

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÖPRÜ KENAR AYAKLARI ETRAFINDA OLUŞAN YEREL OYULMANIN
KIVRIMLI BİR KANAL BOYUNCA DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Meral KORKMAZ

(101115203)

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Hidrolik

Danışman: Prof. Dr. Muhammet Emin EMİROĞLU

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 30 MART 2015

MART-2015

ÖNSÖZ

Birlikte çalışma onuruna eriştiğim, insani değerleri ile örnek aldığım, gerek lisans gerek doktora eğitimim süresince değerli bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve en önemlisi kıymetli zamanını öğrencilerinden esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Muhammet Emin EMİROĞLU'na sonsuz saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın sonuçlandırılmasında bizzat katkıda bulunup, sonsuz emek harcayan Harun KONCA ve Raif ATEŞ'e,

Tez çalışmam süresince desteklerini, yardımını benden esirgemeyen, önerilerinden faydalandığım Arş. Gör. Mustafa TUNÇ' a,

Deneylerin yapılması sırasında yardımlarını esirgemeyen Teknisyen Muhammet KARTAL'a,

Eğitimim süresince sevgi ve dostluklarını benden esirgemeyen, bölüm hocalarıma ve arkadaşlarıma,

Eğitim hayatım boyunca engin tecrübelerini ustalıkla aktaran aynı zamanda maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen eşim Soner KORKMAZ'a,

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan annem ve babama,

Doktora öğrenimim sırasında dünyaya gelen kızlarım Zeynep ile Edanur'a ve onlara benim yokluğumu hissettirmeden bakıp hep yanımda olan kardeşlerime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Meral KORKMAZ

Elazığ-2015

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	XI
SEMBOL LİSTESİ.....	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. KIVIRIMLI KANALLARDA AKIM.....	2
2.1. Kıvrımlı Kanallar.....	2
2.2. Kıvrımlı Kanallardaki Akım Olayının Mekanizması.....	3
3. KÖPRÜ AYAKLARINDA OYULMA.....	12
3.1. Oyulma Tipleri.....	12
3.1.1 Genel oyulma durumu.....	12
3.1.2 Daralma oyulması durumu.....	12
3.1.3 Yerel oyulma durumu.....	14
3.2. Köprü ayağındaki oyulma süreci.....	15
3.2.1 Köprü ayağının hız dağılımına etkisi.....	16
3.2.2 Köprü ayağının basınç dağılımına etkisi.....	17
3.2.3. Sınır tabakasının oluşumu ve sınır tabakasından ayrılmalar.....	20
3.2.4 Akıma yerleştirilen engel etrafında oluşan vorteks sistemler.....	21
3.3. Yapıların yerel oyulmadan korunması.....	25
3.4 Köprü Yapılarının Etrafında Oyulmayı Etkileyen Parametreler.....	25
4. LİTERATÜR ÖZETİ VE KÖPRÜ AYAKLARI İÇİN VERİLEN OYULMA DERİNLİĞİ BAĞINTILARI.....	36
5. DENEY DÜZENİĞİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA.....	51
5.1 Deney Kanalı.....	51
5.1.1 Su temin borusu ve debi ölçümü.....	51
5.1.2 Deney kanalını besleyen dinlendirme havuzu.....	52
5.1.3 Savaktan sonraki dinlendirme havuzu.....	53
5.1.4 Yaklaşım kanalı.....	53
5.1.5 Kıvrımlı kanal.....	53
5.1.6 Doğrusal çıkış kanalı.....	53
5.1.7 Köprü ayağının yerleştirildiği kıvrım açıları.....	54
5.1.8 Hareketli seviye ölçüm arabası.....	54
5.2 Giriş debisinin ölçülmesi.....	55
5.3 Deneyde Kullanılan Köprü Ayağı Modellerinin Seçimi.....	55
5.4 Deneyde kullanılan taban malzemesinin özellikleri.....	56
5.5 Taban malzemesi kritik hızlarının tayini.....	57

5.6 Deneysel çalışmada olayı etkileyen parametrelerin belirlenmesi.....	57
5.7. Deneysel yöntem.....	59
6. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ.....	63
6.1 Maksimum oyulma derinliğinin değişimi.....	63
6.2 Dış kıyı ve iç kıyıdaki oyulma derinliklerinin karşılaştırılması.....	70
6.3 Köprü kenar ayağı uzunluğunun taban oyulmasına etkisi.....	73
6.4 Oyulma çukurunun memba mansap sevi eğimleri.....	76
6.5 Köprü kıvrım açısının taban oyulmasına etkisi.....	78
6.6 Köprü kenar ayağının taban topoğrafyasına etkisi.....	81
7. SONUÇLAR.....	126
KAYNAKLAR.....	128
ÖZGEÇMİŞ.....	134

ÖZET

Köprüler ulaşım ağını hızlandırmak ve kolaylaştırmak için yapılan önemli yapılardır. Son yıllarda ağır hasar gören veya yıkılan köprüler üzerinde yapılan çalışmalar, hasar nedenlerinin çoğunun taşkınlar sırasında meydana gelen oyulma olayından kaynaklandığını ortaya koymuştur. Taşkınlar esnasında köprü kenar veya orta ayakları etrafındaki taban malzemelerinin taşınması sonucu bu bölgede oyulmalar oluşmaktadır. Bu oyulmaların sonucunda köprü ayaklarının stabilitesi azalır ve ayaklar köprüyü taşıyamaz hale gelerek yıkılırlar. Bu sorunun çözümü için; taban oyulmalarına karşı önlemler alınması ve akarsu rejimine en uygun ayak tipinin belirlenmesi veya akarsu rejimini mevcut ayak tipine uygun hale getirilip getirilemeyeceği çalışmalarının yapılması zorunlu olmaktadır. Akarsuyun debisi nedeniyle temelin oyulmasını engellemek için temelin yeterince derine yapılması gerekmektedir. Böylece temel altının oyulması engellenmektedir. Ancak ne kadar derine inşa edileceğini bilmek için mevcut akım ve yapı koşullarına göre maksimum oyulmanın doğru olarak tahmin edilmesi oldukça önemlidir. Akarsularda özellikle kıvrımlı kanallarda sekonder akım nedeniyle de köprü ayakları oyulmaya maruz kalmaktadırlar.

Bu çalışmada, kıvrımlı bir kanal boyunca köprü ayağı etrafında oluşan yerel oyulmalar ve köprü ayak şeklinin oyulma olayına etkisi incelenmiştir. Ayrıca debi ve su derinliği de değiştirilerek bunların oyulma üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Köprü kenar ayağının uzunluğu oyulma derinliği üzerine direk bir etkiye sahiptir. Bu konuda literatürde çalışmalar yapılmıştır, ancak kıvrımlı bir kanal boyunca köprü ayak uzunluğunun ve derinliğinin değişimi ile ilgili çok fazla çalışma yapılmamıştır. Bu çalışmada kıvrımlı bir kanal boyunca iç ve dış kıyılarda 30°, 60°, 90°, 120° ve 150°'lik açılarda köprü kenar ayak uzunluğu ve debisi değiştirilerek temiz su oyulmasında bir dizi deney yapılmıştır. Her ayak için 12-18 saat arasında maksimum oyulma derinlikleri ölçülmüştür. Maksimum oyulma derinlikleri grafikler çizilerek yorumlanmıştır. Ayrıca kanal boyunca taban topografyası incelenmiştir.

Birinci bölüm oyulma olayı, ikinci bölüm kıvrımlı akarsular, üçüncü bölüm köprü ayaklarındaki oyulma olayı, dördüncü bölüm literatür özeti ve köprü ayakları için oyulma bağıntılarını, beşinci bölüm deneysel çalışmayı ve altıncı bölüm ise deney sonuçlarını kapsamaktadır. Bu çalışma ile kıvrımlı kanallara yerleştirilen köprü kenar ayaklarındaki oyulma konusundaki literatürdeki eksikliği gidermek amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Köprü, Oyulma, Köprü kenar ayakları, Kıvrımlı kanal, Temiz su oyulması

SUMMARY

Experimental Investigation of Local Scour Around Bridge Abutments Throughout a Meander Channel

Bridges are important structures that have been made to make transportation network faster and easier. In recent years, studies about heavily damaged or destroyed bridges, revealed that most of the damage caused than scour events that consisting by floods. During floods the base materials around the abutment or pier transportations consists scour. The results of scours are the bridge feets stability reduces and the feet becoming unable to carry the bridge and the bridge destroyes. To solve this problem; take measures againts bed scours and determination of the feet type most appropriate to the regime of the river. Because of the river regime to prevent base scours the base must be made deep enough. Thus obstructs scours on the bottom of the base. But estimating the maximum scours with the current flow and conditions in the building is important to know how deep it will be built. In rivers, especially because of secondary flow in meandering channel are exposed to scour bridge feets.

In this study, throughout a meandering channel the local scours around the bridge feets and the scours into the bridge feet shapes has been investigated. In addition, by changing the water depth and the discharge the effect of scour on of thew was investigated. The length of abutment of the bridge has a direct effect on the depth of scour. Studies have been made in the literature on this subject, however, there is not a lot of work about change of the bridge abutment and depth throughout meandering channel. In this study, conducted a series of experiments about clean water scours throughout a meandering channel on the inner and outer coasts 30°, 60°, 90°, 120° and 150° angels of bridges side foot and with changing flow. The maximum scour depths were measured for each abutment between 12-18 hours. By drawing the graphs of maximum scour depths has been interpreted. The topografy of the base along the channel also interpreted.

The first chapter includes scour events, second chapter includes meandering channel, third chapter includes scours on the bridge feets, fourth chapter includes summary of the literature and equations for bridge feets scours, fifth chapter includes experimental works and the sixth chapter includes experimental results. With this study, it is intended to correct the deficiency in the literature about bridge abutment scours in meandering channels.

Keywords: Bridges, Scour, Abutment, Meandering channel, Clean water scour

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Büyük Menderes Havzası Sarayköy Denizli ve Rio-Cauto Nehri	2
Şekil 2.2 Menderesli akarsu ve çökeller	3
Şekil 2.3 Akarsu kıvrımlarındaki akışkan parçacığının hareketi ve silindirik koordinat sistemi gösterimi	5
Şekil-2.4 Kıvrımlı bir kanalda enine su yüzü profili	6
Şekil 2.5 Kanal kıvrımındaki helikoidal akım	7
Şekil 2.6 Kıvrımlı kanalda akım	10
Şekil 2.7 Kanal kıvrımında $V/\bar{V}$ Hız dağılımı	11
Şekil 3.1 Daralma oyulması	12
Şekil 3.2 Oyulma derinliğinin değişimi	15
Şekil 3.3 Silindirik koordinat sisteminde ayak etrafındaki hız dağılımı	16
Şekil 3.4 Köprü ayağı etrafında akımın ayrılması ve basınç gradyanının değişimi	18
Şekil 3.5 C_p basınç katsayısının dağılımı	20
Şekil 3.6 Sınır tabaka bölgeleri ve hız dağılımları	20
Şekil 3.7. Engel boyunca hız dağılımları ve sınır tabakasının ayrılması	21
Şekil 3.8 Bir köprü ayağı etrafındaki çevrintiler ve oyulma çukuru	21
Şekil 3.9 Sürüklenen vorteks sistemi	22
Şekil 3.10 Atnalı vorteks sistem	22
Şekil 3.11 Akıma yerleştirilen köprü orta ayakları etrafında meydana gelen akım çizgileri ve vorteks sistem	23
Şekil 3.12. Akıma yerleştirilen köprü kenar ayakları etrafında meydana gelen akım çizgileri	24
Şekil 3.13 Dikdörtgen kenar ayak civarında meydana gelen vorteks yapı	25
Şekil 3.14 Kayma hızının veya yaklaşım hızının fonksiyonu olarak, yerel oyulma derinliğinin değişimi	26
Şekil 3.15 Görelî oyulma derinliğinin görelî akım derinliğiyle değişimi	27
Şekil 3.16 Ayak uzunluğunun oyulmaya etkisi	30
Şekil 3.17 Çeşitli ayak formları	33
Şekil 3.18 (θ) Atak Açılılarıyla K_θ Katsayısının değişimi	34
Şekil 3.19. Farklı Atak Açılarının Oyulmaya Etkisi	34
Şekil 4.1 Kenar ayak etrafındaki çevrintiler ve oyulma çukuru	39
Şekil 4.2 Yaklaşım dolgusunun akımla açılı yapması hali	39

Şekil 4.3 Çaycuma köprüsü	42
Şekil 5.1 Deney seti plan ve kesitleri, tüm ölçüler metre cinsindendir	52
Şekil 5.2. Kanalı besleyen dinlendirme havuzu	52
Şekil 5.3 Kıvrımlı kanal ve $\alpha=90^\circ$ de dış kıyıya yerleştirilmiş köprü kenar ayağı	53
Şekil 5.4 Köprü kenar ayağının kıvrım açısına yerleştirilmesi	54
Şekil 5.5 Hareketli seviye ölçüm arabası	54
Şekil 5.6 Giriş debisini ölçen elektromanyetik debimetre ve ayarlama vanası	55
Şekil 5.7 Dairesel burunlu köprü yan ayağı boyutları	55
Şekil 5.8 Taban malzemesinin granülometri eğrisi	56
Şekil 5.9 İç kıyıya yerleştirilen köprü kenar ayağının görünümü	59
Şekil 5.10 İç kıyı ve dış kıyıda taban topografyası ölçümlerinin alındığı noktalar	61
Şekil 6.1. $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında yapılan deneyler	64
Şekil 6.2 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında yapılan deneyler	65
Şekil 6.3 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında yapılan deneyler	67
Şekil 6.4 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında yapılan deneyler	68
Şekil 6.5 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında yapılan deneyler	69
Şekil 6.6 $\alpha=30^\circ$ dış kıyı ve iç kıyıda oyulma derinliği değişimi	70
Şekil 6.7 $\alpha=60^\circ$ dış kıyı ve iç kıyıda oyulma derinliği değişimi	70
Şekil 6.8 $\alpha=90^\circ$ dış kıyı ve iç kıyıda oyulma derinliği değişimi	71
Şekil 6.9 $\alpha=120^\circ$ dış kıyı ve iç kıyıda oyulma derinliği değişimi	71
Şekil 6.10 $\alpha=150^\circ$ dış kıyı ve iç kıyıda oyulma derinliği değişimi	71
Şekil 6.11 Kıvrım açısına göre oyulma derinliklerinin sıralanması	72
Şekil 6.12 $\alpha=30^\circ$ kenar ayak uzunluğunun oyulma derinliğine etkisi	73
Şekil 6.13. $\alpha=60^\circ$ yan ayak uzunluğunun oyulma derinliğine etkisi	74
Şekil 6.14 $\alpha=90^\circ$ yan ayak uzunluğunun oyulma derinliğine etkisi	74
Şekil 6.15 $\alpha=120^\circ$ yan ayak uzunluğunun oyulma derinliğine etkisi	74
Şekil 6.16 $\alpha=150^\circ$ yan ayak uzunluğunun oyulma derinliğine etkisi	75
Şekil 6.17 Oyulma çukurunun memba ve mansap şevi eğimlerinin gösterimi	76
Şekil 6.18. Köprü kıvrım açısının oyulma derinliğine etkisi, $L_a=8$ cm (dış kıyı)	78
Şekil 6.19. Köprü kıvrım açısının oyulma derinliğine etkisi, $L_a=8$ cm (iç kıyı)	78
Şekil 6.20. Köprü kıvrım açısının oyulma derinliğine etkisi, $L_a=10$ cm (dış kıyı)	79
Şekil 6.21. Köprü kıvrım açısının oyulma derinliğine etkisi, $L_a=10$ cm (iç kıyı)	79
Şekil 6.22. Köprü kıvrım açısının oyulma derinliğine etkisi, $L_a=12$ cm (dış kıyı)	80
Şekil 6.23. Köprü kıvrım açısının oyulma derinliğine etkisi, $L_a=12$ cm (iç kıyı)	80

Şekil 6.24 $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	83
Şekil 6.25 $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	84
Şekil 6.26 $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	86
Şekil 6.27 $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	87
Şekil 6.28 $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	89
Şekil 6.29 $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	90
Şekil 6.30 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	92
Şekil 6.31 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	93
Şekil 6.32 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	95
Şekil 6.33 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	96
Şekil 6.34 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	98
Şekil 6.35 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	99
Şekil 6.36 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	101
Şekil 6.37 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	102
Şekil 6.38 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	104
Şekil 6.39 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	105
Şekil 6.40 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	107
Şekil 6.41 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	108
Şekil 6.42 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	110
Şekil 6.43 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	111
Şekil 6.44 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	113

Şekil 6.45 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	114
Şekil 6.46 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	116
Şekil 6.47 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	117
Şekil 6.48 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	119
Şekil 6.49 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	120
Şekil 6.50 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	122
Şekil 6.51 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	123
Şekil 6.52 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	125
Şekil 6.53 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi	126

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 Düşey ayaklar için şekil faktörü	31
Tablo 3.2 Genişliği derinlikle değişen ayaklar için şekil faktörü	32
Tablo 4.1 Orta ayaklar etrafındaki oyulma bağıntıları	37
Tablo 4.2. Kenar ayaklar etrafındaki oyulma bağıntıları	40
Tablo 4.3. Köprü hasar nedenlerinin sınıflandırılması	41
Tablo 5.1 Kıvrımlı kanalda iç kıyı ve dış kıyıda deney verileri	60
Tablo 6.1 Oyulma çukurunun memba ve mansap şevi	77

SEMBOL LİSTESİ

b	Kenar ayak genişliği (L)
B	Ana kanal genişliği (L)
C	Chezy sabitlerine bağlı bir parametre (-)
d_{50}	Malzemenin yüzde ellisini geçiren elek çapı, Medyan çap (L)
d_s	Oyulma Derinliği (L)
d_{se}	Denge zamanındaki oyulma derinliği (L)
d_{smax}	Maksimum oyulma derinliği (L)
d_{sc}	Daralma oyulması (L)
F	Kuvvet (MLT^{-2})
F_d	Densimetrik Froude sayısı (-)
F_{rc}	Taban malzemesini harekete geçiren kritik Froude sayısı
g'	Göreceli yerçekimi ivmesi (-)
g	Yerçekimi ivmesi (LT^{-2})
h	Herhangi bir kesitteki akım derinliği (L)
k_s	Eşdeğer kum pürüzlülüğü (-)
K_θ	Akımın açısı etkisi için düzeltme katsayısı (-)
K_σ	Gradasyon etkisini düzeltme faktörü (-)
K_s	Dairesel ayağa göreli olarak şekil faktörleri (-)
L_a	Kenar ayak uzunluğu (L)
L_b	Kenar ayak genişliği (L)
N	Şekil faktörü (-)
N_s	Tane sayısı
p	Basınç ($ML^{-1}T^{-2}$)
R	Kıvrımın eğrilik yarıçapı (L)
R_i	Kanal kıvrımı iç kenarının eğrilik yarıçapı (L)
t	Zaman (T)
T	Göreceli zaman (-)
Q	Debi (L^3T^{-1})
$u_{0.6D}$	Taban seviyesindeki ortalama akım hızı (LT^{-1})
U	Üniformluk katsayısı (-)
u_s	Sekonder çevrinti hızı (LT^{-1})
$\bar{U}_t$	Sekonder geçiş hızı (LT^{-1})
V	Ana kanaldaki ortalama akım hızı (LT^{-1})
V_{kr}	Kritik kayma hızını (LT^{-1})
u, v, w	sırasıyla r , θ ve z yönündeki hız bileşenleri (LT^{-1})

u_{*kr}	Kritik kayma hızı (LT^{-1})
Z	Boyutsuz oyulma derinliği (-)
z_R	Referans uzunluğu (L)
α	Kıvrım merkez açısı ($^{\circ}$)
θ	Yaklaşım akımının köprü ayağı aksıyla yaptığı açı ($^{\circ}$)
β	Von-Karman sabitlerine bağlı bir parametredir (-)
δ	Toplam taban kayma gerilmesinin akım yönüyle yaptığı açı ($^{\circ}$)
τ	Kayma gerilmesi ($ML^{-1}T^{-2}$)
τ_{sb}	Esas akım yönündeki kayma gerilmesi bileşeni ($ML^{-1}T^{-2}$)
τ_{Rb}	Radyal doğrultudaki kayma gerilmesi bileşeni ($ML^{-1}T^{-2}$)
γ_s	Taban malzemesi olarak özgül ağırlığı ($ML^{-2}T^{-2}$)
σ_g	Taban malzemesi tane dağılımının geometrik standart sapması
σ_{ii}	Normal gerilme ($ML^{-1}T^{-2}$)
τ_{ij}	Kayma gerilmesi ($ML^{-1}T^{-2}$)
ΔH	Kanalın her iki kenarı arasındaki seviye farkı (L)
ρ	Akışkan yoğunluğu (ML^{-3})
ρ_s	Sediment yoğunluğu (ML^{-3})

1. GİRİŞ

Hidrolik yapılarda gözlenen oyulma olayını birçok parametre etkilemektedir. Oyulma, köprü kenar ve orta ayağı etrafındaki oyulma mekanizması ve akım şekli, aşınabilir yatak malzemesi ve köprü temeli etrafındaki türbülanslı akım alanının üç boyutlu güçlü etkileşiminden kaynaklanan karmaşık bir olaydır.

Oyulma, akarsular ve taşkınlardaki su akımının sebep olduğu doğal bir olaydır. Oyulma olayı; akarsu içerisine yerleştirilen köprü kenar ayağı ve mahmuzlar gibi yapıların olması sebebiyle türbülans şiddetinin artması ve katı madde taşınımının karşılıklı etkileşimi sonucunda, akarsuyun yerel katı madde taşıma kapasitesi artmasıyla başlamış olur. Daha sonra oyulma çukurunun geometrisi sürekli olarak değişir. Oyulma çukuruna gelen katı madde miktarı, giden katı madde miktarına eşit olunca dinamik denge oluşur. Bu durumdaki oyulma derinliğine, maksimum denge oyulma derinliği denmektedir (Güngör, 1997).

Menderesli akarsulardaki akım yapısı, doğrusal akarsulardakine göre çok daha karmaşık olduğundan taban topoğrafyası birçok parametreden etkilenmektedir. En önemli parametrelerden biri helikoidal akım, diğeri de maksimum hız yörüngesinin hareketidir. Akışkan kütlesinin sürekliliğini sürdürebilmesi için, su dış kıyıda tabana doğru hareket ederken, iç kıyıda da tabandan yukarı doğru hareket etmektedir. Böylece, teğetsel hız bileşenine ilave olarak kanal eksenine dik oluşan radyal hız bileşeni de *sekonder akımı* oluşturmaktadır. Kıvrımlı kanallardaki sekonder akım ve maksimum hız yörüngesi, dış kıyıda oyulma iç kıyıda ise yığılmalara sebep olarak taban topoğrafyasında değişime sebep olmaktadır.

Akarsularda meydana gelen taşkınlar su yapılarında büyük hasarlara ve yıkımlara neden olmaktadır. Günümüzde önemli bir ulaşım ağı olan köprüler taşkınlardan dolayı büyük zarar görmektedir. Akarsu kıvrımlarında ise sekonder akım nedeniyle köprü ayakları oyulmalara ve akarsu taban topoğrafyası değişimlere maruz kalmaktadır. Bunun sonucunda, ayağın farklı kıvrım açılarında yerleştirilmesi ile ayak etrafındaki oyulma olayı ve kıvrımlı akarsudaki taban topoğrafyası değişiminin tespit edilmesi oldukça önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, kıvrımlı bir kanal boyunca köprü ayağı etrafında oluşan yerel oyulmalar ve köprü ayak şeklinin oyulma olayına etkisi incelenmiştir. Kıvrımlı bir kanal boyunca iç ve dış kıyılarda 30°, 60°, 90°, 120° ve 150°'lik kıvrım açılarında köprü kenar ayak uzunluğu ve akım şiddeti değiştirilerek temiz su oyulması deneysel olarak incelenmiştir.

2. KIVRIMLI KANALLARDA AKIM

2.1. Kıvrımlı Kanallar

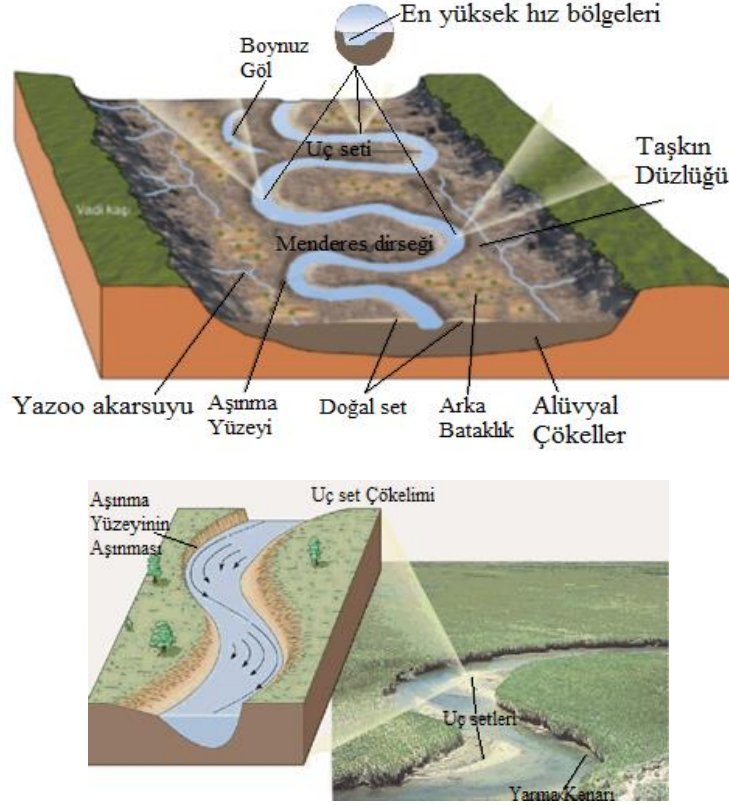
Kıvrımlı kanallar, *menderes* olarak bilinen geniş çengelli bükümlere sahip, tek dolambaçlı bir kanaldan oluşurlar. Bu akarsular, düz olduğu kesimler boyunca yarı dairesel kesitli iken menderes yaptığı kısımlarda belirgin asimettiktir; akarsuyun en derin olduğu yer dıştaki kenardır ve bu kenar genellikle akarsu kanalına dikey olmaktadır. Dış kenara **yarma kenarı** adı verilmektedir, çünkü kanalın o kesiminde aşındırmaya neden olan daha büyük bir hız ve burgaçlılık olmaktadır. Bunun tam tersine, kanala yumuşak bir eğimi olan içteki kenar yakınında akış hızı en düşük düzeydedir. Mendereslerde akış hızının eşit olmayan biçimde dağılması sonucunda yarma kenarı aşınır ve kanalın diğer tarafında çökme meydana gelmektedir. Bir menderes yanal olarak göç eder ve kanal aşağı yukarı sabit bir genişlikte kalmaktadır. Yarma kenarındaki aşınma, kanalın diğer tarafında eşit miktarda çökme ile dengelenmektedir. Bu şekilde oluşan çökel **uç seti** olarak adlandırılmaktadır. Uç setleri çapraz tabakalı kumlar ya da bazı durumlarda çakıllar içermektedir (http://yunus.hacettepe.edu.tr/~kdirik/FJ_13_Akarsular.pdf).



Şekil 2.1 Büyük Menderes Havzası Sarayköy Denizli ve Rio-Cauto Nehri

Menderesler o kadar dolambaçlı bir hal alabilir ki iki komşu menderesi birbirinden ayıran ince boynun taşkın dönemlerinde yarılması kaçınılmaz bir hale gelmektedir. Menderesli ırmakların vadi tabanları genelde hilal şekilli olup aslında yarılmış menderesler olan **boynuz göller** ile belirgin olmaktadır. Bu öküz boynuzu göller, bir süre için göl olarak kalabilir ama sonunda taşkınlarla getirilen ince taneli çökeller ve organik maddelerle doldurulurlar. Doldurulduktan sonra bile taşkın düzlüklerinde görülebilirler. Menderes kesilmesinin anlık etkisi hızda bir artışla kendini gösterir; kesilme sonrasında ırmak eski yatağını terk eder ve daha kısa bir mesafede akar ve böylece eğimini

arttırmaktadır. Çok sayıda kesilmeyle menderesli bir ırmak önemli ölçüde kısalırken, eski menderesler kesildiğinde ırmaklar genellikle başka yerlerde yeni menderesler oluşturmaktadır (http://yunus.hacettepe.edu.tr/~kdirik/FJ_13_Akarsular.pdf).



Şekil 2.2 Menderesli Akarsu ve çökeller (http://yunus.hacettepe.edu.tr/~kdirik/FJ_13_Akarsular.pdf).

2.2 Kıvrımlı Kanallardaki Akım Olayının Mekanizması

Kıvrımlı kanallardaki kıvrım veya eğrilik, düz akarsulara yerleştirilen köprü ayakları tarafından ya da kanal pürüzlülüğünün artmasıyla oluşan akıma benzer şekilde ek bir akıma neden olmaktadır. Akımdaki bu değişim, membada derinlik artmasına ve akım hızının azalmasına sebep olmaktadır. Kabarma etkisi, dış kıyının mansabı yakınlarında, sınır tabakasından ayrılmalarla meydana gelen keskin eğriliklerde daha belirgin olmaktadır.

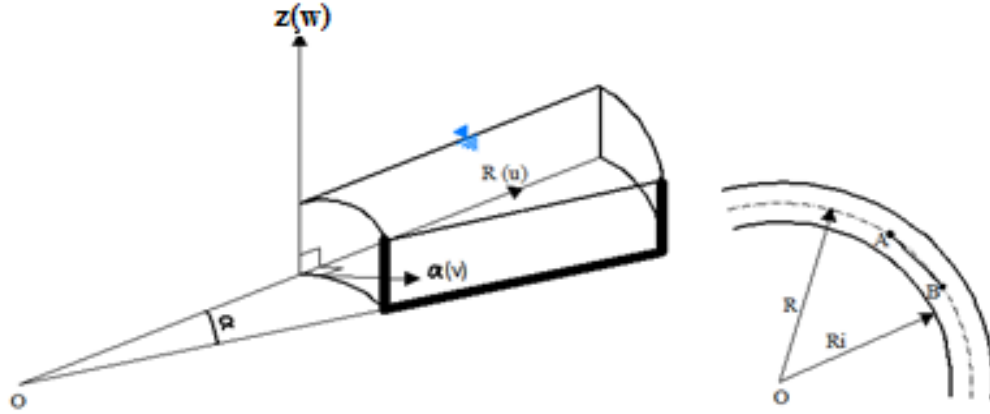
Kıvrım girişinden itibaren mansaba doğru gidildikçe, kıvrımın iç kenarı yakınında serbest yüzeyde ani ve hızlı bir alçalma görülürken, kıvrımın dış kenarında yavaş ve tedrici bir kabarma olduğu deneyler sonucunda görülmüştür. Bu olayın başlıca iki sebebi vardır. Bunlardan birincisi, helikoidal akımdan dolayı dış kıyıda oluşan merkezci kuvvetin dengelenmesi için su yüzeyinin dış kenar civarında kabarmasının gerekmesi, ikincisi ise,

kıvrımın giriş kesiti civarında iç kenar yakınında olduğu gibi akışkanın teğetsel ve taşımsal ivmesinin değişiminden dolayı kinetik ve potansiyel enerjiler arasında bir dönüşüm olayının oluşmasıdır. Suyun, bu hareketi sonucunda aynı düşey kesit içinde biri tabana yakın, diğeri serbest yüzey yakınında olmak üzere aynı biçim ve büyüklükte olan iki elementer sıvı kütlesi dikkate alınır; bu sıvı kütlelerinin momentumlarının birbirinden farklı olduğu görülür. Momentumları farklı olan bu sıvı kütleleri yer değiştirmeye çalışırlar. Öte yandan sürtünmeden dolayı, tabandaki sıvı kütlelerinin hızının serbest yüzeye yakın sıvı kütlelerinin hızından daha küçük olduğu bilinmektedir. Kıvrımlarda merkezkaç kuvvetinin etkisiyle serbest yüzeydeki su kütlesi, kıvrımın dışına itilirken, akarsu tabanındaki sıvı kütlesi de kıvrımın içine doğru hareket etmektedir. Dolayısıyla, akarsu kıvrımlarının en belirgin özelliklerinden biri olan helikoidal akım meydana gelir (Güngör, 1997).

Kıvrımlı kanallardaki akımın en önemli parametrelerinden biri helikoidal akım, diğeri de maksimum hız yörüngesinin hareketidir. **Helikoidal akım**; sürtünme, merkezkaç ve atalet kuvvetlerinin etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Kanal taban yakınlarında akışkan zerreciklerinin hızları, sınır direnci tarafından büyük ölçüde geciktirilmektedir. Taban yakınlarında daha yavaş hareket eden akışkan, merkezkaç ve basınç kuvvetleri arasında bir denge meydana getirmek için daha keskin eğrisel bir yörüngeyi izlemek zorunda kalır. Yüzeydeki akışkan zerreciklerinin yörüngeleri, büyük hızların sebep olduğu daha büyük ataletten dolayı kanal tabanına doğru olmaktadır. Akışkan kütlelerinin sürekliliğini sürdürebilmesi için, su dış kıyıda tabana doğru hareket ederken, iç kıyıda da tabandan yukarı doğru hareket etmektedir. Böylece, teğetsel hız bileşenine ilave olarak kanal eksenine dik radyal hız bileşeni meydana gelmektedir. Oluşan radyal hız bileşeni de kanal enkesiti boyunca **sekonder akımı** oluşturmaktadır (Ağaçcıoğlu, 1995).

Doğrusal bir kanalda maksimum hız kanal ekseni civarındadır ve su yüzeyine yakındır. 180°'lik kıvrımlı bir kanalda ise, maksimum hız yörüngesi normalinden saparak önce iç kıyıya doğru yönelir. $\alpha=45^\circ$ 'den sonra dış kıyıya doğru yönelerek, $\alpha=60^\circ$ civarında dış kıyıya yerleşmeye başlar. Dış kıyıya yerleşen maksimum hız yörüngesi $\alpha=120^\circ$ 'den sonra tekrar kanal eksenine yönelerek, kıvrım çıkışında kanal eksenine yakın görülür (Ağaçcıoğlu, 1995).

Şekil 2.3'te kıvrımlı kanallardaki akım silindirik koordinatlarla gösterilmiştir.

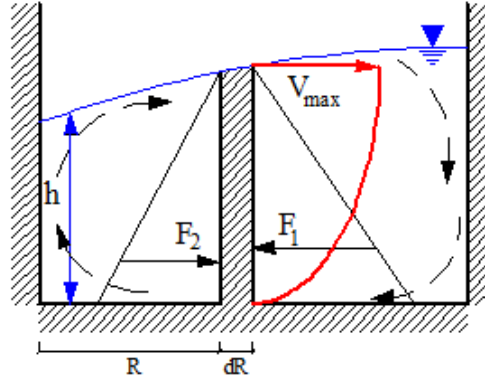


Şekil 2.3 Akarsu kıvrımlarındaki akışkan parçacığının hareketi ve silindirik koordinat sistemi gösterimi (Güngör, 1997)

Burada V =akışkan parçacığının akım doğrultusunda sahip olduğu hız, R =kıvrımın eğrilik yarıçapını ifade eder. Akışkan parçacığının, akım eksenı boyunca A noktasından B noktasına hareket ettiğinde a ivmesiyle vardığı düşünülürse, kanal kıvrımında, akışkan parçacığına etki ettiği düşünülen F kuvveti için,

$$F = \rho \cdot dR \cdot dz \cdot R \cdot d\alpha \cdot \frac{V^2}{R} \quad (2.1)$$

ifadesi yazılabilir. (2.1) bağıntısındaki ρ , akışkanın yoğunluğu, $\frac{V^2}{R}$, açısal ivme, $dR \cdot dz \cdot R \cdot d\alpha$ ise, akışkan parçacığının hacmidir. Parçacığa etki eden F kuvveti, su seviyesinin enine eğiminin bir sonucudur. Dış kıyıya doğru oluşan bu kuvvetin dengelenmesi için, su yüzeyi dış kıyıya doğru kabarıp (Şekil 2.4). Kanal kıvrımında akım iki boyutlu kabul edilirse, örneğin, akım hızı düşeyde sabit kabul edilirse, $\frac{\partial V}{\partial z} = 0$ aşağıdaki çözüm bulunabilir.



