elemanı konumlandırılmamış yatak yüzeyleri.

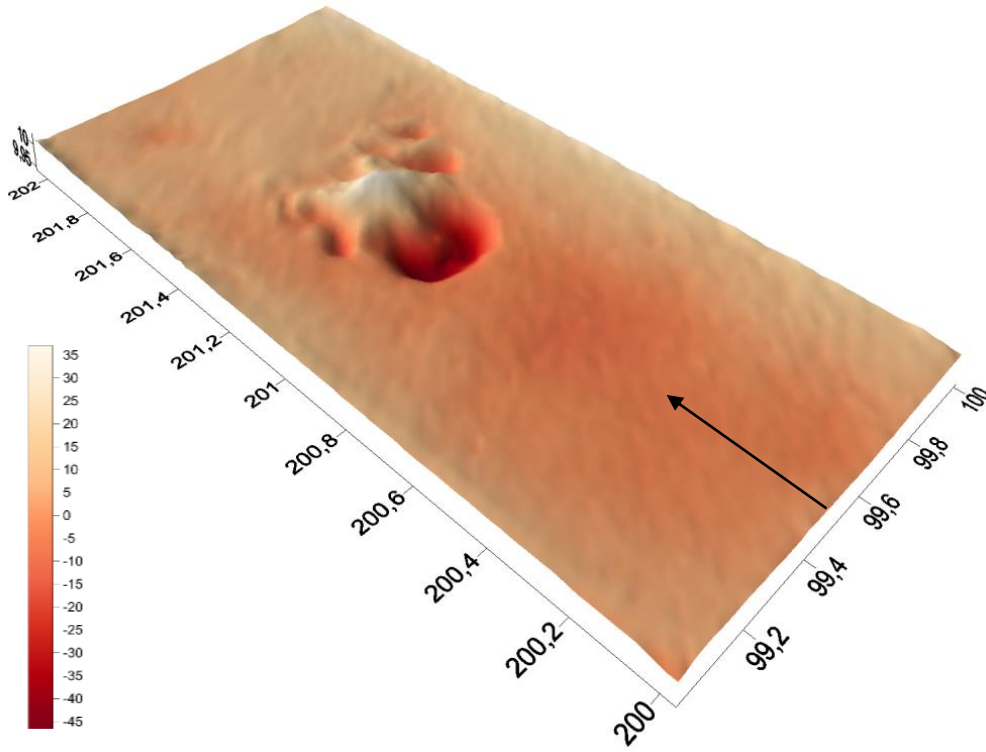
EK-B: Oyulma desenlerinin gösterimi.

EK-C: Eş yükselti eğrileri.

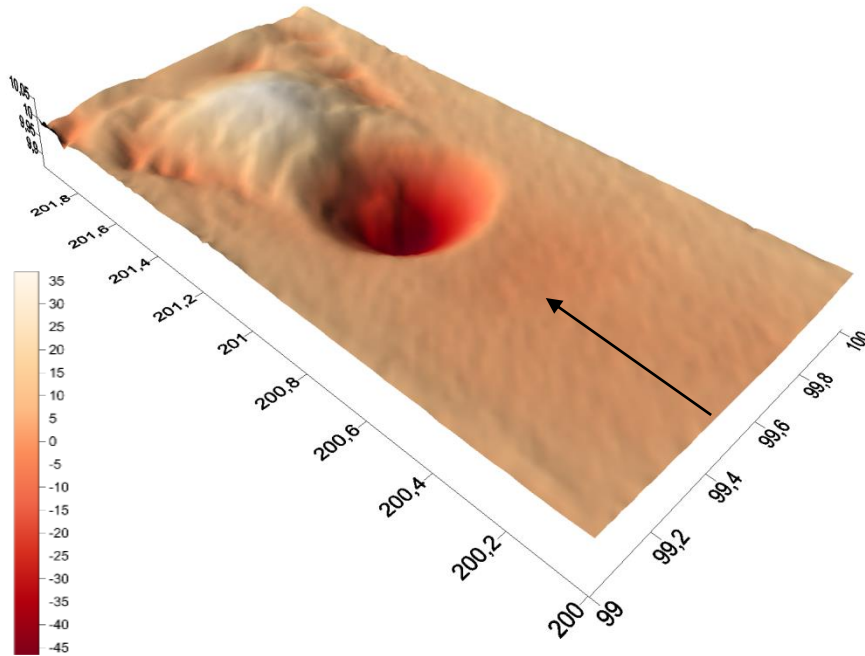
EK-D: Deney sonrası oyulma desenlerinin fotoğrafları.

EK-E: Zıt yönlü akım yönünde çevrıntiler

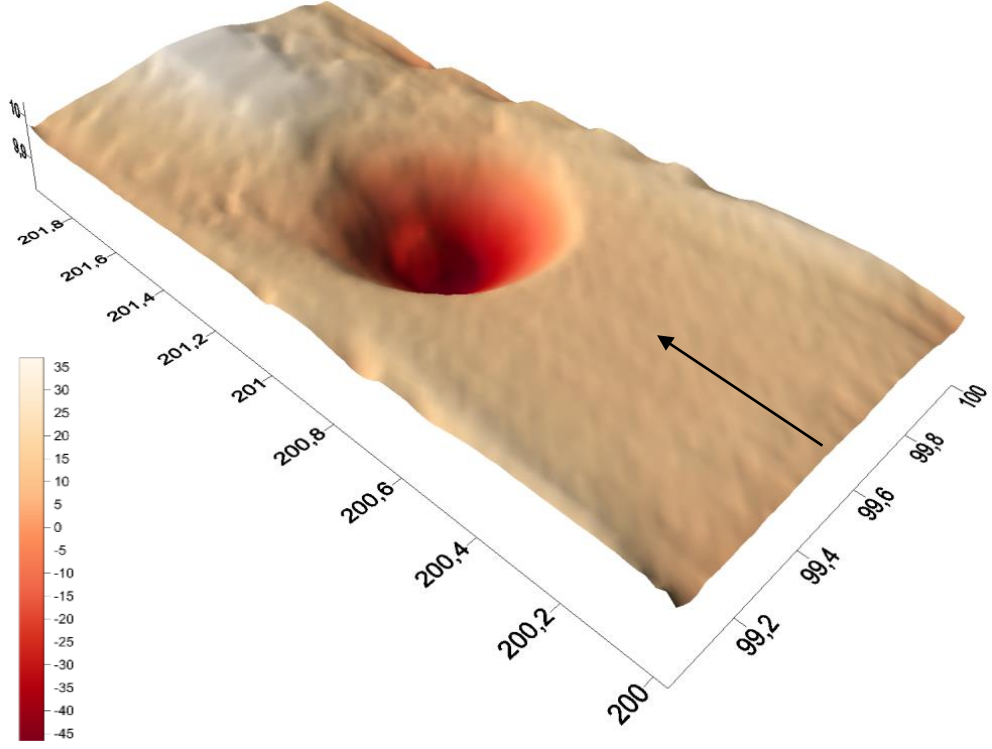
EK A



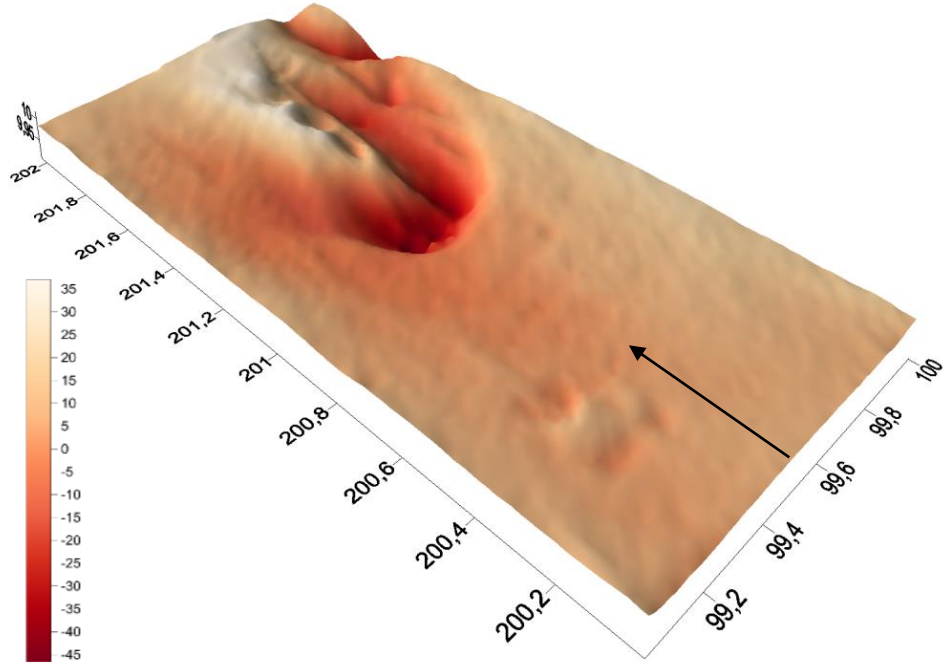
Şekil A.1: $q = 47.08$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 1).



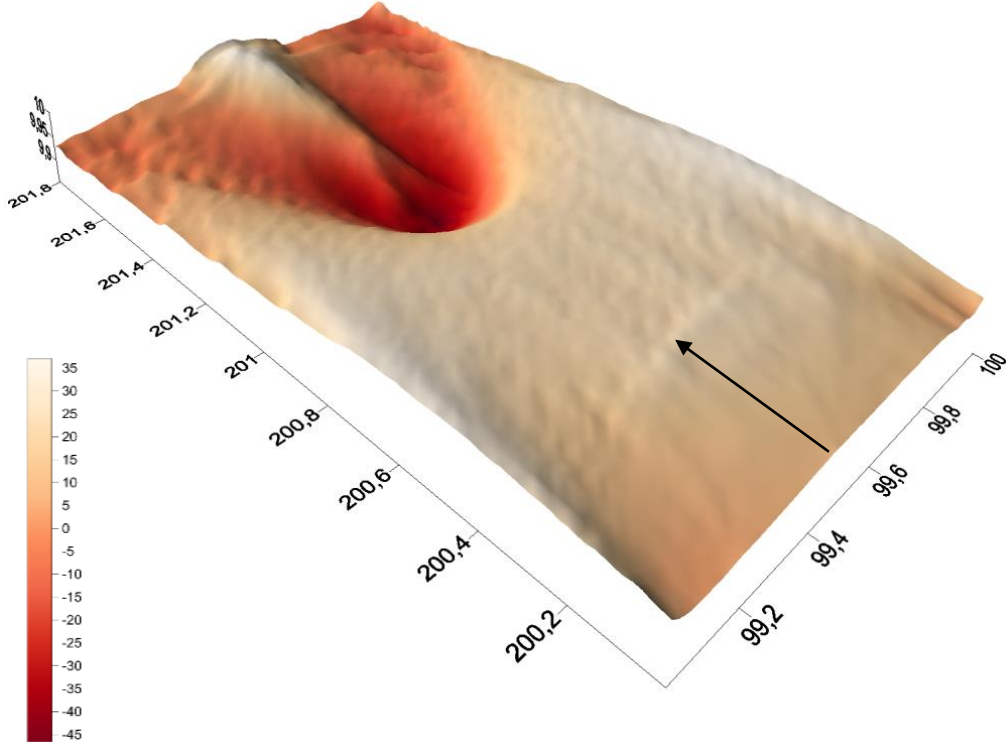
Şekil A.2: $q = 62.1$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 2).



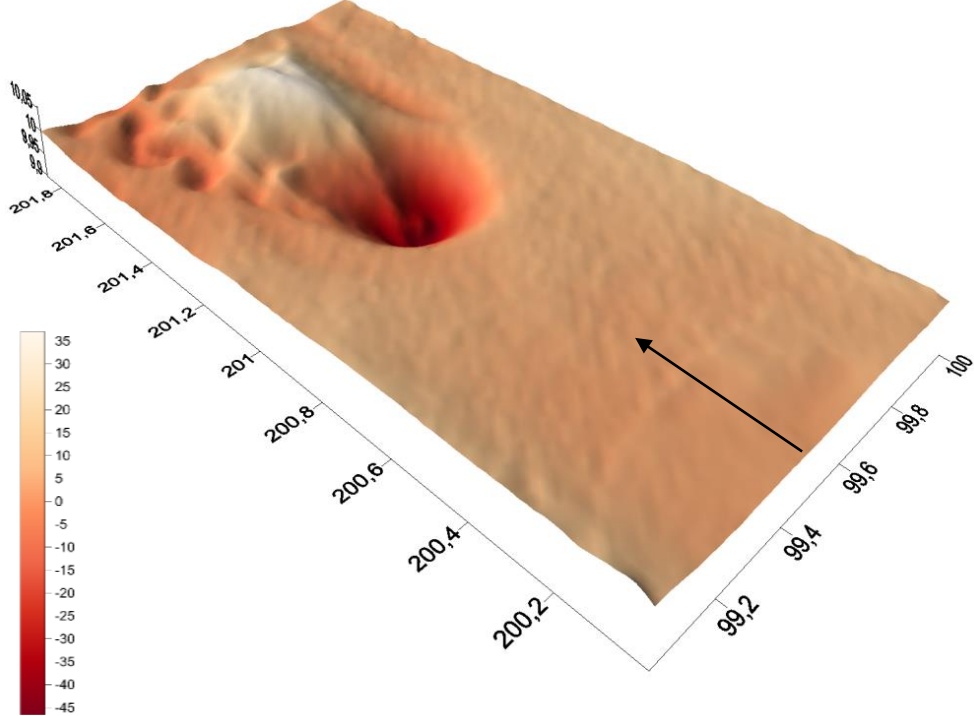
Şekil A.3: $q = 85.54$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 3).