Şekil 2.4 Kıvrımlı bir kanalda enine su yüzü profili (Güngör, 1997)

$$\rho \cdot g \cdot dR \cdot dz \cdot R \cdot d\alpha = \rho \cdot dR \cdot dz \cdot R \cdot d\alpha \cdot \frac{V^2}{R} \quad (2.2)$$

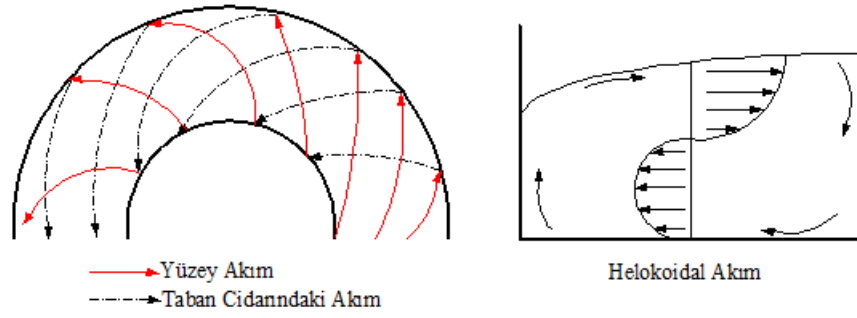
buradan,

$$I_R = \frac{\partial h}{\partial R} = \frac{V^2}{gR} \quad (2.3)$$

bulunur. Düşey doğrultudaki hız ilave edilirse, gerçek hızla hesaplandığı için, sürtünme etkisi de eklenmiş olur. Bu durumda, akımın yüzeyindeki hız, tabandaki hızdan daha büyüktür. Öte yandan, kanal kıvrımlarında enine eğimin etkisiyle her bir akışkan parçacığının su yüzeyinde ve kanal tabanındaki hızı farklı olduğundan, $\frac{V^2}{gR}$ 'nin değeri değişmektedir. Bu değişim χ ile gösterilir ve düşeyde ortalama hız değeri alınır, su yüzeyinde $\chi < \frac{V^2}{gR}$ taban yakınında ise, $\chi > \frac{V^2}{gR}$ olur.

Bu sebeple, su yüzeyi civarındaki akışkan parçacıkları dış kıyıya doğru, buna karşı taban civarındaki akışkan parçacıkları ise, iç kıyıya doğru hareket ederler. Bundan dolayı da Şekil 2.5'te görüldüğü gibi kanal kıvrımlarında helikoidal ve spiral akım meydana gelir.

Helikoidal akım, kanal eksenı boyunca ilerleyen esas akımla enkesit içindeki çevrimin birleşimidir.



Şekil 2.5 Kanal kıvrımındaki helikoidal akım (Güngör, 1997)

Vries (1989)'e göre, kanal kıvrımında su yüzeyi, akım eksenine dik bir eğime sahiptir. Kıvrımdaki bir enkesitte, kanalın her iki kenarı arasındaki seviye farkı ΔH , (2.4) bağıntısıyla hesaplanabilir.

$$\Delta H \cong \frac{V^2 \cdot B}{g \cdot \left(R_i + \frac{b}{2}\right)} \quad (2.4)$$

burada, R_i , kanal kıvrımı iç kenarının eğrilik yarıçapı, B , kanal taban genişliği ve V ise, akım yönünde hız bileşenidir. Helikoidal akımı da tanımladıktan sonra artık kanal tabanındaki τ , kayma gerilmesinin, doğrultusunu ve şiddetini göz önüne almak mümkündür. Kanal tabanındaki τ , kayma gerilmesi, kanal tabanı morfolojisi için oldukça önemlidir. Kayma gerilmesinin iki bileşeni vardır. Esas akım yönündeki kayma gerilmesi bileşeni, τ_{sb} radyal doğrultudaki ise, τ_{Rb} olsun. Bu bileşenler şöyle ifade edilebilirler.

$$\tau_{sb} = \rho \cdot g \cdot h \cdot I = \frac{V^2}{C^2} \rho \cdot g \quad (2.5)$$

$$\tau_{Rb} = \rho \cdot g \cdot h \cdot \frac{V^2}{gR} \cdot \beta \quad (2.6)$$

b indisi, taban yakınındaki seviyeyi gösterir. Yüksel (1987), Rozowski (1967) tarafından aşağıdaki bağıntının verildiğini bildirmektedir.

$$\tau_{Rb} = \rho \cdot g \cdot h \cdot \frac{V^2}{gR} \cdot 2\beta \quad (2.7)$$

burada β , Von-Karman ve C , Chezy sabitlerine bağılı bir parametredir. Toplam taban kayma gerilmesinin akım yönüyle yaptığı açı δ olmak üzere, radyal yöndeki taban kayma gerilmesi bileşeni ile akım yönündeki taban kayma gerilmesi bileşeni arasında, $\tan\delta = \frac{\tau_{Rb}}{\tau_{sb}}$ yazılırsa (2.8) bağıntısı elde edilir.

$$\tan\delta = \frac{2\beta \cdot \rho \cdot g \cdot h \bar{V}^2 / gR}{\rho \cdot g \cdot \bar{V}^2 / C^2} = \xi \frac{h}{R} \quad (2.8)$$

$\xi = 2\beta \frac{C^2}{g}$ Büyük C değerlerinde ve $\kappa = 0,4$ için $\xi = 10$ Bu sebeple, (2.8) ifadesi, (2.9)'daki gibi yazılabilir.

$$\tau_{Rb} = 10\rho \cdot g \cdot h \cdot \frac{h}{R} \quad (2.9)$$

Bir akarsu kıvrımındaki ana akımın enine dağılıma şöylece açıklanabilir (Güngör, 1997).

1. Kanalin kıvrım bölgesine yaklaşıldıkça akım, akım çizgisinin eğriliğini tedrici olarak arttırmaya çalışan memba tarafındaki basınç yükünün etkisiyle karşılaşır.
2. Kıvrıma girişte, akım çizgisinin eğriliği, kıvrımın iç kısmında akımın hızlanmasına yol açan enine ve boyuna basınç gradyanlarına sahiptir.
3. Kıvrıma girişten sonra akım tedrici olarak üniform olmayan derinlik dağılımına kendisini uydurmaya çalışır, V 'nin enine dağılımının dış kıyıya doğru sapmasına neden olur.
4. V 'nin enine dağılımının dış kıyıya doğru sapması, sekonder akımın düşey bileşeninin konvektif (taşımalsal) ivme etkisini arttırmaya çalışır.
5. Kıvrım çıkışına yakın kısımda, akım çizgisinin eğriliği tedrici olarak azalır.
6. Enine doğrultuda basınç gradyanındaki değişim kıvrımın iç kısmında akımı yavaşlatacak, dış kısmında ise hızlandıracak olan boyuna basınç gradyanlarına sebep olur Bu da kıvrım çıkışına yakın bölgede V 'nin enine dağılımında, dışarıya doğru olan daha fazla çarpılmaya sapmaya sebep olur.
7. Kıvrımın dışında bu değişiklikler tedricen kendisini taban topografyasına uydurur (De Vriend ve Struiksma, 1983).

Kıvrımlı kanallarda akım, doğrusal üniform akımlı bir kanaldan oldukça farklıdır. Kıvrım boyunca akım kesitten kesite değişmektedir. Boyuna kütle transferine göre küçük olsa da, kıvrımda enine kütle transferi de etkilidir.

Şekil 2.6'da Yeh ve Kennedy (1993), sabit tabanlı ve sabit yarıçaplı düz bir kanalda akım ve hız dağılım profillerini vermişlerdir. $h/R \ll 1$ olan uzun bir kıvrımdaki kararlı ve sıkıştırılmaz akım için silindirik koordinatlarda hareket ve süreklilik denklemlerini aşağıdaki şekilde belirtmişlerdir.

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_r + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\sigma_{rr})}{\partial r} - \frac{\sigma_{\theta\theta}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z} \quad (2.10)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{uv}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_\theta + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2\tau_{r\theta})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial\tau_{\theta z}}{\partial z} \quad (2.11)$$

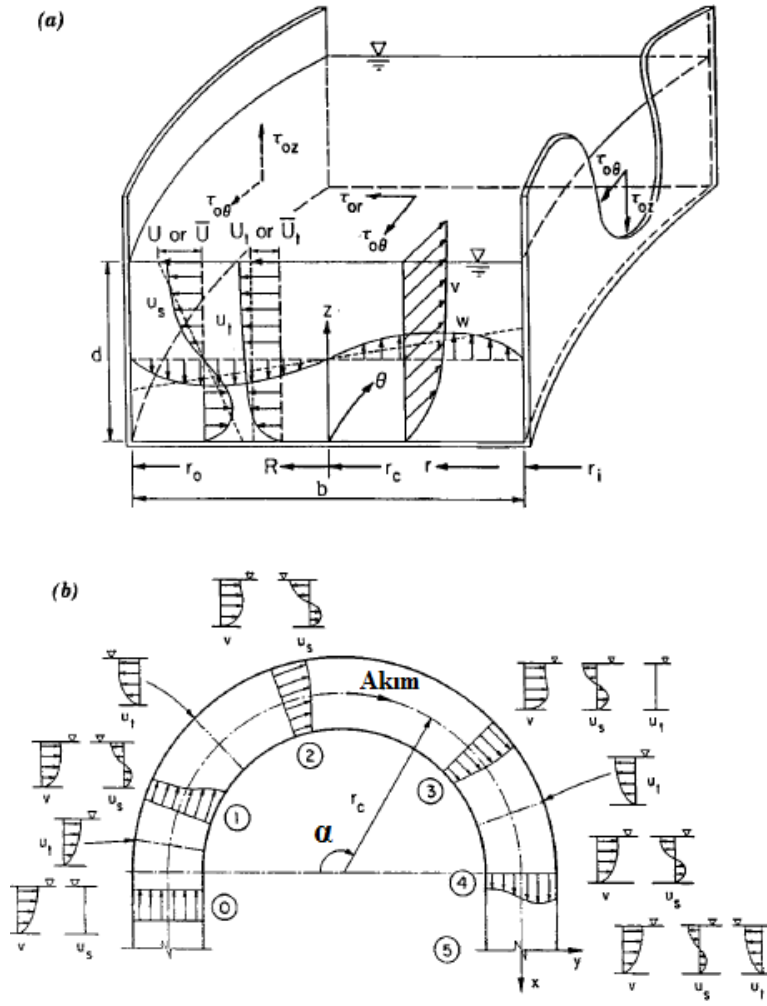
$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.13)$$

burada, ρ , akışkanın özgül kütlesi; (u,v,w) : sırasıyla r , θ ve z yönündeki hız bileşenleri; $\rho, g_{r,\theta,z}$, koordinat yönlerindeki özgül ağırlık bileşenleri; $\sigma_{ii} = -p + \tau_{ii}$, normal gerilme; p , basınç; τ_{ij} , kayma gerilmesidir.

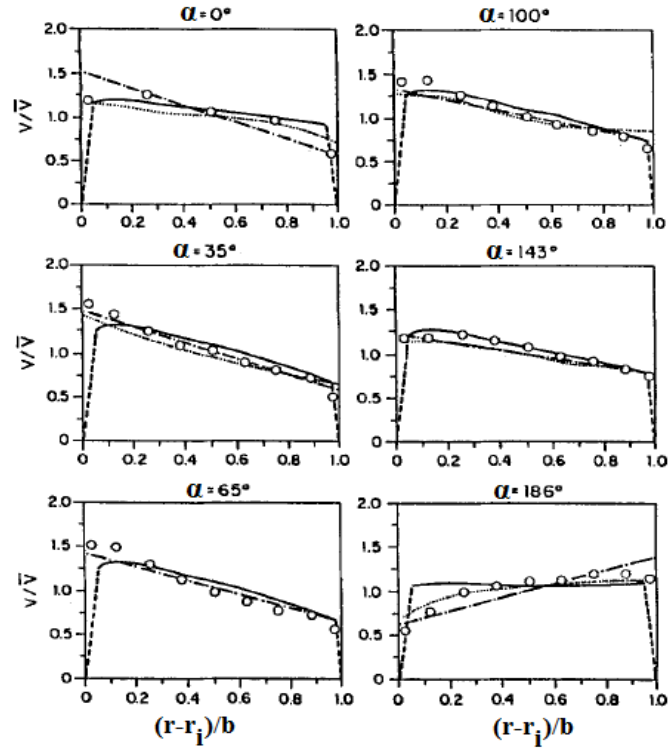
Esas akım hızı $U(r, \theta, z)$, düşeyde üniform olarak dağılmamaktadır. Yeh ve Kennedy (1993), verdikleri bağıntılar için şunları kabul etmişlerdir:

Sabit taban durumunda esas akım hızı üssel, $\bar{U}_t$ sekonder geçiş hızı kanal enkesiti boyunca üniform, u_s , sekonder çevrinti hızı, hem sabit taban, hem de hareketli taban durumunda lineer, w , düşey hız bileşeni ise, düşeyde lineer olarak dağılmaktadır (Şekil 2.6). Ayrıca, basınç dağılımı da hidrostatiktir.



Şekil 2.6 Kıvrımlı kanalda akım (Radyal düzlemde hız profillerinin gösterimi; Kesik çizgili profiller basitleştirmiş integral formülasyonunu temsil etmektedir.) (Yeh ve Kennedy,1993)

Yeh ve Kennedy (1993), yaptıkları çalışmanın sonucunda, kıvrım boyunca $V(r, \theta)$ dağılımını ve taban kayma gerilmesinin, radyal yöndeki bileşeninin akım yönündeki bileşenine oranı ile radyal yönde ortalama hızın, akım yönündeki ortalama hıza oranının lineer olarak arttığını tespit etmişlerdir. Yeh ve Kennedy (1993), keskin bir kıvrımda $\left(\frac{r}{B} = 1\right)$ yaptıkları bu model çalışmanın sonunda, 180° 'lik kıvrım boyunca $V/\bar{V}$ hız dağılımı için, kendi deneysel ve teorik sonuçlarıyla, Leschziner ve Rodi (1979) ve Johannessson (1988)'in çalışmalarını grafikte karşılaştırarak sonuçların kıvrım uzunluğunun büyük bir çoğunluğunda uyum içinde olduğunu göstermişlerdir. Şekil 2.7'de de görüldüğü gibi maksimum hız kıvrımın sonuna yaklaşıncaya kadar iç duvara yakın oluşmaktadır. Kanal kıvrımlarının girişinden sonra, sekonder akımın etkisiyle enine momentumdan dolayı genellikle maksimum esas akım hızı, iç kıyıdan dış kıyıya doğru yer değiştirir.



Şekil 2.7 Kanal kıvrımında $V/\bar{V}$ Hız dağılımı: Ölçülen (o) ve hesaplanan (—), Leschziner ve Rodi (1979) (---), Johannesson (1988) (.....)'in Çalışmaları (Yeh ve Kennedy, 1993)

3. KÖPRÜ AYAKLARINDA OYULMA

3.1 Oyulma Tipleri

Oyulma olayı üç grupta sınıflandırılmaktadır;

- (1) Genel Oyulma
- (2) Daralma Oyulması
- (3) Yerel Oyulma şeklindedir.

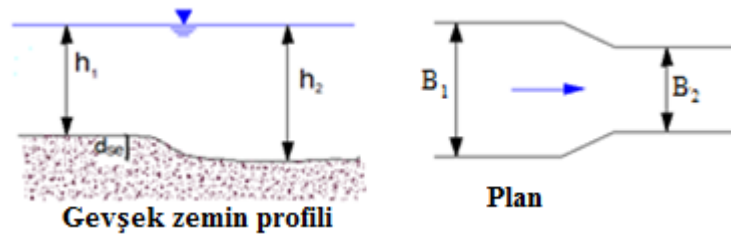
3.1.1 Genel oyulma durumu

Genel oyulma olayı doğal ya da insanlar tarafından yatak malzemesinin tümünün kaldırılması ile oluşmaktadır.

3.1.2 Daralma oyulması durumu

Daralma oyulması ise akarsu kesitinin daralmasından ya da doğal olarak akımın ivmelenmesinden oluşmaktadır.

Köprü geçişlerindeki kesit daralmaları gevşek zeminlerde oyulmaya sebep olurlar. Geniş taşkın yataklı akarsularda yaklaşım dolgularının boyu fazla olabilir, hatta ana kanala kadar uzayabilir. Bu durumda, aşırı daralma nedeniyle ana kanaldaki hızlar ve dolayısıyla kayma gerilmeleri çok artar. Bu halde tabanda önemli oyulmalar oluşur. Oyulmanın mertebesi $\beta = B_1/B_2$ şeklinde tanımlanan bir daralma katsayısına bağlıdır. Burada B_1 ve B_2 sırasıyla yaklaşım kesitindeki ve daralmış kesitteki ortalama kanal genişlikleridir. Daralma oyulması Şekil 3.1’de sunulmaktadır. Bu şekilde h_1 , ve h_2 yaklaşım ve daralma kesitlerindeki akım derinlikleridir (Yanmaz, 2002).



Şekil 3.1 Daralma oyulması

Literatürde sunulan daralma oyulması bağıntılarından bazıları aşağıda verilmektedir. Laursen (1962) tarafından sunulan ve Richardson ve Davis (1995) tarafından düzenlenen hareketli taban oyulması denklemi şöyledir;

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{6/7} \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{k_1} \quad (3.1)$$

Hız yükleri ihmal edilirse daralma oyulması, d_{sc} , yaklaşık olarak $d_{sc} = h_2 - h_1$ ifadesiyle hesaplanabilir. Burada Q_1 membadaki toplam debi, Q_2 daralmış kesitteki debi, B_1 membadaki taban genişliği, B_2 daralmış kesitteki ayak kalınlıkları çıkarılmış net taban genişliğidir.

Düzeltilmiş Laursen (Richardson ve Davis, 1995) temiz su oyulması denklemi şöyle verilmiştir:

$$h_2 = \left(\frac{0.0235Q^2}{d_{50}^{2/3} B^2}\right) \quad (3.2)$$

burada $d_{se} = h_2 - h_1$, h_2 ; daralmış kesitteki denge oyulması sonunda oluşan yeni su derinliği (m), h_1 ; daralmış kesitteki oyulma öncesi su derinliği (m), Q; köprü açıklığındaki metre cinsinden net genişlik, B; değerinden geçen debi (m^3/s), d_{50} ; tane medyan çapıdır (m). Komura (1966) temiz su oyulması için Eşitlik (3.3), hareketli taban oyulması için Eşitlik (3.4)'ü önermiştir:

$$\frac{h_2}{h_1} = 1.6F_{r1}^{0.2}\beta^{0.67}\sigma_g^{-0.5} \quad (3.3)$$

$$\frac{h_2}{h_1} = 1.45F_{r1}^{0.2}\beta^{0.67}\sigma_g^{-0.5} \quad (3.4)$$

burada σ_g , taban malzemesi tane dağılımının geometrik standart sapması $(d_{84.1}/d_{15.9})^{0.5}$, F_{r1} ise yaklaşım kesitindeki Froude sayısıdır. Gill (1981); temiz su oyulması için Eşitlik (3.5), hareketli taban oyulması için ise Eşitlik (3.6)'yı önermiştir.

$$\frac{h_2}{h_1} = \beta^{6/7} \left(\frac{\tau_c}{\tau_1}\right)^{-3/7} \quad (3.5)$$

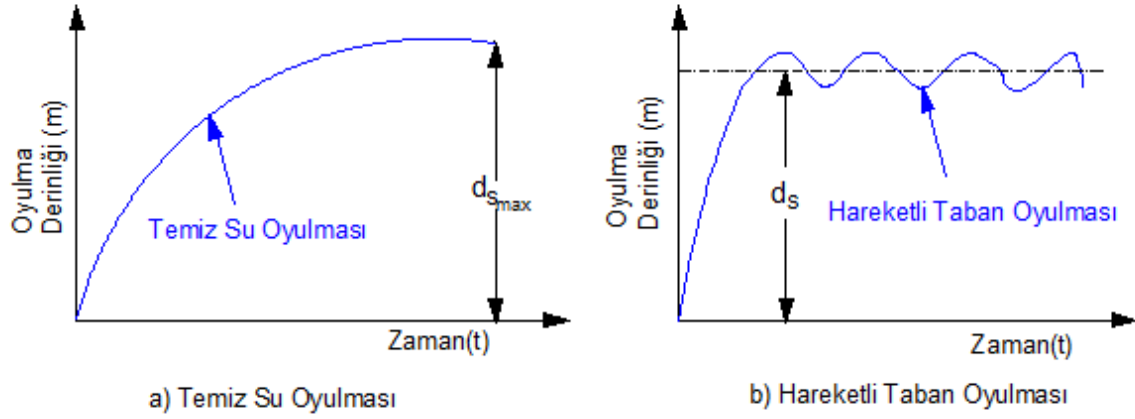
$$\frac{h_2}{h_1} = \beta^{6/7} \left[\beta^{1/m} \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_1} \right) + \frac{\tau_c}{\tau_1} \right]^{-3/7} \quad (3.6)$$

burada τ_c , taban malzemesinin kritik kayma gerilmesi değeri, τ_1 , yaklaşım kesitindeki taban kayma gerilmesi ve m , bir üstür. Einstein-Brown (Brown,1950) sürüntü yükü bağıntısına göre $m=3$ alınmaktadır.

3.1.3 Yerel oyulma durumu

Alüvyonlu akarsularda akım rejimine, malzeme cinsine, akarsu kesit özellikleri ve güzergâhına ve akarsu kullanımına bağlı olarak tabanda oyulmalar veya yığılmalar oluşmaktadır (Yanmaz, 2002).

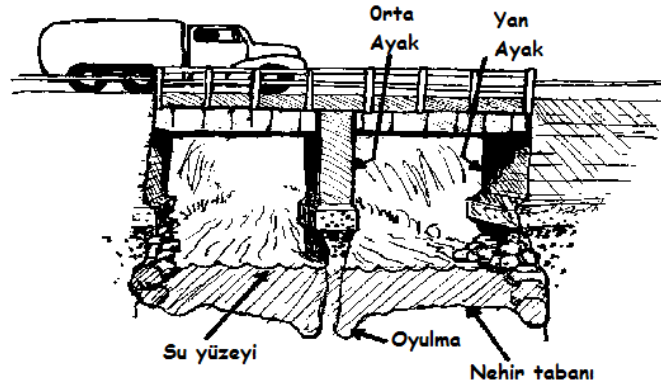
Membadan sürüntü yükü taşınıp taşınmadığına bağlı olarak alüvyonlu bir akarsuda başlıca iki tip oyulma oluşmaktadır. Akım koşulları tabanda kritik kayma gerilmesini aşmayan gerilmeler yaratıyorsa membada sürüntü hareketi başlamamıştır. Akarsu tabanında sürüntü hareketi başlamamıştır ancak oyulma vardır. Bu durumda akarsu yapısındaki oyulmaya “**temiz su oyulması**” (clear-water scour) denilir. Temiz su oyulmasında oyulmanın mertebesi, oluşan oyulma çukuru içindeki akım özelliklerine bağlıdır. Oyulma çukurundaki akım, ayak geometrisinden ve akımın ataletinden etkilenir. Temiz su oyulmasında, oyulma derinliği yavaş yavaş artar ve asimptotik bir değere yaklaşır ki o zaman oyulma çukurundan sediment taşıma kapasitesi sıfırdır. O anda elde edilen oyulma derinliği “**denge oyulma derinliği**” (equilibrium scour depth) olarak adlandırılır. Temiz su durumunda, denge oyulma derinliğine genellikle uzun bir süre içinde ulaşılır. Akım şiddeti artığında membadaki taban kayma gerilmesi taban malzemesinin karşı koyacağı kritik kayma gerilmesi değerini aşıyorsa, membadan itibaren akım yönünde sediment hareketi başlar. Bu hareket, çevrinti etkisiyle oluşan oyulma çukurundaki akımla birleşecektir. Dolayısıyla, oyulma çukurunun gelişimi sadece çukur içindeki akım özelliklerine değil, aynı zamanda membadaki akım koşullarına da bağlı olacaktır. Bu oyulma tipi “**hareketli taban oyulması**”(live bed scour) olarak adlandırılır. Oyulma derinliği zamanla hızla artar, oyulma çukurundan dışarı çıkan sediment miktarı oyulma çukuruna giren miktara eşit olduğu zaman başlangıçta maksimum bir değere ulaşır ve denge oyulma derinliği olarak bilinen ortalama bir değerde yaklaşık olarak dalgalanır (Yanmaz, 2002).



Şekil 3.2 Oyulma derinliğinin değişimi

Bu denge durumunun çok kısa zamanda hareketli taban akımı durumuna ulaştığı şekil 3.1’de görülmektedir (Graf,1996). Maksimum temiz su oyulması durumundaki denge oyulma derinliği hareketli taban oyulmasından yaklaşık yüzde on daha büyüktür.

3.2. Köprü ayağındaki oyulma süreci



Köprü yan ve orta ayağı etrafındaki oyulma mekanizması ve akım şekli, aşınabilir yatak malzemesi ve köprü temeli etrafındaki türbülanslı akım alanının üç boyutlu güçlü etkileşiminden kaynaklanan karmaşık bir olaydır. Akım alanına yerleştirilen köprü ayağı, akım alanında önemli değişikliklere sebep olur. Köprü ayağının meydana getirdiği olaylar şöyle sıralanabilir (Zengin, 2010);

- Ayaktan dolayı akım çizgilerinde meydana gelen sapmalar ve bunun neticesinde de ayak etrafındaki hız ve basınç alanında önemli değişiklikler,
- Ayak etrafında sınır tabakasının oluşması, hız ve basınç alanındaki değişikliklerden dolayı sınır tabakasından ayrılımlar,

$$u_r = -u_0 \left(1 - \left(\frac{r_1}{r}\right)^2\right) \cos \theta \quad (3.7)$$

$$u_\theta = u_0 \left(1 + \left(\frac{r_1}{r}\right)^2\right) \sin \theta \quad (3.8)$$

Burada, u_θ , membada daralmamış kesitteki hız, r_1 silindirin yarıçapı, r radyal koordinat, θ açısal koordinatı ifade etmektedir.

Toplam hız ise,

$$u_1 = \sqrt{u_r^2 + u_\theta^2} \quad (3.9)$$

Denklem (3.7) ve (3.8), denklem (3.9)'da yerine konulursa;

$$u_1 = \left[u_0^2 \left(1 - 2 \left(\frac{r_1}{r}\right)^2 + \left(\frac{r_1}{r}\right)^4\right) \cos^2 \theta + u_0^2 \left(1 + 2 \left(\frac{r_1}{r}\right)^2 + \left(\frac{r_1}{r}\right)^4\right) \sin^2 \theta \right]^{1/2} \dots (3.10)$$

$$u_1 = u_0 \left[1 - 2 \left(\frac{r_1}{r}\right)^2 \cos 2\theta + \left(\frac{r_1}{r}\right)^4 \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

elde edilir.

3.2.2 Köprü ayağının basınç dağılımına etkisi

Hız alanında meydana gelen değişmelere paralel olarak, basınç alanında da önemli değişimler görülür. Şekil 3.3'te 0 ve 1 numaralı kesitler arasında yük kaybını ihmal ederek enerji denklemi yazılırsa;

$$\frac{p_0}{\gamma} + \frac{u_0^2}{2g} + z_0 = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} + z_1 \quad (3.12)$$

burada z_0 ve z_1 taban seviyeleridir. Birbirine yakın kesitler arasındaki taban seviyeleri farkı ihmal edilirse,

$$\frac{p_1 - p_0}{\gamma} = \frac{1}{2g} (u_0^2 - u_1^2) \quad (3.13)$$

eşitliği elde edilir. Silindir yüzeyinde $r=r_1$ olduğundan, Eşitlik (3.7) ve (3.8.)'den $u_\theta=2u_0\sin\theta$ bulunur. Dolayısıyla $u_1= u_\theta$ olmaktadır. Engel etrafındaki basınç dağılımı ise, akımın sıkışmaz ve viskozitesiz bir potansiyel bir akım olduğu kabulü ile,

$$p_1 - p_0 = \frac{\rho u_0^2}{2} (1 - 4\sin^2\theta) \quad (3.14)$$

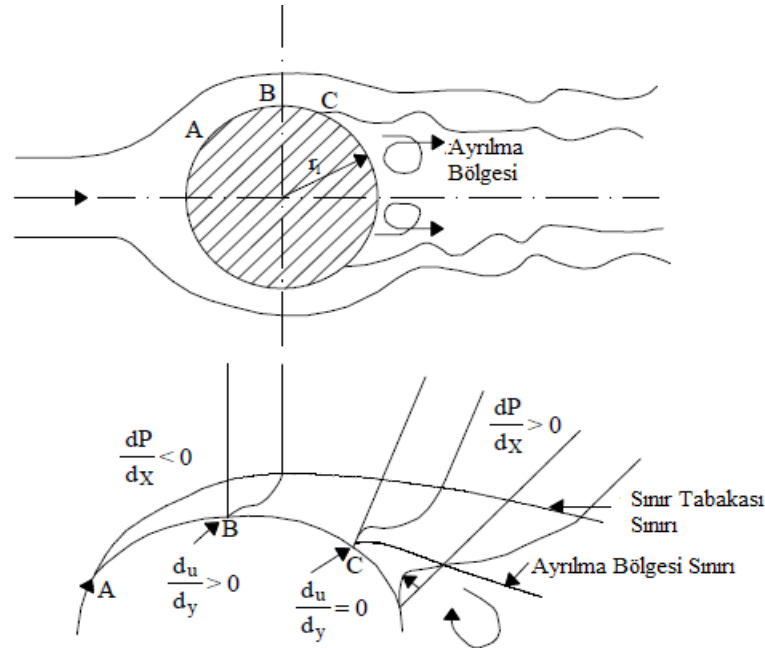
ifadesi elde edilir.

Köprü ayağının memba yüzünde $\theta=0^\circ$ olduğu için Eşitlik (3.14) şöyle olur:

$$p_1 = p_0 + \frac{\rho u_0^2}{2} \quad (3.15)$$

Formülден anlaşıldığı gibi, köprü ayağının membaındaki basınç membaındaki 0 numaralı kesitteki basınçtan daha fazladır. Bunun neticesinde su yüzeyinde kabarma meydana gelmektedir. Burada $\rho u_0^2/2$ dinamik basınçtır. Basınç artması sebebiyle orta ve kenar ayakların memba yüzü su seviyelerinde 0 numaralı kesitin hız yükü kadar bir artma görülür.

Köprü ayağında meydana gelen basınç dağılımını daha iyi anlayabilmek için şekil 3.4 verilmiştir.



Şekil 3.4 Köprü ayağı etrafında akımın ayrılması ve basınç gradyanının değişimi (Yanmaz, 2002).

Bu şekilde görüldüğü üzere A noktasından B noktasına kadar kesit daralması sebebiyle hız artar ve Bernoulli prensibine göre basınç azalır. B noktasından sonra ise tam tersi kesit genişlemekte basıncın arttığı ve hızın azaldığı görülmektedir. B noktasından sonra basınç artışı sebebiyle bu sınır tabakası içindeki bir taneye etki eden sürtünme kuvvetlerine ek olarak artan basınçtan dolayı bu bölgede tanenin hareketi zorlaşmaktadır. Bu durumda C noktasından sonra sınır tabakasındaki akışkanın bir kısmı esas akım doğrultusuna zıt doğrultuda bir akım meydana getirecektir. Yüzeyden uzaklaştıkça sürtünme etkisi azalacağından sınır tabakası içindeki ikinci ayrılma sınırının üzerindeki akım genel akımla aynı yönde olacaktır. Türbülanslı yüksek akımlarda akım hızı ile kinetik enerji doğru orantılı olarak artacağından; A ve C noktalarında oluşan birincil ve ikincil ayrılmalar düşük türbülanslı akımlara göre daha mansapta oluşacaktır. Sınır tabakasının kalınlığı ve şekli ayak geometrisine bağlıdır. Küt burunlu ayaklarda ayrılma daha belirgin, hem yerel yük kaybı daha fazla, hem de ayrılma bölgesinde oluşan çevrıntiler artacağından akım alanı daha fazla rahatsız olacaktır. Bundan dolayı eğriliği fazla olan ayak geometrisinden kaçınmak gerekmektedir. (Yanmaz, 2002).

Hjorth (1975), engel etrafında oluşan basıncın değişimini incelemek amacı ile yaptığı deneysel çalışma sonucunda, engel etrafındaki basıncın değişimini C_p cinsinden ölçmüştür. Burada, C_p boyutsuz basınç katsayısı olup,

$$C_p = \frac{p_1 - p_0}{\frac{\rho u_0^2}{2}} \quad (3.16)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

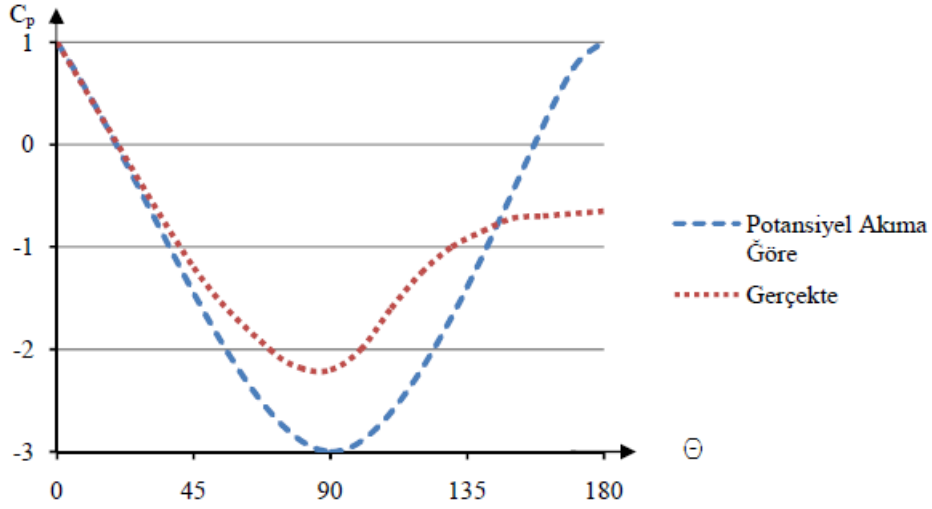
burada;

p_1 : Engel durgunluk düzlemindeki bir noktanın statik basıncı,

p_0 : Engelden yeter uzaklıktaki bir noktanın basıncı,

u_0 : Yaklaşım hızı ve

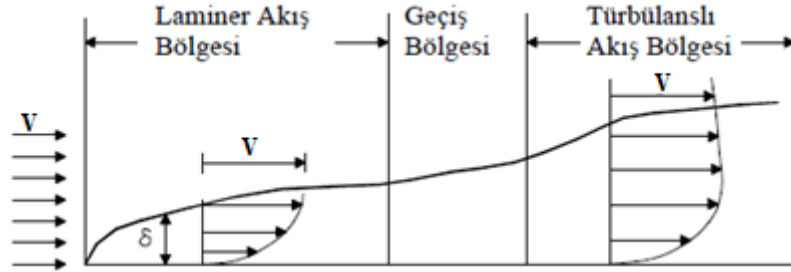
$\frac{\rho V^2}{2}$: Dinamik basıncı ifade etmektedir.



Şekil 3.5 C_p basınç katsayısının dağılımı (Zengin, 2010)

3.2.3. Sınır tabakasının oluşumu ve sınır tabakasından ayrılmalar

Akışkan hızının, cidardan itibaren sürtünme etkisinin ihmal edildiği dış akım hızına %1 kadar yaklaştığı bölgeye sınır tabakası adı verilir. Sınır tabakaları akım içindeki oluşum özelliklerine göre şekil 3.6'da gösterilmiştir.

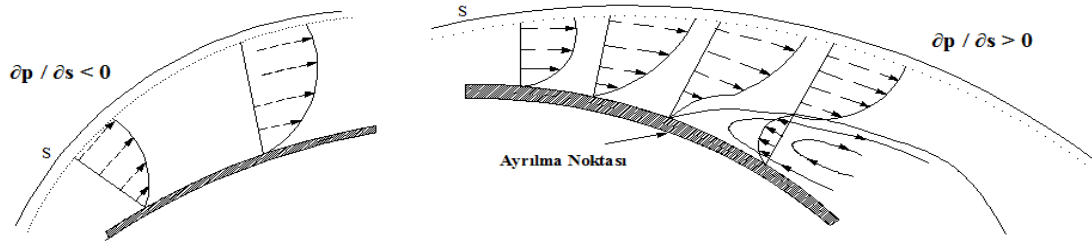


Şekil 3.6 Sınır tabaka bölgeleri ve hız dağılımları

Sınır tabakası dışında ideal kabul edilen akışkanın hareket yönünde basınç gradyeninin artması, sınır tabakası içindeki akışkan partiküllerinin bu ters basınç gradyenine karşı hareket ederken kinetik enerjilerinin büyük bir bölümünü kaybetmesine sebep olur. Bu ters basınç gradyeninin tesirleri artık sınır tabakası içindeki partiküller tarafından belirli bir yerden itibaren yenilenemez. Bu noktada yavaşlama başlar ve ardında da ayrılma oluşur. Bu duruma sınır tabakasının ayrılması denilir (Zengin, 2010).