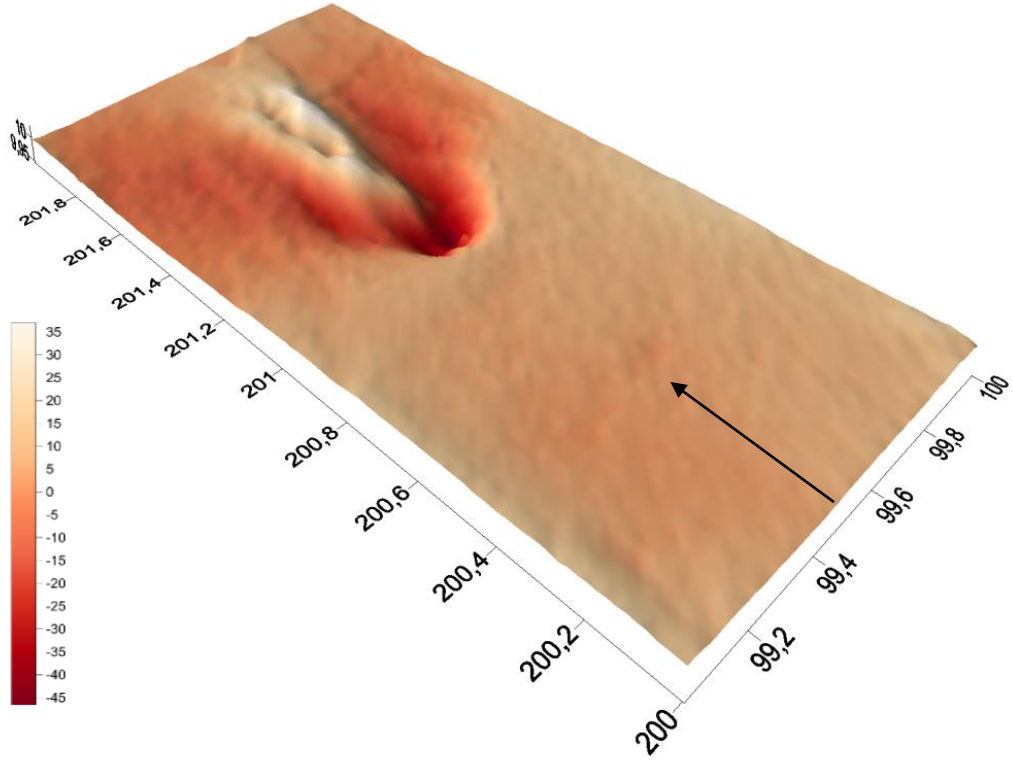
Şekil A.4: $q = 61.18$ L/s-m birim genişlik debisi altında dik blok etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 4).



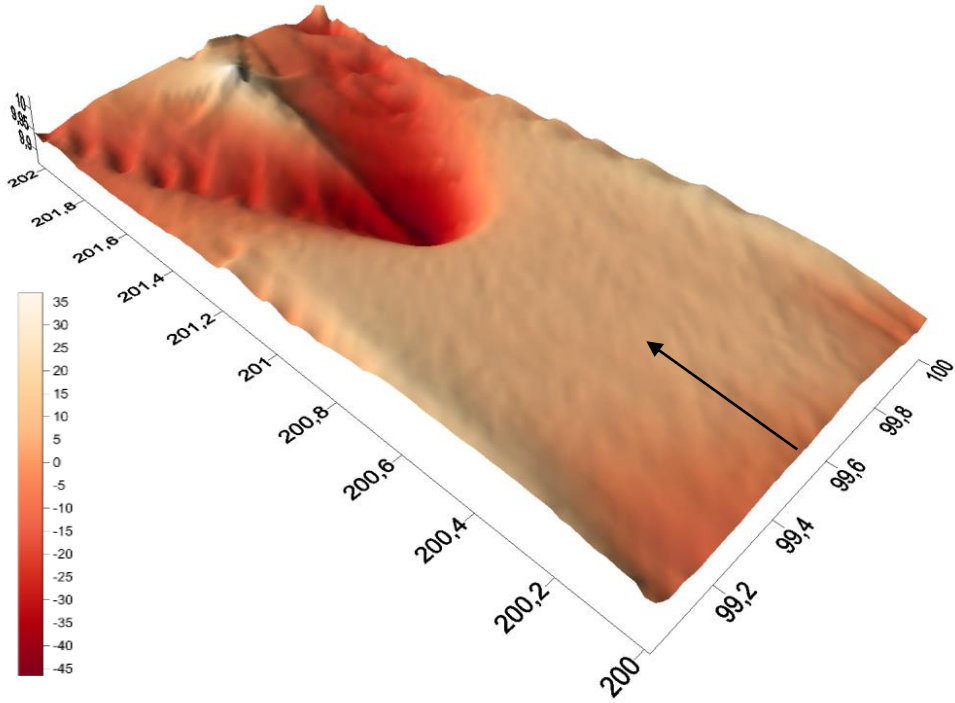
Şekil A.5: $q = 80.03$ L/s-m birim genişlik debisi altında dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 5).



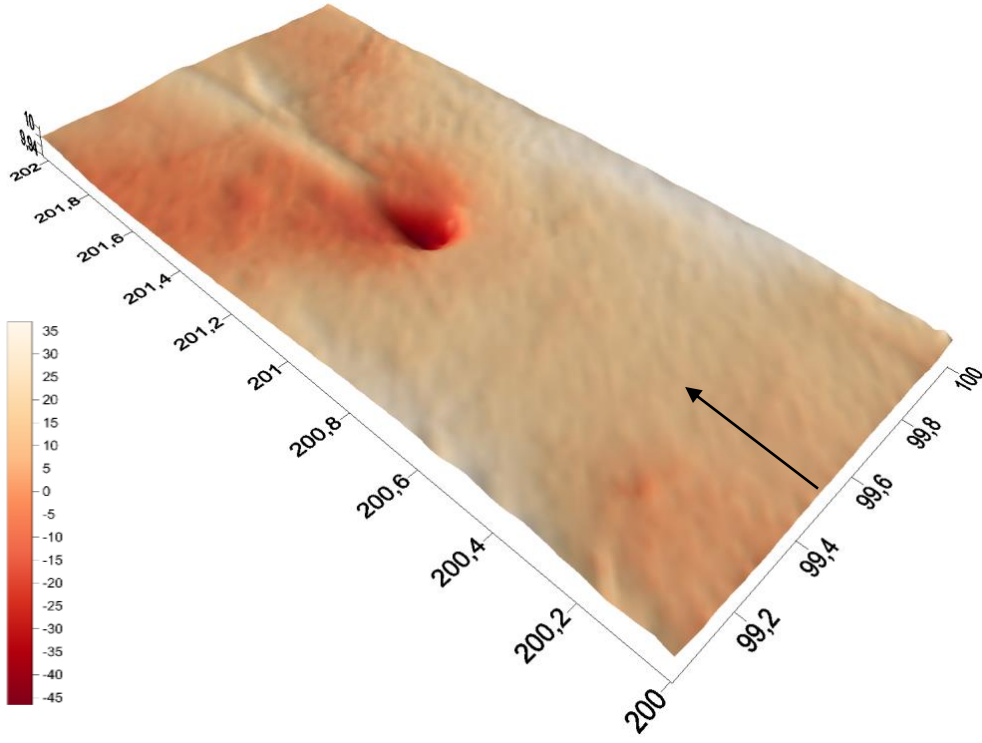
Şekil A.6: $q = 56.35$ L/s-m birim genişlik debisi altında etrafı sarılmış batmamış dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 6).



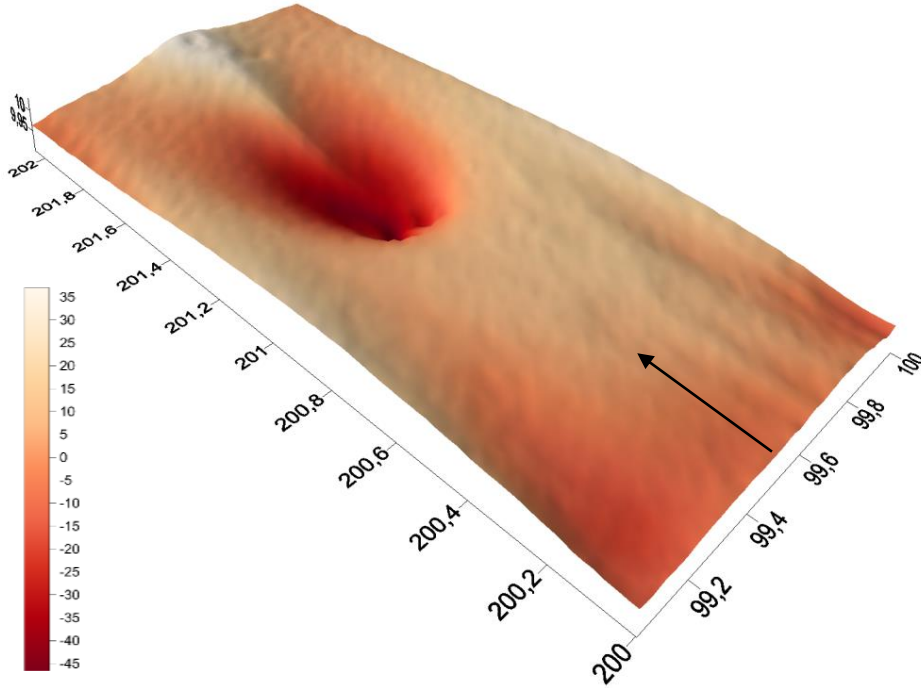
Şekil A.7: $q = 55.65$ L/s-m birim genişlik debisi altında eğik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 7).



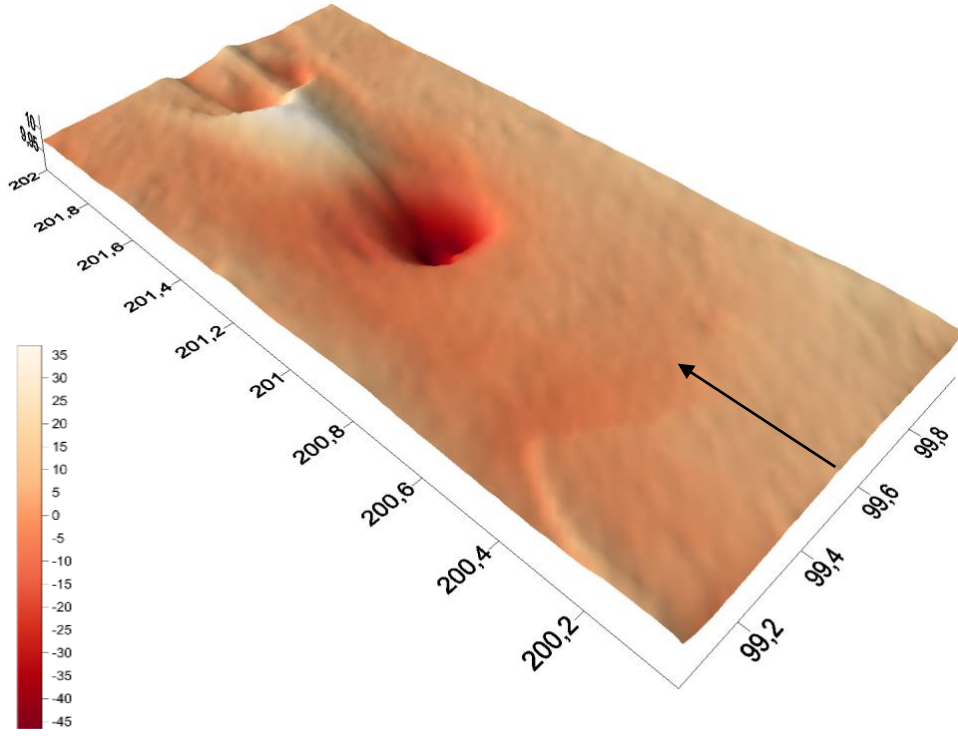
Şekil A.8: $q = 79.45$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 8).



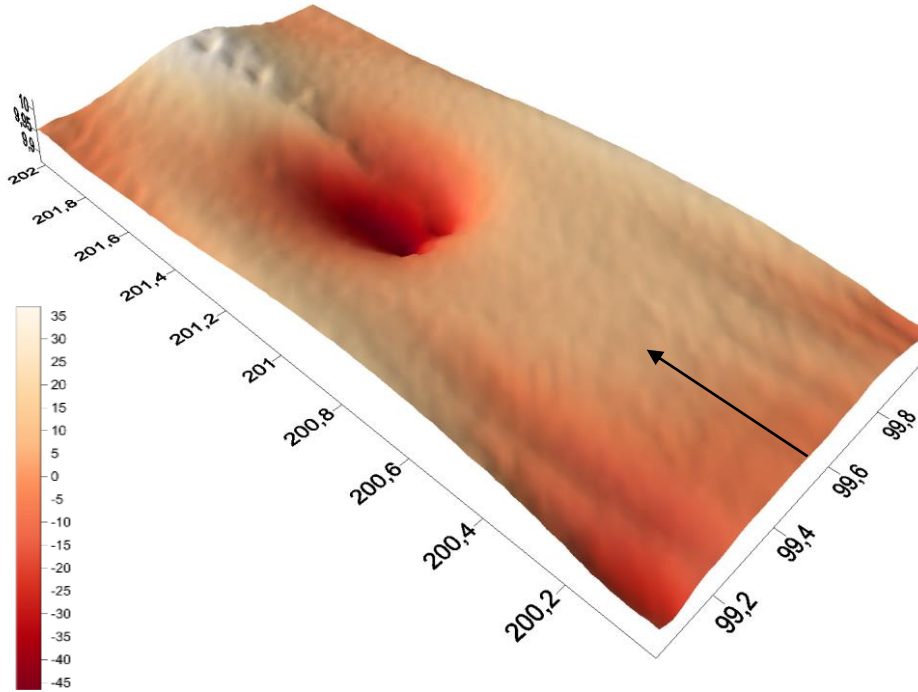
Şekil A.9: $q = 57.82$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 9).



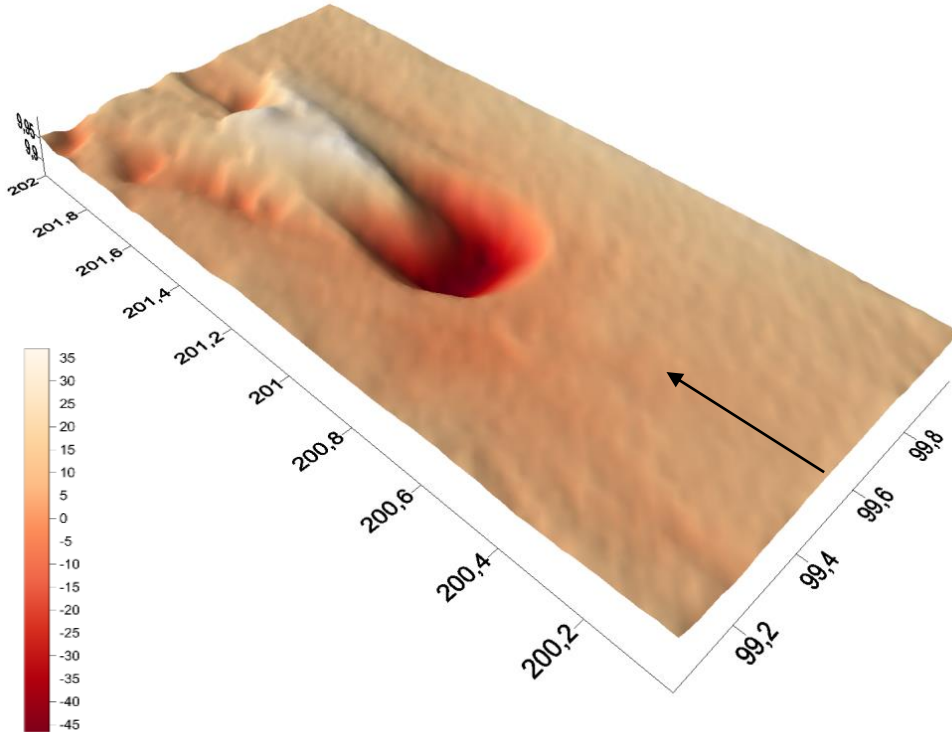
Şekil A.10: $q = 90$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 10).