Sınır tabakasından ayrılma olayı, yüksek basınç artımı oluşturan küt burunlu engellerde veya sivri burunlu olmasına rağmen akım doğrultusuna paralel yerleştirilmemiş engellerde meydana gelir. Bunun sebebi, engelin bütün yüzeyi üzerinde, sınır tabakasının bağlanması

mümkün olmadığı gibi, engelin arka kısmında dış akım önemli derecede gecikmeye uğrar. Bu ise sınır tabakasının sürekliliği ile uyuşmayan bir özelliktir. Şekil 3.7’de sınır tabakasındaki hız dağılımı ve ayrılma noktası verilmiştir (Üç, 1988).

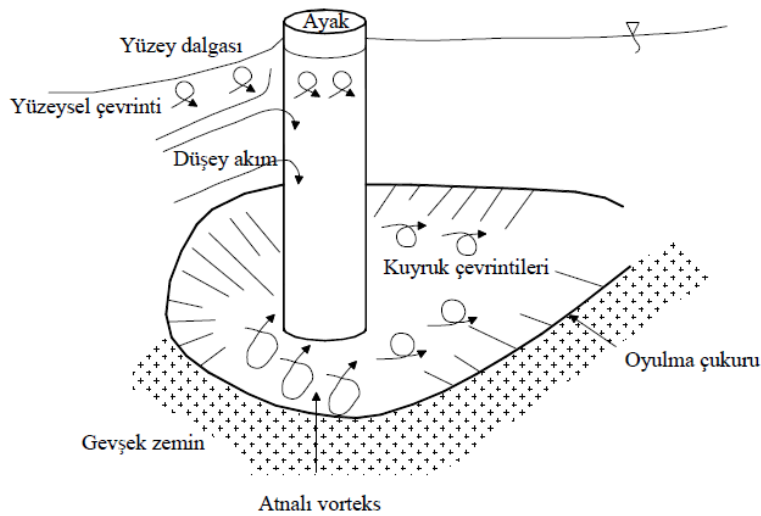


Şekil 3.7 Engel boyunca hız dağılımları ve sınır tabakasının ayrılması (Güngör, 1997)

3.2.4 Akıma yerleştirilen engel etrafında oluşan vorteks sistemler

Akım içine yerleştirilen köprü ayağı etrafında vorteksler oluşmaktadır. Vorteksler, engelin etkisiyle sınır tabakası içinde oluşan ters basıncın bir sonucu olarak meydana gelirler. Engelin membaındaki akımın düşey bileşenini etkiler ve hız alanını enlemesine kesen çevrintiler meydana getirirler. Bu çevrintiler sonucunda engel etrafında oyulma oluşmaktadır. Engel etrafında oluşan bu vorteks sistemler, esas itibariyle üç ayrı biçimdedirler (Zengin, 2010).

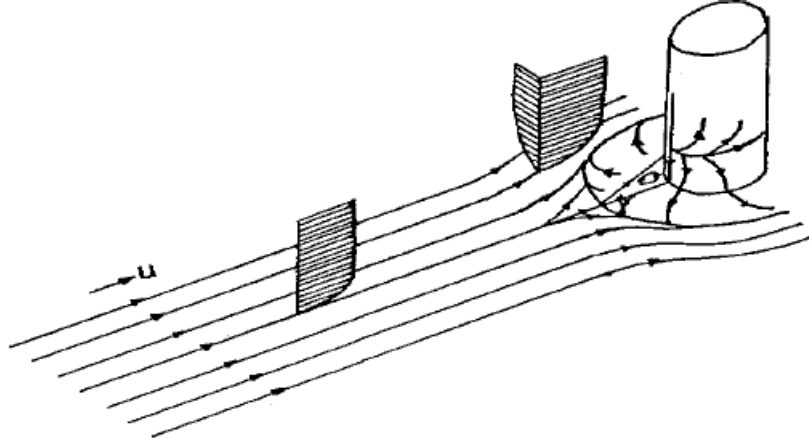
- Sürüklenen vorteks sistem,
- Atmalı vorteks sistem,
- Art - iz (izli) vorteks sistem, oluşmaktadır.



Şekil 3.8 Bir köprü ayağı etrafındaki çevrintiler ve oyulma çukuru (Yanmaz, 2002)

a) Sürüklenen vorteks sistemi

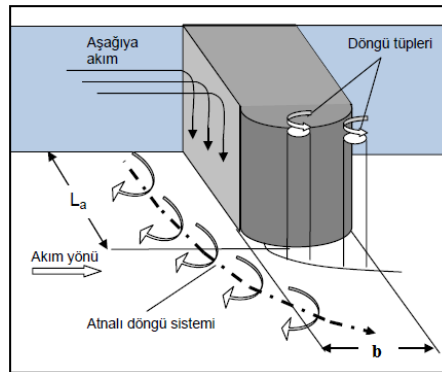
Sürüklenen vorteks sistemler, aynı köşede birleşen yüzeyler arasında sonlu basınç farkları olan durumlarda meydana gelmektedir. Engelin durgunluk düzlemi ile kanal tabanının birleştiği yerde, kabarmadan dolayı oluşan yüksek basınç gradyanları bu vortekslerin oluşmasına neden olur. Genellikle, tamamen batık engellerde meydana gelir.



Şekil 3.9 Sürüklenen vorteks sistemi (Zengin, 2010)

b) Atnalı vorteks sistem

Engelin membaında oluşan aşağı yönlü düşey hız bileşeninin tabana vardığında yansıyarak sapmaktadır. Yön değiştiren bu hızın bileşenlerinin bir bölümü sürüklenen vorteks sistemini oluştururken, diğer bir bölümü de tekrar yükselerek hareketlerine devam eder. Bu olayların sonucu olarak engelin tabanı yakınında oluşan bu çevrinti hareketine *atnalı vorteks sistemi* denilir. Bu hareketin hızları ile genel hareketin hızları birleşerek *helikoidal hareketi* meydana getirirler (Zengin, 2010).

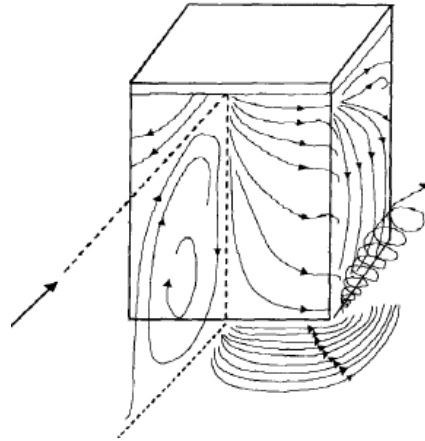


Şekil 3.10 Atnalı vorteks sistem (Göğüş ve Köken, 2011)

Atnalı vorteks sistemlerin oluşması için yeterli büyüklükte bir basınç değişiminin olması gerekmektedir. Sadece küt burunlu ayaklarda sınır tabakasından ayrılmalar olduğunda yeterli büyüklükte basınç değişimi oluşur. Diğer ayaklar sivri burunlu olarak tarif edilir ve bu ayaklar etrafında da vorteks oluşmaktadır. Ancak ayağın etrafında yeterli büyüklükte basınç değişimi sağlanmadığı için hiçbir vorteks sistem oluşmaz.

Atnalı vorteksin şiddetine, yaklaşım akımının ortalama hızı ve derinliği, ayağın şekli ve boyutları, oyulma çukurunun geometrisi ve akışkanın kinematik viskozitesi etkili olmaktadır. (Gugten, 1982) Ancak daha sonra araştırmacılar, kinematik viskozitenin etkisini önemsiz bulmuşlar ve olayda Froude sayısının daha etkili olduğunu savunmuşlardır.

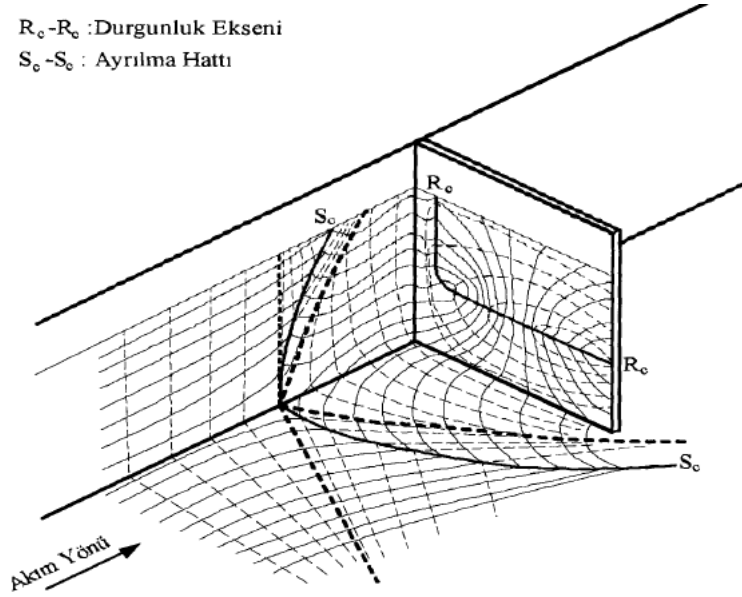
Şekil 3.11’de görüldüğü gibi, akıma yerleştirilen küt burunlu köprü orta ayaklarının membaındaki akım hızları, ayağın memba yüzeyi merkezindeki düşey eksen boyunca oluşan durgunluk düzleminde aşağı doğru vorteks oluştururlar. Bu vorteks, tabana varınca akıntıya karşı yönde taban boyunca bir miktar hareket ettikten sonra, akımın etkisiyle yukarı doğru yönelirler. Durgunluk düzleminin her iki yanında da akım çizgileri sağa ve sola saparlar. Sürüklenme vorteksi olarak bilinen, durgunluk sistemindeki bu vorteks sistem, yaklaşım hızıyla birleşerek akımın ayaktan ayrılma bölgesinde atnalı vorteksini oluştururlar. Atnalı vorteksinin içindeki yüksek hızlar, ayağın önündeki ve yanlarındaki oyulmada oldukça etkin rol oynarlar.



Şekil 3.11 Akıma yerleştirilen köprü orta ayakları etrafında meydana gelen akım çizgileri ve vorteks sistem (Güngör, 1997)

Şekil 3.12’de görüldüğü gibi, akıma yerleştirilen küt burunlu köprü kenar ayaklarında ise, durgunluk eksenini ilk önce ayağın memba yüzeyinde ve kenara yakın bölgede, düşey bir eksen boyunca meydana gelir. Ancak, tabana ulaşmadan tabana paralel bir hat boyunca

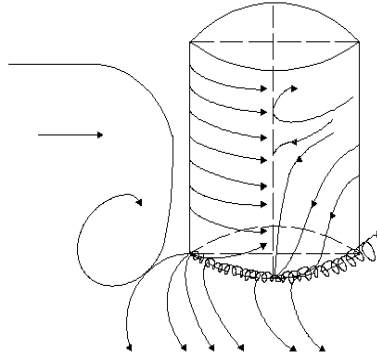
akım eksenine doğru yönelerek ayağı terk eder. Diğer taraftan, ayağın memba yüzeyine yaklaşan akım, yüzeyde aşağı doğru yönelir, durgunluk eksenine varınca, tabana varmadan akıma karşı yönde bir miktar hareket ettikten sonra yaklaşım akımının etkisiyle karşılaştıkları yerde bir ayrılma hattı oluşur. Yaklaşım akımının etkisiyle ayağın ayrılma bölgesine doğru yönelen akım, ayrılma hattı boyunca hareket eder ve ayağın ayrılma bölgesinde yaklaşım akımıyla birlikte direk atnalı vorteksini oluştururlar. Görüldüğü gibi ayağın membaında sürüklenme vorteksi oluşmamaktadır. Bundan dolayı oyulma ayağın ucunda başlamaktadır.



Şekil 3.12 Akıma yerleştirilen küt burunlu köprü kenar ayakları etrafında meydana gelen akım çizgileri (Güngör, 1997)

c) Art - İz (Kuyruk) Vorteks Sistemi

Art-iz çevrinti sisteminde yoğunlaşan çevrinti, ayak tarafından meydana getirilir. Bu sistem ayak yüzeyinde meydana gelen düzensiz kayma gerilmesi tabakalarının sarması sonucu oluşur. Bu sistem, ayağın öteki yüzünden büyük ayak Reynolds sayılarına sahip ayrılma tabakasıyla ayrılmıştır. Bu çevrintiler düzensiz ve yayılmış durumda olup, akım yönüne bağlıdır. Bu çevrintilerin gücü büyük ölçüde akışkan hızına ve ayağın şekline bağlı değişiklik gösterir. Shen vd. (1969)'nin deneylerinde atnalı çevrinti sistemleri meydana gelmediği veya uygun kontrol edilmediği zaman, ayaklarda akım yönünde de büyük oyulma çukurlarının meydana geldiği görülmüştür. Atnalı vorteks sisteminin ayağın arkasına taşıdığı malzemeyi, emerek oyulma bölgesinden uzaklaştırılır.



Şekil 3.13 Silindir kenar ayak civarında meydana gelen vorteks yapısı (Güngör, 1997)

Düşük Reynolds sayılarında ($3 < Re < 50$), bu vorteksler stabildir ve ayağın mansabına yakın kalırlar. Ancak, Re 'nin daha büyük değerlerinde stabil değildir ve ayaktan mansaba doğru yayılırlar. Bu vortekslerin şiddeti, ayak sekline ve akım hızına bağlıdır.

3.3 Yapıların yerel oyulmadan korunması

Basit üç metotla yapılar yerel oyulmanın zararından korunabilirler (Chiew, 1992; Chiew, 1995; Singh et. al., 1995; Dey, 1997; Duarte and Sainz, 1999; Chiew, 2004).

1. Yapının dengesini tehdit etmeyecek en derin derinliğe yapının temelini yerleştirmektir.
2. Büyüyen aşındırıcı vorteksleri önlemektir.
3. Oyulma çukurunun büyümesini durdurmak için akarsu yatağının altına veya belirli bir düzeyde koruma sağlamaktır.

Riprap köprü yan ve orta ayaklarını yerel oyulmadan koruyan genel bir metottur (Kayatürk, 2005).

3.4 Köprü Yapılarının Etrafında Oyulmayı Etkileyen Parametreler

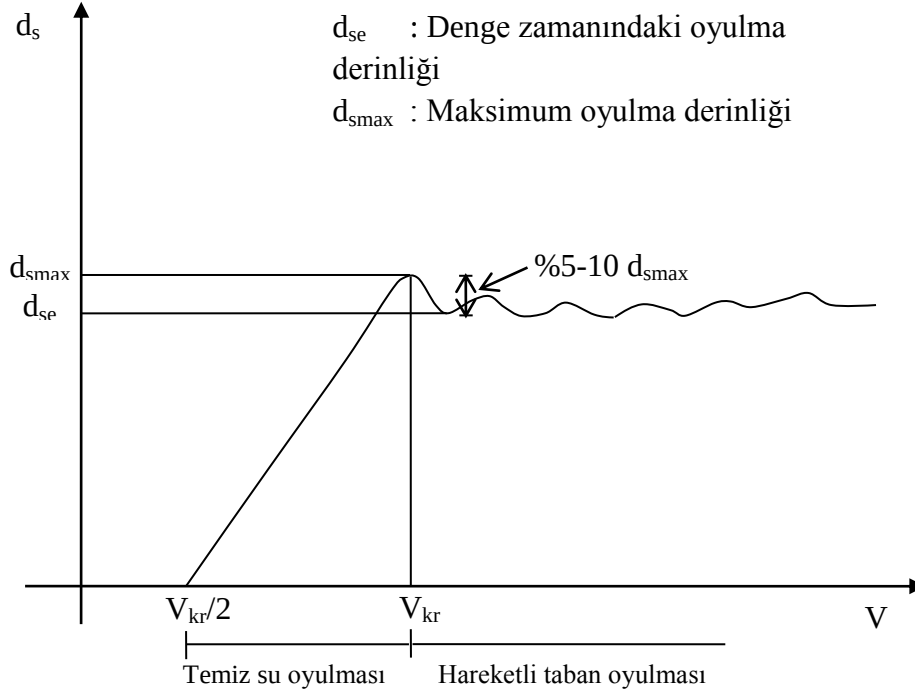
Köprü ayaklarındaki oyulma olayı akımın ve katı madde hareketinin etkisiyle meydana gelir. Genel de köprü ayaklarında yerel oyulma derinliğini etkileyen faktörler şunlardır:

a- Akım hızı

Bilimsel çalışmalar sonucunda akım hızının oyulmaya etkisi olduğu kabul edilmektedir. Temiz su oyulması durumunda; oyulma derinliği bir V hızı ile başlamakta ve V_{kr} değerine kadar artmaktadır. Hız V_{kr} değerine geldikten sonra oyulma derinliği maksimum değerine

ulaşmaktadır. Zira temiz su oyulması durumunda akımın gücünün tamamı oyulmaya kullanılmaktadır.

Hareketli taban durumunda ise toplam güç oyulma ve katı madde taşınması için kullanılmaktadır. Dolayısıyla hareketli taban durumundaki maksimum oyulma derinliği V_{kr} hızında erişilen derinlikten daha azdır.



Şekil 3.14 Kayma hızının veya yaklaşım hızının fonksiyonu olarak, yerel oyulma derinliğinin değişimi

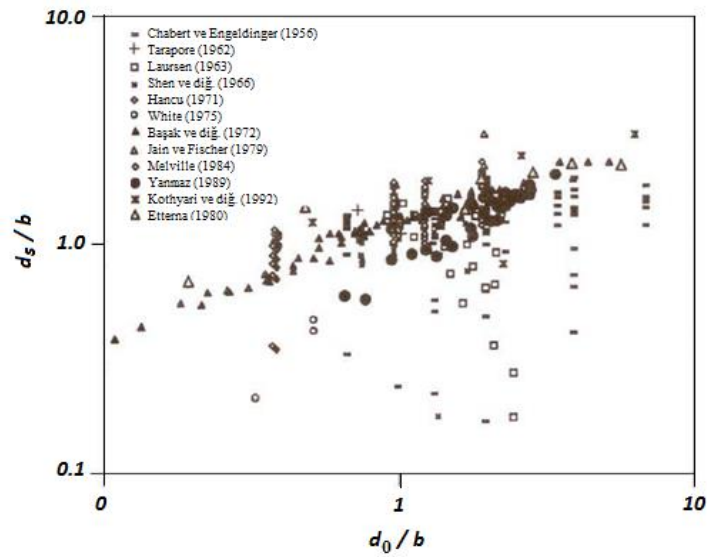
Şekil 3.14'te Raudkivi ve Ettema (1985) tarafından oyulma çukurunun gelişimi; kayma hızının veya yaklaşım hızının fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Oyulma hızın belli bir değerinde başlayıp giderek büyümektedir. Oyulmaya etki eden hız değerleri incelendiğinde aşağıdakileri söylemek mümkündür.

- $V/V_{kr} \leq 0.5$ ise oyulma yoktur.
- $0.5 \leq V/V_{kr} \leq 1.0$ ise Temiz-su oyulmasıdır ve bu bölgede oyulma V/V_{kr} ile hemen hemen lineer artmaktadır.
- $V/V_{kr} \geq 1.0$ ise Hareketli taban oyulması vardır. Bu bölgede dinamik denge hareketi gerçekleştiğinden oyulma derinliği hızla birlikte artmaz

b- Akım derinliği

Akım alanına yerleştirilen ayaklar nedeniyle membada su kabarması sonucunda bir yüzey çevrintisi oluşmaktadır. Tabanda ise atnalı çevrintiler oluşmaktadır. Yüzeyde ve

tabanda oluşan çevrıntiler birbirlerinden zıt yönde hareket etmektedir. Oyulmanın akım derinliğine bağlılığı, yüzey ve taban çevrıntilerinin birbirleriyle yaptığı girişime dayanmaktadır. Yaklaşım akım derinliği az ise bu iki çevrinti birbiriyle girişim yapmakta ve oyulmayı arttırmaktadır. Ancak akım derinliği arttıkça bu girişimde azaldığından oyulma derinliği akım derinliğinden bağımsız oluşmaktadır. Melville ve Sutherland (1988), tabanda geçiş rejimine kadar olan hareketli taban oyulması donelerine dayanarak ince agrega için boyutsuz oyulma derinliği, d_s/b 'nin boyutsuz akım derinliğinin $d_0/b \geq 3.0$ değerleri için akım derinliği etkisinin ihmal edilebileceğini belirtmişlerdir. Kaba taban malzemesi için bu oran $d_0/b \geq 6.0$ olmaktadır. Kaba malzemede taban çok pürüzlü olduğu için durgunluk basıncı ve düşey hız bileşeni daha büyük d_0/b değerlerine kadar etkili olmaktadır. Literatürlerde sunulan değişik akım koşullarındaki oyulma derinliğine göre değişimi Şekil 3.15'te gösterilmektedir. Şekil 3.15'de maksimum oyulma derinliği d_s/b yaklaşık olarak 2.5 mertebesinde (Yanmaz, 2002).



Şekil 3.15 Boyutsuz oyulma derinliğinin boyutsuz akım derinliğiyle değişimi (Yanmaz, 2002)

Akarsu derinliğinin oyulmaya etkisinin araştırılması sonucunda aşağıdaki görüşler ileri sürülmüştür (Zengin, 2010).

- Leclerc (1971) ve Başak (1977) yaptıkları deneyler sonucunda su derinliğinin oyulmaya etkisi olmadığını tespit etmişlerdir.
- Su derinliğinin oyulmaya etkisi vardır.
- Su derinliğinin belirli bir değerden itibaren oyulmaya etkisi vardır.

Bu görüşleri savunan araştırmacılar;

Hancu (1971)	: $h/d_s \geq 1$
Quesnot ve Nicollet (1971-1971)	: $h/d_s \geq 2$
Larras (1963)	: $h/d_m = 30 \sim 40$

değerlerini sınır olarak belirlemişlerdir. Su derinliğinin oyulma üzerindeki etkisi konusunda henüz ortak bir görüş oluşmamıştır. Ancak belirli bir değerden sonra oyulmaya etkisi olmadığı görüşü birçok araştırmacı tarafından kabul edilmektedir.

c- Taban malzemesinin etkisi

Raudkivi ve Ettema(1983) taban malzemesi dağılımının dengeli ve temiz su oyulması derinliğine etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda tane dağılımının oyulma derinliğini önemli ölçüde etkilediği belirtilmektedir. Tane dağılımı geometrik standart sapması σ_g , arttıkça tabandaki zırhlanma etkisiyle, yani kaba tanelerin ince tanelerin üzerini kaplamasıyla oyulma derinliği önemli ölçüde azalmaktadır. Raudkivi (1986) bu etkiyi bir düzeltme katsayısıyla tanımlamıştır ve verdiği düzeltme eğrisi için;

$1.0 \leq \sigma_g \leq 5.0$ aralığında eşitlik (3.17)'yi çıkarmışlardır:

$$K_\sigma = 0.013462 \sigma_g^5 - 0.2232 \sigma_g^4 + 1.4066 \sigma_g^3 - 4.0864 \sigma_g^2 + 5.007 \sigma_g^1 - 1.1179 \quad (3.17)$$

K_σ , gradasyon etkisini düzeltme faktörüdür. Denklemin kullanılmasıyla taban malzemesi kum-çakıl olan ($\sigma_g \approx 3.5$) bir akarsu tabanındaki yerel oyulma derinliğinin, taban malzemesi üniform olan bir akarsuyun sadece %20'si mertebesinde olduğu gösterilmektedir. Taban malzemesi tane dağılımı büyük olan bir akarsuda hareketli taban oyulması durumunda da üniform malzemeye göre daha az oyulma beklenmektedir. Ancak bu şartlarda mekanizma oldukça karışık olmaktadır. Tabanda oluşan sürüntü hareketi zırhlanma etkisinde olduğu için modellenmesi zor olur. Bu nedenle hareketli taban oyulması koşullarında tane dağılımı etkisi halen bir araştırma konusu olarak güncelliğini korumaktadır (Yanmaz, 2002).

Taban malzemesinin tane çapının oyulmaya etkisi konusunda aşağıdaki görüşler belirtilmektedir (Zengin, 2010).

- Larras (1963) ve Coleman (1971) oyulmanın tane çapından bağımsız olduğunu kabul etmişlerdir.

- Tane çapının belirli sınırlar arasında oyulmayı arttırdığı, bu sınırlar dışında ise bağımsız kaldığı kabul edilmektedir.

Yatak malzemesi boyutu, gradasyonu ve kohezyonu gibi karakteristik özellikleri yerel oyulmaya etkili olabilir. Yatak malzemesini kum boyutu yerel oyulma derinliğinde çok az etkilidir. Ayrıca daha büyük boyutlu yatak malzemeleri maksimum oyulma derinliğinden etkilenmeksizin yan veya orta ayak üzerinden türbülans, vorteks veya akım ile taşınabilir fakat sadece ulaşması zaman alır. Çok büyük parçalar oyulma çukurunu kaplayabilir.

d- Zaman etkisi

Temiz su oyulması durumunda dengeli oyulma derinliğine çok geç ulaşılır. Bunun başlıca nedeni, böyle bir durumun oyulma çukuru içindeki ortalama kayma gerilmesi, su ağırlık kuvveti etkisi ve türbülans gerilmelerinin birlikte bir denge yaratmasının sağlanmasıdır.

Temiz su oyulması koşullarında denge oyulma derinliğine çok uzun bir sürede ulaşılır. Raudkivi (1986) laboratuvar koşullarında yaklaşık 50 saatlik bir srenin denge oyulma derinliğine erişmek için gerekli olduğunu belirtmektedir. Froude benzeşimi kullanıldığında 50 saatlik bir model sresinin doğada çok daha büyük akım sürelerine karşılık geldiği anlaşılmaktadır. rnek olarak 1/50 ölçeğinde bir laboratuvar modelini ele alırsak, Froude modelinde laboratuvarda 50 saat olan akım süresi doğada, $Tr=Lr/Vr$, $Tr=Lr/(Lr)^{1/2}$, $Tr=\sqrt{Lr}$, $Lr=1/50$, $Tr=Tm/Tp$, $\sqrt{1/50} = 50/Tp$, $Tp=50 * \sqrt{50} = 354$ saat olmaktadır. Böyle bir srenin oluşması fiziksel koşullar altında zordur. Pek çok durumda etkili akım süresi daha azdır. Bu nedenle, köprü ayağı temel derinliğinin temiz su koşulları için tayin edilmesinde denge oyulma derinliği yerine makul bir tasarım sresinde ulaşabilecek oyulma derinliğinin kullanılması daha gerçekçi ve ekonomiktir. Bunun için temiz su oyulması durumunda oyulma derinliğinin zamansal değişimi bilinmelidir (Yanmaz, 2002).

e- Orta ayak genişliği ve yan ayak uzunluğu

Genel olarak tüm araştırmacılar akıma dik ayak genişliği ne kadar büyük ise, yani ne kadar küt burunlu ise ayak etrafındaki oyulma derinliğinin de o kadar büyük olacağı görüşündedir. Oyulma derinliği(d_{smax}), ayağın akıma dik genişliğinin (b) bir fonksiyonu olduğu düşüncesiyle yapılan araştırmalar sonucunda aşağıdaki bağıntılara ulaşılmıştır (Güngör, 1997).

Başak (1977) : $d_{smax} = 0,446 b^{0.586}$

Başak (1975) : $d_{smax} = 0,558 b^{0.586}$ (dikdörtgen enkesit için)

Breusers (1965) : $d_{smax} = 1.4 b$

Üç (1979) : $d_{smax} = 0.61 b^{0.766}$

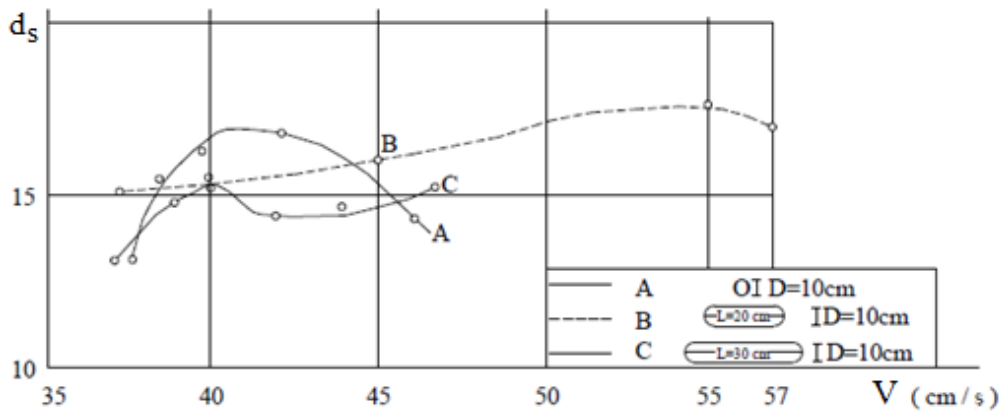
Larras (1963) : $d_{smax} = 1.05 b^{0.75}$

Neill (1973) : $d_{smax} = 1.5 \sim 2.5 b$

Shen (1969) : $d_{smax} = b^{0.619}$ (sabit hız için)

Sığ sularda gerek köprü ayakları gerekse kenar ayaklar etrafındaki oyulma derinliğinin, ayağın akıma dik gelen genişliğiyle arttığını bunun akımın derinliğine bağlı olmadığını belirtmişlerdir (Kandasamy ve Melville 1998).

Yapılan bu tespite ek olarak derin akımlarda atnalı vorteksi gücünün, ayağın aşağı yöndeki bileşenleri ile kenar ayaktaki benzer akım bileşenlerinin ayağın akıma dik genişliğiyle bağlantılı olduğunu belirtmektedir. Uzun kenar ayakların yerleştirildiği sığ sularda ise oyulma çukuru kenar ayağın memba yüzeyi boyunca uzanamayacağından, kenar ayak uzunluğunun oyulma derinliğini daha az etkilediği belirtilmiştir. Çok uzun ayaklarda ise oyulma çukurunun ayağın her bir ucunda iki ayrı çukur olarak gelişir.



Şekil 3.16 Ayak uzunluğunun oyulmaya etkisi (Zengin, 2010)

Orta ayak genişliği ve kenar ayak uzunluğu arttıkça oyulma derinliği artar. Ayak uzunluklarının da oyulmaya etkileri olduğu belirtilmiştir. Şekil 3.16’da yapılan deneysel çalışmanın neticesinde elde edilen değişim görülmektedir. Yapılan deneysel çalışmanın sonucunda köprü ayaklarının yan yüzeylerinin de oyulmaya etkisi olduğu tespit edilmiştir (Zengin, 2010).

f- Kenar veya orta ayağın şekli

Köprü ayağı aksının yaklaşım akıma dik olarak yerleştirilmesi gereklidir. Zira akımla açı yapacak şekilde yerleştirilmiş dairesel ayak dışındaki ayakların akıma dik olan izdüşüm alanları artar. Bunun sonucunda, akımın ayrılma sınırı, çevrintilerin etki alanları ve ayağı etkileyen sürüklenme kuvveti artar. Tablo da yaklaşım akımıyla aynı doğrultuda yerleştirilmiş ayaklar için dairesel ayağa göreceli olarak şekil faktörleri, K_s , verilmiştir. Burada L_p ayak uzunluğu, b , ayak genişliğidir. Kare, dikdörtgen, dairesel, silindirik ve oblonik ayaklarda elde edilen neticeler sonucunda; kare kesitli bir ayak, dairesel kesitli bir ayağa göre %22 daha fazla bir oyulma derinliği oluşturur (Yanmaz, 2002).

Tablo 3.1 Düşey ayaklar için şekil faktörü (Yanmaz, 2002)

Ayak Şekli	b/L_p	K_s
Daire	-	1.00
Kare	1:1	1.22
Dikdörtgen	1:3	1.08
	1:5	0.99
Yarım daire uçlu dikdörtgen	1:3	0.90
Mamba ucu yarım daire, mansap ucu kama şekilli	1:5	0.86

Ayağın düşeyle açılı olarak yerleştirilmesi de oyulma derinliğini etkilemektedir. Genişliği yukarı doğru artan ayaklarda oyulma daha fazla olmaktadır. Bunun ana nedeni tabanda gelişen at nalı çevrintilerinin böyle bir durumda mamba yüzünden kolaylıkla sürüklenememesidir. Genişliği yukarı doğru azalan ayaklarda ise at nalı çevrintiler akımla sürüklenerek taban seviyesinde tutulmaları kısmen önlenmiş olmaktadır. Tabana doğru genişleyen ayakların ayrıca zemin seviyesinde daha düşük gerilmeler yaratacağı açıktır (Yanmaz, 2002).

Tablo 3.2 Genişliği derinlikle değişen ayaklar için şekil faktörü (Yanmaz, 2002)

Ayak şekli	V (m/s)	d_s/b	K_s
	0.67	2.03	
	0.81	2.06	1.20
	0.67	1.31	0.78
	0.81	1.26	0.74

Ayak smelinin şekli ve konumu da taban seviyesindeki oyulmayı etkilemektedir. Breusers ve Raudkivi (1991), ortalama taban seviyesinin altına ayak çapının 1.6 katı çapta yerleştirilmiş bir münferit smel veya kesonun oyulmayı azaltıcı etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Ancak ortalama taban seviyesinin daha üstünde bir kota yerleştirilen bir kesonun oyulmayı artıracadı açıktır. Zira taban seviyesinden daha büyük bir evrinti etki alanı oluşmaktadır.

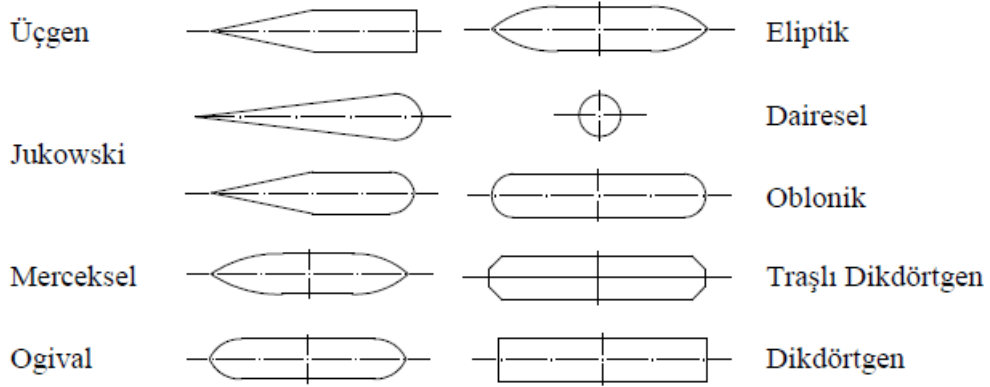
Köprü ayağının etrafındaki oyulmaya akım çizgilerinin eğriliklerinin etkili olduğu araştırmacılar tarafından kabul edilmiştir. Ayak şeklinin oyulmaya etkisi atak açısının etkisine benzer ve oyulma derinliği hesaplanırken şekil faktörü olarak hesaba katılır. Yapılan çalışmalarda köprü ayakları memba yüzey şekillerine göre;

- Kt burunlu ayaklarda, atnalı vorteks yapısı güçlü olmakta ve oyulma ayağın önünde meydana gelmektedir.
- Sivri burunlu ayaklarda, atnalı vorteksin etkisi zayıftır ve maksimum oyulma derinliği mansaba doğru kaymaktadır.

Akıma dik ucu kt burunlu ayaklar etrafında meydana gelen oyulmanın sivri burunlu ayaklara göre çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Özellikle akıma dik ayak genişliği oyulmada etkin bir rol oynamaktadır. Bu nedenle ayak şeklinin oyulmaya etkisi çok büyüktür.

Tison (1940)'a göre bu etkilerin nedenleri aşağıda özetlenmiştir.

- Akım çizgilerinde büyük bir eğrilik oluşturan ayak şekilleri ayak önündeki düşey hız bileşenlerini büyüterek oyulmanın artmasına neden olurlar.
- n yüzü keskin olan ayak şekillerinde bu eğrilik daha kk olduğundan oyulma daha az olmaktadır.



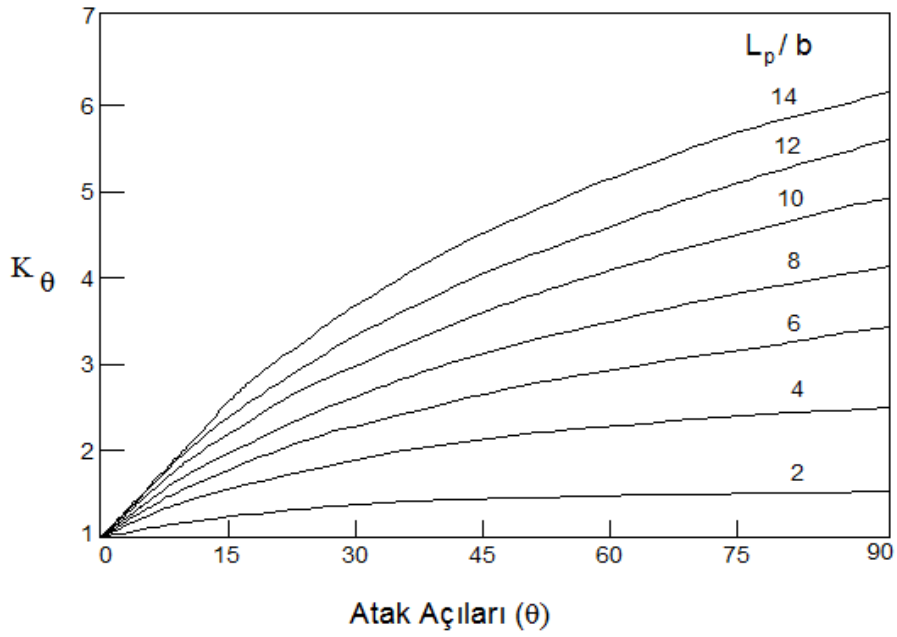
Şekil 3.17 Çeşitli ayak formları (Zengin, 2010)

Dairesel silindirik bir ayak için elde edilen verilerin diğer ayaklar içinde uygulanabileceği fakat $K=0.41 \sim 1.40$ değerleri arasındaki ayak biçimlerine bağlı olan katsayılarla çarpmak gerektiğini belirtmiştir (Zengin, 2010).

g- Atak açısının etkisi

Dairesel ayaklar hariç bütün ayak şekilleri için yerel oyulma derinliğinin atak açısından etkilenmektedir. Dairesel kesitli ayakların geometrisinden dolayı akım çizgilerindeki eğrilik değişmediğinden oyulma derinliği atak açısından etkilenmemektedir. Açılı gelen bir akımda akıma dik ayak izdüşüm alanı fazla olduğundan çevrintilerin etki alanı da artmaktadır. Yaklaşım akımının köprü ayağı aksıyla yaptığı açı θ ise, akıma dik izdüşüm uzunluğu $b_t = b \cos \theta + L_p \sin \theta$ olmaktadır. Burada L_p ayak uzunluğu, b ayak genişliğidir. Akımın atak açısı etkisi için düzeltme katsayısı, K_θ , θ derece cinsinden olmak üzere şu bağıntıdan hesaplanabilir (Yanmaz, 2002).

$$K_\theta = \left(b \cos \theta + \frac{L_p}{b} \sin \theta \right)^{0.65} \quad (3.18)$$

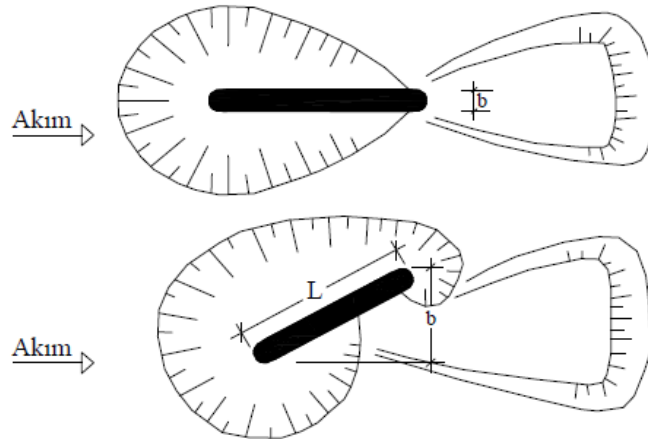


Şekil 3.18 (θ)Atak Açılıyla K_θ Katsayısının değişimi (Yanmaz, 2002)

Sabit bir θ açısında ayağın L_p/b oranı arttıkça oyulma etkisi de artacağından akımın dik gelme haline göreceli olarak tanımlanan K_θ katsayısı da artmaktadır. Ayrıca sabit bir L_p/b oranında yaklaşım açısı arttıkça K_θ açısı da artmaktadır. Bunun nedeni, artan açıyla izdüşüm genişliği b_i 'nin artmasıdır.

Kenar ayaktaki oyulma derinliği genellikle atak açısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Kenar ayağın membaya doğru yerleştirilmesiyle büyük oyulma derinlikleri oluşmaktadır. Atak açısı $\theta=90^\circ$ iken maksimum oyulma oluşmaktadır.

Membaya doğru $\theta=30^\circ$ açıyla yerleştirilen kenar ayak oluşan oyulma derinliği, mansaba doğru $\theta=150^\circ$ açıyla yerleştirilen kenar ayak etrafında oluşan oyulma derinliğinden %17 daha fazladır (Güngör,1997).



Şekil 3.19 Farklı Atak Açılarının Oyulmaya Etkisi (Güngör,1997)

Yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi atak açıları artarken maksimum oyulma derinliğinin oluştuğu nokta ayağın açıkta kalan yanı boyunca arkaya doğru kayar. Burada ayağın ön tarafına göre daha büyük bir oyulma derinliği oluşmaktadır (Güngör,1997).

h- Reynolds ve Froude sayılarının oyulmaya etkisi

Yapılan teorik çalışmaların sonucunda atnalı vorteksinin hızının akımın Re sayısı ile orantılı olduğu tespit edilmiştir. Ve atnalı çevrintisinin şiddeti köprü ayağı Reynolds sayısına bağlı bir fonksiyondur. O zaman oyulma derinliği de Reynolds sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Üç ve Ağaçoğlu (1999)'nun bu konuda yaptıkları deneysel çalışmalar sonucu oyulma derinliği için; $d_{se} = 0.00222 \times Re_a$ ifadesini bulmuşlardır. Bu eşitlik tüm Reynolds sayıları için geçerlidir. Reynolds sayısı için; $Re_a = 0.619$ değerlerinin kullanılabileceği önerilmektedir. Re_a = Ayak Reynolds sayısını göstermektedir. Oyulma, Re_a değeri ile belirli bir değere kadar artmakta fakat maksimum bir değere ulaştıktan sonra, Re_a sayısının artmasına rağmen oyulma derinliği azalmakta hatta sabit kalmaktadır.

4. LİTERATÜR ÖZETİ VE KÖPRÜ AYAKLARI İÇİN VERİLEN OYULMA DERİNLİĞİ BAĞINTILARI

Köprü ayakları etrafındaki oyulma problemi 1950’li yıllardan beri araştırılmaktadır, konunun karmaşık olması nedeniyle henüz tüm koşullara uyan bir bağıntı elde edilememiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar sadece yapılan koşullarda geçerli olup, farklı akım ve taban malzemesi değerlerinde de farklılık göstermektedir. Köprülerle ilgili deneylerde taban malzemesi özellikleri, akarsuyun güzergâhı, en kesit detayı, akım özellikleri gibi birçok parametre etkili olmaktadır. Pratikte bir proje yapacağımız zaman kendine özgü koşullarına benzer bir çalışmanın bağıntıları kullanılmalıdır (Yanmaz, 2002).

Taşkınlar esnasındaki tehlike nedeniyle yüksek akım koşullarında arazide ölçülmüş oyulma verisi çok azdır, Ayrıca bu verinin güvenilirliği düşük olup, ölçülen oyulma derinliğinin olası maksimum değer olup olmadığı bilinmemektedir. Bu nedenle, boyut analizine göre türetilecek bir bağıntının arazi doneleriyle hassas kalibrasyonu yapılamamaktadır.

Oyulma analizinin sağlıklı yapılabilmesi için sadece köprü yakını civarındaki değil, memba ve mansaptaki tüm koşullar, akarsu kullanımı, mevcut ve yapımı olası hidrolik yapılar ve bunların etkileri, havzanın kullanımı ve hidrolojik rejim bilinmeli ve köprü üzerine etkileri araştırılmalıdır. Olayın hidrolojik boyutu havza kullanımı ve tasarım akım parametrelerinin belirlenmesiyle sınırlıdır. Problemin hidrolik boyutu ise akımların modellenmesi, su yüzü profillerinin belirlenmesi, taban malzemesi özelliklerinin belirlenmesi, katı madde taşınım miktarının saptanması ve elde edilen tüm bilgiler kullanılarak toplam oyulma derinliğinin belirlenmesidir (Yanmaz, 2002).

Aşağıda sunulan oyulma denklemleri köprü ayağı genişliğinin üniform taban malzemesi tane çapından çok büyük olduğu ($b/d_{50} > 50$) ve akımın ayak aksıyla açı yapmadığı durumlarda tek tip ayak için verilmiştir. Dolayısıyla, bu şartların dışında kalan durumlar için yeni oyulma derinliği $d_{sm} = d_s \cdot K_\sigma \cdot K_D \cdot K_S \cdot K_\alpha$ şeklinde düzeltilmelidir. Yukarıda verilen etkilerden herhangi birinin olmaması durumunda anılan katsayı 1.0 olarak alınacaktır.

Doğada temiz su oyulması koşullarına taşkın dalgasının çekilme döneminde veya taşkın yatağında rastlanabilir. Ana yataktaki akım daha hızlı ve derin olduğundan burada genellikle hareketli taban oyulması söz konusu olmaktadır. Dolayısıyla taşkın yataklı geniş

akarsularda tabanın akarsu genişliği boyunca maruz kalacağı rejim saptanmalı ve ilgili oyulma bağıntısı buna göre kullanılmalıdır (Yanmaz, 2002).

Tablo 4.1’de orta ayaklar etrafındaki oyulma bağıntıları sunulmaktadır.

Tablo 4.1 Orta ayaklar etrafındaki oyulma bağıntıları (Yanmaz, 2002)

Araştırmacı	Standart Denklemler	Geçerlilik şartı
Laursen (1958)	$\frac{d_s}{d} = 1.34 \left(\frac{d_0}{b}\right)^{0.5}$	Dairesel ayak, maksimum temiz su
Carstens (1966)	$\frac{d_s}{d} = 0.546 \left(\frac{N_s^2 - 1.64}{N_s^2 - 5.02}\right)^{5/6}$	Dairesel ayak, hareketli taban
Laursen (1963)	$\frac{d_s}{d} = 1.11 \left(\frac{d_0}{b}\right)^{0.5}$	Dairesel ayak, hareketli taban
Hancu (1971)	$\frac{d_s}{d} = 2.42 \left(\frac{d_0}{b}\right)^{1/3} F_r^{2/3}$	Dairesel ayak, maksimum temiz su
Neill (1973)	$\frac{d_s}{d} = K_s$	$K_s = 1.5$ (dairese) 2.0 (dikdörtgen)
Bresusers ve 1 diğerleri (1977)	$\frac{d_s}{b} = 2.0 \tanh\left(\frac{d_0}{b}\right)$	Dairesel ayak, maksimum temiz su
Jain ve Fischer (1979)	$\frac{d_s}{d} = 1.85 F_{rc}^{0.25} \left(\frac{d_0}{b}\right)^{0.3}$	Dairesel ayak, maksimum temiz su
Günyaktı (1988)	$\frac{d_s}{b} = 1.183 \left(\frac{d_0}{b}\right)^{0.471}$	Dairesel ayak, genel oyulma
Günyaktı (1988)	$\frac{d_s}{b_t} = 1.484 \left(\frac{d_0}{b_t}\right)^{0.569}$	Dairesel olmayan ayak, genel oyulma
Yanmaz (1989)	$\frac{d_s}{d} = 0.85 \left(\frac{d_0}{b}\right)^{0.686}$	Dairesel, maksimum temiz su, $1.16 \leq N_s \leq 2.26$
Yanmaz (1989)	$\frac{d_s}{b_t} = 1.111 \left(\frac{d_0}{b_t}\right)^{0.654}$	Kare, maksimum temiz su, $1.16 \leq N_s \leq 2.26$
Jain ve Fischer (1980)	$\frac{d_s}{b} = 2.0 (F_r - F_{rc})^{0.25} \left(\frac{d_0}{b}\right)^{0.5}$	Dairesel ayak, hareketli taban, $F_r - F_c > 0.2$
Johnson (1992)	$\frac{d_s}{b} = 2.02 \left(\frac{d_0}{b}\right)^{0.02} (F_r^{0.21} \sigma_g)^{-0.24}$	Dairesel ayak, hareketli taban
Melville, 1997	$d_s = K_{yb} K_1 K_d K_s K_\alpha$	Genel oyulma
Richardson ve Davis (2001)	$\frac{d_s}{b} = 2.0 K_s K_1 K_\alpha K_b K_z \left(\frac{d_0}{b}\right)^{0.35} F_r^{0.413}$	Genel oyulma
Yanmaz (2001)	$\frac{d_s}{b} = 1.564 \left(\frac{d_0}{b}\right)^{0.405} F_r^{0.413}$	Dairesel ayak, hareketli taban
Yanmaz (2001)	$\frac{d_s}{b} = 2.748 \left(\frac{d_0}{b}\right)^{0.556} F_r^{0.859}$	Dairesel olmayan ayak, hareketli taban

Bu tabloda, F_{rc} taban malzemesini harekete geçiren kritik Froude sayısı ($F_{rc} = u_c / (gd_o)^{0.5}$) ve u_c tabanda hareketi başlatan ortalama akım hızı olur. Tablo 4.1’de N_s tane sayıdır. Carstens (1975) yönteminde N_s ortalama akım hızından, Yanmaz (1989) yönteminde ise taban seviyesindeki ortalama hızdan bulunmaktadır. Tane sayısının tanımı Eşitlik (4.1)’de verilmiştir.

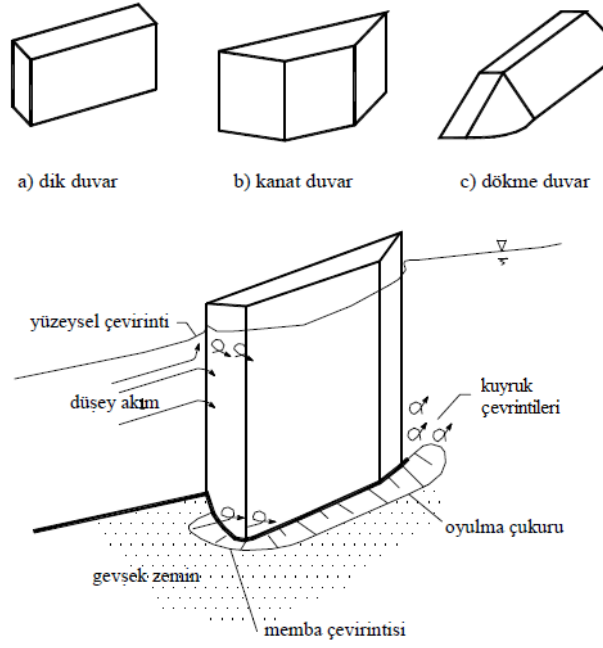
$$N_s = \frac{u_{0.6}}{\sqrt{\Delta g D_{50}}} \quad (4.1)$$

burada $u_{0.6D}$ taban seviyesindeki ortalama akım hızı olup, şu ifadeden bulunabilir:

$$\frac{u_{0.6D}}{u_*} = 5.75 \log \frac{d_o}{k_s} + C \quad (4.2)$$

burada $u_{0.6D}$ (Le Feuvre vd., 1970), k_s =eşdeğer kum pürüzlülüğü (ince malzeme için d_{50} alınabilir), $d_{50} \leq 11.6 v/u_*$ ise $C = 5.5$, $d_{50} \geq 70 v/u_*$ ise $C = 8.5$ alınabilir.

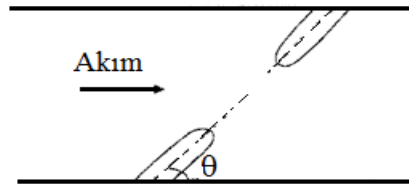
Köprü açıklığının yanlarına yapılan ve köprü üzerindeki yüklerin bir kısmını temele aktaran **kenar ayaklar**, dengeyi sağlamak için akarsu kesitine doğru bir miktar eğimli olacak şekilde tasarlanırlar. Köprü tasarımında gerekli olan bu detay, akarsu kesitinde daralmaya neden olur. Bu daralma neticesinde akarsuyun ortalama hızı artar, ayak etrafında akım çizgilerinde ayrılma ve ayak önünde ve arkasında çevrıntiler oluşur. Kenar ayaklarında akım ayrılmalarının olduğu, memba kısmında daha çok oyulma oluşmaktadır. Kenar ayak kesitleri membada oluşması muhtemel oyulmayı azaltacak geometride seçilir. Genelde kenar; dik duvar, kanat duvar, dökme duvar olarak kullanılmaktadır. Kenar ayaklar üzerindeki başka bir etkide, taşkınlar esnasında yamaçlardan gelen yanal akımdır, bu etki kenar ayaklardaki oyulmayı artırır. Bu nedenle büyük taşkınlar kenar ayak temellerinde büyük oyulmalara neden olmaktadır (Yanmaz, 2002).



Şekil 4.1 Kenar ayak etrafındaki çevrıntiler ve oyulma çukuru (Yanmaz, 2002)

Kenar ayaklar etrafındaki oyulma derinliği, d_{sa} için önerilmiş bazı bağıntılar Tablo 4.2’de sunulmaktadır. Burada, L_a , akıma dik yönde ve akım alanı içindeki kenar ayak uzunluğu, $Fr = u / (gd_0)^{0.5}$, akım Froude sayısıdır. Bu denklemden de anlaşılacağı gibi dik duvarlı kenar ayak etrafındaki oyulma, dökme ayak etrafındaki oyulmanın yaklaşık olarak iki katı kadardır. Bu sebepten yapının projelendirilmesi yapılırken akarsu kesitinde fazla daralma yaratmayacaksa dökme ayak tercih edilmelidir.

Froehlich (1987) bağıntısında K_s değeri dik duvar için 1.0, kanat duvarı için 0.82, dökme duvar için 0.55 olan bir şekil faktörü, $K_\theta = (\theta/90)^{0.13}$ (θ , derece cinsinden) şeklinde tanımlanan kenar ayak konum faktörü, θ kenar ayak aksının yaklaşım aksıyla yaptığı açıdır (Şekil 4.2). Froehlich (1989) denkleminde y_f taşkın yatağındaki ortalama akım derinliği, F_r taşkın yatağındaki yaklaşım akımının Froude sayısıdır. Melvilie (1997) ve Sturm (1999) taşkın yatağı etkisini inceledikleri için daha genel bağıntılar vermişlerdir.



Şekil 4.2 Yaklaşım dolgusunun akımla açı yapması hali

Tablo 4.2. Kenar ayaklar etrafındaki oyulma bağıntıları (Yanmaz, 2002)

Araştırmacı	Standart Denklem	Geçerlilik şartı
Liu vd., 1961	$\frac{d_{sa}}{d_0} = 1.1 \left(\frac{L_a}{d_0} \right)^{0.40} F_r^{0.33}$	Dökme ayak, hareketli taban, $(L_a/d_0) < 25$
Liu vd., 1961	$\frac{d_{sa}}{d_0} = 2.15 \left(\frac{L_a}{d_0} \right)^{0.40} F_r^{0.33}$	Dik duvar, hareketli taban, $(L_a/d_0) < 25$
Laursen (1963)	$\frac{L_a}{d_0} = 2.75 \left(\frac{d_{sa}}{d_0} \right) \left\{ \frac{\left[0.09 \frac{d_{sa}}{d_0} + 1 \right]^{1.17}}{\frac{u_*}{u_{*c}}} - 1 \right\}$	Dik duvar, temiz su
Laursen (1963)	$\frac{d_{sa}}{d_0} = 1.89 \left(\frac{L_a}{d_0} \right)^{0.5}$	Dik duvar, maksimum temiz su
Gill. 1970, 1972	$\frac{d_{sa}}{d_0} = 8.375 \left(\frac{d_0}{L_a} \right)^{0.75} \left(\frac{D_{50}}{L_a} \right)^{0.25} \beta^{6/7} - \frac{d}{L}$	Dik duvar, maksimum temiz su
Laursen, 1980	$\frac{d_{sa}}{d_0} = 1.5 \left(\frac{L_a}{d_0} \right)^{0.48}$	Dik duvar, Hareketli taban
Froehlich, 1987 (Simons ve Şentürk, 1992)	$\frac{d_{sa}}{d_0} = 0.78 K_s K_\theta F_r^{1.16} \left(\frac{L_a}{d_0} \right)^{0.63} \left(\frac{d_0}{D_{50}} \right)^{0.43} \sigma_g^{-187} + 1$	Temiz su, tüm tip kenar ayaklar
Froehlich, 1989	$\frac{d_{sa}}{d_0} = 2.27 K_1 K_2 \left(\frac{y_f}{L_a} \right)^{0.57} F_r^{0.61} + 1.0$	Hareketli taban, tüm tip kenar ayaklar
Melville, 1992	$d_{sa} = 2(L_a d_0)^{0.5}$	Dik duvar, temiz su, $(L_a/d_0) < 25$
Richard, ve Davis, 1995	$\frac{d_{sa}}{L_a} = 7.27 K_1 K_2 \left(\frac{d_0}{L_a} \right) F_r^{0.33}$	Hareketli taban, tüm tip kenar ayaklar
Lim, 1997	$\frac{d_{sa}}{d_0} = 1.8 \left(\frac{L_a}{d_0} \right)^{0.5}$	Dik duvar, temiz su
Melville, 1997	$d_{sa} = K_{yL} K_1 K_d K_s K_\theta K_G$	Genel taban, tüm tip kenar ayaklar
Sturm, 1999	$\frac{d_{sa}}{y_{f0}} = 8.14 K_{st} \left(\frac{q_{f1}}{Mu_{cx} y_{f0}} - 0.4 \right) + 1.0$	Temiz su
Sturm, 1999	$\frac{d_{sa}}{y_{f0}} = 2 \left[\frac{q_{ml}}{Mu_{mlc} y_{f0}} - 0.47 \right] + 1.0$	Hareketli taban

Köprü ayaklarındaki oyulma birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Çalışmaların büyük bir çoğunluğu, doğrusal akarsular üzerine yerleştirilen köprü ayaklarında oluşan oyulma ile ilgilidir.

İstatistiklere göre, köprü yıkılmalarının % 60'ı oyulma nedeniyle meydana gelmiştir. Oyulma herhangi bir zamanda da oluşabilmesine rağmen taşkınlar sırasında meydana gelme olasılığı daha yüksektir. Akarsularda köprü kenar ve orta ayağına yakın oyulmalar diğer sebeplerden daha çok köprü hasarlarına neden olmaktadır (Murillo, 1987). 1847-1975 yılları arasında 143 hasarlı köprünün hata nedenleri hakkında bir analiz yapılmıştır. Elde edilen bulgular Tablo 4.3'te verilmiştir (Zhai, 2010).

Tablo 4.3. Köprü hasar nedenlerinin sınıflandırılması (Zhai, 2010)

Sınıflandırma	Yıkılma Nedenleri	Adet
1	Taşkın oyulma	70
2	Sakıncalı malzemeler	22
3	Aşırı Yükleme ve Kazalar	14
4	Uygun olmayan yerleştirme	12
5	Depremler	11
6	Tasarım hataları	5
7	Rüzgâr Tahribatları	4
8	Dayanıklılığını yitirme	4
9	Paslanmak	1

Uzmanlar, Türkiye'de 7 Nisan 2012'de 110 metresi yıkılan 255 metrelik Çaycuma Köprüsü'nün yıkılmasının en önemli sebebinin köprünün temelindeki oyulma olduğunu belirtmişlerdir. Köprüler ister doğrusal akarsularda ister kıvrımlı akarsularda inşa edilsin, suyun mevcut akım koşullarına dayanması gerekmektedir. Köprülerin, hem statik kuvvetlere karşı hem de suyun dinamik etkisine karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Her köprünün zayıf tarafı temelinin su tarafından oyulma ihtimalidir. Bu yüzden inşaat sırasında taban oyulmalarına karşı önlemler alınması zorunludur. Akarsuyun debisi nedeniyle temelin oyulmasını engellemek için temelin yeterince derine yapılması gerekir. Böylece temel altının oyulması engellenmektedir. Ancak ne kadar derine inşa edileceğini bilmek için mevcut akım ve yapı koşullarına göre maksimum oyulmanın doğru olarak tahmin edilmesi oldukça önemlidir. Akarsularda sekonder akım nedeniyle akarsuyun köprü ayakları oyulmaya karşı maruzdur. Ayak etrafındaki oyulma denge oyulma durumu gerçekleşene kadar oyulmanın devam edeceği açıktır. Tabanın kararlı hale geldiği yerin de altına doğru temel ve riprap uygulaması yapılmaktadır. Çaycuma Köprüsü'nde de topuk oyulması meydana gelmiştir (Şekil 4.3). Yukarıda da ifade edildiği gibi tasarım

aşamasında denge oyulma derinliğini tahmin etmek, yapının güvenliği açısından büyük öneme sahiptir.



Şekil 4.3 Çaycuma köprüsü (7 Nisan 2012) (www.milliyet.com.tr)

Chiew ve Melville (1987) yaptıkları deneysel çalışmada üniform ve kohezyonsuz katı maddenin (sedimentin) taşınması durumunda silindirik şeklindeki köprü ayağı etrafında oluşan yerel oyulmaları araştırmışlardır.

Melville ve Sutherland (1988), geçmişte yapılan deneysel çalışmalara ait verileri değerlendirerek, üniform veya üniform olmayan taban malzemesi için farklı tipte köprü orta ayağı çevresindeki temiz su ve hareketli taban oyulmalarının nihai derinliğini tahmin eden bir bağıntı önermişlerdir.

Chiew ve Melville (1989) dairesel köprü ayağı etrafında oluşan oyulmaları üniform olmayan sediment kullanarak menbadan sürekli sediment beslemeli bir kanalda deneysel olarak incelemişlerdir. Zırhlanmanın ve köprü ayağı çapının dane çapına oranının denge oyulma derinliğinin azalmasında önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda üniform olmayan malzeme durumunda denge oyulma derinliğinin üniform malzeme durumuna göre daha az veya eşit olduğunu bulmuşlardır.

Yanmaz ve Altınbilek (1991), üniform taban malzemesi kullanarak dairesel ve kare kesitli köprü ayaklarında oluşan temiz su oyulmalarının zamana bağlı değişimi için sediment süreklilik denklemini kullanarak yarı teorik bir model geliştirmişler ve tasarım amaçlı boyutsuz oyulma tahmini eğrilerini değişik sediment ve akım özellikleri için hazırlamışlardır.

Chiew (1992) köprü ayaklarında oluşan oyulmalara karşı ayakta açılan dar-uzun dikdörtgen deliklerin (slot) yaka ile birleştirilmesi şeklindeki koruyucu önlemi incelemiştir.

Melville (1992) uzun süreler boyunca yaptığı testler sonucunda, denge oyulma derinliğini, (d_{se}) akım derinliği ve kenar ayak uzunluğuna bağlı olarak sınıflandırmıştır. Eğer $L_a/h \leq 1$ olursa kısa kenar ayak ve $L_a/h \geq 25$ olursa uzun kenar ayak olarak adlandırmıştır. Uzun ayaklarda, kenar ayak yaklaşım akım hızı kenar ayağın memba yüzüne paralel olarak sapma yapar ve bu yüzden kenar ayağın önündeki aşağı doğru oluşan akım etkisizdir. Kısa ayaklarda ise köprü orta ayaklarına benzer akım durumları oluşmaktadır. Kenar ayağın memba yüzünden aşağı doğru olan düşey akım, kuyruk çevrintileri ve atnalı vorteksler meydana gelmektedir. Melville Auckland Üniversitesindeki kenar ayaktaki oyulma ile ilgili önceki çalışma verilerini toplamış ve mevcut kanal verilerini rasyonelleştirip, denge oyulma derinliği (d_{se}) için aşağıdaki bağıntıları önermiştir.

$$d_{se}=10h \quad L_a/h \geq 25$$

$$d_{se}=2(hL_a)^{0.5} \quad 1 < L_a/h < 25$$

$$d_{se}=2L_a \quad L_a/h \leq 1$$

Ayala ve Grandon (1994) dairesel ve dikdörtgen kesitli köprü ayaklarında üniform olmayan taban malzemesi ile temiz su oyulmalarını deneysel olarak incelemiş ve akım özelliklerine ek olarak oyulma derinliğinin hem ayak kesit geometrisine hem de zırhlanmaya bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Chiew (1995) riprap boyutu ve tabaka kalınlığı ile ilgili deneysel çalışmaları sonunda gerekli boyut için yarı ampirik bir bağıntı önermiştir. Riprap örtüsü çapının köprü ayak çapına oranının 1.5 ~ 3 aralığında olması durumunda göçmeye karşı direncin riprap örtüsü genişliğiyle doğrusal arttığını ifade etmiştir.

Richardson ve Davis (1995) riprap tabakası çapının köprü ayak çapının 5 katı olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Melville ve Raudkivi (1996) üniform olmayan dairesel enkesitli köprü ayağı üzerinde yaptıkları çalışmalarda temel geometrisinin oyulma üzerine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Melville (1997), deneysel çalışmalara ait verileri değerlendirerek üniform veya üniform olmayan taban malzemesi için farklı tipte köprü orta ve yan ayakları çevresindeki temiz su ve hareketli taban oyulmalarının nihai derinliğini tahmin eden bir bağıntı önermiştir.

Kandasamy ve Melville (1998) köprü kenar ve orta ayaklarında oluşabilecek en büyük oyulma derinlikleri ile ilgili bir makale yayınlamışlardır.

Melville ve Chiew (1999) silindirik şeklindeki köprü ayağı etrafında oluşan oyulmanın zaman içinde gelişimini incelemiş ve denge zaman ölçeğini tanımlamışlardır.

Melville ve Coleman (1999) riprap tabakası çapının köprü ayak çapının 3 ~ 4 katı olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Cardoso vd (1999) Köprü kenar ayaklarındaki oyulmaya zaman ve kanal geometrisinin etkisini incelemişlerdir.

Kumar vd (1999) dairesel yaka ve köprü ayağında açılmış dikdörtgen deliğin (slot) oyulmalara etkisini temiz su oyulması şartlarında araştırmışlardır.

Ballio vd (2000) köprü kenar ayakları etrafındaki yerel oyulmaların zamanla değişimini incelemişlerdir.

Chiew, Y. M. ve Lim F. H. (2000) köprü ayağı etrafında temiz su oyulması şartlarında yerleştirilen riprap örtüsünün işlevliğini araştırmışlardır.

Lauchlan C.S. ve Melville (2001) hareketli taban şartlarında kenar göçmesi (edge failure), kayma göçmesi (shear failure), savrulma (winnowing) şeklindeki olumsuzluklara ilave olarak yatak şeklindeki değişimin (bed form progression) de bir etmen olduğunu belirterek yaptıkları araştırmalar sonrasında riprap tabakasının konumunu da içeren bir bağıntı önermişlerdir.

Richardson ve Davis (2001), geçmişte yapılan deneysel çalışmalara ait verileri değerlendirerek, farklı tipte köprü orta ayakları çevresinde nihai temiz su ve hareketli taban oyulmasını tahmin eden bir bağıntı önermişlerdir.

Oliveto ve Hager (2002) temiz su oyulması durumunda, üniform ve üniform olmayan taban malzemesi kullanarak dairesel köprü orta ayakları etrafında meydana gelen oyulmaları deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde, 1 m ve 0.50 m genişliklerine sahip, 11 metre uzunluğunda iki ayrı dikdörtgen kanal kullanmışlardır. Taban malzemesi olarak 3 ayrı üniform ve 3 ayrı üniform olmayan malzeme seçmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, temiz su koşullarında meydana gelen yerel oyulmanın zamana bağlı değişimi için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir.

$$Z = \frac{d_s}{L_R} = 0.068 N \sigma^{-1/2} F_d^{1.5} \log(T) \quad (4.3)$$

burada; Z =boyutsuz oyulma derinliği, d_s = oyulma derinliği, F_d = densimetrik Froude sayısı, L_R = referans uzunluğu, T = boyutsuz zaman, N = şekil faktörü (dairesele orta ayak için 1, karesel yan ayak için 1,25) ve σ = sediment standart sapmasını göstermektedir.

$$\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{0.5} \quad (4.4)$$

$$F_d = \frac{V}{\left(g d_{50} \frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)^{1/2}} \quad (4.5)$$

$$T = [(g' d_{50})^{1/2} / L_R] t \quad (4.6)$$

$$g' = \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) g \quad (4.7)$$

burada, g' = Göreceli yerçekimi ivmesini ifade eder. Referans uzunluğu kenar ayak için aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir.

$$L_R = b^\alpha h^\beta, \quad (\alpha + \beta = 1) \quad (4.8)$$

Coleman vd (2003) köprü kenar ayağında oluşan oyulmalarını temiz su durumunda araştırmışlardır.

Rahman ve Haque (2003) köprü ayaklarının bulunduğu bölgelerde yerel oyulmaların tahmininde kullanılan Lacey formülünde değişiklik yaparak Bangladeş'teki nehirlerle uygulamışlardır.

Chiew (2004) şekli bozulan kanal durumunda köprü ayakları etrafında oluşan yerel oyulmalar ve riprapın kararlılığı ve işlevliliği ile ilgili deneyler gerçekleştirmiştir.

Dey ve Barbhuiya (2004) bir kanat duvarı ve yarım daire kenar ayaklarında oluşan temiz su oyulmaları incelemek amacıyla üniform ve üniform olmayan taban malzemesi kullanarak laboratuvarında deneyler yapmışlardır. Deneyler sonucunda, belli bir akım derinliğinden sonra oyulma derinliğinin akım derinliğinden etkilenmediğini gözlemlemişlerdir. Üniform olmayan sediment kullanıldığında ise köprü ayağı etrafında oluşan oyulma derinliğinin üniform malzeme kullanıldığında meydana gelen oyulmadan daha az olduğunu gözlemlemişlerdir.

Sheppard ve Odeh (2004), üniform taban malzemesi kullanarak köprü orta ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulmasını deneysel olarak incelemiş ve nihai oyulma derinliğini veren bir bağıntı önermişlerdir. Çalışmalarını 6.1 m genişliğinde, 6.4 m derinliğinde ve 38.4 m uzunlukta bir kanalda gerçekleştirmişlerdir. Kullandıkları dairesele

orta ayak çapları 0.114, 0.305, 0.914 m'dir ve taban malzemeleri uniform olup, medyan çapları 0.22, 0.80, 2.90 mm'dir.

Rajkumar ve Subhasish (2005) dairesel ve kare kesitli kr ayaklarında oluşan temiz su oyulmalarını ve oyulma derinliğinin denge durumuna gelme sürelerini incelemek amacıyla uniform ve uniform olmayan sedimentler kullanarak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda denge oyulma derinliğinin dane çapı ile ters orantılı olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda kr ayaklarında gözlenen oyulmanın denge durumuna gelme sürelerinin uniform malzeme için Froude sayısı ve dane çapı arttıkça artmakta olduğunu, uniform olmayan taban malzemesi için dane çapı dağılımının geometrik standart sapması arttıkça azalmakta olduğunu belirtmişlerdir.