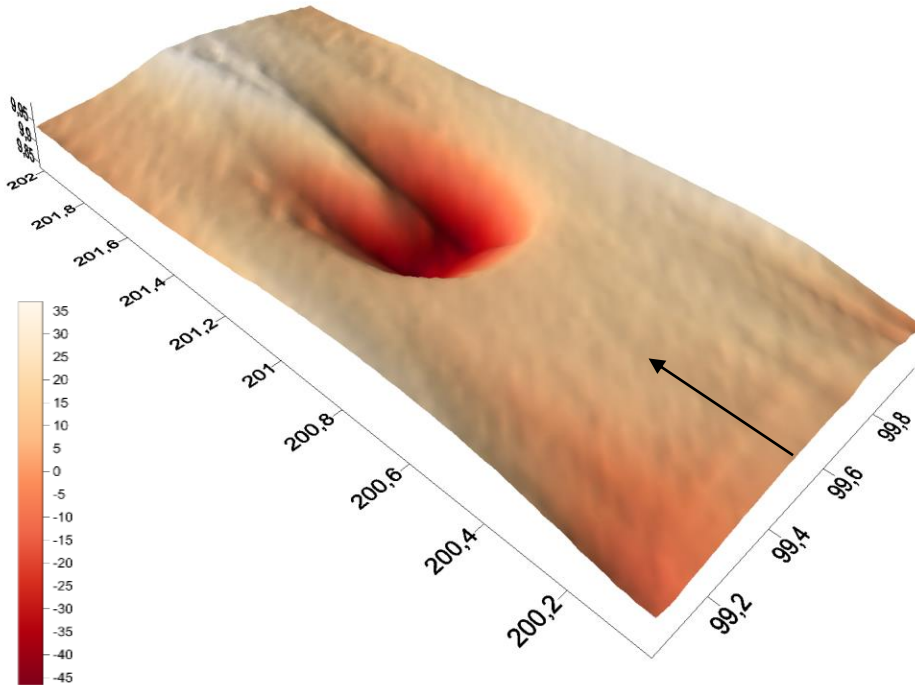
Şekil A.11: $q = 58.14$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 11).



Şekil A.12: $q = 81.23$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 12).

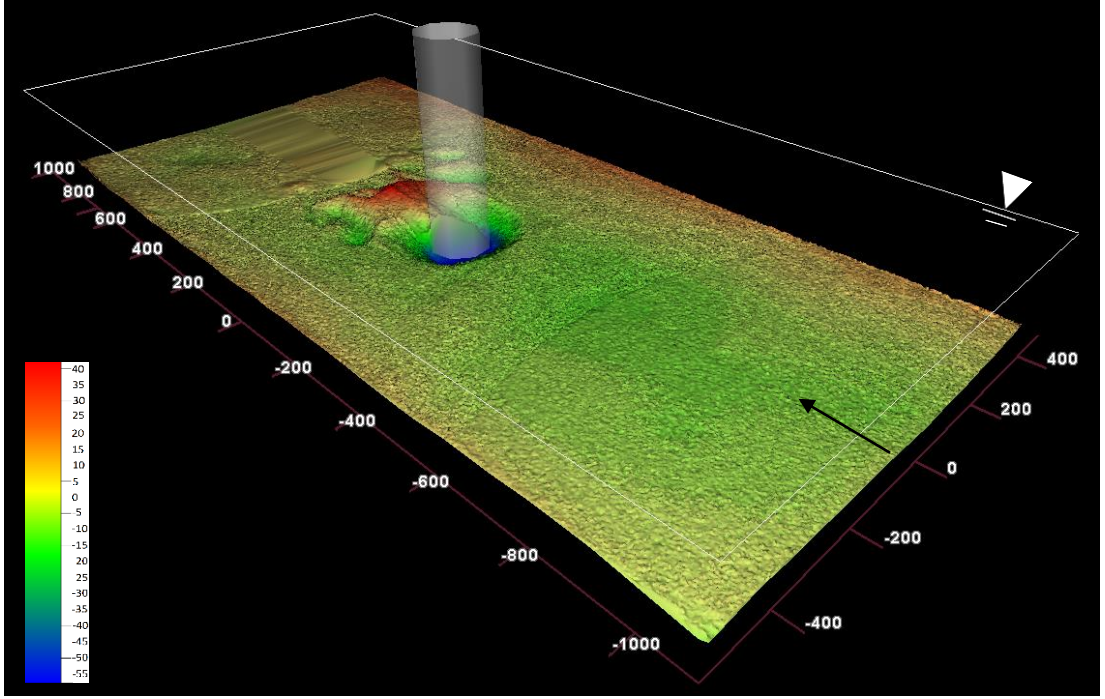


Şekil A.13: $q = 61.44$ L/s-m birim genişlik debisi altında altıgen şeklinde dizilmiş silindirler etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 13).

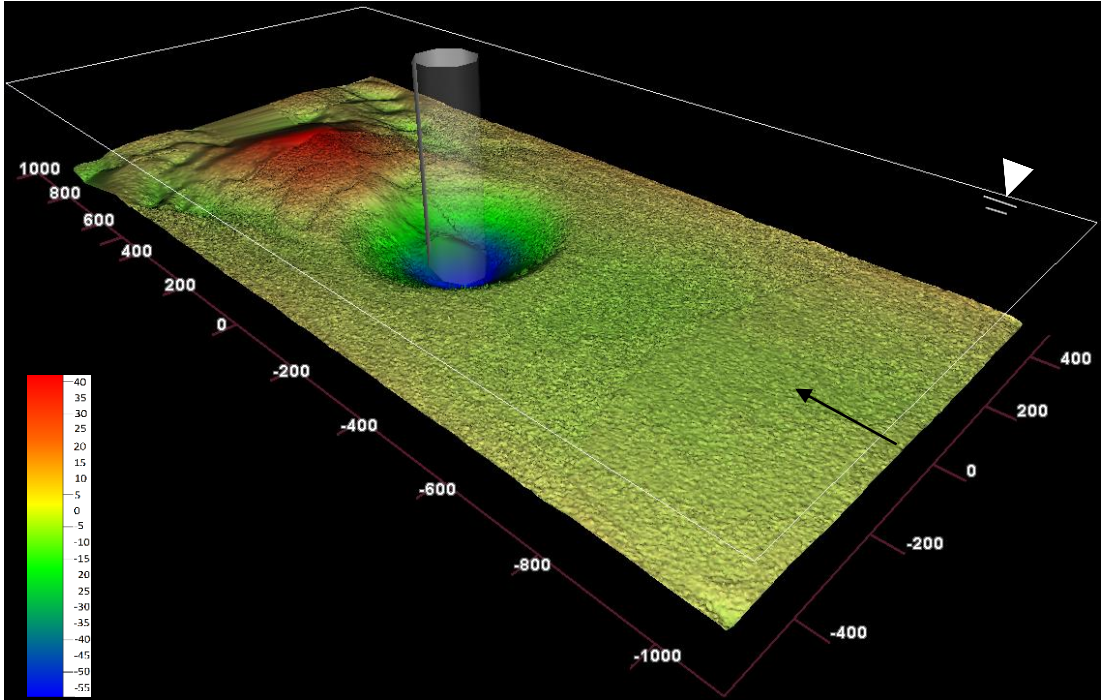


Şekil A.14: $q = 88.36$ L/s-m birim genişlik debisi altında altıgen şeklinde dizilmiş silindirler etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 14).

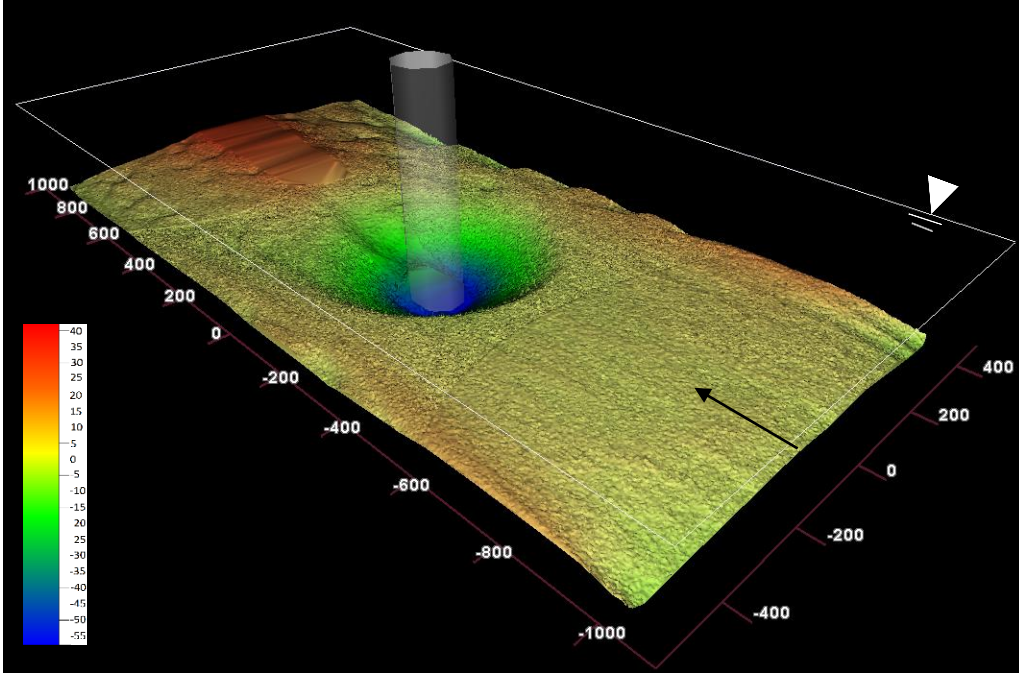
EK B



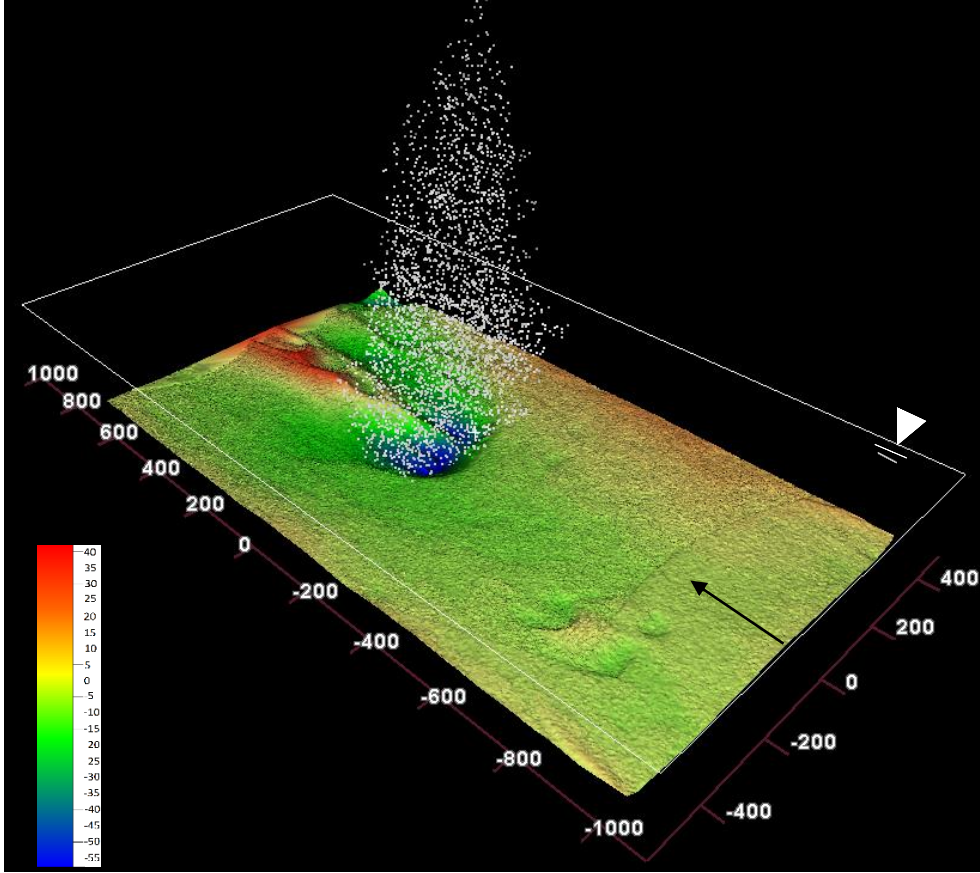
Şekil B.1: $q = 47.08$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 1).



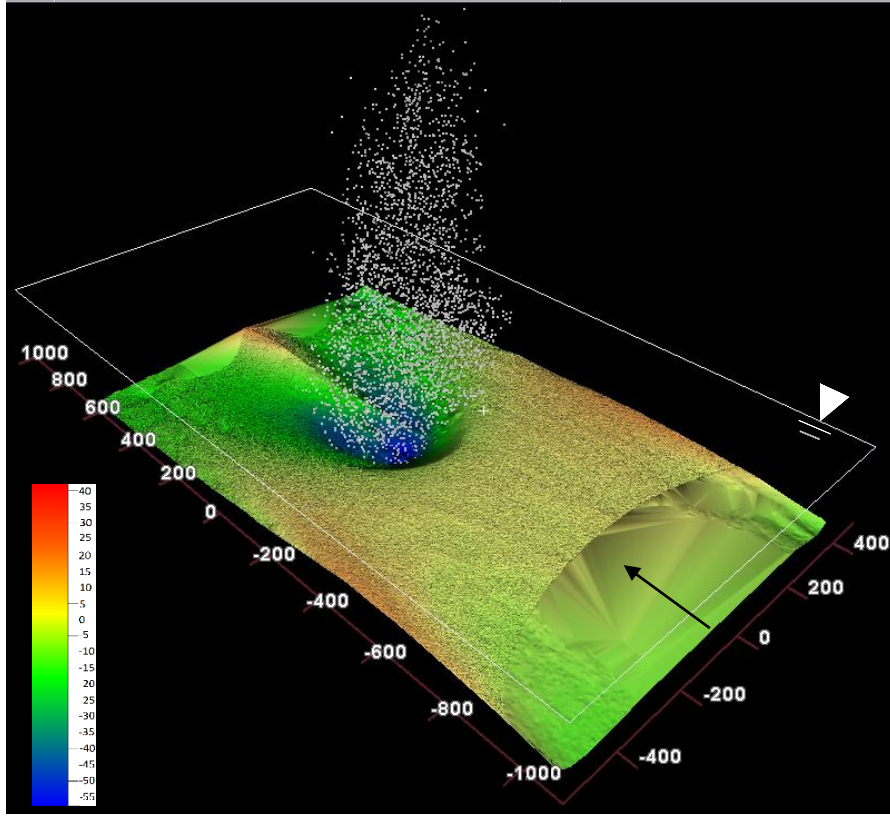
Şekil B.2: $q = 62.1$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 2).