Kayatürk (2005)'te yaptığı doktora çalışmasında kr ayakları etrafındaki oyulmayı incelemiştir. alışmasını 30 m uzunluğunda ve 1.5 m genişliğinde bir açık kanalda yrtmştir. Deney kanalı, $d_{50}=1.48$ mm medyan dane çapına sahip uniform yatak malzemesi ile doldurulmuştur. Kr ayağının yerleştirildiği kısımda kum derinliği 0.5 metre olarak alınmıştır. Bu 0.5 metrelik kısım 10 metre uzunluğundadır. Kr yan ayak boyunun, eninden daha önemli bir parametre olduğu ifade etmiştir. Yerel oyulma derinliğini azaltmak amacı ile kr yan ayağının etrafına farklı derinliklere yerleştirilen plakanın genişliğinin artması halinde ve plakanın kum seviyesine veya kum seviyesinin altına yerleştirilmesi durumunda, oyulma derinliği azaldığını tespit etmiştir. Kr yan ayakları etrafına yerleştirilen plakaların kesilmesi ile elde edilen kısmi plakaların bazı durumlarda tam plaka kullanıldığında elde edilen etkiye sahip olduğunu bildirmiştir. Kr yan ayaklarının etrafında, meydana gelen oyulmaların zamanla değişimi plakaların kullanılması durumunda aynı zaman periyodunda plakasız duruma göre oyulma derinliğinde dikkate değer bir azalma olduğu göstermiştir. Plakaların, yan ayak ve orta ayağın birlikte olduğu çalışmalarda gösterdiği davranışın, yan ayak ile orta ayak tek başlarınayken etraflarına yerleştirildiği zaman elde edilen davranıştan çok farklı olduğunu gözlemlemiştir.

Güngör ve Fırat (2005) alışmalarını genişliği 0.9 m, uzunluğu 27 m ve yüksekliği 0.6 m olan bir açık kanalda yapmışlardır. Taban malzemesi olarak özgül ağırlığı, $\gamma_s= 26.5$ kN/m³ olarak belirlenen kuvars kumu kullanmışlardır. Ortalama akım hızı, 0.455 m/s, akım derinliği 10 cm ve debi 41 L/s olarak belirlemiştir. Deneylerde boyutlar santimetre cinsinden olmak üzere; dikdörtgen için 5x10, 5x15, 5x20 olarak tespit edilen ayak

modelleri, oblonik için de $r = 2.5$ cm yarıçaplı yarım daire kesitli elemanlarla dikdörtgen ayaklar birleştirilerek elde edilen ayak modellerini kullanmıştır. Bu çalışmalarında, kıvrımın dışında 60° merkez açı civarında rölatif oyulma derinliğinin her iki çalışmada da maksimum değere ulaştığı tespit etmiştir. Ayrıca, 130° merkez açı civarında kıvrımın dış kenarına yerleştirilen ayaklar etrafında meydana gelen rölatif oyulma derinliği maksimum değere ulaşmıştır. Kanal kıvrımında elde edilen taban topoğrafyasıyla, kanal boyunca her üç ekseninde de kıvrıma yerleştirilen ayaklar etrafında meydana gelen yerel oyulma derinliklerinin yakın bir benzerlik gösterdiğini ve taban şekillerinin maksimum rölatif denge oyulma derinliğinin oluşumunda etkili olduğu çalışmaların da görülmektedir. Ayrıca, kıvrımlı kanalda akımın etkisiyle oluşan taban topoğrafyasına etki eden parametrelerin, kıvrıma yerleştirilen köprü kenar ve orta ayakları etrafında meydana gelen denge oyulma derinliklerinin oluşumunda da aynen etkili olduğunu göstermişlerdir.

Li vd. (2005) Dünya Çevre ve Su Kaynakları Konferansında sundukları bildiride köprü kenar ayaklarındaki oyulmalara karşı alınan yakanın önleyici etkilerini sunmuşlardır.

Oliveto ve Hager (2005), 2002'deki çalışmalarına ek olarak yan ayaklar ve mahmuzlar etrafında oluşan yerel oyulmaları deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca köprü orta ayakları etrafında taşkın hidrografları sırasında meydana gelen yerel oyulmanın zamana bağlı değişimini veren bir yöntem önermişlerdir.

Yoon (2005) gabion (taş ile doldurulmuş telden sepet) koruyucu önlemini temiz su şartlarında deneyler gerçekleştirmiştir. Esneklik, kalıcılık, geçirimsizlik ve ekonomik nedenleriyle ripraba göre daha üstün bir yöntem olduğunu belirtmiştir.

Alabi (2006) Kanada'da Saskatchewan Üniversitesinde yaptığı yüksek lisans tezi çalışmalarında köprü ayağına yerleştirilen yakanın oyulmayı ne kadar azalttığını ve denge oyulma derinliğini araştırmıştır.

Unger ve Hager (2006) dairesel enkesite sahip köprü ayaklarında oyulma mekanizmasını incelemiş ve riprabin göçme açısından güvenilirliğini değerlendirmiştir.

Zarrati vd. (2006) dairesel enkesitli iki ayaktan oluşan gruba riprap ve yaka yerleştirilmesinin sonuca etkilerini araştırmışlardır. Yakanın ayaklara ayrı ayrı olarak veya tek parça şeklinde yerleştirilmesi ayrıca yakanın akıma paralel veya dik konumda olması hallerinde deneysel bulgularını yorumlamışlardır.

Yanmaz ve Köse (2007) dikdörtgen kesitli köprü ayağı kenar etrafındaki temiz su oyulmasını üniform taban malzemesi kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Oyulma

derinliği ve oyulma konturlarını ölçmüşler ve köprü ayağı etrafında oluşan oyulmanın zamana bağlı alansal ve hacimsel değişimini vermişlerdir. Deneyler sonucunda oyulmayı önlemek amacıyla kullanılmakta olan ripraplar için yerleştirilme bölgesi önermişlerdir.

Kothyari vd. (2007), temiz su oyulmasının zamana bağlı gelişimini hesaplamak için yeni bir bağıntı önermişlerdir. Deneyler, 1 m ve 0,50 m genişliklerine sahip, 11 metre uzunluğunda iki ayrı dikdörtgen kanalda gerçekleştirilmiştir.

Kumcu vd. (2007) dikdörtgen kenar ayağa farklı seviyelerde yaka monte edilmesi durumunda temiz su oyulmasının zamana bağlı olarak değişimini incelemişlerdir.

Melville vd. (2007) kanat kenar ayak durumunda hareketli taban şartlarında yaptığı deneyler sonunda gerekli riprap boyutunu belirlemiş ve göz önüne alınacak hususları anlatmışlardır.

Dey vd. (2008) bozulmuş yatak durumunda 45 derece açılı kanat köprü kenar ayağı için yerel oyulmaları ve riprap kararlılığını araştırmışlardır.

Doğan (2008) Orta Doğu Teknik Üniversitesinde yaptığı yüksek lisans tezi çalışmalarında 0.90 mm çaplı katı madde kullanmış ve yaka monte edilmiş dikdörtgen köprü kenar ayağı etrafındaki temiz su oyulmalarını araştırmıştır.

Emami vd. (2008) hem düz kanalda hem de *U* şeklinde 180° kıvrımlı bir kanalda deneyler gerçekleştirmişlerdir. Kıvrımlı kanalda oluşan minimum oyulma derinliğinin düz kanalda oluşan minimum oyulma derinliğinden daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Deneylerin sonucunda orta ayağın tüm bölgelerinde debinin artmasıyla oyulma derinliğinin miktarının arttığını yorumlamışlardır. Deneysel çalışmada seçilen her debi değerı için maksimum oyulma derinliğinin kıvrımın $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında olduğuunu elde etmişlerdir.

Ballio vd. (2009) temiz-su oyulması durumunda kenar ayakta akım daralmalarından dolayı oyulmanın gelişimini incelemiş ve engel oranı (kanal genişliği ve kenar ayak uzunluğu arasındaki oran) üzerinden basit bir formül geliştirmişlerdir.

Cardoso ve Fael (2009) temiz su oyulması şartlarında gerçekleştirdikleri deneyler sonunda köprü kenar ayaklarına yerleştirilecek riprap örtüsü tabaka kalınlığının riprap çapının en az altı katına eşit olması durumunda oyulmaların ihmal edilebilir mertebede olduklarını belirtmişlerdir.

Chang, vd. (2009), kararlı ve kararsız akım koşullarında, üniform veya üniform olmayan taban malzemesi kullanarak köprü orta ayağı etrafındaki temiz su oyulmasının zamana bağlı değişimi için bir hesap yöntemi önermişlerdir.

Deng vd. (2010) köprü ayakları etrafında oluşan yerel oyulmaların ölçümü, tahmini ve oyulmalara karşı alınacak önlemlerle ilgili çalışmalarını yayınlamışlardır.

Diab vd. (2010) oyulma çukurunun gelişimini ve denge durumunu çakıl taban malzemesine yerleştirilen köprü ayağı için araştırmışlardır.

Masjedi vd. (2010) kıvrımlı kanalda dikdörtgen şeklindeki bir orta ayak etrafındaki yerel oyulma derinliğinin azaltılması için uygulanan plakanın oyulmayı ne kadar azalttığını araştırmışlardır. Oyulmadaki maksimum azalmanın plakasız oyulma derinliğinin %78'ine eşit olduğunu söylemişlerdir.

Köse ve Yanmaz (2010) dik köprü kenar ayakları etrafındaki temiz su oyulmasının zamana bağlı değişimini veren amprik ve yarı amprik yöntem geliştirmişlerdir.

Simarro vd. (2011) silindirik kesit bir ayakta oluşan denge oyulma derinliği 6 adet uzun süreli deney yaparak değerlendirmiştir. Denge oyulma derinliğini sağlamak için deneylerin en azından 1-2 hafta yapılmasının yeterli olacağını belirtmişlerdir. Daha kısa süreli deneylerde ise, denge oyulma derinliği sınırsız zaman kayıtlarını ekstrapolasyonu ile elde edilmesinin hiçbir garantisi olmadığını söylemişlerdir.

Göğüş ve Köken (2011) yaptıkları çalışmada dikdörtgen kesitli düz bir kanala yerleştirilen farklı uzunluktaki (L_a) oblonik köprü kenar ayakları etrafında oluşan akım karakteristiklerini farklı oyulma aşamalarında deneysel olarak incelemişlerdir. Köprü kenar ayağının boyu uzadıkça ayak etrafındaki oyulma çukurunun maksimum derinliğinin arttığını elde etmişlerdir.

Gümgüm (2012) dairesel kesitli köprü orta ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulmalarını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Deneyler sonucunda en büyük oyulmanın köprü ayağının yan bölgelerinde olduğunu, memba tarafında oluşan oyulmanın mansap tarafında oluşan oyulmadan daha büyük olduğunu ve akım şiddeti arttıkça oyulma derinliğinde arttığını yorumlamıştır.

Mokhles vd. (2012) kohezyonlu zeminlerde köprü yan ayaklarındaki yerel oyulmayı deneysel olarak araştırmışlardır. Yatak malzemesi olarak kaolin kili ve üç farklı tipte yan ayak tipi seçerek temiz su oyulması durumunda oyulma derinliğinin zamanla gelişimini tahmin eden bir formül geliştirmişlerdir.

Tekin (2012) köprü kenar ayakları etrafında oluşan oyulmalar ve bu oyulma derinliklerinin azaltılması için yerleştirilen plakaların etkisini temiz su oyulması durumu için deneysel olarak incelemiştir.

Mayda (2012) dairesel enkesitli köprü ayakları etrafında meydana gelen hareketli taban oyulmalarını deneysel olarak incelemiştir. Deneylerin sonucunda; memba tarafına düşen oyulmanın mansap tarafında oluşan oyulmadan büyük olduğu, akım şiddeti arttıkça oyulma derinliğinin arttığını ve köprü ayak çapı arttıkça oyulma derinliğinin arttığını elde etmiştir.

Özalp (2013) köprü ayaklarının eğikliğinin yerel oyulma üzerine olan etkisini incelemiştir. Eğikliğin etkisiyle yerel oyulmaların büyük miktarda azaldığını gözlemlemiştir. Özellikle membadaki köprü ayağı etrafında oyulmadaki azalmanın dikkat çektiğini belirtmiştir.

Govindasamy vd. (2014) oyulma için gözlem metodu (OMS) kullanılarak iki köprünün değerlendirmesini sunmaktadır. Bunun sonucunda alanda yapılan ölçümler ile OMS kullanılarak tahmin edilen sonuçlar arasında benzerlik olduğunu gözlemlemiştir.

Sheppard vd. (2014) çalışmalarında belki de köprü ayaklarında en kapsamlı laboratuvar ve arazi veri gruplarını derlemiştir. 441 laboratuvar, 791 arazi verisi ve 17 tahmini denklemi uygulamak için kalite kontrol görüntüleme metodu geliştirilmiştir. Tahmini yöntemlerin son yıllarda geliştirilen en iyi performansı göstermesiyle zamanla doğruluğunda gelişme göstermişlerdir. Sheppard/Melville (S/E) yönteminin bu testlerden en doğrusu olduğu ve tasarım olarak kullanılabileceğini tavsiye etmişlerdir.

Gutierrez vd. (2014) Amazon Nehri üzerinde serbest akışlı kıvrımlı nehirlerde kesişimlerin akım karakteristikleri üzerine çalışmışlardır.

Bu çalışmada ise, kıvrımlı bir kanal da farklı kıvrım açılarının hem dış kıyısına hem de iç kıyısına yerleştirilen köprü kenar ayağı etrafında oluşan yerel oyulmalar temiz su oyulması durumu için deneysel olarak incelenmiştir. Her ayak için 10-12 saat arasında maksimum oyulma derinlikleri belirlenecektir. Taban topoğrafyası tüm kıvrımlı kanal boyunca çıkartılacaktır. Kıvrımlı kanalda kenar ayak etrafındaki taban geometrisi ve maksimum oyulma derinlikleri anlamlı deneyler ile incelenecektir. Literatürde böyle bir çalışmaya rastlanmadığından, bu eksiklik giderilmeye çalışılacaktır.

5. DENEY DÜZENİĞİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA

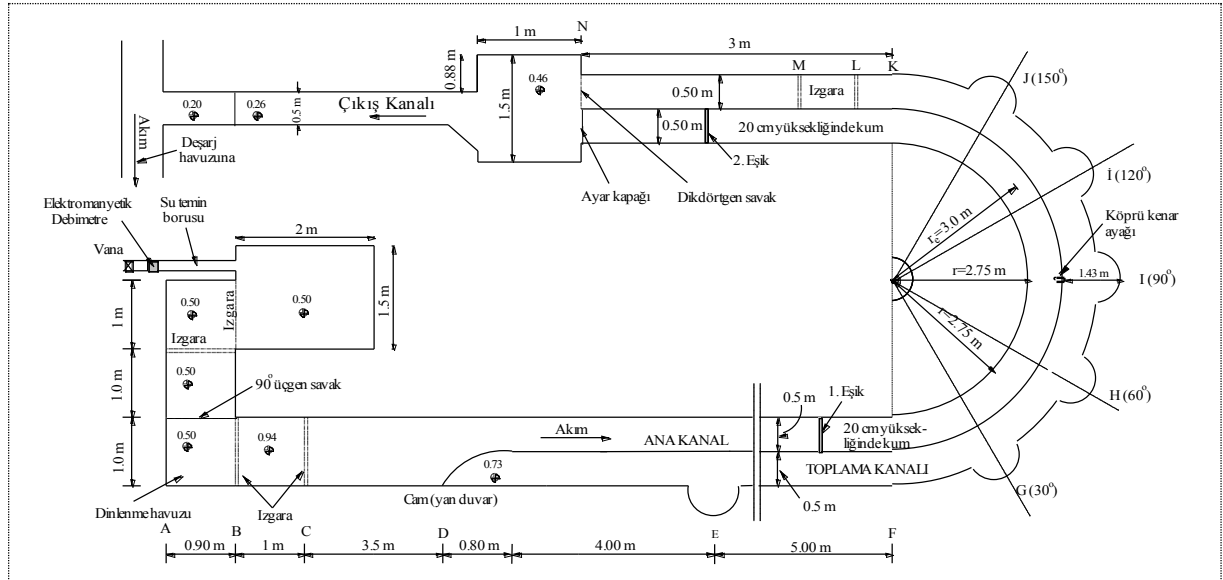
5.1 Deney Kanalı

Deneyler Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında mevcut deney kanalına köprü ayağı yerleştirilerek yapılmıştır. Laboratuvardaki mevcut açık kanal, bir ana kanal ve bir adet toplama kanalından oluşmaktadır. Ana kanal 0.50 m genişliğinde ve 0.50 m yüksekliğindedir. Toplama kanalı 0.50 m genişliğinde, 0.70 m yüksekliğindedir (Şekil 5.1).

Deney setinin tüm yan duvarları, cam ve pleksiglas malzemeden imal edilmiştir. Ana kanal ve toplama kanalını birbirinden ayıran kısım ise, sac malzemeden yapılmıştır. Deney seti, püskürtme boya ile boyanmıştır. Set üzerine gerekli yerlere sakinleştiriciler yerleştirilmiştir. Deneyler yapılırken bu mevcut sakinleştiriciler yeterli gelmediği zaman, su yüzüne paralel 6 mm'lik demirden küçük karelere sahip bir sakinleştirici imal edilmiş, gerektiğinde kullanılmıştır. Bu şekilde limnimetre ile alınan okumalar oldukça hassas olmuştur. Deney kanalındaki bölümler ve özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

5.1.1 Su temin borusu ve debi ölçümü

Su temin borusunun çapı 10 inç'tir. Ana su temin borusundan yaklaşık 210 L/s debi alınabilmektedir. Laboratuvarımızda mevcut su temin sisteminde iki adet tank vardır. Biri bodrum katta diğeri üçüncü kattadır. Bodrum kattaki tank 100 m^3 ve üst kattaki tank ise 50 m^3 'tür. Üst kattaki tank üzerinde bir dolusavak yapılmıştır. Bu şekilde deney süresince su seviyesi sabit tutulmaktadır. Bu tanka bodrumdaki tanktan su basan üç adet pompa mevcuttur. Bunların her biri yaklaşık 77 L/s su basabilmektedir. 75 L/s'ye kadar tek pompa, sonraki debiler için ise iki veya üç pompa çalıştırılmaktadır.



5.1.2 Deney kanalını besleyen dinlendirme havuzu

Kanalı besleyen dinlendirme havuzu üç bölmeden oluşmaktadır. Bunlar üzerinde sakınleştiriciler yerleştirilmiştir. Boyutları şekilde verilmiştir. Havuzun sonunda ise, debi ölçümü amacıyla 90°'lik keskin kenarlı bir üçgen savak yerleştirilmiştir. Savağın tepe noktasının, havuz tabanından yüksekliği 0.95 m'dir. Debi ölçümü debimetre ile yapıldığından üçgen savak sadece karşılaştırma için ilk aşamalarda kullanılmıştır.



Şekil 5.2 Kanalı besleyen dinlendirme havuzu

5.1.3 Savaktan sonraki dinlendirme havuzu

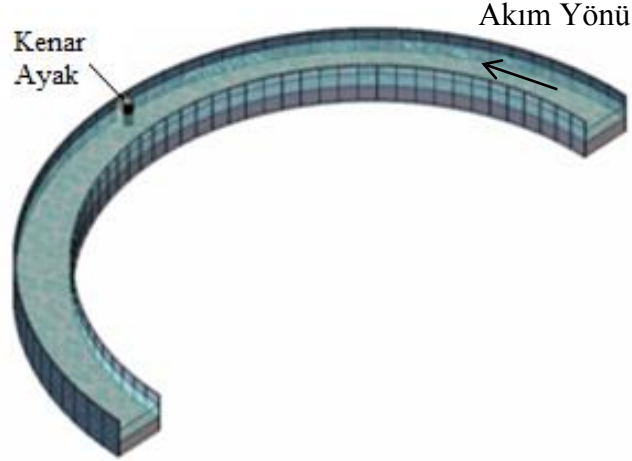
Üçgen savaktan kanala akan su, 1.00x0.90 m boyutunda ikinci bir dinlendirme havuzunda dinlendirilmiştir. Bu havuzun, su giriş ve çıkışında sakinleştiriciler mevcuttur.

5.1.4 Yaklaşım kanalı

Yaklaşım kanalı 4.50 m'lik doğrusal giriş kanalı, 0.80 m geçiş kanalı ve 9.00 m uzunluğunda ve 0.50x0.50 m en kesitli doğrusal ana kanaldan oluşmaktadır.

5.1.5 Kıvrımlı kanal

Kıvrımlı kanal, $r = 3$ m eksen yarıçaplı ve 180° 'lik kıvrımlı kanal kısmından oluşmaktadır (Şekil 4.3). Kıvrımlı kanal üzerine 30° , 60° , 90° , 120° , 150° 'lik kıvrım merkez açılarına köprü kenar ayakları sırasıyla yerleştirilmiştir.



Şekil 5.3 Kıvrımlı kanal ve $\alpha=90^\circ$ 'de dış kıyıya yerleştirilmiş köprü kenar ayağı

5.1.6 Doğrusal çıkış kanalı

Doğrusal çıkış kanalı 3 m uzunluğundadır. Toplama kanalı sonuna bir dikdörtgen savak yerleştirilmiştir. Bu kısımda iki adet sakinleştirici mevcuttur. Doğrusal kanalın ana kanal sonunda iki parçalı ve düz seviye ayar kapağı yerleştirilmiştir. Bu kapakların boyutları 0.25x0.50 m'dir. Sakinleştirici olarak tuğlalardan da yararlanılmıştır.

5.1.7 Köprü ayağının yerleştirildiği kıvrım açıları

Ana kanal dış duvarı, 5 mm'lik sac malzemeden ve iç duvarı cam malzemeden imal edilmiştir. Üst kısmı kutu profile tutturulmuş ve ölçüm arabası için raylar yerleştirilmiştir. Deneyler kıvrımlı kanalın hem iç kıyısında hem de dış kıyısına yerleştirilen köprü ayakları için yapılmıştır. Köprü kenar ayakları 30°, 60°, 90°, 120°, 150°'lik kıvrım açılarına yerleştirilmiştir. Kıvrımlı kanalın kaç derecelik açısında çalışılacaksa köprü kenar ayağı bu kısma yerleştirilmektedir.



Şekil 5.4 Köprü kenar ayağının kıvrım açısına yerleştirilmesi

5.1.8 Hareketli seviye ölçüm arabası

Ana kanal üzerindeki seviye ölçümleri raylar üzerinde hareket eden arabaya monte edilmiş dijital limnimetre (± 0.01 mm hassasiyetli) ile yapılmıştır. Araba hem doğrusal kısımda ve hem de kıvrımlı kısımda rahatlıkla hareket edecek şekilde tasarlanmıştır. Böylece, hem x ve hem de y doğrultusunda okumalar alınabilmektedir.



Şekil 5.5 Hareketli seviye ölçüm arabası

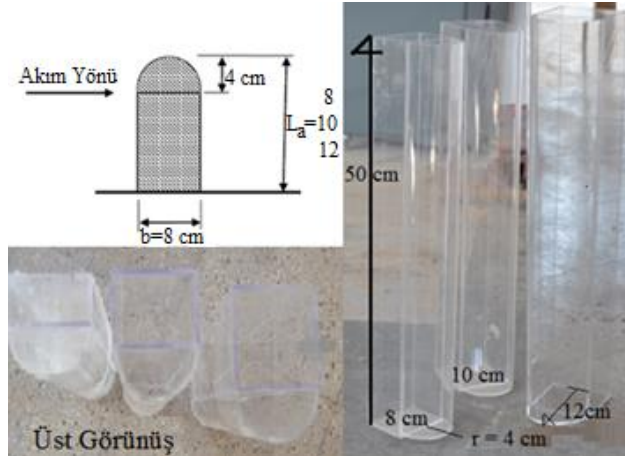
5.2 Giriş debisinin ölçülmesi

Giriş debisi, Siemens marka elektromanyetik bir debimetre kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 5.6). Debiler L/s cinsinden 0.01 L/s hassasiyetle ölçülmüştür.



Şekil 5.6 Giriş debisini ölçen elektromanyetik debimetre ve ayarlama vanası

5.3 Deneyde Kullanılan Köprü Ayağı Modellerinin Seçimi



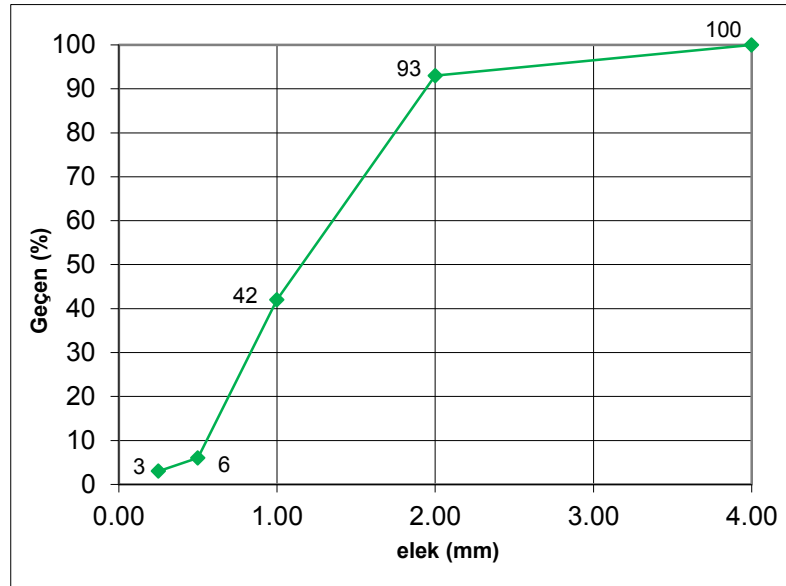
Şekil 5.7 Dairesel burunlu köprü yan ayağı boyutları

Ana kanala yerleştirilecek olan köprü ayakları pleksiglas malzemeden yapılmıştır. Dairesel burunlu (oblonik) köprü kenar ayağı $b=8$ cm genişliğinde, 50 cm yüksekliğinde olup $L_a=8,10$ ve 12 cm olmak üzere üç farklı uzunlukta ayak tipi seçilerek imalatı

yaptırılmıştır. Kenar ayağın ucu yarım daire şeklinde ve çapı 8 cm'dir. Köprü ayağı sırasıyla 30°, 60°, 90°, 120° ve 150°'lik açılarda ana kanalın iç ve dış kıyı duvarına sikonla dik olarak monte edilmiştir. Deneylerde daralma etkisi oluşmaması için aynı anda hem iç kıyıya hem de dış kıyıya köprü ayakları monte edilerek deneyler yürütölmemiştir. Önce iç kıyıya sonra dış kıyıya yerleştirilerek deneyler yürütölmüştür.

5.4 Deneyde kullanılan taban malzemesinin özellikleri

Bu deneysel çalışmada, taban malzemesi olarak granölometrisi ve özgül ağırlığı Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında yapılan deneylerle belirlenen kuvars kumu kullanılmıştır. Kumun özgül ağırlığı, $\gamma_s=2.65 \text{ N/m}^3$ 'tür. Yapı Laboratuvarında yapılan deneyler sonucunda, elde edilen granölometri eğrisi Şekil 5.7'de verilmiştir. Şekil 5.7'ye göre, $d_{10}=0.56 \text{ mm}$, $d_{16}=0.63 \text{ mm}$, $d_{60}=1.35 \text{ mm}$, $d_{84}=1.82$ olarak belirlenmiştir. Seçilen granölometriden, üniform malzeme kullanıldığı görölmektedir. $U=d_{60}/d_{10}=2.41<3$ 'tür. Burada; U=Üniformluk katsayısıdır. Sediment standart sapması ise, $\sigma_g=(d_{84}/d_{16})^{0.5}=1.70$ 'tir.



Şekil 5.8 Taban malzemesinin granölometri eğrisi

5.5 Taban malzemesi kritik hızlarının tayini

Taban malzemesini harekete geçirecek kritik akım hızları V_{kr} , logaritmik formdaki Eşitlik 5.2’den hesaplanmıştır (Melville ve Chiew, 1999; Önen, 2005).

$$\frac{V_{kr}}{u_{*kr}} = 5.75 \log \left(5.53 \frac{h}{d_{50}} \right) \quad (5.2)$$

burada u_{*kr} =kritik kayma hızı (m/s), h =su derinliği (m) ve d_{50} =malzemenin %50’sini geçiren elek çapıdır. Kayma hızları Shields Diyagramı kullanılarak bulunmuştur. 20 °C’de kuvars kumu için Shields diyagramı kullanılarak aşağıdaki ifade yazılabilir (Melville ve Chiew, 1999; Önen, 2005).

$$u_{*kr} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1}, 1 \text{ mm} < d_{50} < 100 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Medyan çap $d_{50}=1.16 \text{ mm}$ için (5.2) ve (5.3) eşitliklerinden, akımın çeşitli derinlikleri için taban malzemesini hareket ettirebilecek kritik hızlar için (5.4) eşitliği elde edilmiştir.

$$V_{kr} = 0.1557 \log(4767h) \quad (5.4)$$

Bu eşitlik, deney düzeneğinde test edilerek de doğrulanmıştır.

$0.5 \leq V/V_{kr} \leq 1.0$ temiz su oyulması durumunda V/V_{kr} hız aralıkları esas alınarak su yükseklikleri ve debi değerleri seçilerek temiz su oyulması durumu için geçerli olan kritik akım hızları denklem (5.4) eşitliğinden hesaplanmıştır

5.6 Deneysel çalışmada olayı etkileyen parametrelerin belirlenmesi

Kıvrımlı bir kanalda temiz su oyulması durumunda köprü ayağındaki oyulmaya etki eden birçok parametre vardır. Bunlar;

$$ds_{max} = f(L_a, b, V, V_{kr}, h, S, g, \rho_s, \rho, \mu, d_{50}, \sigma_g, t, B, t_{max}, \alpha) \quad (5.5)$$

Burada L_a = Kenar ayak uzunluğu, b = kenar ayak genişliği, V = ortalama akım hızı, h = su derinliği, S = Kanal eğimi, g = yerçekimi ivmesi, ρ_s = sediment yoğunluğu, ρ = akışkan yoğunluğu, μ = viskozite, d_{50} = malzemenin %50’sini geçiren elek çapı, σ_g = sedimentin

geometrik standart sapması; t = herhangi bir andaki oyulma süresi, B = kanal genişliği, t_{max} = maksimum oyulma süresi ve α =kıvrım açısıdır.

Bucking Pi teoremi uygulanarak Eşitlik 5.6'daki boyutsuz parametreler elde edilmiştir.

$$\frac{ds_{max}}{h} = f\left(\frac{L_a}{h}, \frac{b}{h}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{V}{\sqrt{gh}}, \frac{B}{h}, \frac{\mu}{U\rho h}, \frac{V.t}{h}, \frac{V_{kr}.t}{h}, S, \sigma_g, \frac{d_{50}}{h}, \frac{t}{t_{max}}, \alpha\right) \quad (5.6)$$

Deneyler bir adet sediment boyutu için yürütüldüğünden ρ_s ve d_{50} ihmal edilmiştir. Kanal taban eğimi deneylerde sabit tutulmuştur, bu nedenle S ihmal edilmiştir. Viskoz etkilerde ihmal edildiğinden Eşitlik 5.7 basitleştirilmiştir.

$$\frac{ds_{max}}{h} = f\left(\frac{L_a}{h}, \frac{b}{h}, \frac{V}{\sqrt{gh}}, \frac{B}{h}, \frac{V.t}{h}, \frac{V_{kr}.t}{h}, \frac{t}{t_{max}}, \alpha\right) \quad (5.7)$$

L_a/h , b/h 'ye ve L_a/h , B/h 'ye bölünerek ve $V.t/h$, $V_{kr}.t/h$ 'ye bölünerek Eşitlik 5.8 yeniden düzenlenirse;

$$\frac{ds_{max}}{h} = f\left(\frac{L_a}{h}, \frac{V}{\sqrt{gh}}, \frac{L_a}{b}, \frac{L_a}{B}, \frac{V}{V_{kr}}, \frac{t}{t_{max}}, \alpha\right) \quad (5.8)$$

$$\frac{ds_{max}}{L_a} = f\left(\frac{h}{L_a}, \frac{V}{\sqrt{gh}}, \frac{b}{L_a}, \frac{B}{L_a}, \frac{V}{V_{kr}}, \frac{t}{t_{max}}, \alpha\right) \quad (5.9)$$

veya

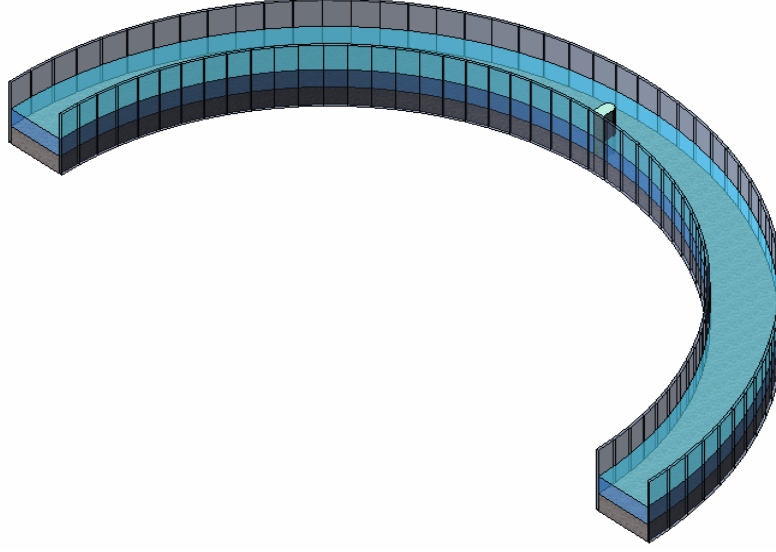
$$\frac{ds_{max}}{L_a} = f\left(\frac{h}{L_a}, Fr, \frac{b}{B}, \frac{V}{V_{kr}}, \frac{t}{t_{max}}, \alpha\right) \quad (5.10)$$

elde edilir.

Böylece oyulma derinliğini etkileyen boyutsuz parametreler elde edilmiş olur.

5.7. Deneysel yöntem

Bu çalışma 3 m eksen eğrilik yarıçapına sahip bir kıvrımlı kanalda, iç ve dış kıyılarda 30°, 60°, 90°, 120° ve 150°'lik kıvrım açılarında yapılmıştır. Kıvrımlı kanalın toplam genişliği 100 cm'dir. Bunun 50 cm'lik kısmı ana kanal, diğer 50 cm'lik kısmı ise toplama kanalıdır. Ana kanal derinliği 50 cm, toplama kanalının derinliği ise 70 cm'dir (Şekil 5.10).



Şekil 5.9 İç kıyıya yerleştirilen köprü kenar ayağının görünümü

Dairesel burunlu köprü kenar ayağı $b=8$ cm genişliğinde, 50 cm yüksekliğinde olup $L_a=8,10$ ve 12 cm olmak üzere üç farklı uzunlukta ayak tipi seçilerek imalatı yaptırılmıştır. Kenar ayağın ucu yarım daire şeklinde ve çapı 8 cm'dir. İlk bir saatte 15 dakikada bir, ikinci saatte 20 dakikada bir, üçüncü saatte 30 dakikada bir ve sonraki sürelerde 60'şar dakikada bir oyulma derinlikleri ölçülmüştür. Temiz su oyulmasında denge oyulma derinliği deneyleri maksimum 660 dakikaya kadar sürdürülmüştür. Tablo 5.2'de görüldüğü gibi $\alpha=30^\circ$ 'de 24 adet deney yapılmıştır. Aynı şekilde 60°, 90°, 120° ve 150°'lik açılarının her birinde de 24 adet deney yapılarak toplamda $24 \times 5=120$ adet deney yapılmıştır. Bu deneylerde ayak genişliğinin yanında su yüksekliği ve debi de değiştirilmiş ve oyulma üzerindeki etkisi incelenmiştir.