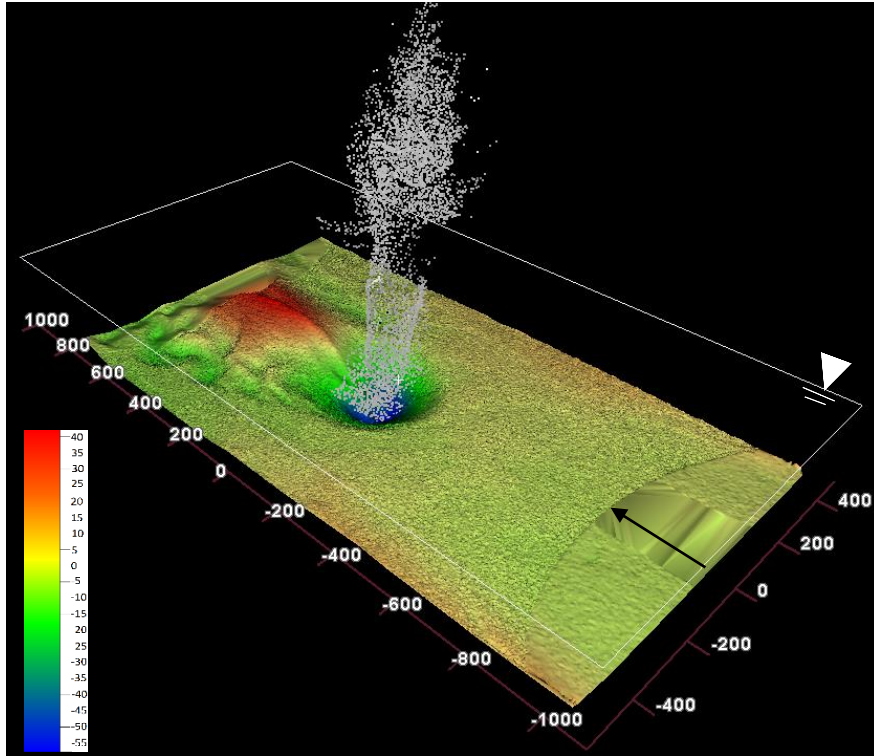
Şekil B.3: $q = 85.54$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 3).



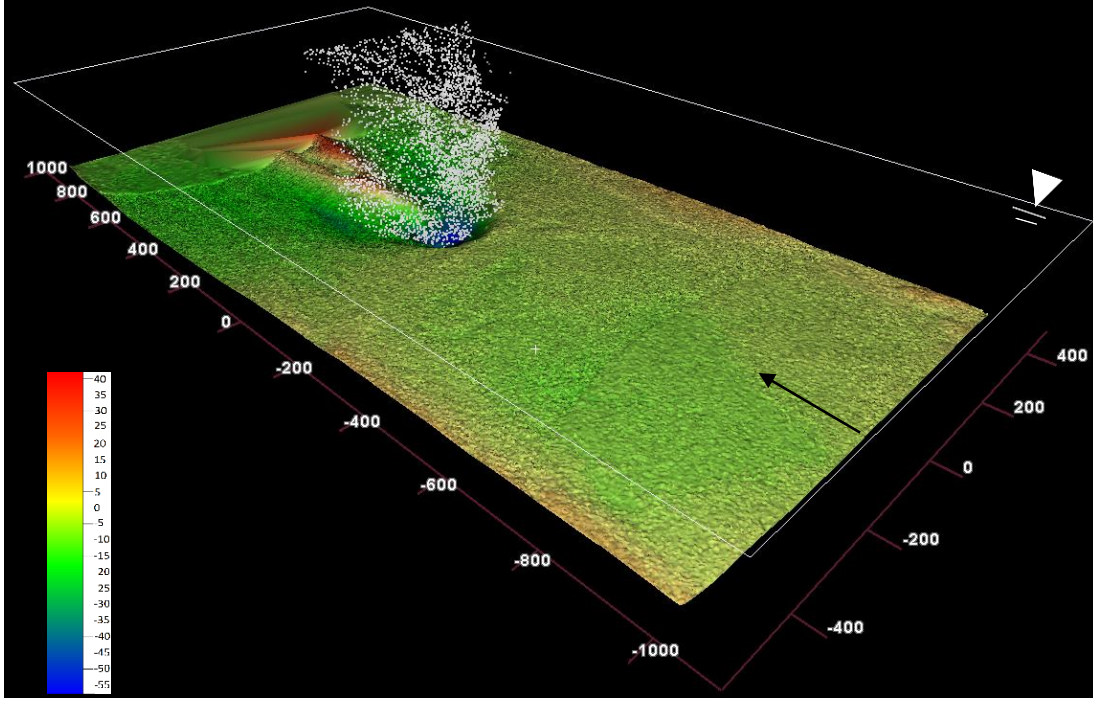
Şekil B.4: $q = 61.18$ L/s-m birim genişlik debisi altında dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 4).



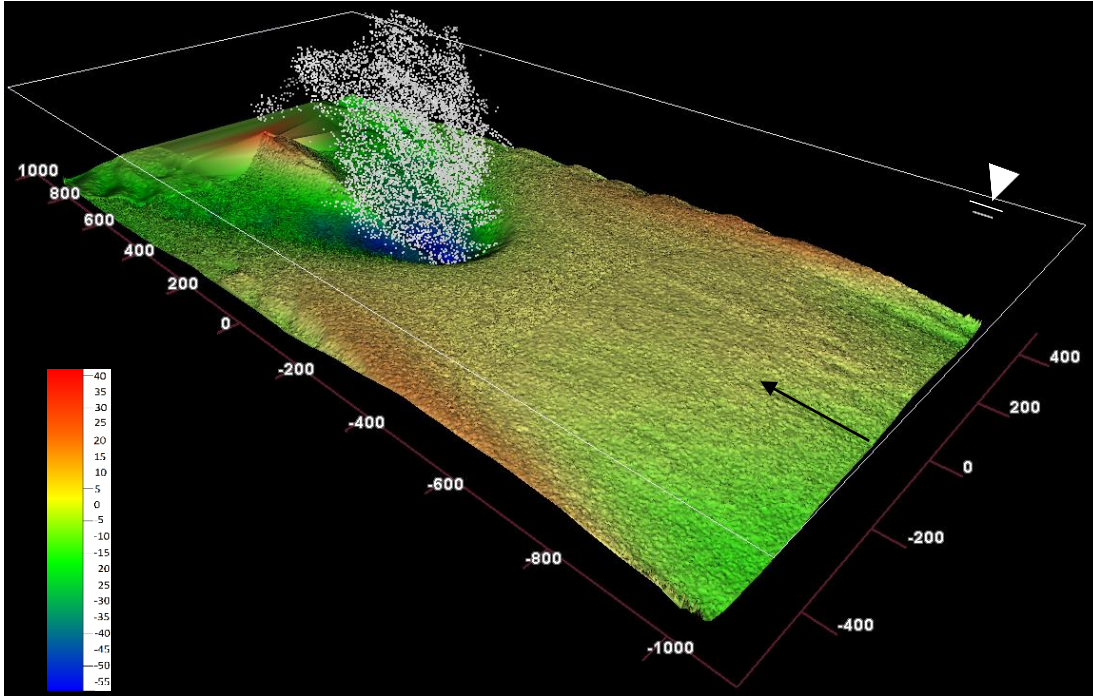
Şekil B.5: $q = 80.03$ L/s-m birim genişlik debisi altında dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 5).



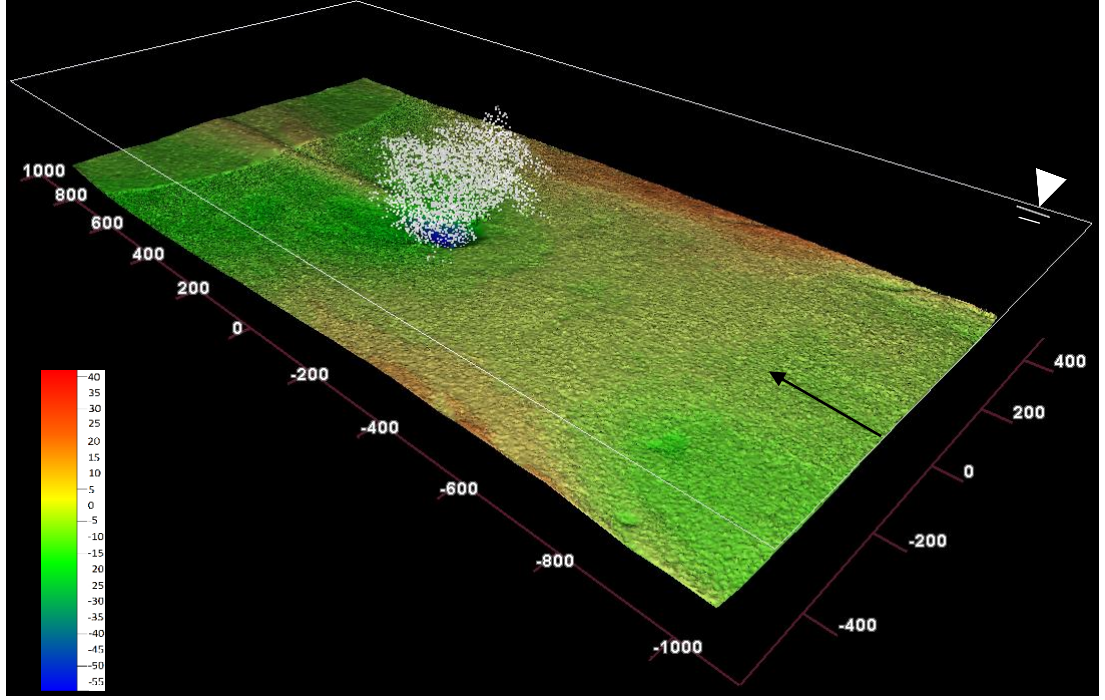
Şekil B.6: $q = 56.35$ L/s-m birim genişlik debisi altında etrafı sarılmış batmamış dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 6).



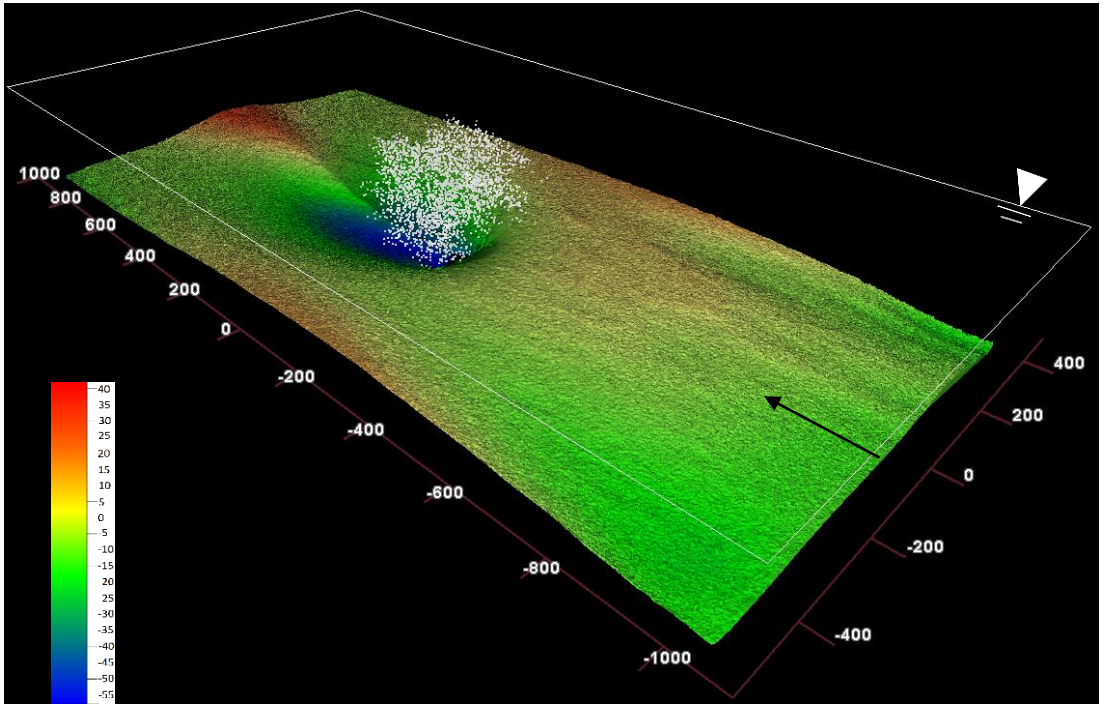
Şekil B.7: $q = 55.65$ L/s-m birim genişlik debisi altında eğik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 7).



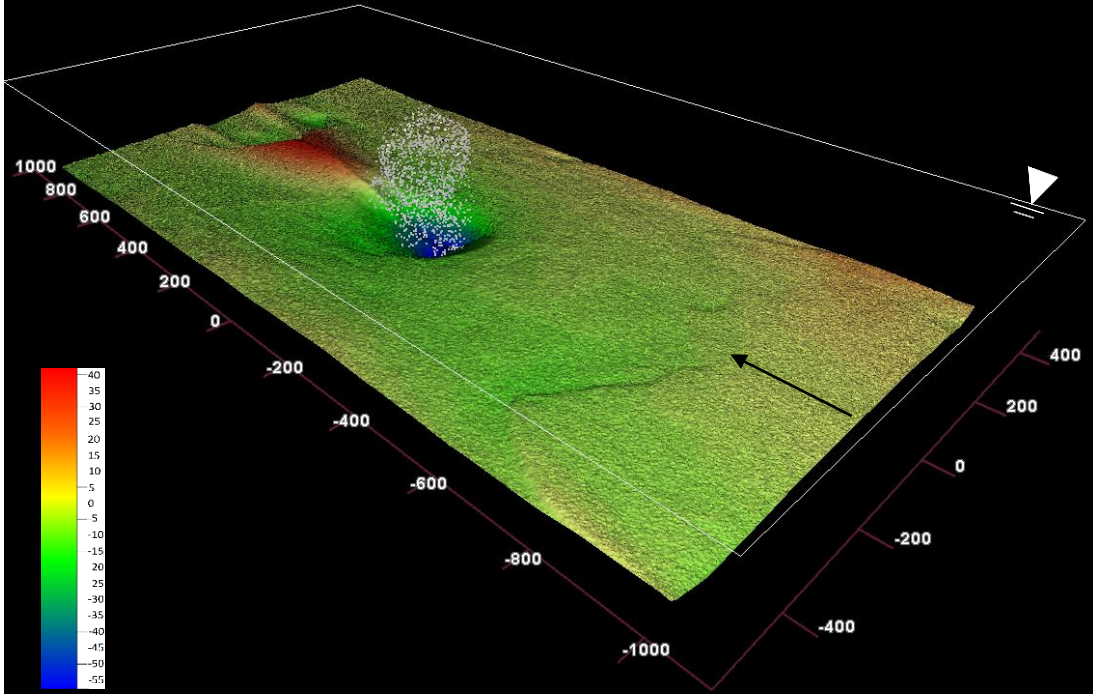
Şekil B.8: $q = 79.45$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 8).



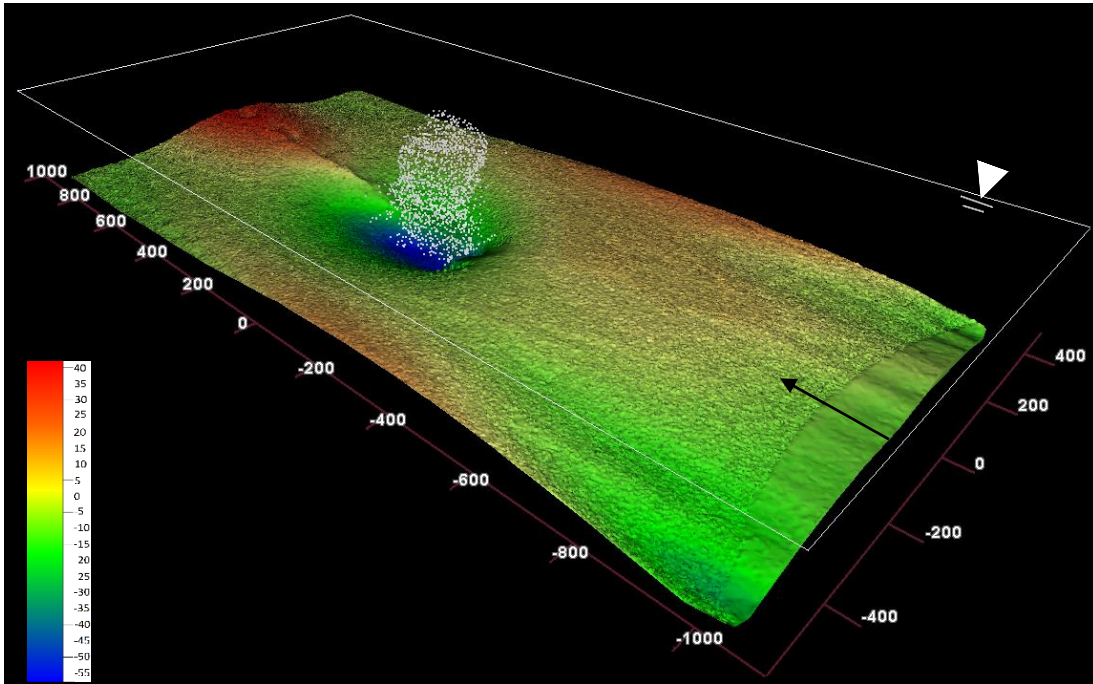
Şekil B.9: $q = 57.82$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 9).



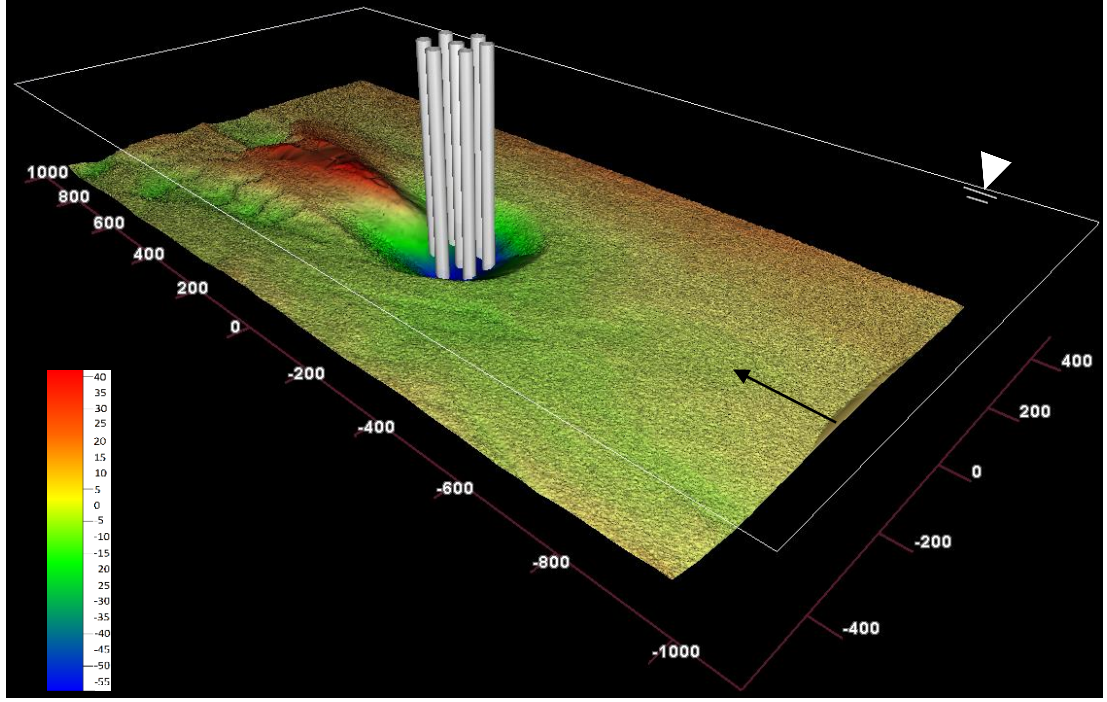
Şekil B.10: $q = 90$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 10).



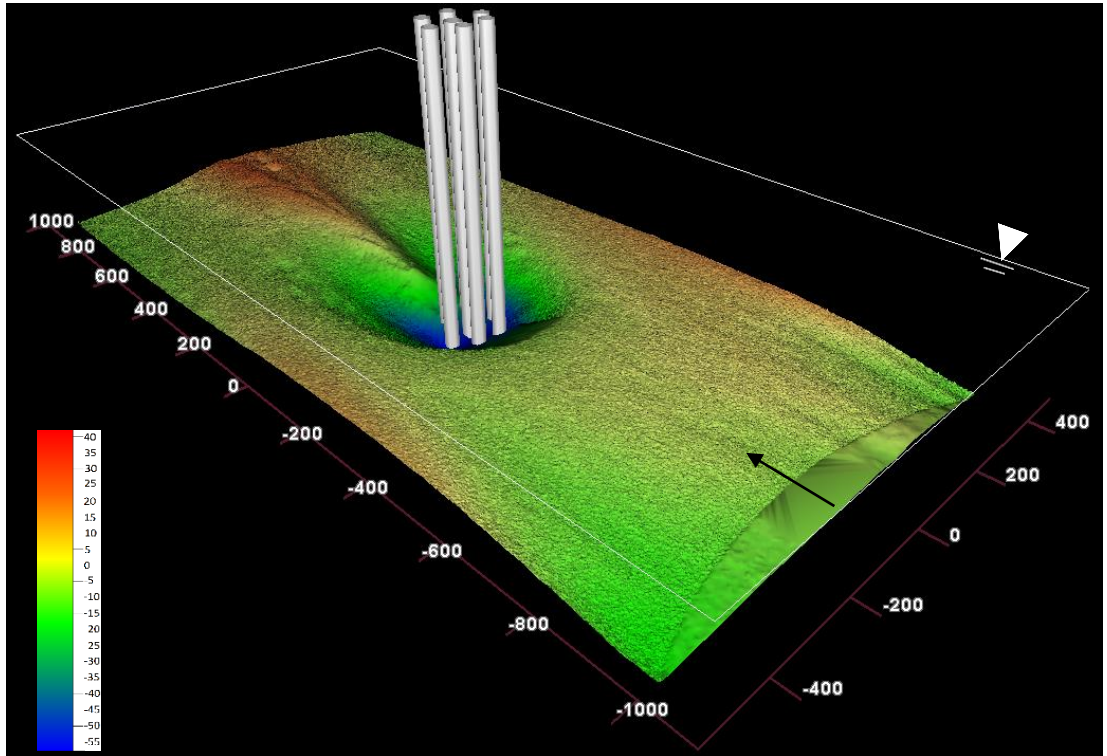
Şekil B.11: $q = 58.14$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 11).



Şekil B.12: $q = 81.23$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 12).

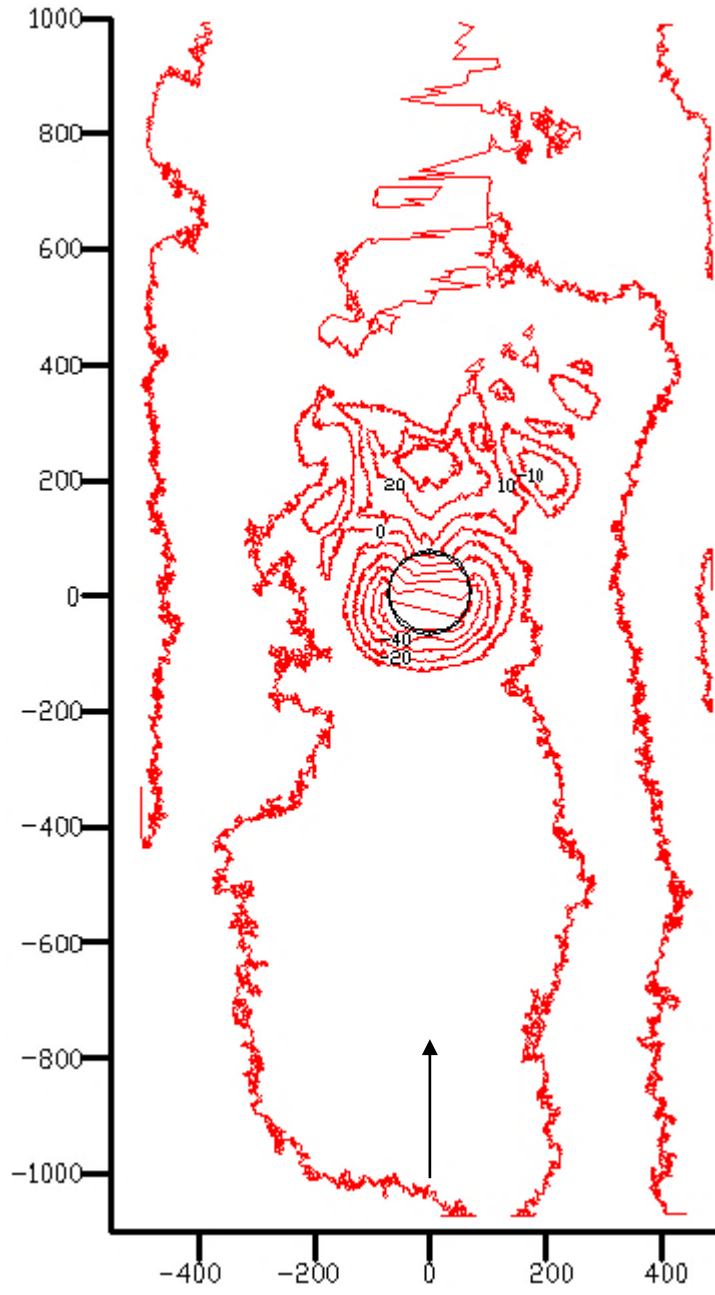


Şekil B.13: $q = 61.44$ L/s-m birim genişlik debisi altında altıgen şeklinde dizilmiş silindirler etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 13).

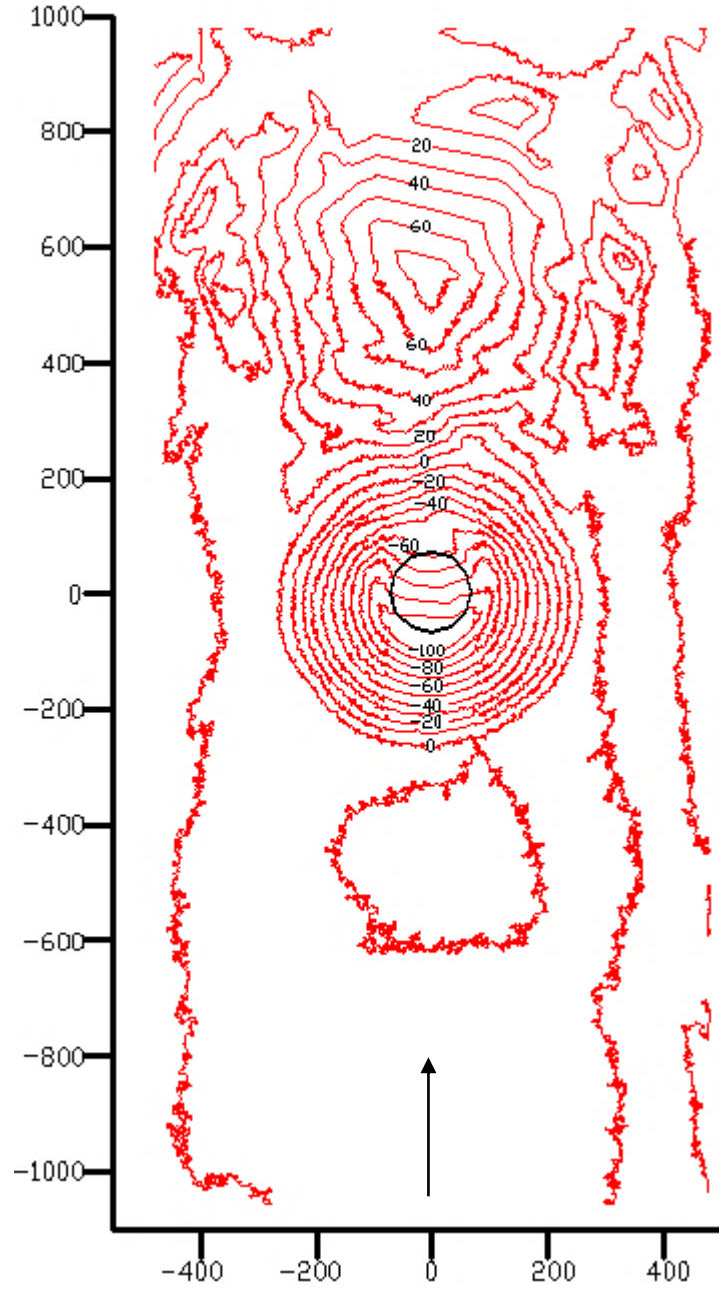


Şekil B.14: $q = 88.36$ L/s-m birim genişlik debisi altında altıgen şeklinde dizilmiş silindirler etrafında meydana gelen oyulma desenleri (Deney 14).