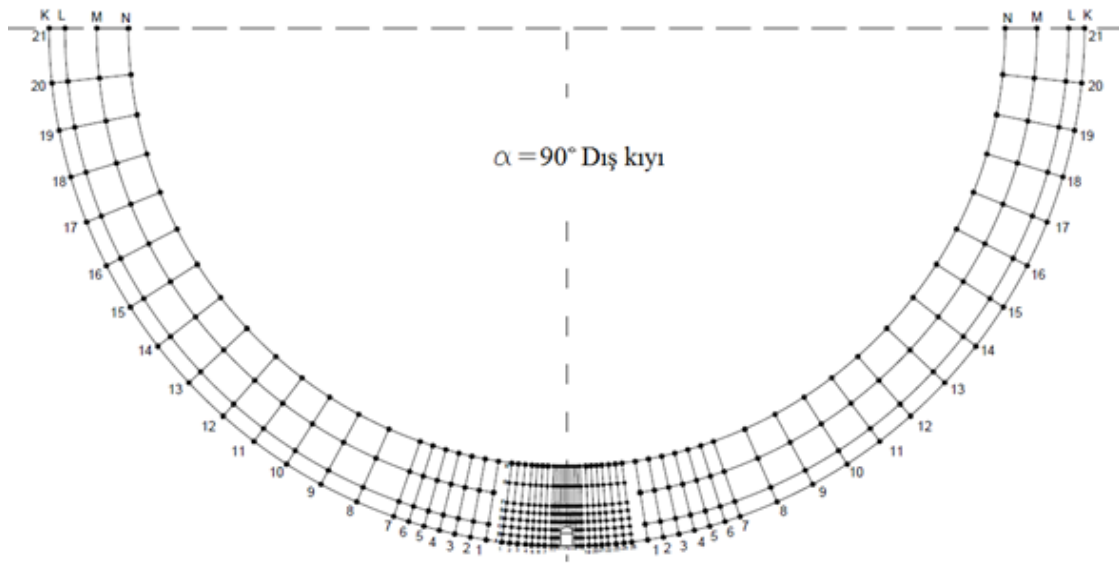
Tablo 5.1 Kırırmlı kanalda iç kıyı ve dış kıyıda deney verileri

Deney No	Ayak şekli	DEBİ	h	V	V_{kr}	V/V_{kr}
1	$L_a=8$ cm (dış kıyı)	23	150	0.307	0.4444	0.6901
2		26	150	0.347	0.4444	0.7801
3		30	160	0.375	0.4488	0.8356
4		35	170	0.412	0.4529	0.9093
5	$L_a=8$ cm (iç kıyı)	23	150	0.307	0.4444	0.6901
6		26	150	0.347	0.4444	0.7801
7		30	160	0.375	0.4488	0.8356
8		35	170	0.412	0.4529	0.9093
9	$L_a=10$ cm (dış kıyı)	23	150	0.307	0.4444	0.6901
10		26	150	0.347	0.4444	0.7801
11		30	160	0.375	0.4488	0.8356
12		35	170	0.412	0.4529	0.9093
13	$L_a=10$ cm (iç kıyı)	23	150	0.307	0.4444	0.6901
14		26	150	0.347	0.4444	0.7801
15		30	160	0.375	0.4488	0.8356
16		35	170	0.412	0.4529	0.9093
17	$L_a=12$ cm (dış kıyı)	23	150	0.307	0.4444	0.6901
18		26	150	0.347	0.4444	0.7801
19		30	160	0.375	0.4488	0.8356
20		35	170	0.412	0.4529	0.9093
21	$L_a=12$ cm (iç kıyı)	23	150	0.307	0.4444	0.6901
22		26	150	0.347	0.4444	0.7801
23		30	160	0.375	0.4488	0.8356
24		35	170	0.412	0.4529	0.9093

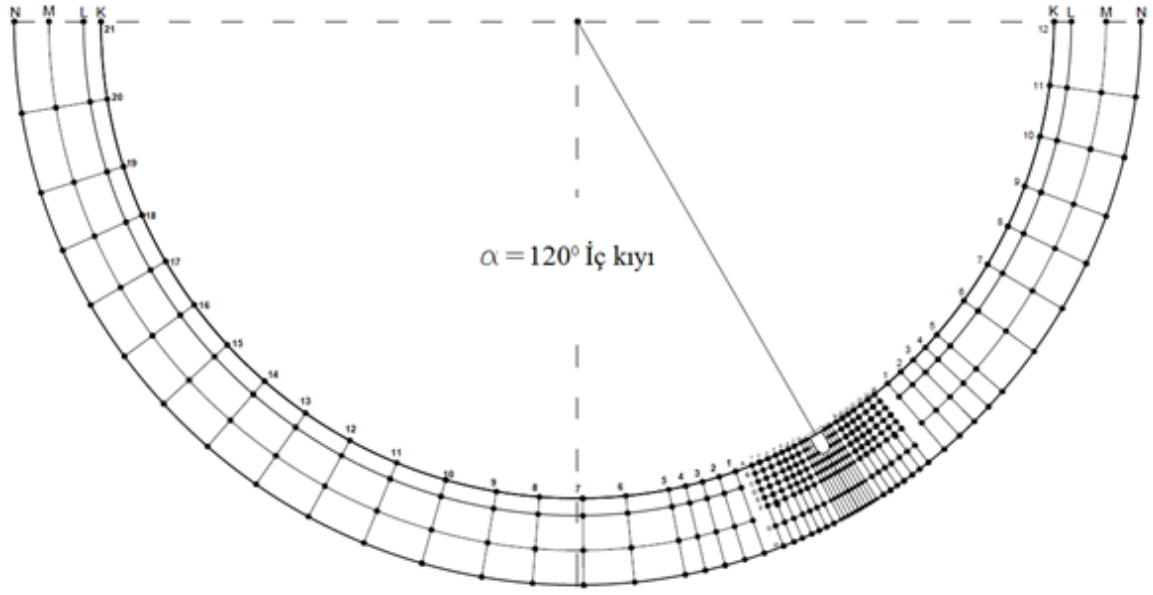
Deneyler 50 cm'lik ana kanalda yapılmıştır. Ana kanal üzerindeki 1. ve 2. eşik arasına 20 cm yüksekliğinde kuvars kumu yerleştirilmiştir. Her deneyden önce kum karıştırılarak ve sıkıştırılarak taban düzlenmiştir. Taban düzlenmesini aynı seviyede düzgün olarak serebilmek için, raylar üzerinde hareket eden araba üzerine bir aparat yerleştirilerek taban düzlemesi yapılmıştır. Taban düzenlemesi yapıldıktan sonra deneye başlarken vana çok az açılarak kanala su yavaş bir şekilde verilip kumun bozulmaması sağlanmıştır. Tüm kanal boyunca su seviyesi eşit olduktan sonra istenilen debi değeri Siemens marka elektromanyetik bir debimetre kullanılarak ayarlanır. Deneyler $V/V_{kr} < 1.0$ temiz-su

oyulması durumuna göre değerler alınarak yapılmıştır. Ana kanal kıvrım boyunca seviye ölçümleri, raylar üzerinde hareket eden arabaya monte edilmiş dijital limnimetre (± 0.01 mm hassasiyetli) ile yapılmıştır.

Deney tamamlandıktan sonra (maksimum 12 saat sonunda), vana yavaşça kapatılarak tabanda oluşan topografyanın bozulmaması için 20 cm'lik eşik doğrusal kanalın mansabındaki eşiğin üzerine tekrar konulmuş ve bu sayede suyun kanaldan yavaşça tahliyesi sağlanmıştır. Tüm bu işlemlerden sonra dijital limnimetre yardımıyla kıvrımlı kanal boyunca köprü kenar ayak etrafında daha sık olmak üzere belirli aralıklarda taban seviyesi ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.11'de iç kıyı ve dış kıyıda taban topografyası ölçümlerinin alındığı noktalar gösterilmiştir. Topoğrafya ölçümlerinde köprü ayağı etrafındaki oyulmayı daha iyi gözlemlemek amacıyla daha sık aralıklarla okumalar alınmıştır. Kanal boyunca da tabanda değişimler olduğu gözlemlendiğinden dolayı tüm kanalda da ölçümler alınıp grafikler, arazi çizimleri programlar yardımı ile çizilip yorumlanmıştır. Bu çalışmada Autocad, İdecad, Netcad, ve Office programları ile çizimler yapılmıştır.



a) 90° kıvrım açısında dış kıyı için okuma alınan noktalar



b) 120° kıvrım açısında dış kıyı için okuma alınan noktalar

Şekil 5.10 İç kıyı ve dış kıyıda taban topografyası ölçümlerinin alındığı noktalar

6. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ

Köprü kenar ayağı, kıvrımlı bir kanalda iç ve dış kıyılarda 30°, 60°, 90°, 120° ve 150°'lik açılara yerleştirilerek deneyler yapılmıştır. Farklı ayak uzunlukları için temiz su oyulması durumu farklı akım koşullarına göre köprü kenar ayağı etrafında oluşan oyulma deneysel olarak incelenmiştir. Kenar ayak uzunluğunun maksimum oyulmaya ve taban geometrisine olan etkisi uzun süreli deneyler yapılarak incelenmiştir.

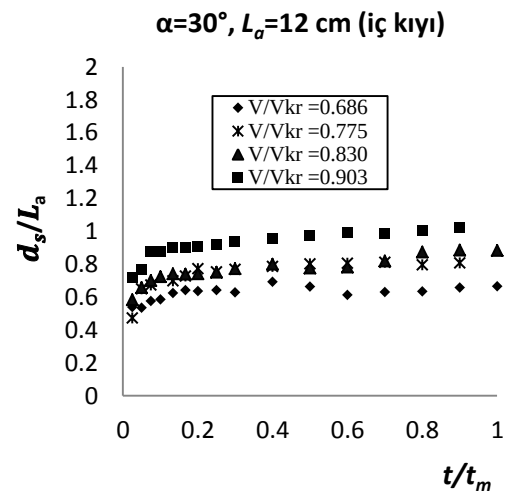
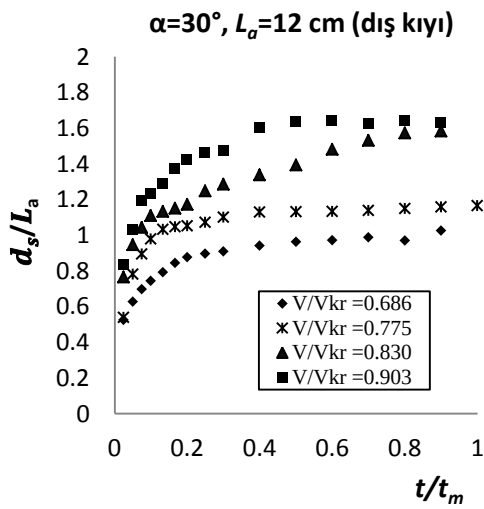
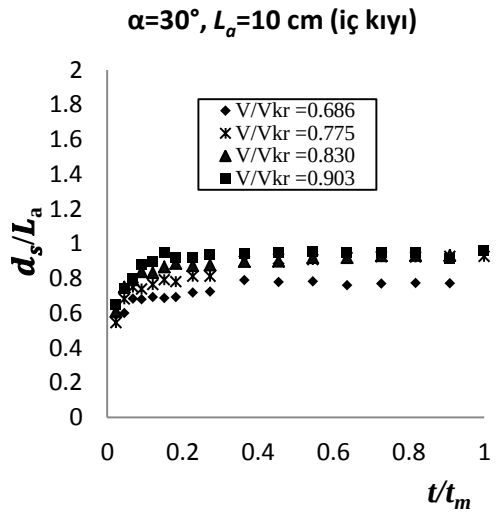
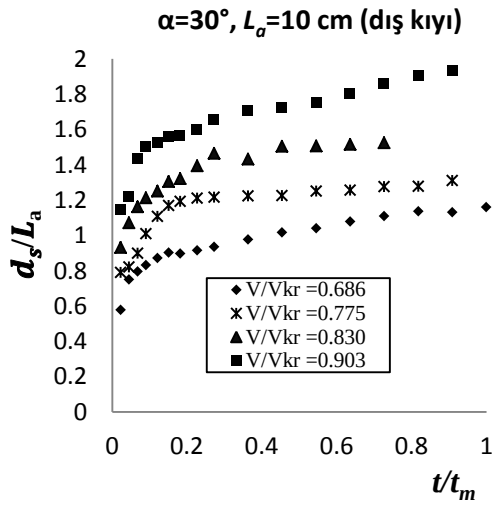
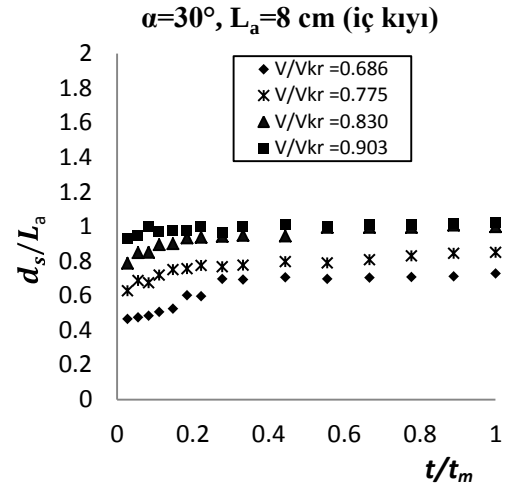
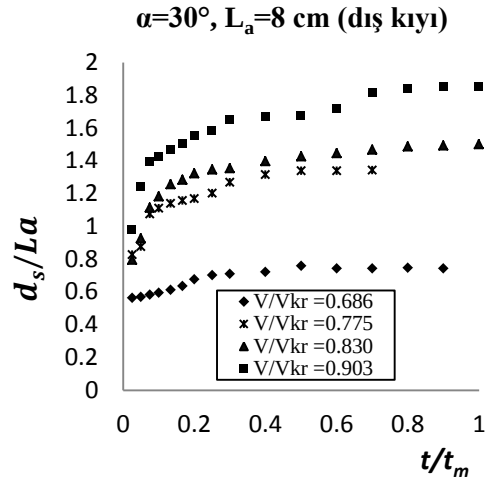
Yapılan bu deneylerin esas amacı, kanal kıvrımının iç ve dış kıyısına, kanal boyunca çeşitli açılarda yerleştirilen farklı genişlikteki oblonik ayaklar etrafında oluşan yerel oyulma derinliklerinin temiz-su oyulması durumunda oluşan taban profilinin değişimi ve maksimum oyulmanın yerinin belirlenmesidir.

6.1 Maksimum oyulma derinliğinin değişimi

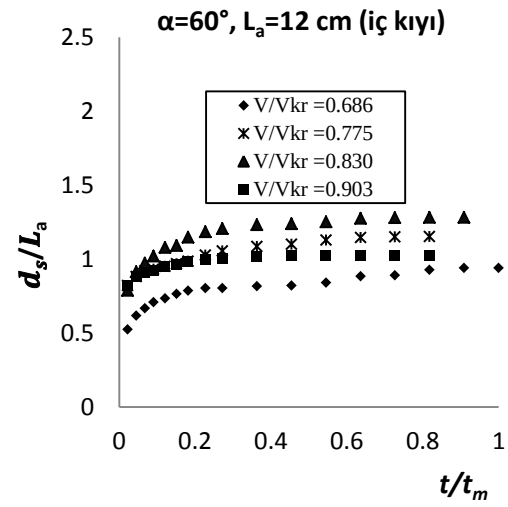
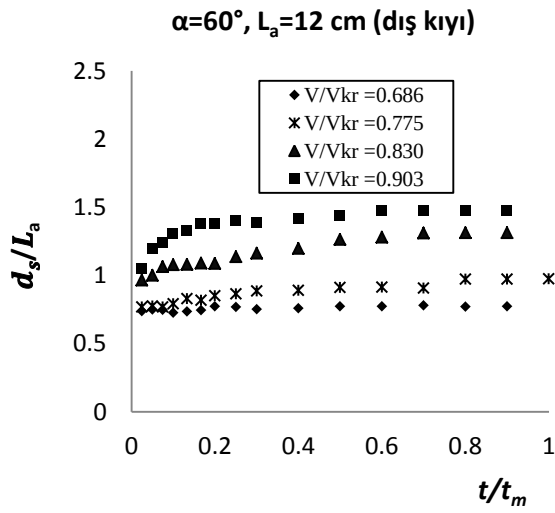
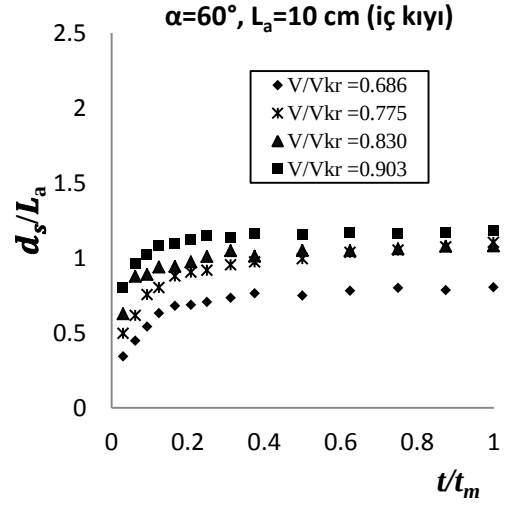
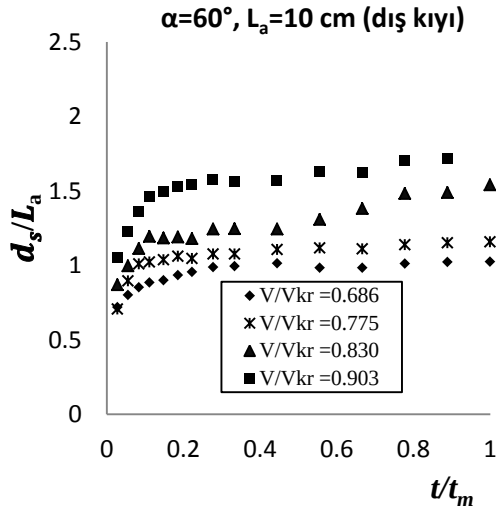
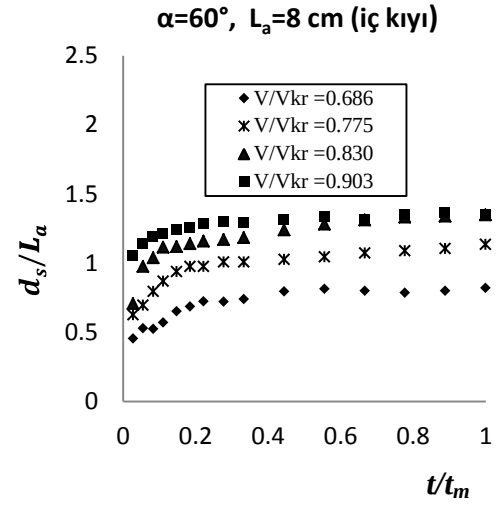
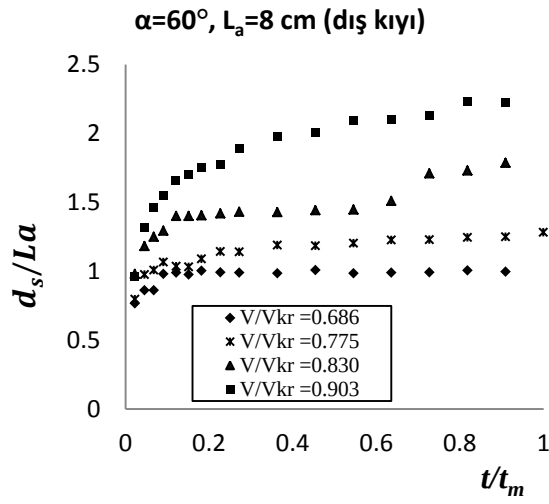
Kıvrımlı kanalın $\alpha=30^\circ$, 60° , 90° , 120° ve 150° 'lik açılarda ana kanalın iç ve dış kıyı duvarına köprü kenar ayağı yerleştirilip ölçülen maksimum oyulma derinlikleri boyutsuz parametreler d_s/L_a ve t/t_m cinsinden alınarak; akım şiddetinin oyulma derinliği ile değişimi aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

Şekil 6.1'de $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında iç ve dış kıyıda gerçekleştirilen oyulma deneylerinin sonuçları verilmiştir. Literatürde hareketli taban oyulmasının yerine temiz-su oyulması deneyleri daha çok yapılmaktadır. Kararlı bir durum olması, daha büyük oyulma derinliklerinin olması tasarımcılara çok daha iyi fikir vereceğinden deneyler temiz-su şartlarında yürütülmüştür. Akım şiddetinin (V/V_{kr}) maksimum oyulma derinliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu Şekil 6.1'de görülmektedir. Dış kıyıda oyulma daha fazla olmuştur bunun en önemli nedeni sekonder akımın etkisidir. 200 dakikaya kadar maksimum oyulma derinliğinin artma eğilimi bu süreden sonrakilere göre daha fazla olmaktadır.

Şekil 6.2'de $\alpha=60^\circ$ 'de dış kıyıda oyulma iç kıyıya göre daha fazla olmuştur bunun en önemli nedeni sekonder akımın etkisidir. 200 dakikaya kadar maksimum oyulma derinliğinin artma eğilimi bu süreden sonrakilere göre daha fazla olmaktadır. $L_a=12$ cm hariç maksimum oyulma maksimum akım şiddetinde meydana gelmektedir.



Şekil 6.1 $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında yapılan deneyler



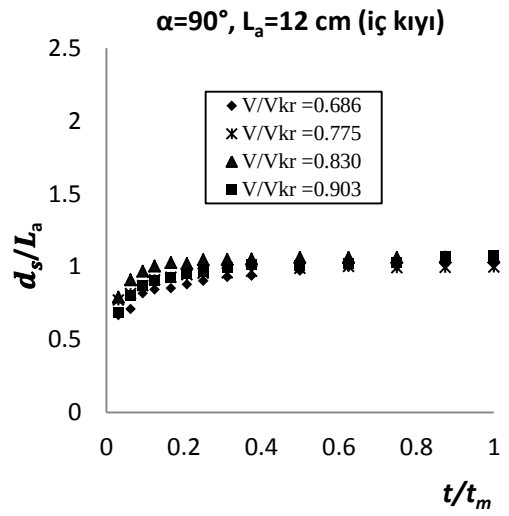
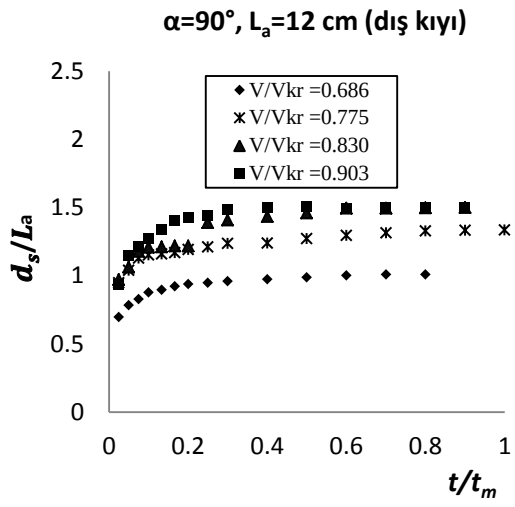
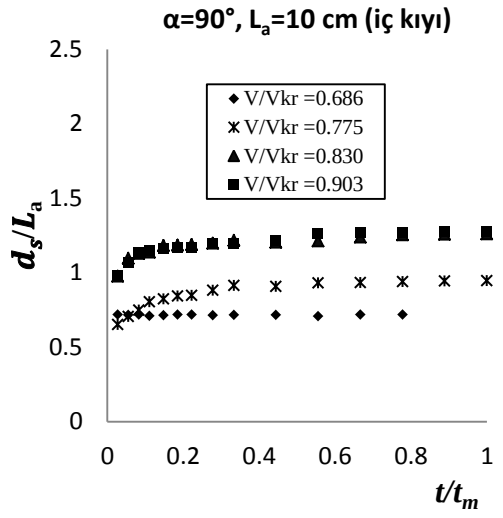
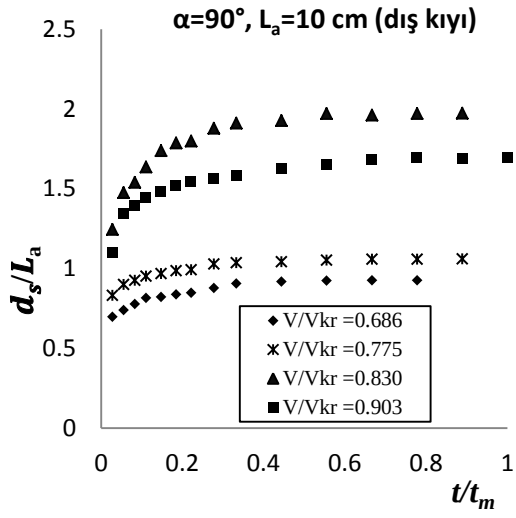
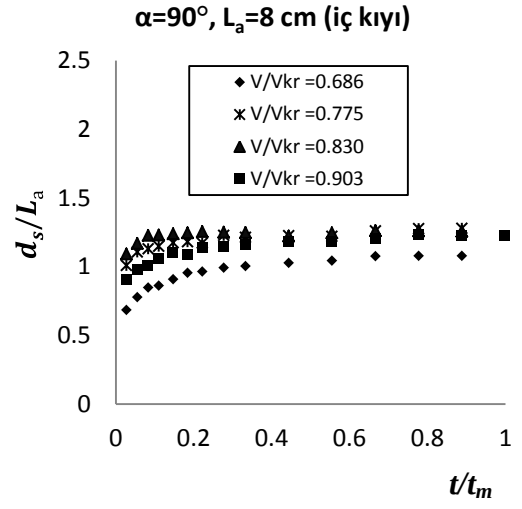
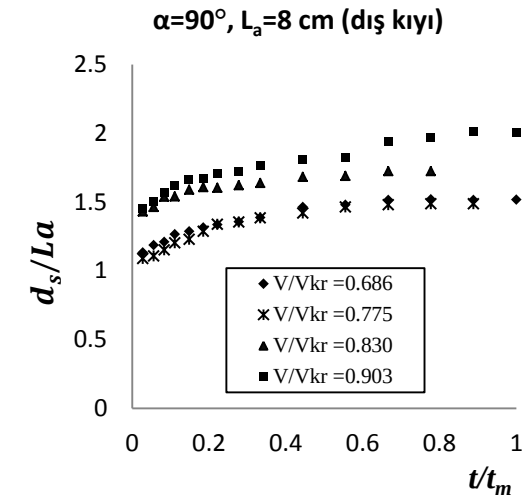
Şekil 6.2 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında yapılan deneyler

Şekil 6.3’de $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında iç ve dış kıyıda gerçekleştirilen oyulma deneylerinin sonuçları verilmiştir. Akım şiddetinin (V/V_{kr}) maksimum oyulma derinliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu Şekil 6.3’de görülmektedir. Dış kıyıda oyulma iç kıyıya göre daha fazla olmuştur. Burada $L_a=10$ cm hariç maksimum oyulma maksimum akım şiddetinde meydana gelmektedir. $L_a=10$ cm(dış kıyı)’de ise maksimum oyulma $V/V_{kr}=0.830$ ’da oluşmaktadır.

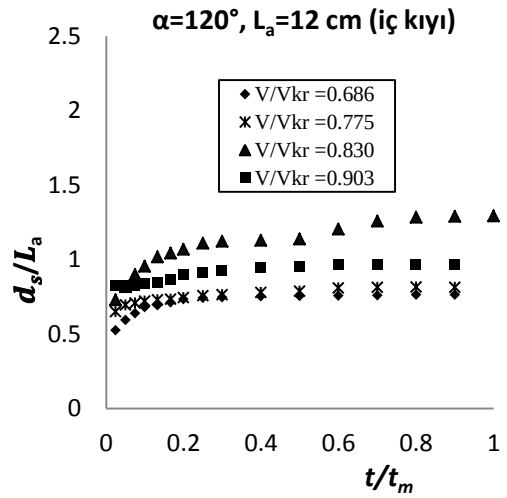
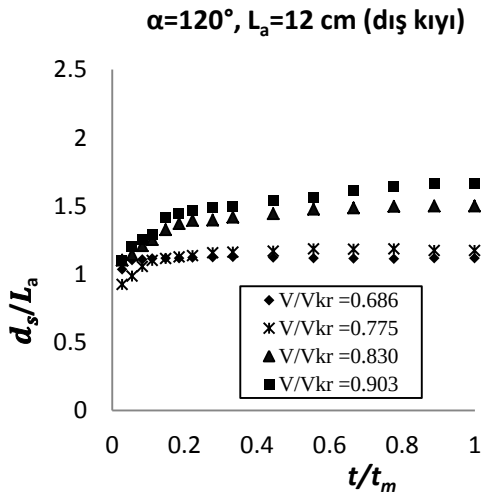
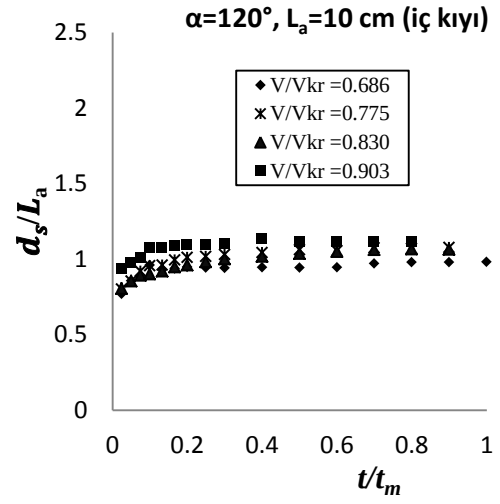
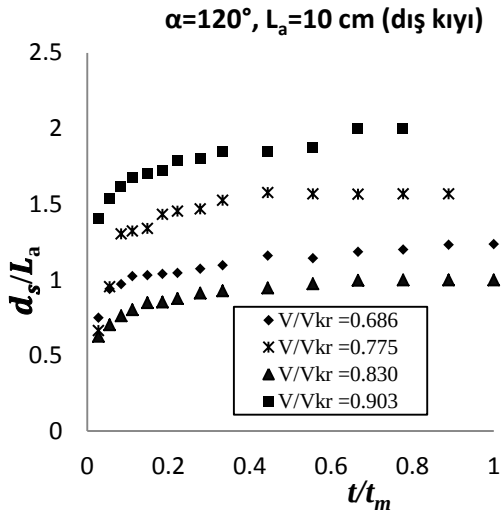
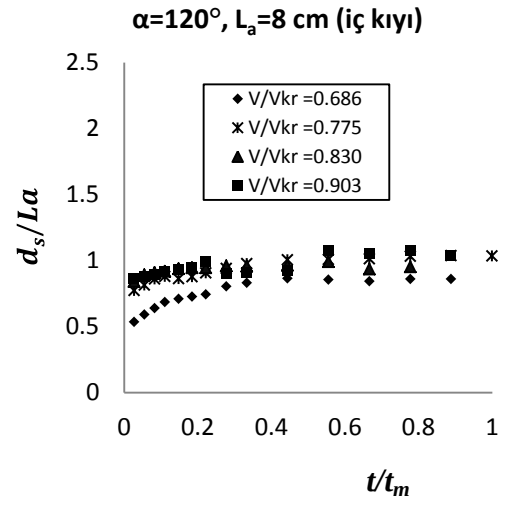
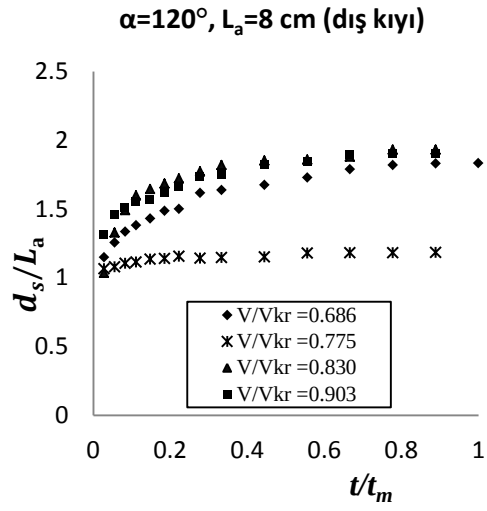
Şekil 6.4’de $\alpha=120^\circ$ ’de dış kıyıda oyulma iç kıyıya göre daha fazla olmuştur bunun en önemli nedeni sekonder akımın etkisidir. 200 dakikaya kadar maksimum oyulma derinliğinin artma eğilimi bu süreden sonrakilere göre daha fazla olmaktadır. $L_a=12$ cm hariç maksimum oyulma maksimum akım şiddetinde meydana gelmektedir. $L_a=12$ cm (iç kıyı)’de ise maksimum oyulma $V/V_{kr}=0.830$ ’da oluşmaktadır.

Şekil 6.5’te $\alpha=150^\circ$ ’de dış kıyıda oyulma iç kıyıya göre daha fazla olmuştur bunun en önemli nedeni sekonder akımın etkisidir. 200 dakikaya kadar maksimum oyulma derinliğinin artma eğilimi bu süreden sonrakilere göre daha fazla olmaktadır. $L_a=8$ cm (iç kıyı) hariç genel olarak maksimum oyulma maksimum akım şiddetinde meydana gelmektedir. $L_a=8$ cm(iç kıyı)’de ise maksimum oyulma $V/V_{kr}=0.830$ ’da oluşmaktadır.

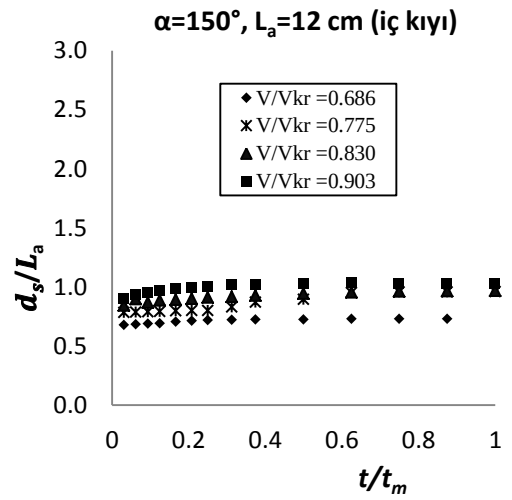
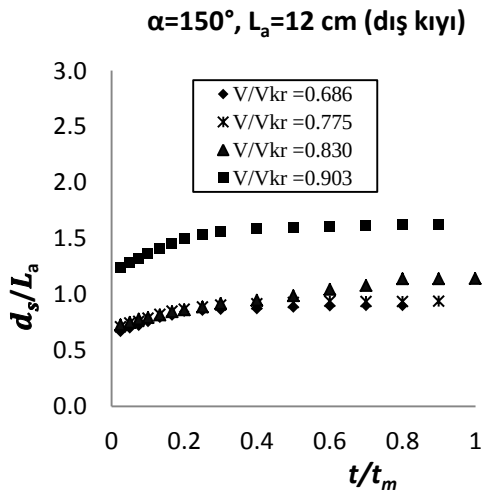
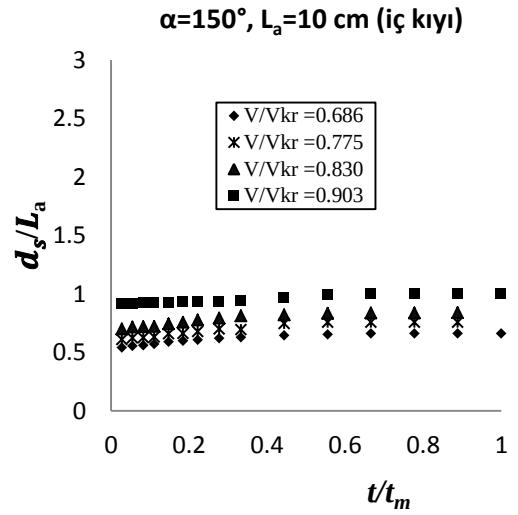
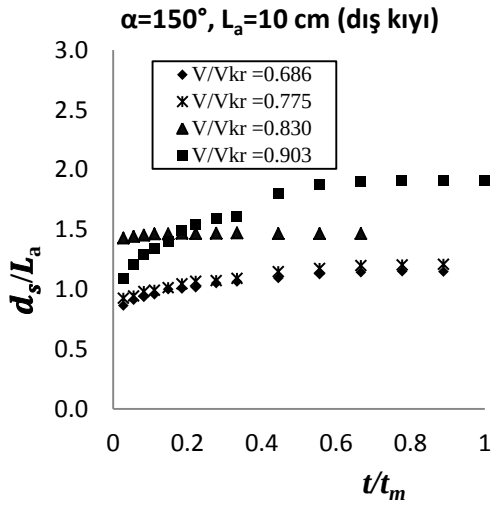
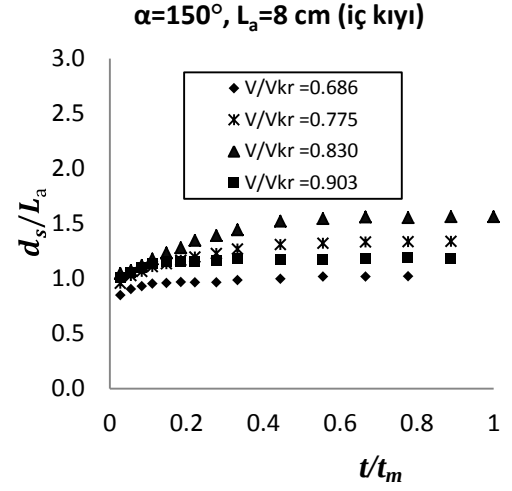
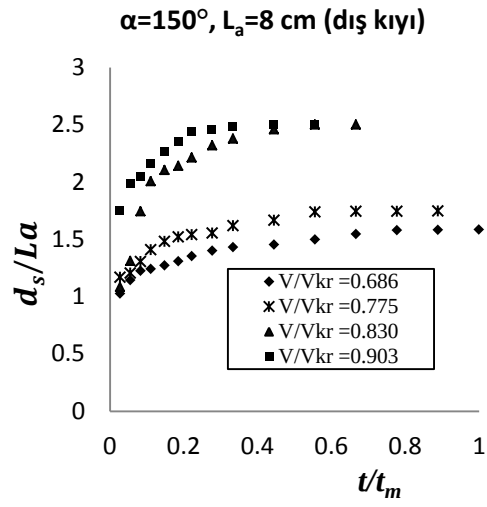
Kıvrımlı kanalda akım olayının karmaşık yapısından dolayı kıvrımın her açısında oyulmanın farklı olduğu gözlenmiştir. Maksimum oyulma derinliği hakkında genel olarak şu sonuca ulaşılmaktadır. Kıvrımlı kanallarda da, düz kanallardaki gibi akım şiddeti (V/V_{kr}) arttığında oyulma derinliği de artmaktadır.



Şekil 6.3 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında yapılan deneyler



Şekil 6.4 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında yapılan deneyler

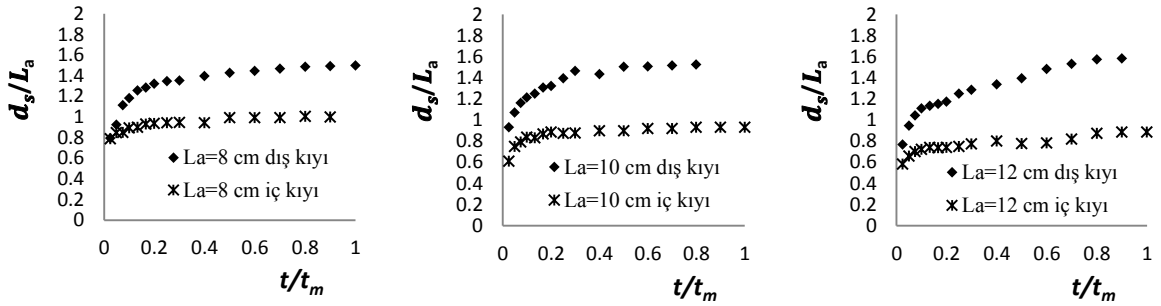


Şekil 6.5 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında yapılan deneyler

6.2 Dış kıyı ve iç kıyıdaki oyulma derinliklerinin karşılaştırılması

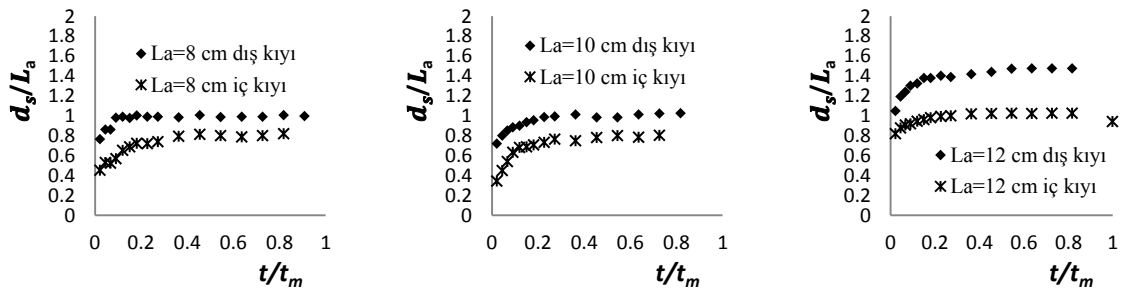
Kıvrımlı kanalın $\alpha=30^\circ$, 60° , 90° , 120° ve 150° 'lik açılarda ana kanalın iç ve dış kıyıları arasında boyutsuz parametreler y eksenini d_s/L_a ve x eksenini t/t_m cinsinden alınarak iç ve dış kıyıda oyulma derinliği değişimi aşağıda gösterilmiştir.

Şekil 6.6'da $\alpha=30^\circ$ 'de iç kıyı ve dış kıyı oyulma derinlikleri arasındaki oranlar sırasıyla 1.60, 1.80, 1.54'tür. Bu oranların ortalaması alındığı zaman ise, dış kıyıdaki maksimum oyulma derinliğinin iç kıyıdakinden 1.65 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni kıvrımlı kanalda sekonder akımın oluşmasıdır. Dış kıyı oyulurken iç kıyıya malzeme birikmektedir.



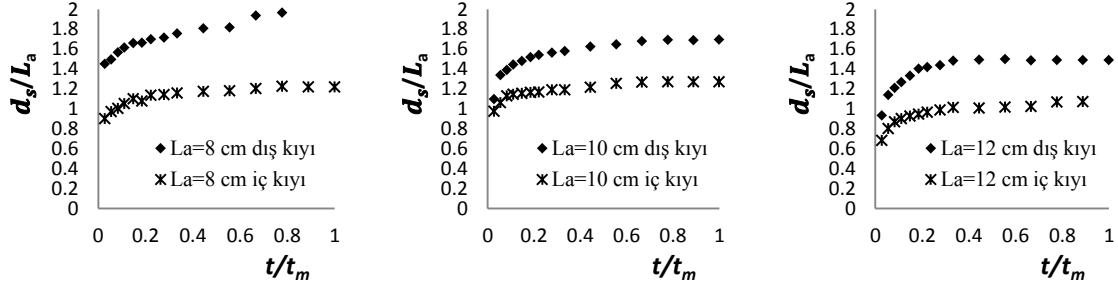
Şekil 6.6 $\alpha=30^\circ$ dış kıyı ve iç kıyıda oyulma derinliği değişimi

Şekil 6.7'de $\alpha=60^\circ$ 'de iç kıyı ve dış kıyı oyulma derinlikleri arasındaki oranlar sırasıyla 1.38, 1.39, 1.40'tır. Bu oranların ortalaması alındığı zaman ise, dış kıyıdaki maksimum oyulma derinliğinin iç kıyıdakinden 1.39 kat daha fazla olduğu görülmektedir. $\alpha=60^\circ$ 'de elde edilen oyulma derinlikleri $\alpha=30^\circ$ için elde edilenlerden daha az olmuştur.



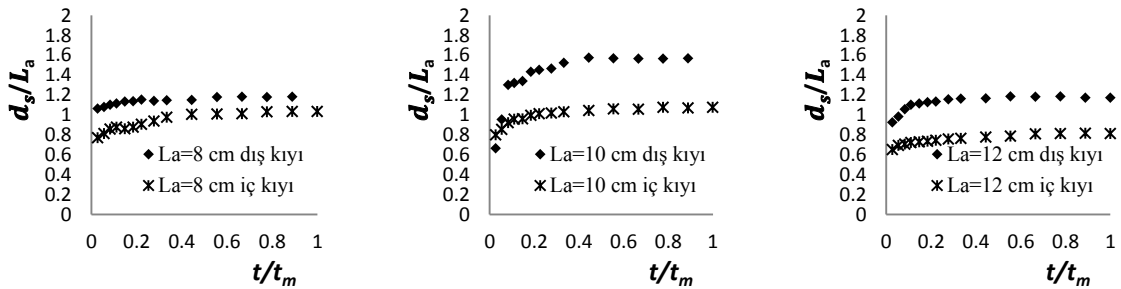
Şekil 6.7 $\alpha=60^\circ$ dış kıyı ve iç kıyıda oyulma derinliği değişimi

Şekil 6.8’de $\alpha=90^\circ$ ’de iç kıyı ve dış kıyı oyulma derinlikleri arasındaki oranlar sırasıyla 1.56, 1.30, 1.45’tir. Bu oranların ortalaması alındığı zaman ise, dış kıyıdaki maksimum oyulma derinliğinin iç kıyıdakinden 1.43 kat daha fazla olduğu görülmektedir.



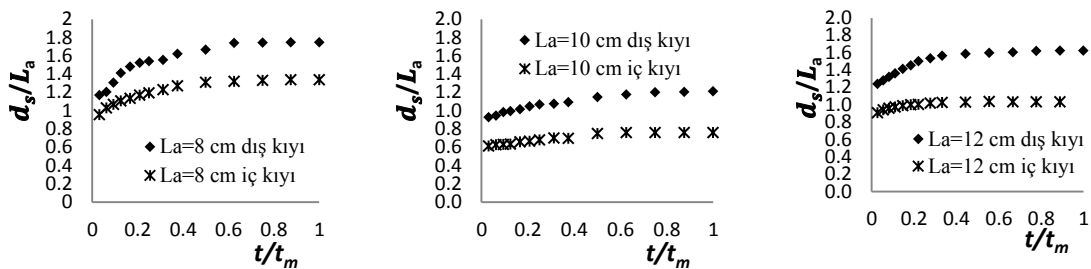
Şekil 6.8 $\alpha=90^\circ$ dış kıyı ve iç kıyıda oyulma derinliği değişimi

Şekil 6.9’da $\alpha=120^\circ$ ’de iç kıyı ve dış kıyı oyulma derinlikleri arasındaki oranlar sırasıyla 1.22, 1.38, 1.49’tir. Bu oranların ortalaması alındığı zaman ise, dış kıyıdaki maksimum oyulma derinliğinin iç kıyıdakinden 1.36 kat daha fazla olduğu görülmektedir. $\alpha=120^\circ$ ’de oluşan oyulma derinlikleri $\alpha=60^\circ$ ’de gözlemlenen oyulmaya yakın olmuştur.



Şekil 6.9 $\alpha=120^\circ$ dış kıyı ve iç kıyıda oyulma derinliği değişimi

Şekil 6.10’da $\alpha=150^\circ$ ’de iç kıyı ve dış kıyı oyulma derinlikleri arasındaki oranlar sırasıyla 1.28, 1.56, 1.49’dur. Bu oranların ortalaması alındığı zaman ise, dış kıyıdaki maksimum oyulma derinliğinin iç kıyıdakinden 1.44 kat daha fazla olduğu görülmektedir.



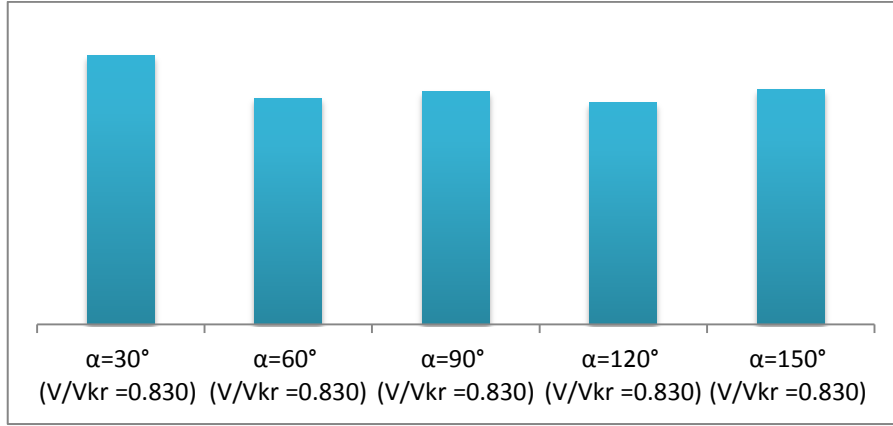
Şekil 6.10 $\alpha=150^\circ$ dış kıyı ve iç kıyıda oyulma derinliği değişimi

$\alpha=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ ve 150° 'lik açılardaki oranların ortalaması alındığında ise kıvrımlı kanalın iç kıyı ve dış kıyısı arasında şöyle bir bağıntı elde edilebilir.

$$d_{dış}=d_{iç} \times 1.45 \quad (6.1)$$

Kıvrım açısına göre oyulma derinlikleri arasında aşağıdaki gibi bir sıralama yapılabilir. Bu sıralama şekil 6.11'de de gösterilmiştir.

$$d_{s(30^\circ)} > d_{s(150^\circ)} > d_{s(90^\circ)} > d_{s(60^\circ)} > d_{s(120^\circ)}$$



Şekil 6.11 Kıvrım açısına göre oyulma derinliklerinin sıralanması

Burada 180° 'lik kıvrımlı bir kanalda maksimum hız yörüngesi normalinden saparak önce iç kıyıya doğru yönelir. $\alpha=45^\circ$ 'den sonra dış kıyıya doğru yönelerek, $\alpha=60^\circ$ civarında dış kıyıya yerleşmeye başlar. Dış kıyıya yerleşen maksimum hız yörüngesi $\alpha=120^\circ$ 'den sonra tekrar kanal eksenine yönelerek, kıvrım çıkışında kanal eksenine yakın olduğu daha önce ifade etmiştik. Ağaçoğlu 1995 yılında yaptığı çalışmaya göre, kanal giriş ve çıkışında hızın kanal ekseninden iç kıyıya doğru yöneldiği $\alpha=30^\circ$ ve $\alpha=150^\circ$ 'lik bölgede oyulma derinliği en fazla ve ayrıca $d_{s(30^\circ)} > d_{s(150^\circ)}$ daha büyük olduğu görülmektedir. Benzer şekilde $\alpha=60^\circ$ 'de ise maksimum hızın dış kıyıda olduğu ve oyulma derinliğinin diğer kıvrım açılarına göre daha az oyulma olduğu ve $d_{s(60^\circ)} > d_{s(120^\circ)}$ olduğu görülmektedir. Kıvrımlı kanaldaki oyulma derinliği hız yörüngesi iç kıyıdayken daha fazla dış kıyıdayken daha az olduğu söylenebilir.

6.3 Köprü kenar ayağı uzunluğunun taban oyulmasına etkisi

Kıvrımlı kanalın $\alpha=30^\circ$, 60° , 90° , 120° ve 150° 'lik açılarda ana kanalın iç ve dış kıyı duvarına köprü kenar ayağı yerleştirilip ölçülen maksimum oyulma derinlikleri boyutsuz parametreler d_s/L_a ve t/t_m cinsinden alınarak; ayak uzunluğunun oyulma derinliği ile değişimi aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. ($V/V_{kr}=0.775$ seçilmiştir.)

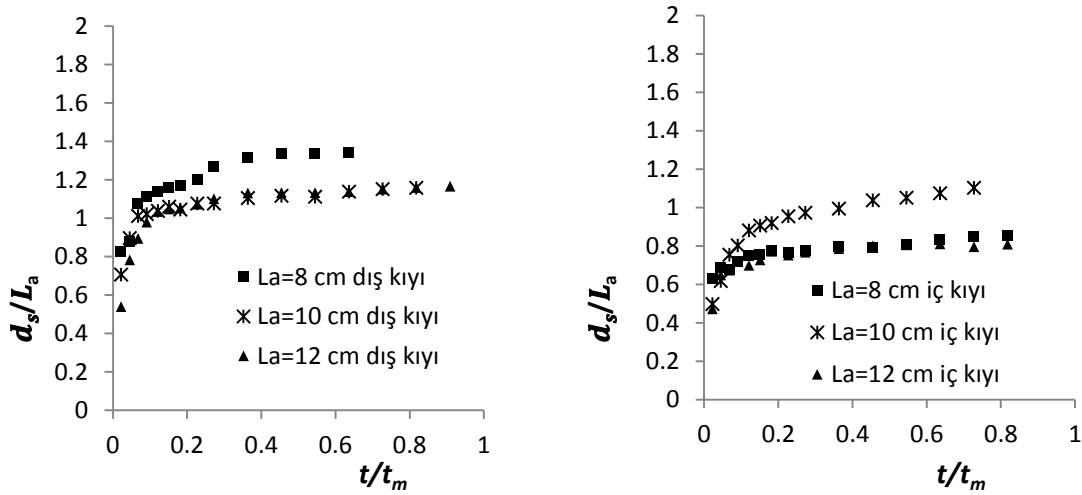
Şekil 6.12, $\alpha=30^\circ$ 'de dış kıyıda kenar ayak uzunluğu $L_a=8$ iken oyulma maksimumdur. İç kıyıda ise kenar ayak uzunluğu $L_a=10$ iken oyulma derinliği maksimumdur.

Şekil 6.13, $\alpha=60^\circ$ 'de dış kıyıda kenar ayak uzunluğu $L_a=8$ iken oyulma maksimumdur. İç kıyıda ise kenar ayak uzunluklarında oyulma derinlikleri benzerdir.

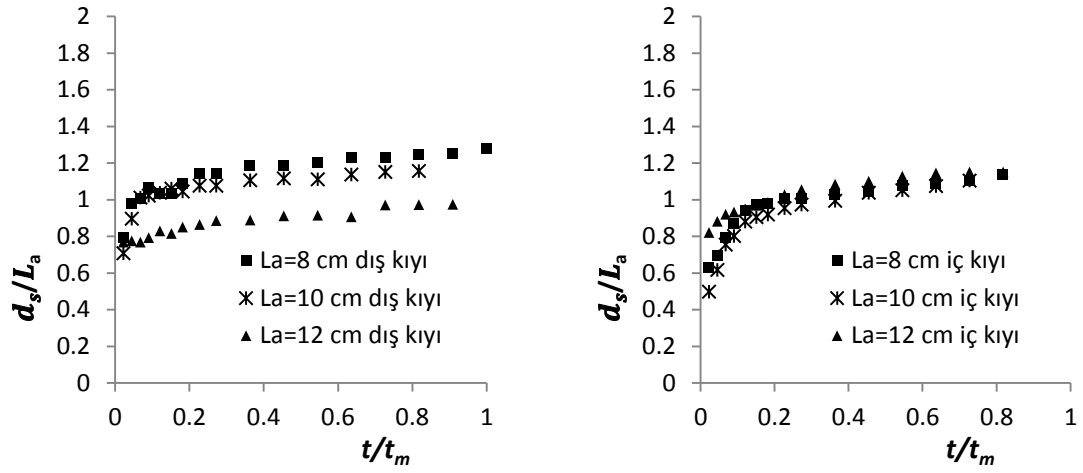
Şekil 6.14, $\alpha=90^\circ$ 'de dış kıyıda ve iç kıyıda kenar ayak uzunluğu $L_a=8$ iken oyulma maksimumdur.

Şekil 6.15, $\alpha=120^\circ$ 'de iç kıyı ve dış kıyıda $L_a=10$ cm'de maksimum oyulma oluşmaktadır.

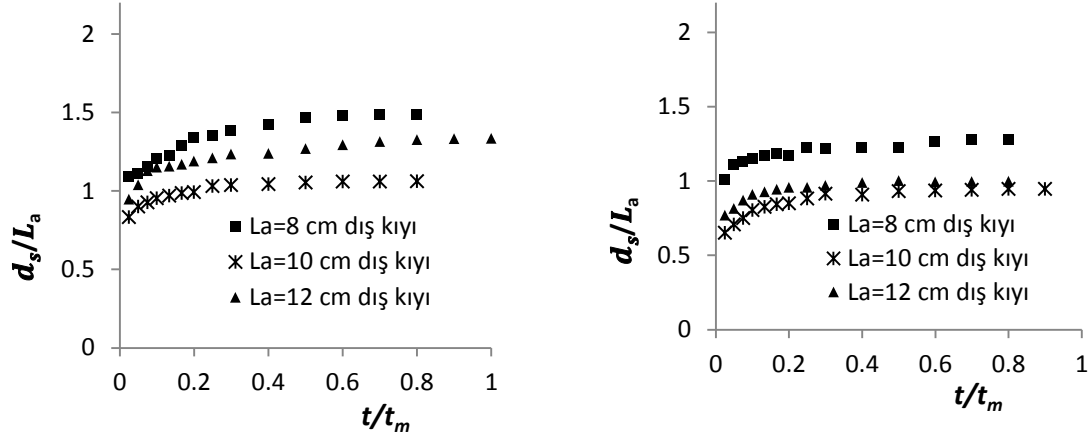
Şekil 6.16, $\alpha=150^\circ$ 'de dış kıyı ve iç kıyıda kenar ayak uzunluğu $L_a=8$ cm'de ise maksimum olmaktadır ($L_a=10 < L_a=12 < L_a=8$).



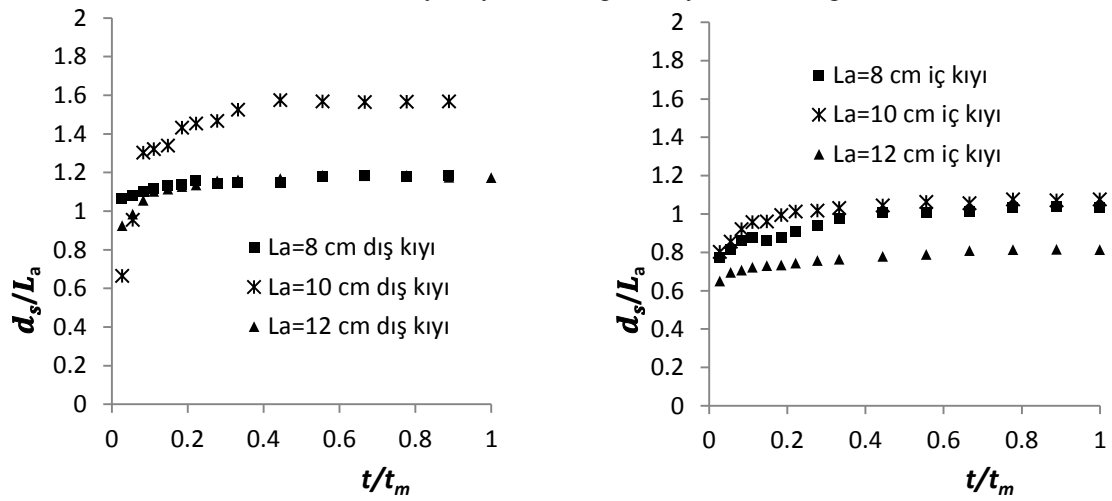
Şekil 6.12 $\alpha=30^\circ$ kenar ayak uzunluğunun oyulma derinliğine etkisi



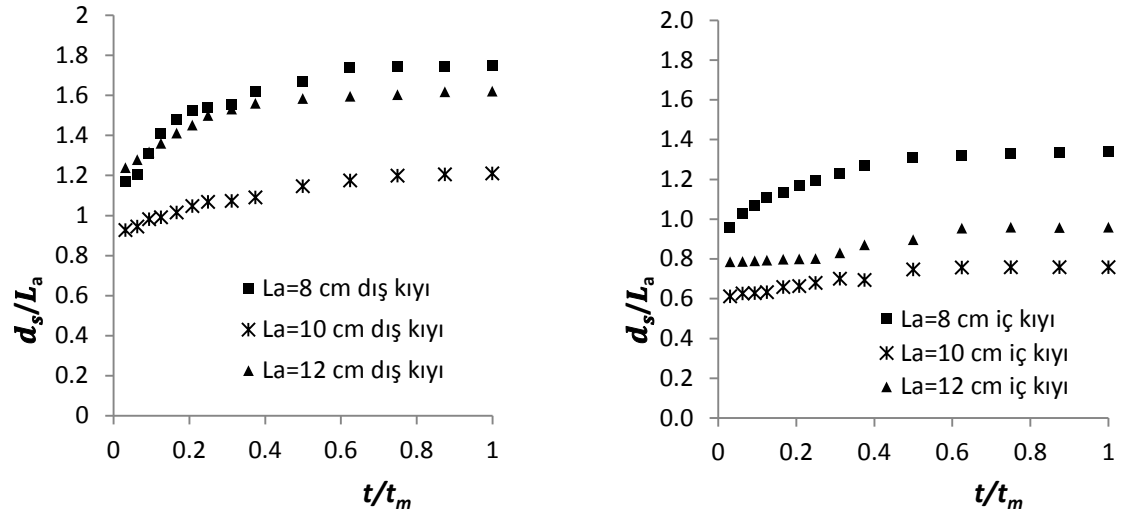
Şekil 6.13 $\alpha=60^\circ$ yan ayak uzunluğunun oyulma derinliğine etkisi



Şekil 6.14. $\alpha=90^\circ$ yan ayak uzunluğunun oyulma derinliğine etkisi



Şekil 6.15 $\alpha=120^\circ$ yan ayak uzunluğunun oyulma derinliğine etkisi



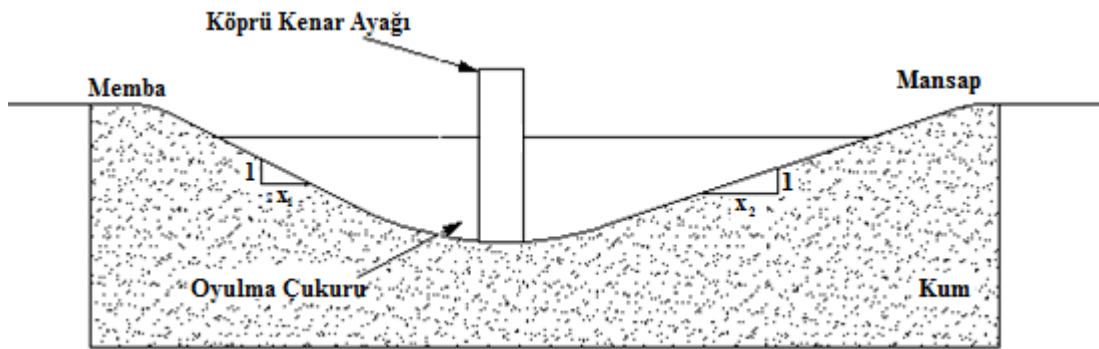
Şekil 6.16 $\alpha=150^\circ$ yan ayak uzunluğunun oyulma derinliğine etkisi

6.4 Oyulma çukurunun memba ve mansap şev eğimleri

Tüm deneylerde köprü ayağı etrafında oluşan oyulma çukurunun memba ve mansap şev eğimleri için ölçümler itina ile yapılmıştır. Ölçümlerden yararlanarak oyulma çukurunun membadaki şev eğimleri hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular Tablo 6.1’de verilmiştir. Tablo 6.1’de $1/x_1$ memba şev eğimidir ve $1_{(düşey)}/x_{1(yatay)}$ mesafeyi göstermektedir. Tablo 6.1’de görüldüğü gibi oyulma çukurunun memba şev eğimleri mansap şev eğimlerinden daha büyüktür. Memba şev eğimleri ortalaması 4.13’tür. Mansap şev eğimleri ortalaması 5.07’dir.

Dış kıyıda; $\alpha=30^\circ$ ’de memba şev eğimleri ortalaması 2.98, mansap şev eğimleri ortalaması ise 4.97’dir. $\alpha=60^\circ$ ’de memba şev eğimleri ortalaması 10.36, mansap şev eğimleri ortalaması ise 6.78’dir. $\alpha=90^\circ$ ’de memba şev eğimleri ortalaması 3.44, mansap şev eğimleri ortalaması ise 5.04’tür. $\alpha=120^\circ$ ’de memba şev eğimleri ortalaması 2.80, mansap şev eğimleri ortalaması ise 4.62’dir. $\alpha=150^\circ$ ’de memba şev eğimleri ortalaması 3.11, mansap şev eğimleri ortalaması ise 6.17’dir.

İç kıyıda; $\alpha=30^\circ$ ’de memba şev eğimleri ortalaması 2.34, mansap şev eğimleri ortalaması ise 4.03’tür. $\alpha=60^\circ$ ’de memba şev eğimleri ortalaması 2.09, mansap şev eğimleri ortalaması ise 3.15’dir. $\alpha=90^\circ$ ’de memba şev eğimleri ortalaması 3.37, mansap şev eğimleri ortalaması ise 4.43’tür. $\alpha=120^\circ$ ’de memba şev eğimleri ortalaması 6.92, mansap şev eğimleri ortalaması ise 3.82’dir. $\alpha=150^\circ$ ’de memba şev eğimleri ortalaması 3.92, mansap şev eğimleri ortalaması ise 7.64’tür.



Şekil 6.17 Oyulma çukurunun memba ve mansap şev eğimlerinin gösterimi

Tablo 6.1 Oyulma çukurunun memba ve mansap şevi

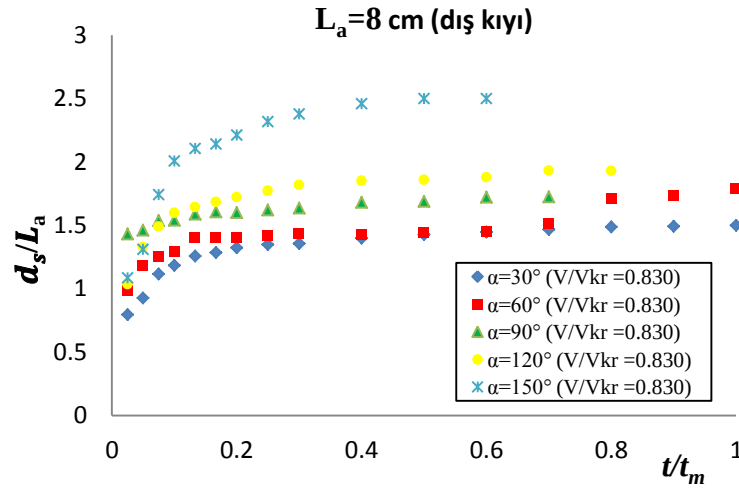
DIŞ KIYI				
Kıvrım Açısı	L_a	V/V_{kr}	Memba $1/x_1$	Mansap $1/x_2$
$\alpha=30^\circ$	8	0.775	3.86	6.37
	8	0.83	3.15	3.15
	8	0.903	2.85	9.73
	10	0.775	2.65	5.82
	10	0.83	3.03	6.27
	10	0.903	3.07	4.44
	12	0.686	2.85	2.75
	12	0.775	2.85	3.76
	12	0.83	2.51	3.69
12	0.903	2.98	3.71	
Ortalama:			2.98	4.97
$\alpha=60^\circ$	8	0.686	2.56	4.30
	8	0.775	48.84	6.20
	8	0.83	45.95	23.16
	8	0.903	4.68	5.51
	10	0.686	2.77	5.97
	10	0.775	3.48	4.67
	10	0.83	2.85	10.88
	10	0.903	2.23	5.24
	12	0.686	2.35	3.20
	12	0.775	2.60	3.82
	12	0.83	3.13	4.44
	12	0.903	2.89	4.00
	Ortalama:			10.36
$\alpha=90^\circ$	8	0.686	2.48	5.89
	8	0.775	2.35	4.94
	8	0.83	3.42	5.62
	8	0.903	3.39	7.03
	10	0.686	3.63	4.34
	10	0.775	3.46	3.99
	10	0.83	7.03	4.27
	10	0.903	3.23	4.42
	12	0.686	3.75	6.11
	12	0.775	2.97	4.13
	12	0.83	3.06	4.62
	12	0.903	2.46	5.06
	Ortalama:			3.44
$\alpha=120^\circ$	8	0.686	2.71	5.74
	8	0.775	3.61	4.80
	8	0.83	2.79	8.24
	8	0.903	2.82	7.41
	10	0.686	2.67	5.07
	10	0.775	3.16	1.94
	10	0.83	3.45	5.11
	10	0.903	2.28	5.43
	12	0.686	2.76	4.36
	12	0.775	2.84	6.71
	12	0.83	2.26	-3.28
	12	0.903	2.28	3.94
	Ortalama:			2.80
$\alpha=150^\circ$	8	0.686	3.06	4.07
	8	0.775	2.84	7.21
	8	0.83	2.54	9.79
	8	0.903	2.31	3.29
	10	0.686	3.70	16.53
	10	0.775	4.37	8.64
	10	0.83	2.99	4.90
	10	0.903	2.53	5.89
	12	0.686	3.64	4.57
	12	0.775	3.94	5.01
	12	0.83	3.25	4.20
	12	0.903	2.13	0.00
	Ortalama:			3.11

İÇ KIYI				
Kıvrım Açısı	L_a	V/V_{kr}	Memba $1/x_1$	Mansap $1/x_2$
$\alpha=30^\circ$	8	0.903	1.96	3.19
	10	0.686	3.18	2.34
	10	0.775	2.47	4.80
	10	0.83	3.03	4.02
	10	0.903	1.92	3.01
	12	0.686	2.20	3.91
	12	0.775	2.22	4.89
	12	0.83	2.02	5.02
	12	0.903	2.11	5.05
Ortalama:			2.34	4.03
$\alpha=60^\circ$	8	0.686	2.94	3.27
	8	0.775	1.85	3.34
	8	0.83	2.49	3.29
	8	0.903	1.81	4.11
	10	0.686	2.00	3.35
	10	0.775	2.02	2.85
	10	0.83	1.93	3.53
	10	0.903	1.98	3.01
	12	0.686	1.90	2.88
	12	0.775	2.39	2.42
	12	0.83	2.05	2.25
	12	0.903	1.70	3.48
	Ortalama:			2.09
$\alpha=90^\circ$	8	0.686	3.69	4.09
	8	0.775	2.60	4.04
	8	0.83	2.62	2.99
	8	0.903	2.66	3.07
	10	0.686	6.11	8.91
	10	0.775	4.01	5.33
	10	0.83	3.09	3.51
	10	0.903	3.26	3.28
	12	0.686	3.28	3.50
	12	0.775	3.31	5.23
	12	0.83	3.08	3.49
	12	0.903	2.76	5.71
	Ortalama:			3.37
$\alpha=120^\circ$	8	0.686	3.95	2.78
	8	0.775	4.03	4.60
	8	0.83	2.92	4.39
	8	0.903	3.35	4.33
	10	0.686	3.62	4.52
	10	0.775	3.43	3.59
	10	0.83	3.63	3.67
	10	0.903	2.41	3.77
	12	0.686	3.84	2.52
	12	0.775	3.48	4.24
	12	0.83	10.02	1.55
	12	0.903	38.33	5.93
	Ortalama:			6.92
$\alpha=150^\circ$	8	0.686	4.23	4.27
	8	0.775	4.74	3.16
	8	0.83	4.22	10.71
	8	0.903	3.65	4.03
	10	0.686	5.02	18.82
	10	0.775	3.97	9.70
	10	0.83	3.19	6.42
	10	0.903	2.37	4.00
Ortalama:			3.92	7.64

6.5 Köprü kıvrım açısının taban oyulmasına etkisi

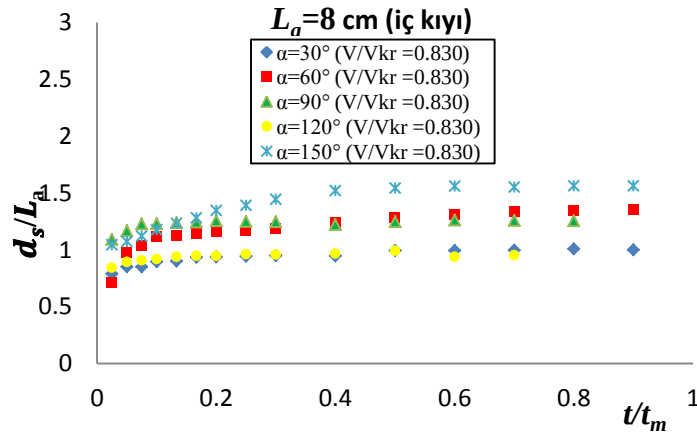
Kıvrımlı kanalın $\alpha=30^\circ$, 60° , 90° , 120° ve 150° 'lik açılarda ana kanalın iç ve dış kıyı duvarına köprü kenar ayağı yerleştirilip ölçülen maksimum oyulma derinlikleri boyutsuz parametreler d_s/L_a ve t/t_m cinsinden alınarak; ayak uzunluğunun oyulma derinliği ile değişimi aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

Şekil 6.18'de dış kıyı oyulma derinliği incelendiğinde, kenar ayak $\alpha=30^\circ$ 'ye yerleştirildiğinde oyulma derinliği en düşük ve $\alpha=150^\circ$ 'ye doğru arttığı görülmektedir ($\alpha=30^\circ < 60^\circ < 90^\circ < 120^\circ < 150^\circ$).