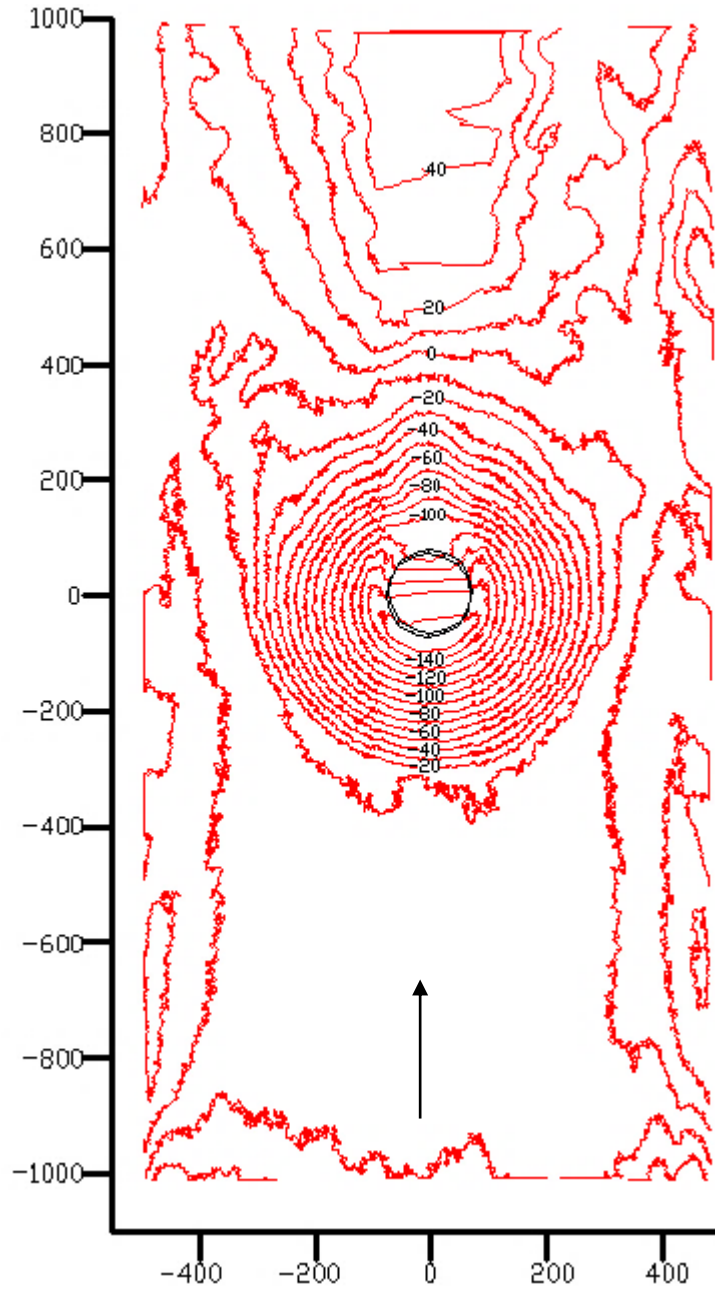
EK C



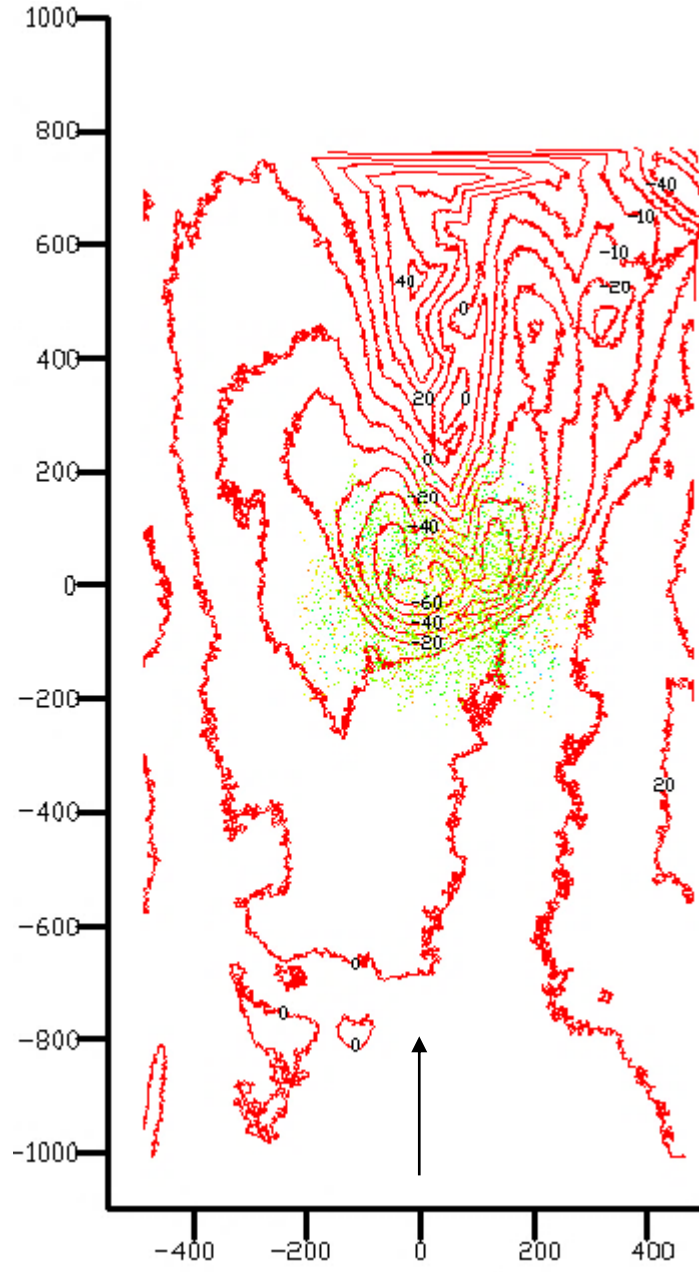
Şekil C.1: $q = 47.08$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 1).



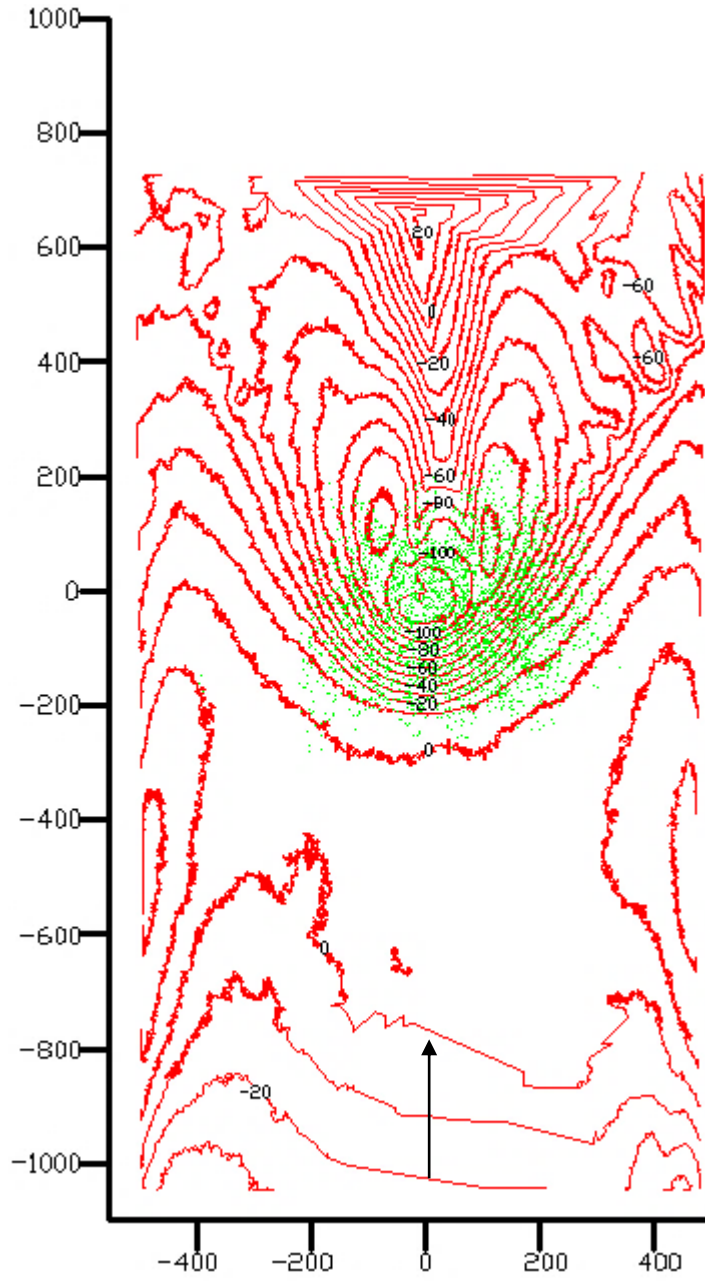
Şekil C.2: $q = 62.1$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 2).



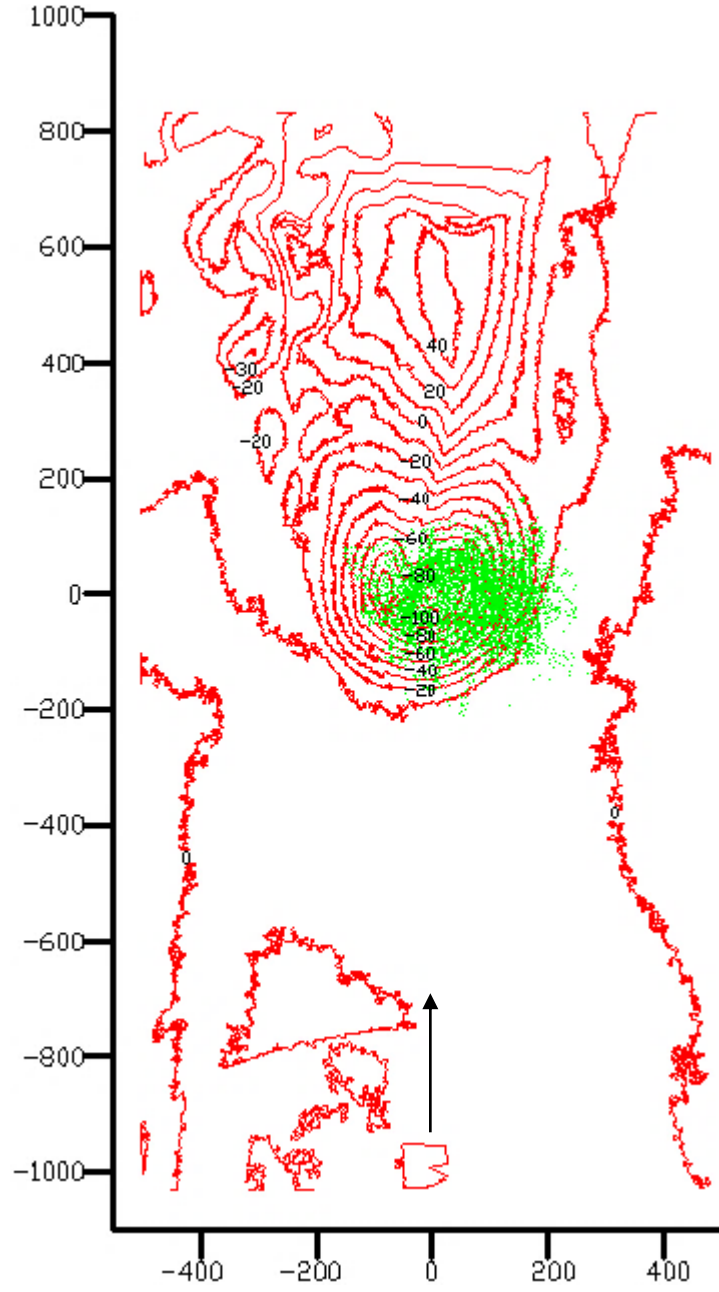
Şekil C.3: $q = 85.54$ L/s-m birim genişlik debisi altında silindir etrafında meydana gelen oyulma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 3).



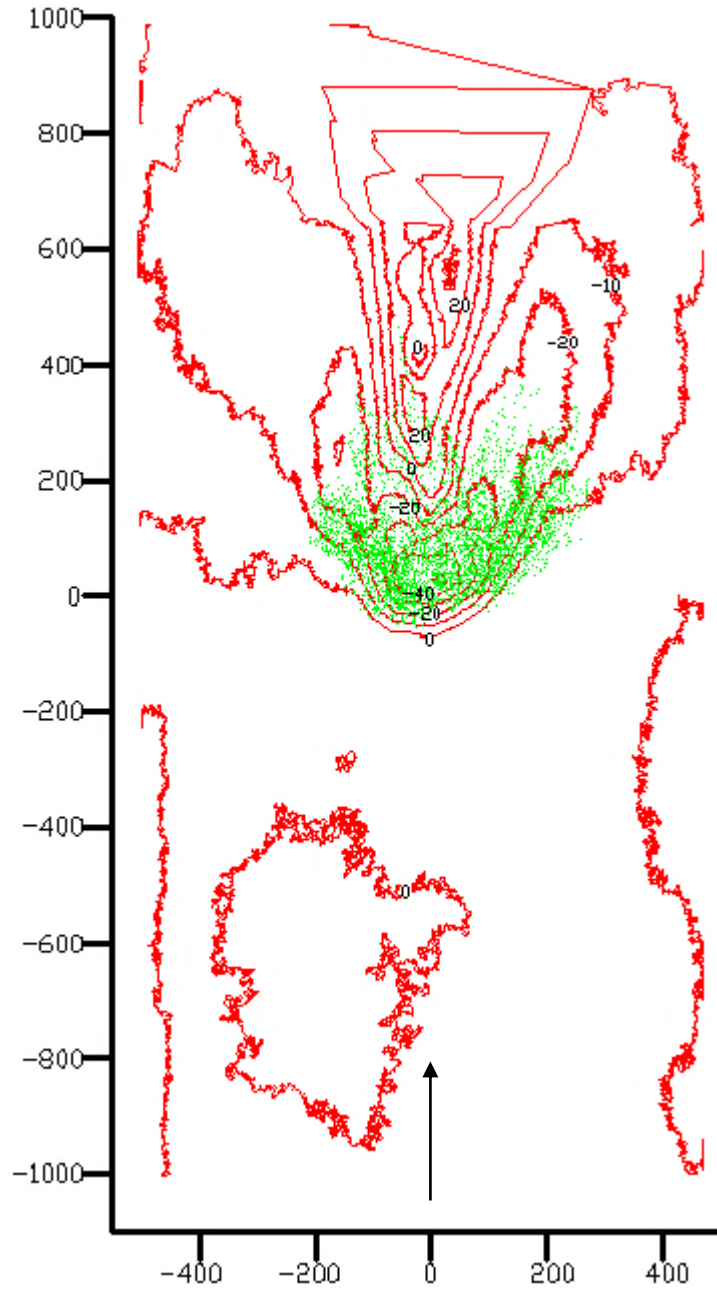
Şekil C.4: $q = 61.18 \text{ L/s-m}$ birim genişlik debisi altında dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 4).



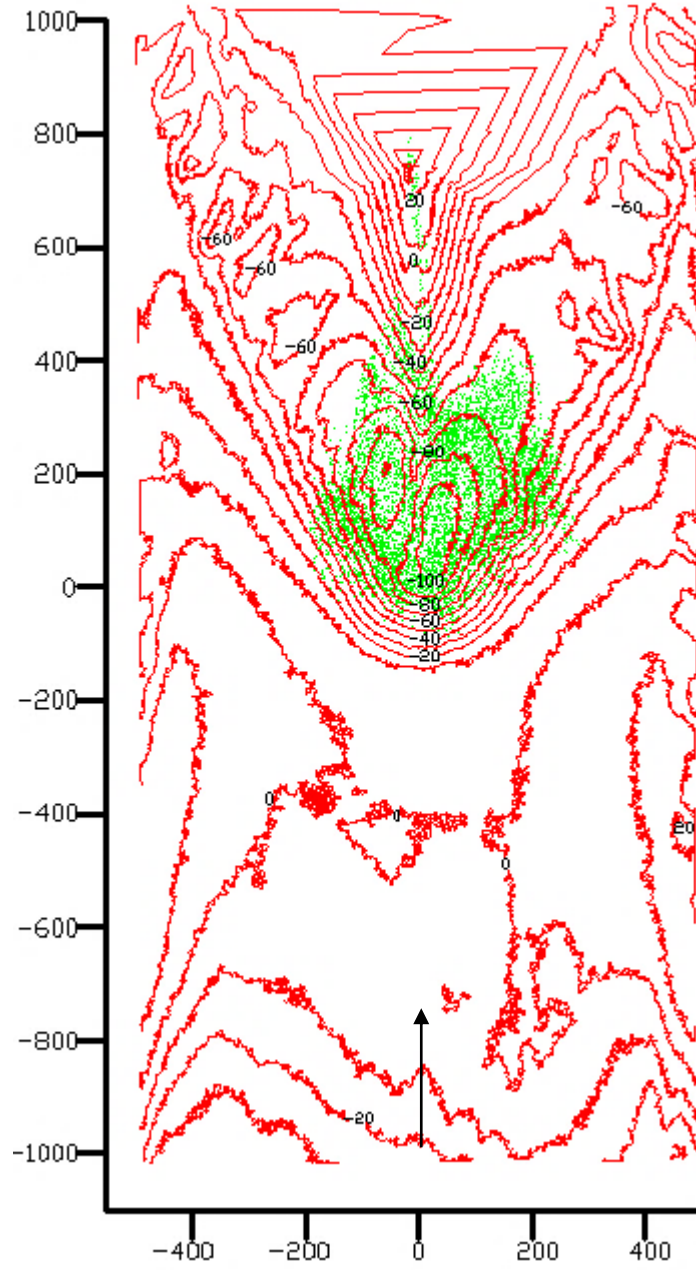
Şekil C.5: $q = 80.03$ L/s-m birim genişlik debisi altında dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 5).



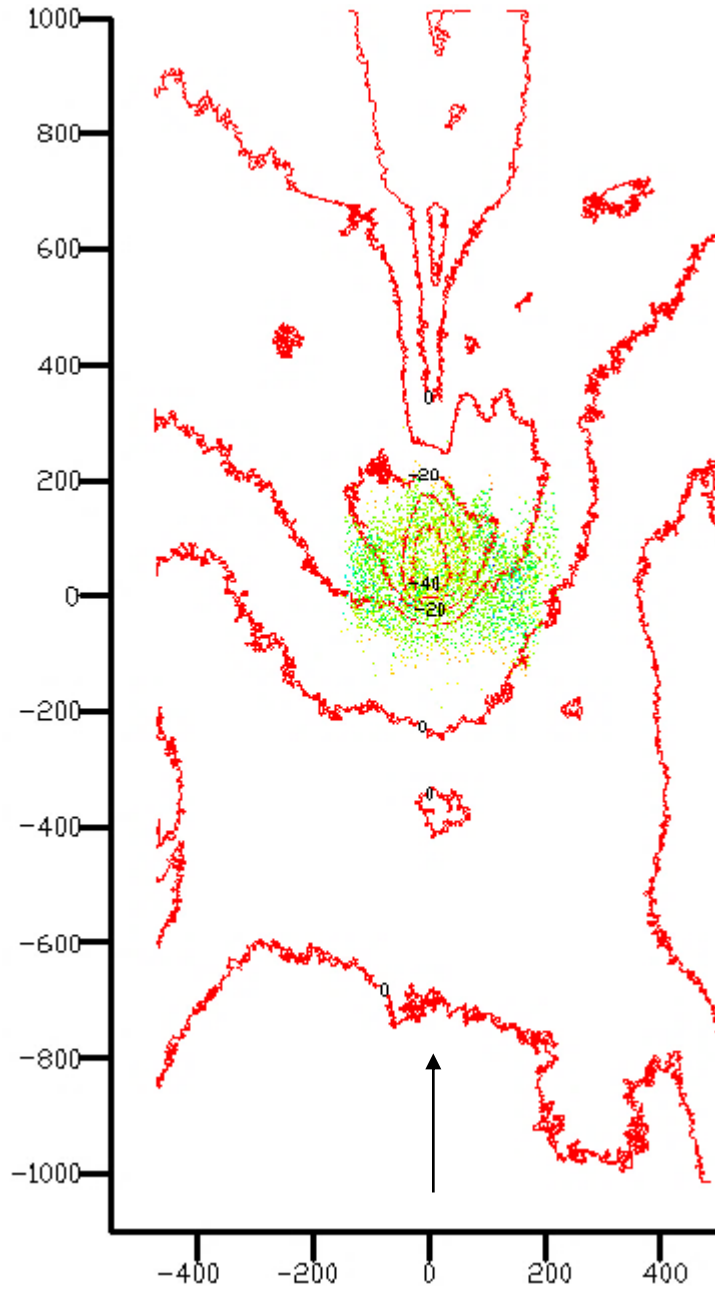
Şekil C.6: $q = 56.35$ L/s-m birim genişlik debisi altında etrafı sarılmış batmamış dik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 6).



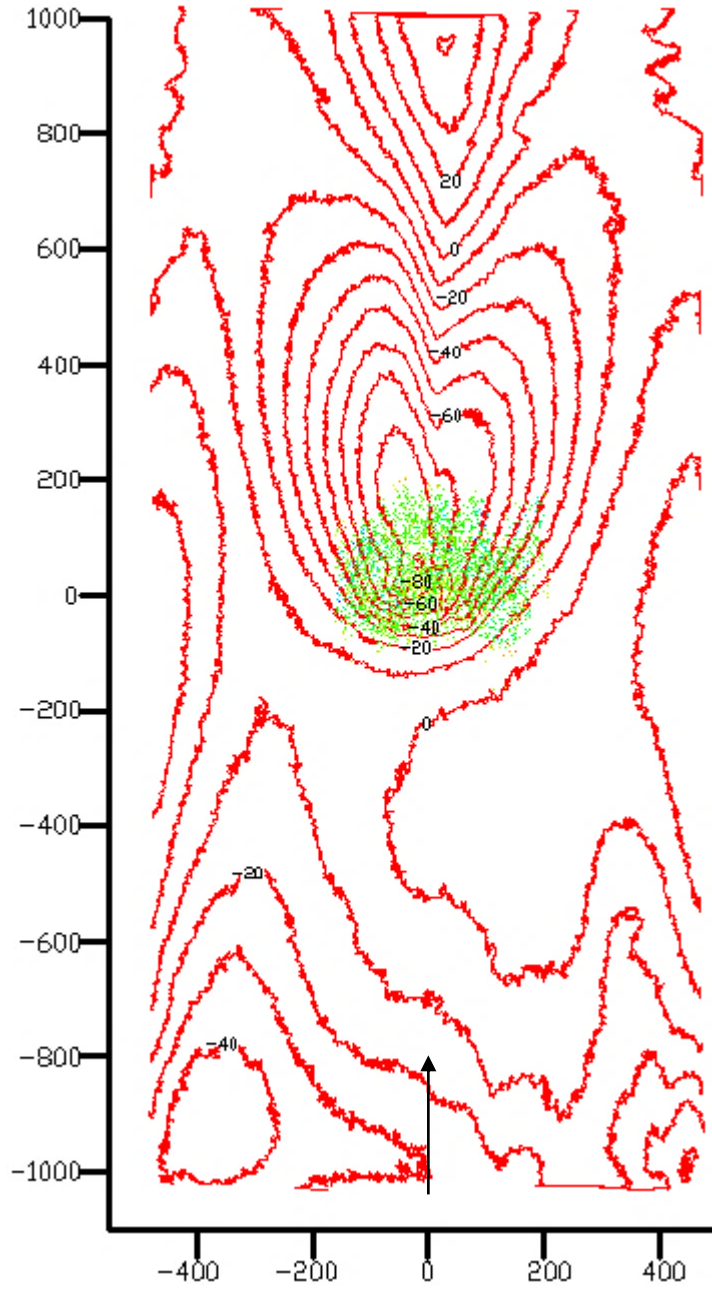
Şekil C.7: $q = 55.65$ L/s-m birim genişlik debisi altında eğik bitki etrafında meydana gelen oyulma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 7).



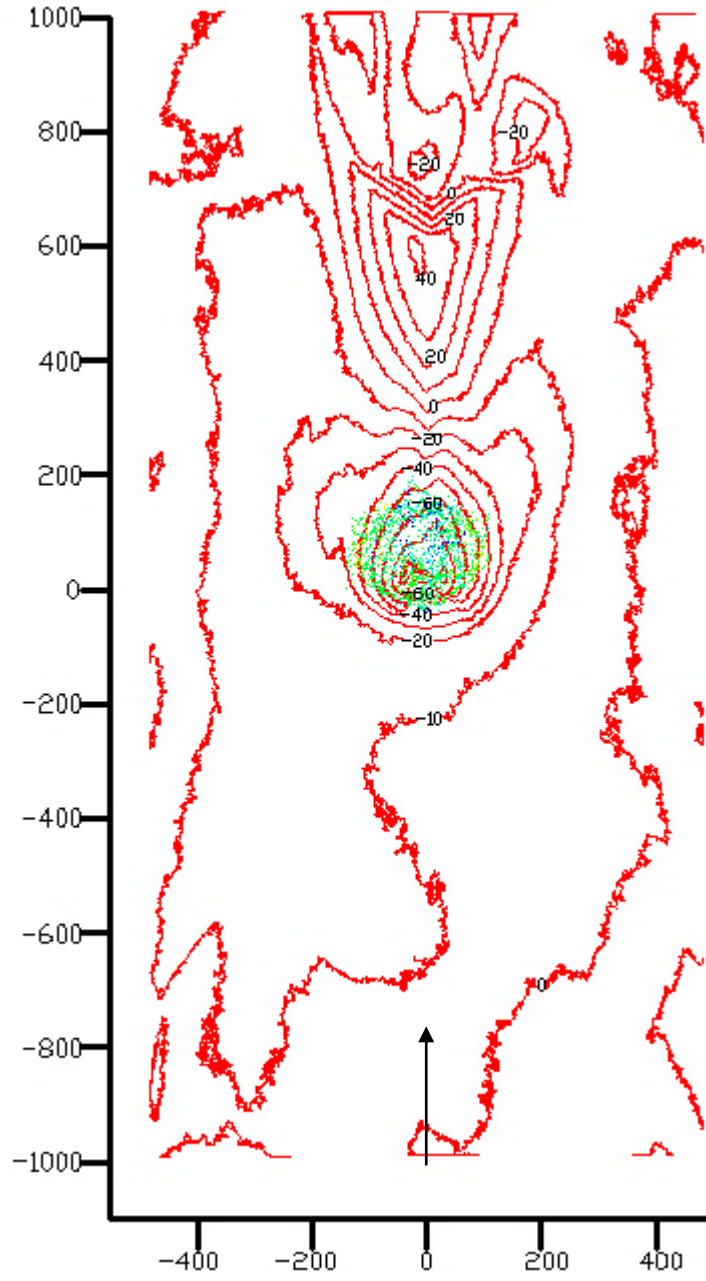
Şekil C.8: $q = 79.45$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oyulma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 8).



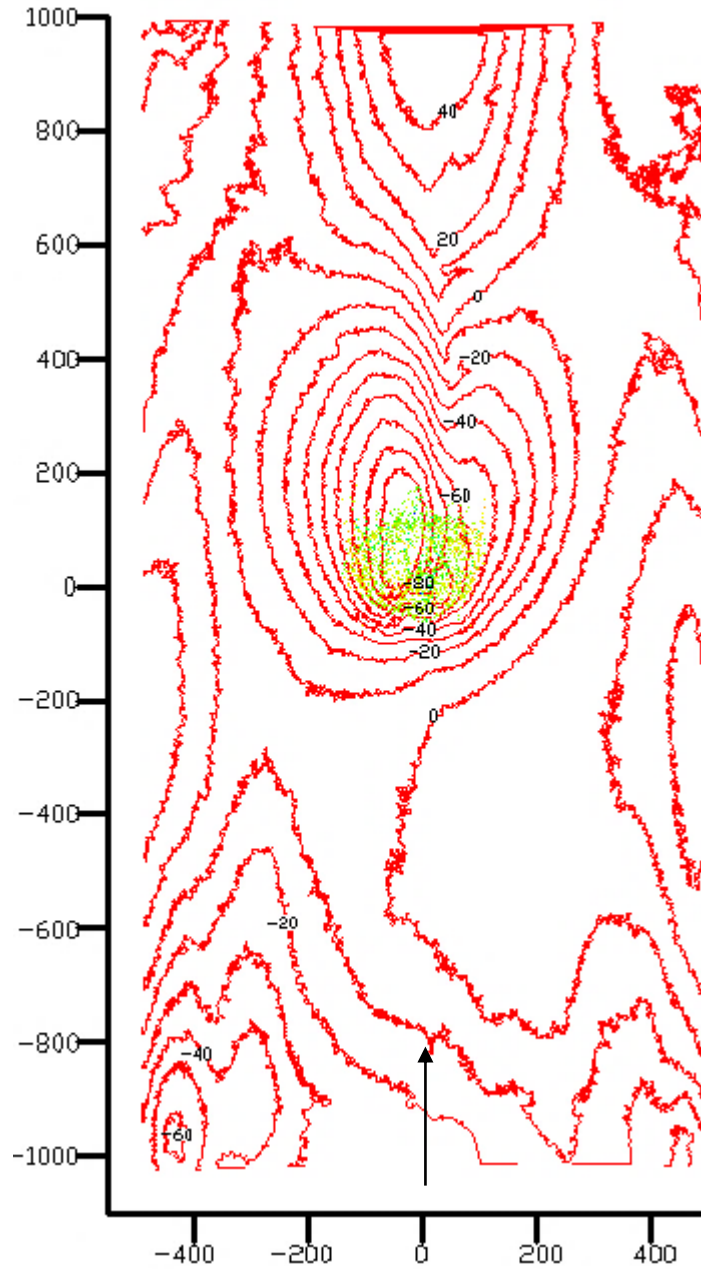
Şekil C.9: $q = 57.82$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık bitki etrafında meydana gelen oyulma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 9).



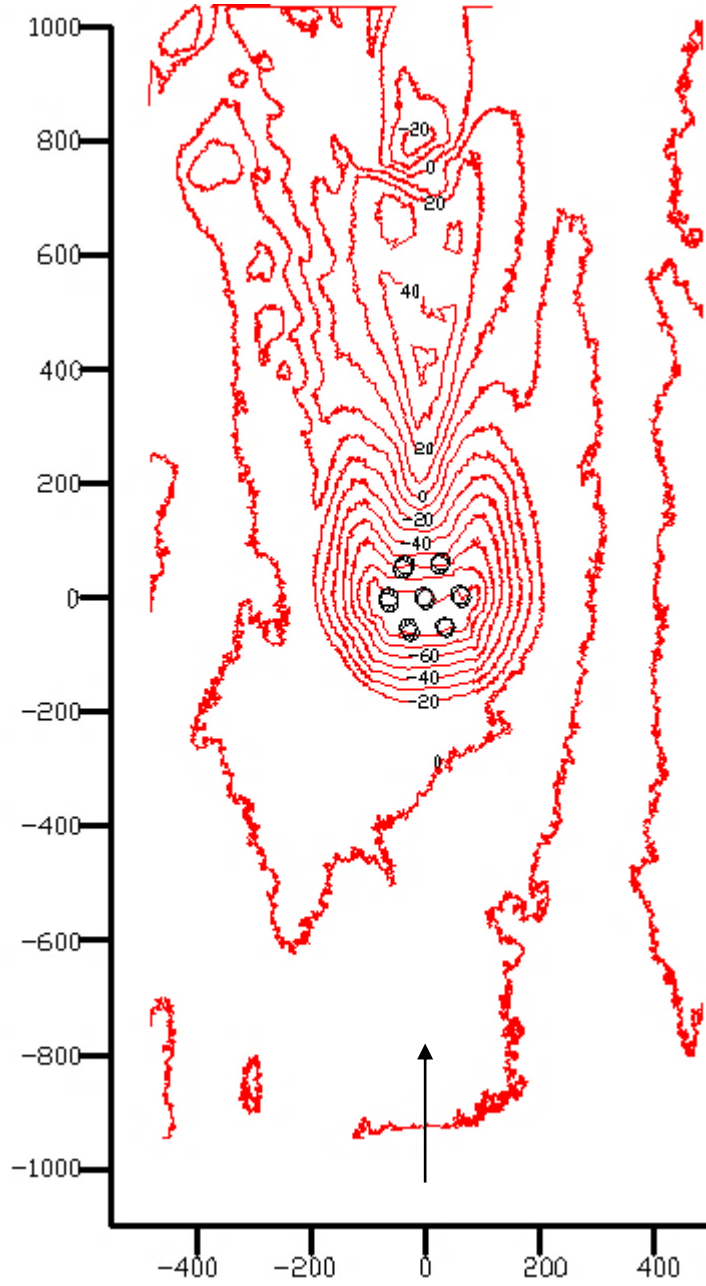
Şekil C.10: $q = 90 \text{ L/s-m}$ birim genişlik debisi altında batık bitki etrafında meydana gelen oyulma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 10).



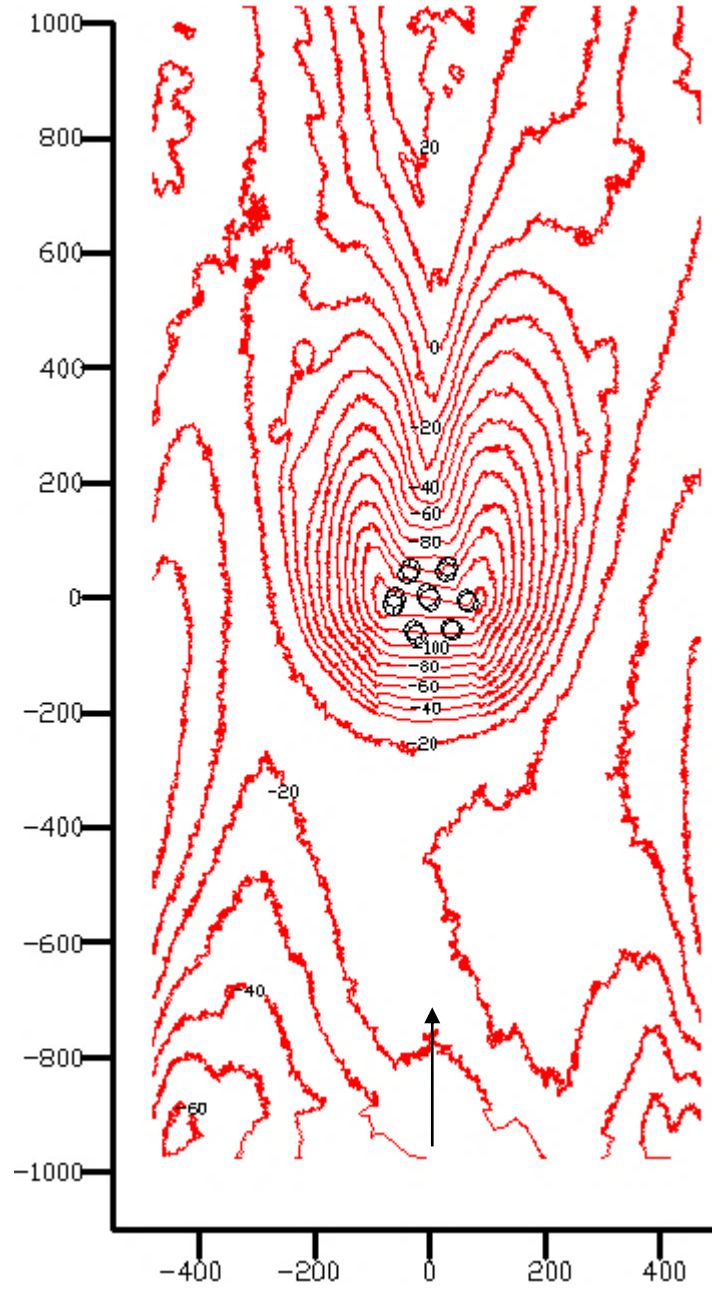
Şekil C.11: $q = 58.14$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oyulma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 11).



Şekil C.12: $q = 81.23$ L/s-m birim genişlik debisi altında batık ve geçirimsiz bitki etrafında meydana gelen oyulma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 12).

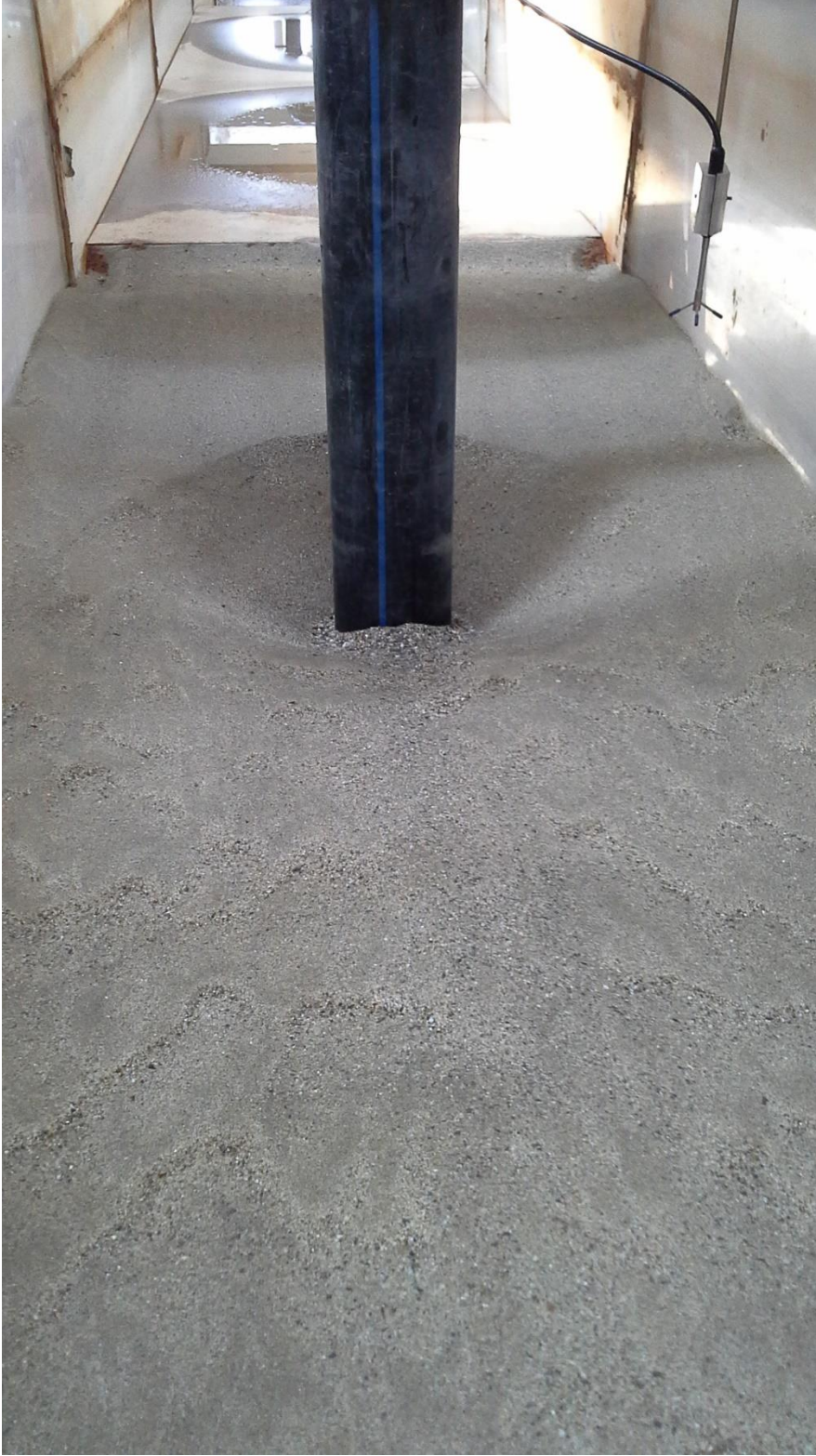


Şekil C.13: $q = 61.44$ L/s-m birim genişlik debisi altında altıgen şeklinde dizilmiş silindirlere etrafında meydana gelen oyluma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 13).



Şekil C.14: $q = 88.36$ L/s-m birim genişlik debisi altında altıgen şeklinde dizilmiş silindirler etrafında meydana gelen oyulma desenlerinin eş yükselti eğrileri (Deney 14).

EK D



Şekil D.1: Deney 3 sonrası oyulma çukuru



Şekil D.2: Deney 4 sonrası bitki etrafındaki oyulma desenleri.



Şekil D.3: Deney 5 sonrası bitki etrafındaki oyulma desenleri.



Şekil D.4: Deney 6 sonrası geçirimsiz bitki etrafındaki oyulma desenleri.



Şekil D.5: Deney 7 sonrası eğik bitki etrafındaki oyulma desenleri.



Şekil D.6:
Deney 8
sonrası eğik
bitki
etrafındaki
oyulma
desenleri.



Şekil D.7: Deney 9 sonrası batık bitki elemanı etrafındaki oyulma deseni.



Şekil D.8: Deney 10 sonrası batık bitki elemanı etrafındaki oyulma deseni.



Şekil D.9: Deney 11 sonrası batık ve geçirimsiz bitki elemanı etrafındaki oyulma deseni.



Şekil D.10: Deney 12 sonrası batık ve geçirimsiz bitki elemanı etrafındaki oyulma deseni.

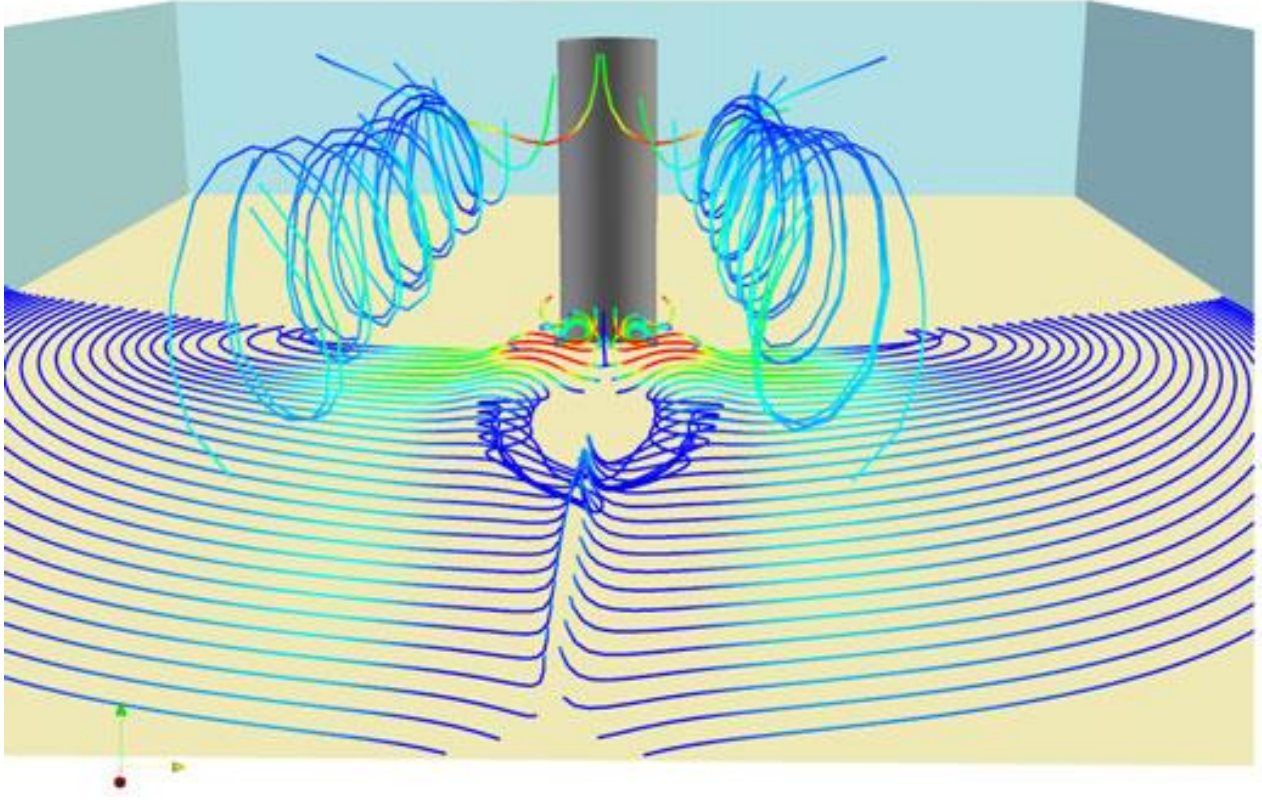


Şekil D.11: Deney 13 sonrası altıgen biçiminde yerleştirilmiş silindirlerin etrafındaki oyulma deseni.



Şekil D.12: Deney 14 sonrası altıgen biçiminde yerleştirilmiş silindirlerin etrafındaki oyulma deseni.

Ek E



Şekil E.1: Zıt yönlü akım yönünde çevrıntiler (Baykal ve diğ., 2014).

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Can Hodoğlu

Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara / 02.07.1990

Adres :Kartaltepe Mah. Mumcu Ap. 23/7
Bakırköy/İstanbul

E-posta : canhodoğlu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans :İstanbul Üniversitesi – Çevre Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans :İstanbul Teknik Üniversitesi – Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Yüksek Lisans Programı