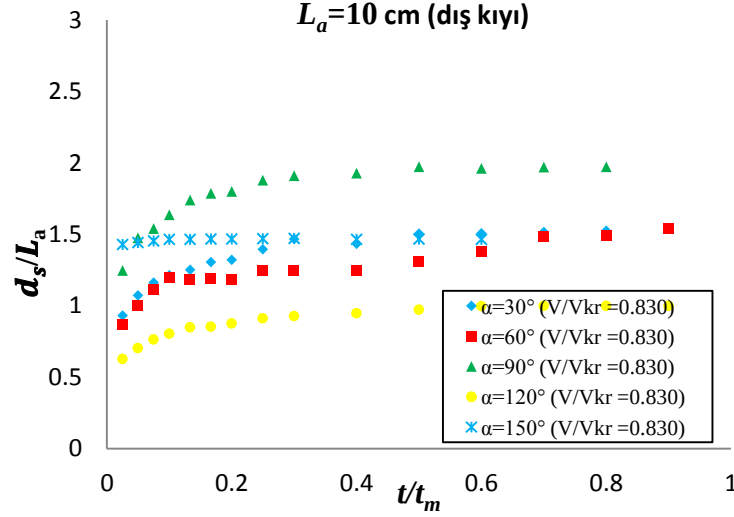
Şekil 6.18 Köprü kıvrım açısının oyulma derinliğine etkisi, $L_a=8$ cm (dış kıyı)

Şekil 6.19'da iç kıyı oyulma derinliği incelendiğinde, kenar ayak $\alpha=30^\circ$ 'ye yerleştirildiğinde oyulma derinliği minimum ve $\alpha=150^\circ$ 'de maksimum olduğu görülmektedir ($\alpha=30^\circ < 120^\circ < 90^\circ < 60^\circ < 150^\circ$).



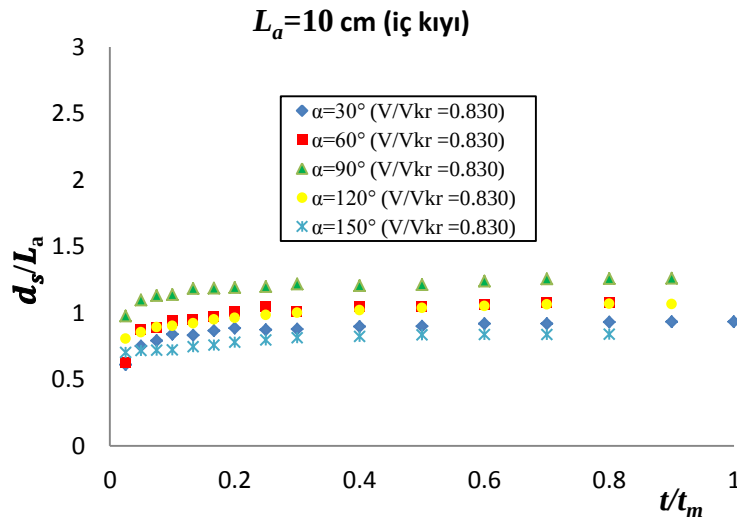
Şekil 6.19 Köprü kıvrım açısının oyulma derinliğine etkisi, $L_a=8$ cm (iç kıyı)

Şekil 6.20’de dış kıyı oyulma derinliği incelendiğinde, kenar ayak $\alpha=120^\circ$ ’ye yerleştirildiğinde oyulma derinliği minimum ve $\alpha=90^\circ$ ’de maksimum olduğu görülmektedir ($\alpha=120^\circ < 60^\circ < 30^\circ < 150^\circ < 90^\circ$).



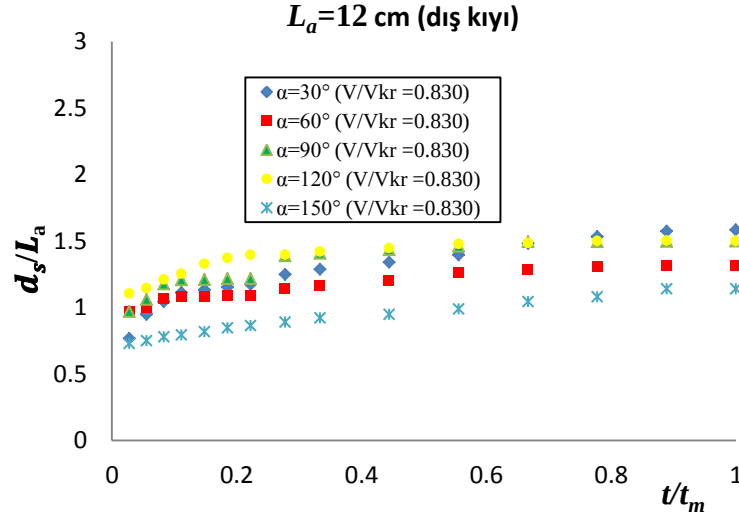
Şekil 6.20 Köprü kıvrım açısının oyulma derinliğine etkisi, $L_a=10 \text{ cm}$ (dış kıyı)

Şekil 6.21’de iç kıyı oyulma derinliği incelendiğinde, kenar ayak $\alpha=150^\circ$ ’ye yerleştirildiğinde oyulma derinliği minimum ve $\alpha=90^\circ$ ’de maksimum olduğu görülmektedir ($\alpha=150^\circ < 30^\circ < 120^\circ < 60^\circ < 90^\circ$).



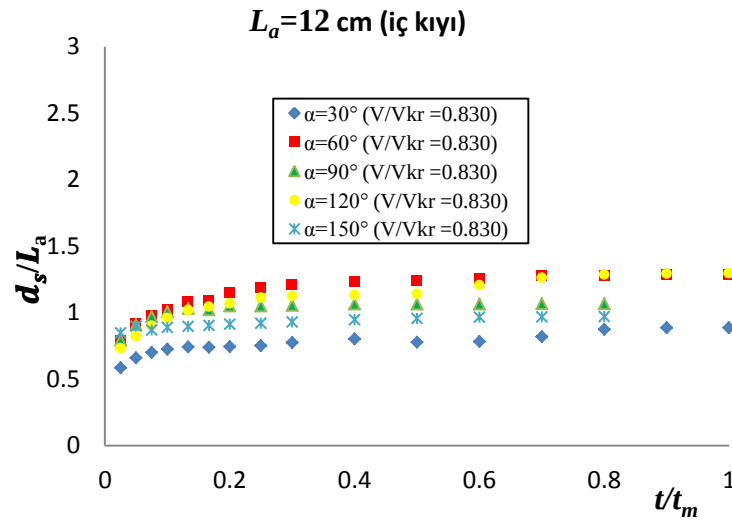
Şekil 6.21 Köprü kıvrım açısının oyulma derinliğine etkisi, $L_a=10 \text{ cm}$ (iç kıyı)

Şekil 6.22’de iç kıyı oyulma derinliği incelendiğinde, kenar ayak $\alpha=150^\circ$ ’ye yerleştirildiğinde oyulma derinliği minimum ve $\alpha=30^\circ$ ’de maksimum olduğu görülmektedir ($\alpha=150^\circ < 60^\circ < 90^\circ < 120^\circ < 30^\circ$).



Şekil 6.22 Köprü kıvrım açısının oyulma derinliğine etkisi, $L_a=12$ cm (dış kıyı)

Şekil 6.23’te iç kıyı oyulma derinliği incelendiğinde, kenar ayak $\alpha=30^\circ$ ’ye yerleştirildiğinde oyulma derinliği minimum ve $\alpha=120^\circ$ ’de maksimum olduğu görülmektedir ($\alpha=30^\circ < 150^\circ < 90^\circ < 60^\circ < 120^\circ$).



Şekil 6.23 Köprü kıvrım açısının oyulma derinliğine etkisi, $L_a=12$ cm (iç kıyı)

Kıvrım açılarındaki maksimum oyulma derinlikleri incelendiğinde, $L_a=8$ cm’lik ayak $\alpha=150^\circ$ ’ye yerleştirildiğinde dış kıyı ve iç kıyıda maksimum oyulma oluşmaktadır. $L_a=10$

cm'lik ayak $\alpha=90^\circ$ 'ye yerleştirildiğinde dış kıyı ve iç kıyıda maksimum oyulma oluşmaktadır. $L_d=12$ cm'lik ayak $\alpha=120^\circ$ 'ye yerleştirildiğinde dış kıyı ve iç kıyıda maksimum oyulma oluşmaktadır. Buradan kıvrımlı kanalda $\alpha=90^\circ$ 'den (akımın yönünün değiştiği bölgeden) itibaren oyulma derinliği maksimum olduğu görülmektedir.

6.6 Köprü kenar ayağının taban topoğrafyasına etkisi

Daha önceki bölümlerde köprü kenar ayaklarındaki oyulma olayının değişimi incelenmiştir. Burada ise köprü kenar ayağı sırasıyla 30° , 60° , 90° , 120° ve 150° 'lik açılarda ana kanalın iç ve dış kıyısına yerleştirilerek temiz su oyulması durumunda taban topoğrafyasının değişimi incelenmiştir. Kıvrım açılarında taban topoğrafyasının değişimini V/V_{kr} tüm kıvrımlarda aynı değerde $V/V_{kr}=0.9093$ alınmıştır. Deneyler maksimum 660 dakikaya ulaşıldıktan sonra, vana yavaşça kapatılarak 20 cm'lik eşik doğrusal kanalın mansabındaki eşiğin üzerine tekrar konulmuş ve bu sayede suyun kanaldan yavaşça tahliyesi sağlanmıştır. Daha sonra tabanda oluşan topografya dijital limnimetre yardımıyla kıvrımlı kanal boyunca köprü kenar ayak etrafında daha sık olmak üzere belirli aralıklarda ölçümler alınmıştır. Şekil 4.11'de iç kıyı ve dış kıyıda taban topografyası ölçümlerinin alındığı noktalar gösterilmiştir. Topoğrafya ölçümlerinde köprü ayağı etrafındaki oyulmayı daha iyi gözlemlemek amacıyla daha sık aralıklarla okumalar alınmıştır. Kanal boyunca da tabanda değişimler olduğu gözlemlendiğinden dolayı tüm kanalda da ölçümler alınıp grafikler, arazi çizimleri Netcad, İdecad ve Autocad programları yardımı ile çizilip yorumlanmıştır.

Dijital limnimetre yardımıyla elde edilen noktalar programa aktarıldıktan sonra ayaklar etrafında oluşan oyulma olayının kanal boyunca değişimi Şekil 6.24(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

Şekil 6.24(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde iç kıyıda oyulmanın -1'den başladığı ve dış kıyıda kenar ayağa doğru maksimum oyulmanın -14'e kadar ulaştığı görülmektedir. Burada oyulma mimbada -10 cm iken mansapta -14 cm olduğu yani maksimum oyulmanın mansap tarafında olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın

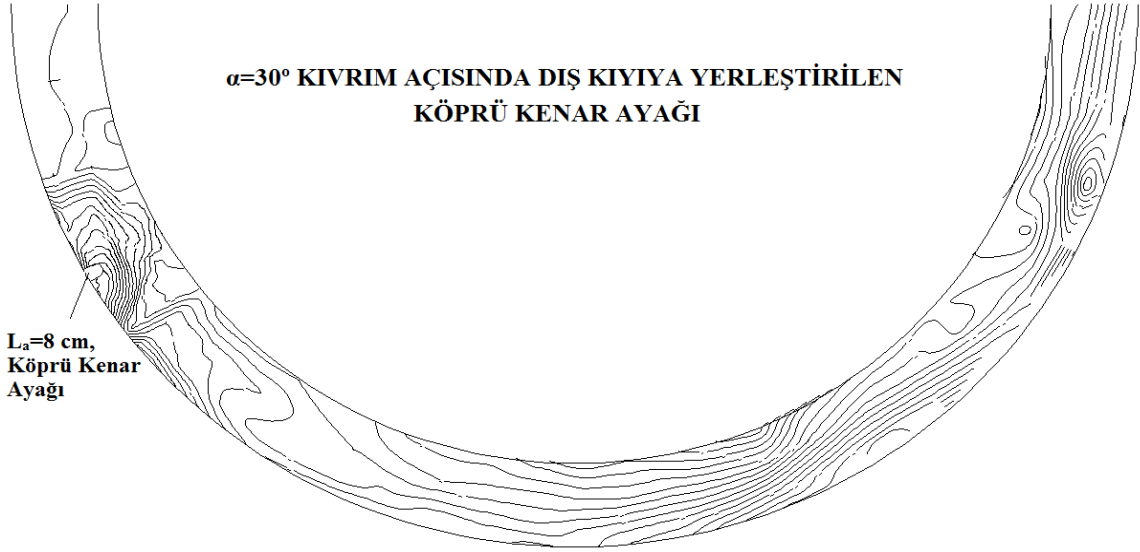
kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir. Kanal girişinde ise membadan gelen malzeme taşınan malzemeyi karşıladığından pek fazla oyulma olmamıştır. Ancak kıvrımlı kanal boyunca helikoidal akım nedeniyle ayak sonrasında da oyulma gözlenmiştir.

Şekil 6.24(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.24(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. Burada maksimum oyulmanın mansapta -14.492 cm olduğu görülmektedir.

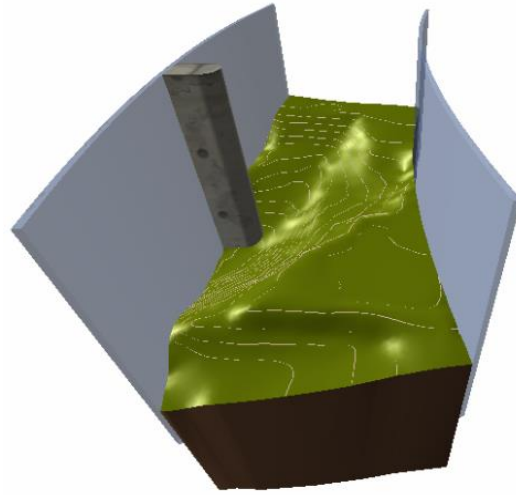
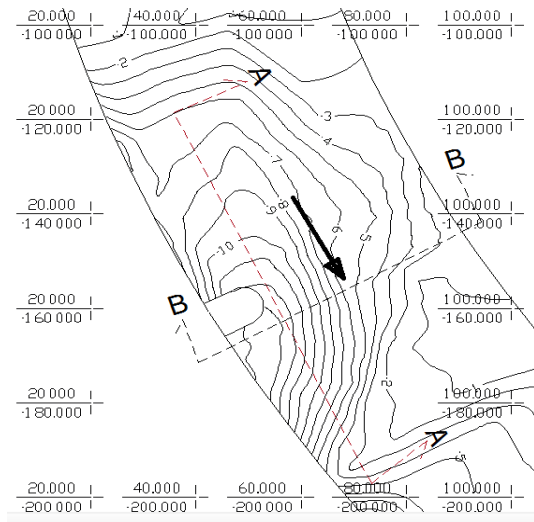
$\alpha=30^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.25(a)'de gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise membadan gelen malzeme taşınan malzemeyi karşıladığından pek fazla oyulma olmamıştır. Ancak kıvrımlı kanal boyunca helikoidal akım nedeniyle ayak sonrasında da oyulma gözlenmiştir. Kenar ayaktan sonra ise dış kıyıda oyulma daha fazla iç kıyıda daha az olmuştur.

Şekil 6.25(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -7 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

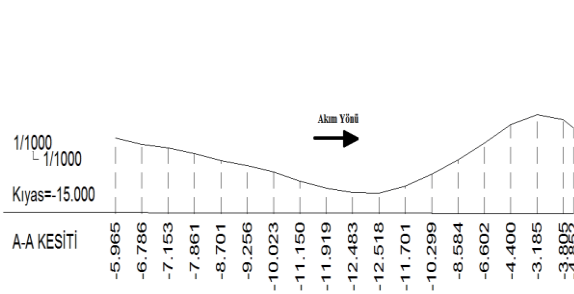
Şekil 6.25(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.25(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -5.233 cm olduğu görülmektedir.



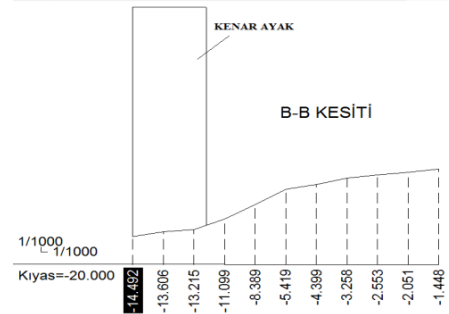
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayığı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

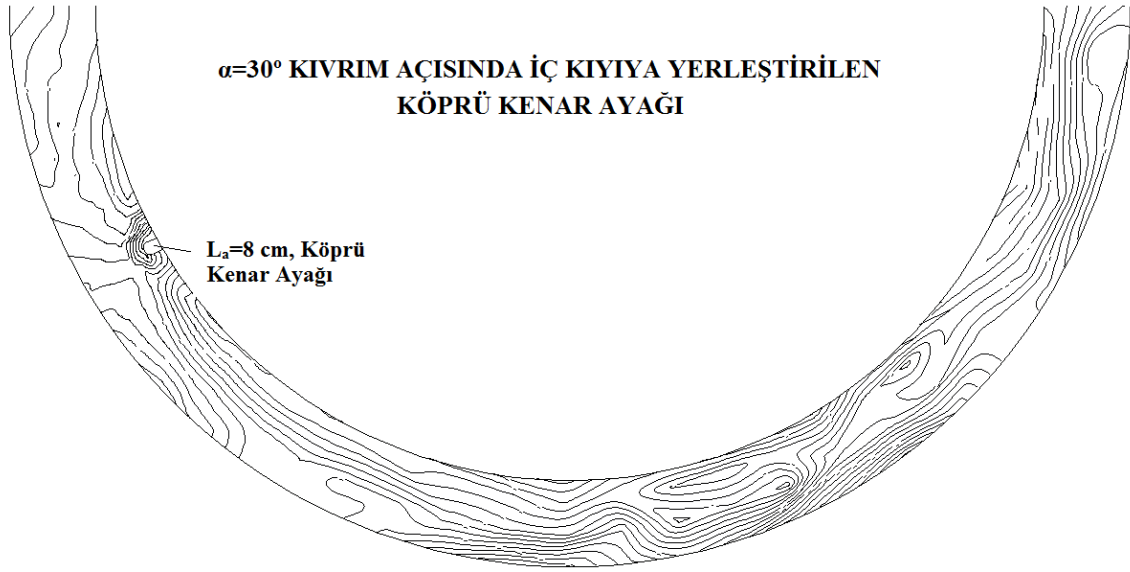


(c) A-A Kesiti

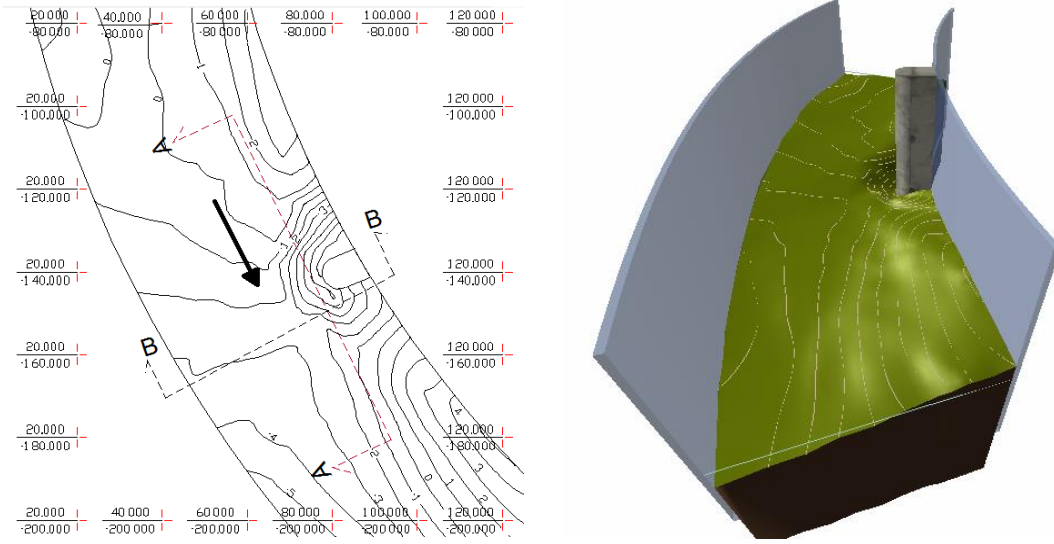


(d) B-B Kesiti

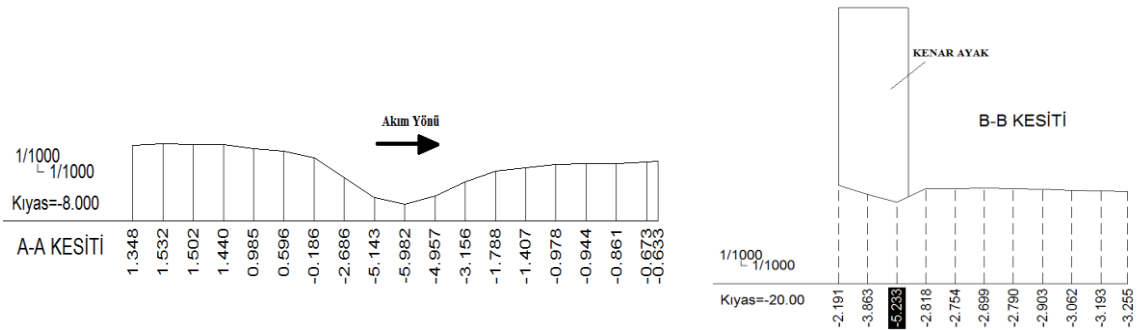
Şekil 6.24 $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayığı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti

(d) B-B Kesiti

Şekil 6.25 $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=30^\circ$ kıvrım açısına dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.26(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise membadan gelen malzeme taşınan malzemeyi karşıladığından pek fazla oyulma olmamıştır. Ancak kıvrımlı kanal boyunca helikoidal akım nedeniyle ayak sonrasında da oyulma gözlenmiştir.

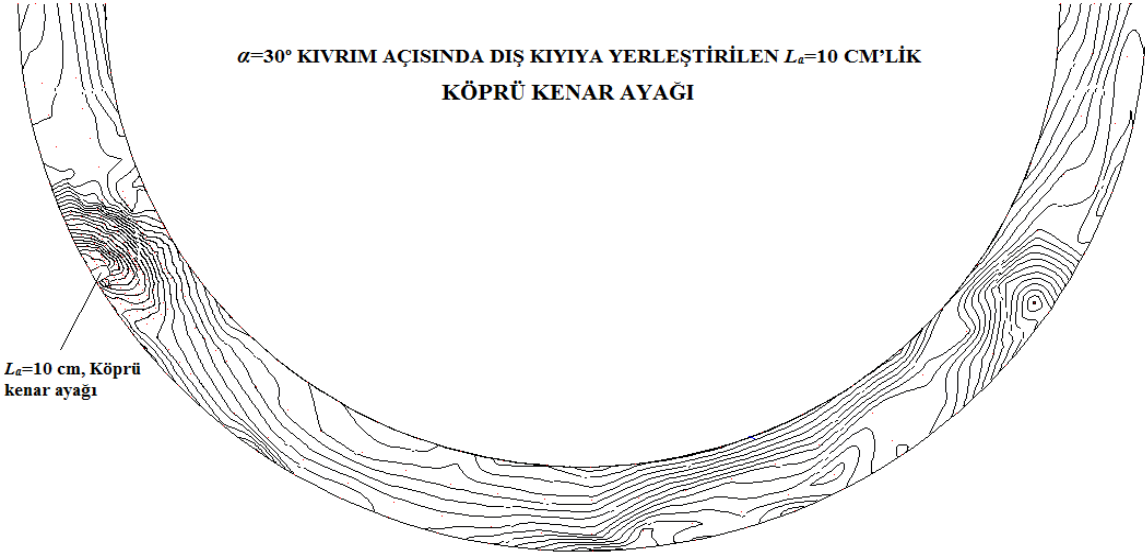
Şekil 6.26(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -18 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.26(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.26(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -13.816 cm olduğu görülmektedir.

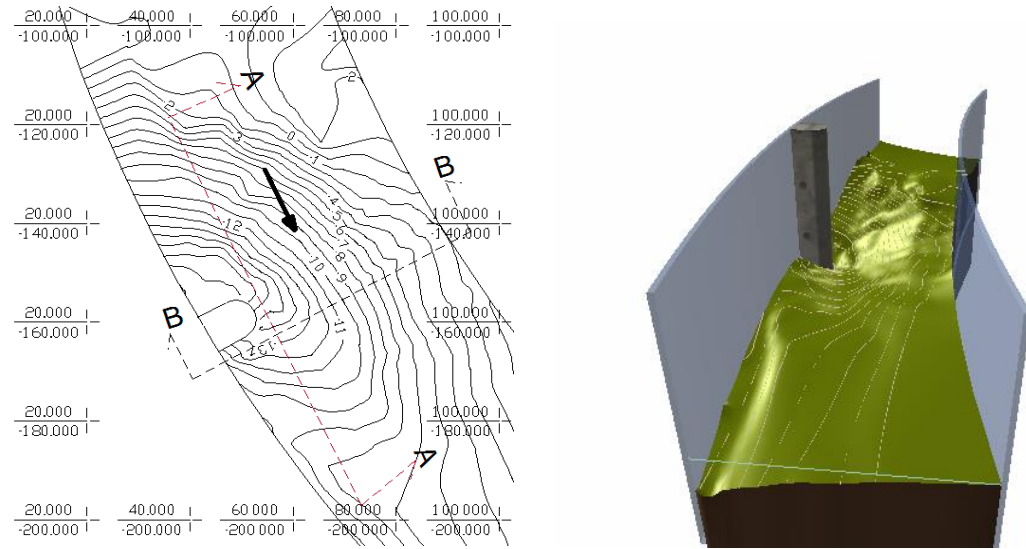
$\alpha=30^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.27(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

Şekil 6.27(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada ve yaklaşık -9 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

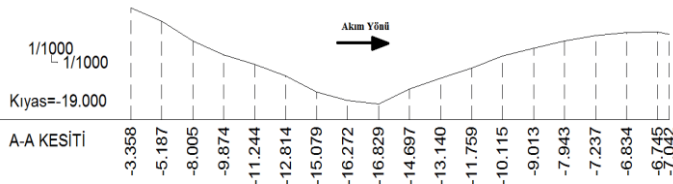
Şekil 6.27(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.27(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -6.941 cm olduğu görülmektedir.



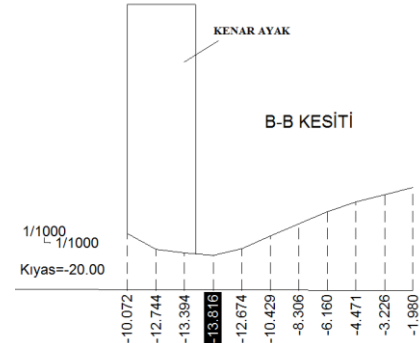
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

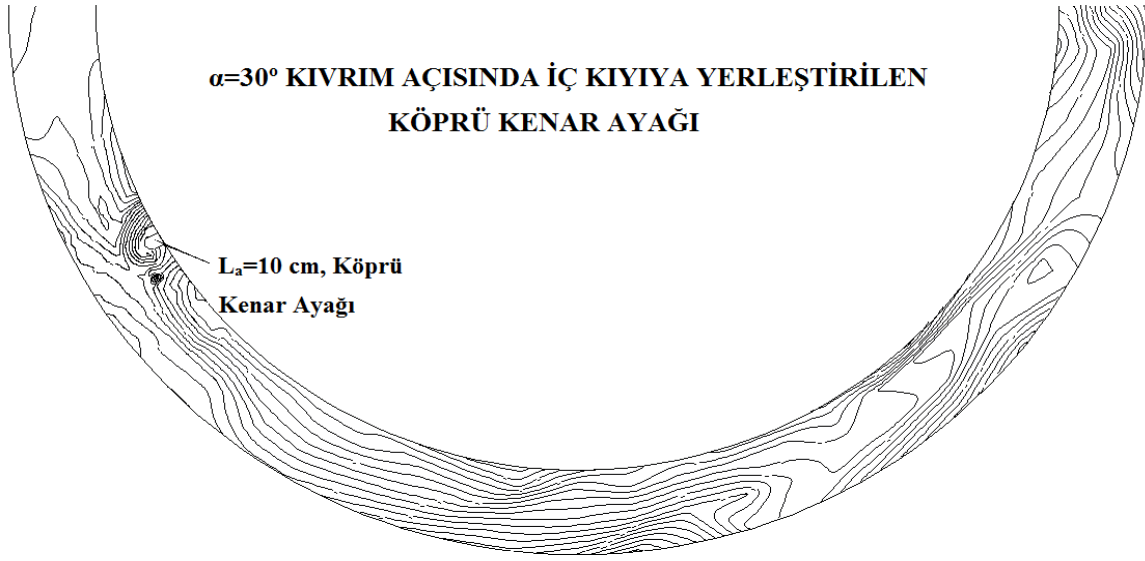


(c) A-A Kesiti

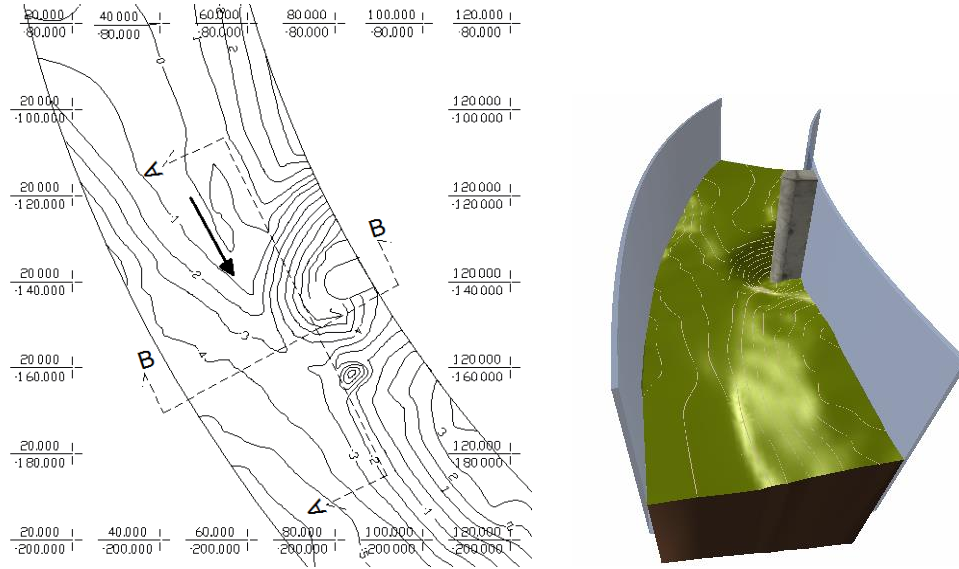


(d) B-B Kesiti

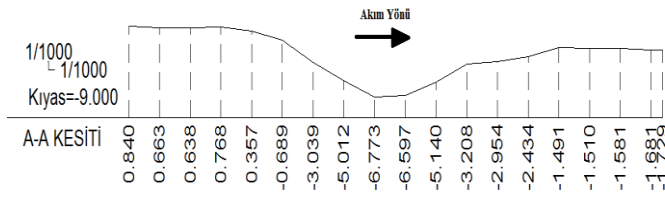
Şekil 6.26 $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



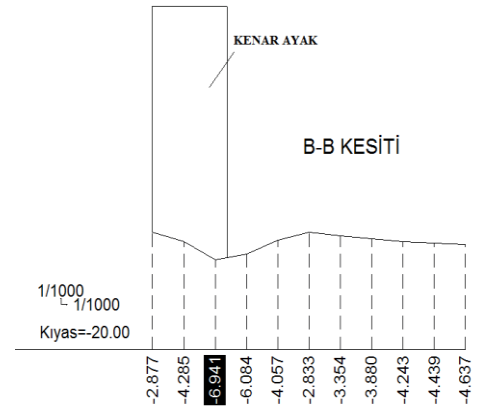
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti



(d) B-B Kesiti

Şekil 6.27 $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=30^\circ$ kıvrım açısına dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.28(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise membadan gelen malzeme taşınan malzemeyi karşıladığından pek fazla oyulma olmamıştır. Ancak kıvrımlı kanal boyunca helikoidal akım nedeniyle ayak sonrasında da oyulma gözlenmiştir.

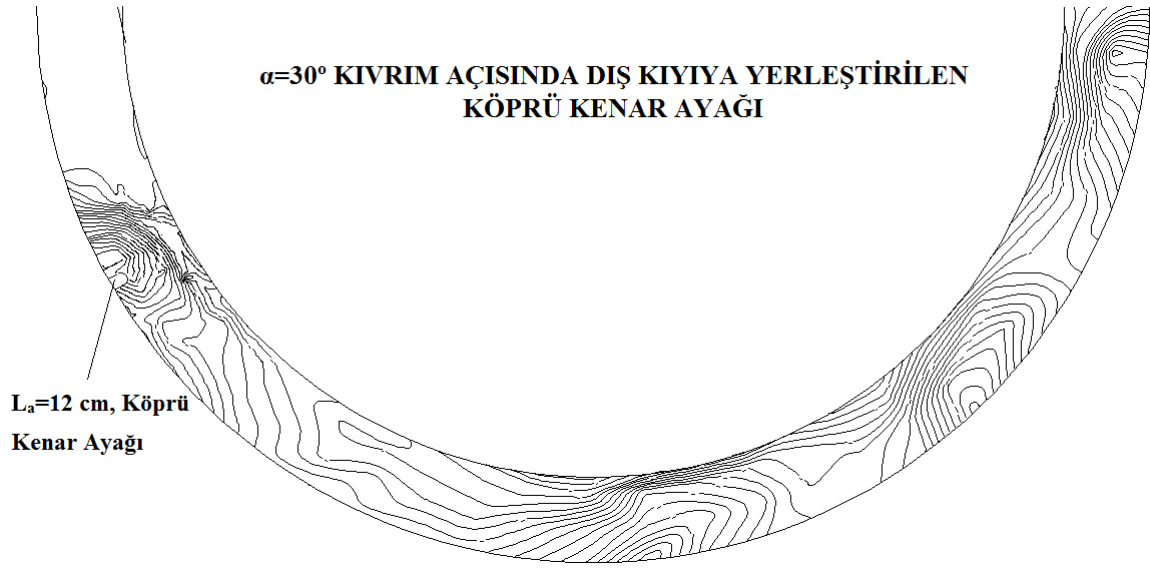
Şekil 6.28(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -18 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.28(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.28(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -14.313 cm olduğu görülmektedir.

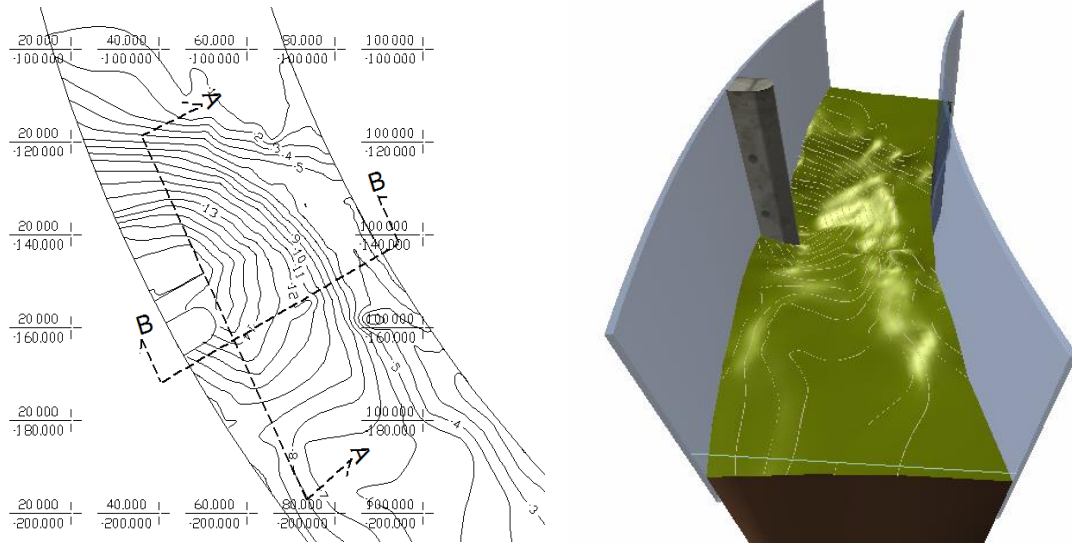
$\alpha=30^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.29(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

Şekil 6.29(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada ve yaklaşık -10 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

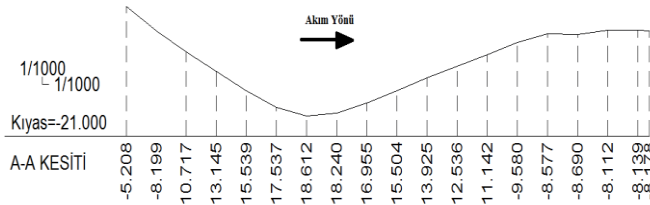
Şekil 6.29(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.29(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -9.185 cm olduğu görülmektedir.



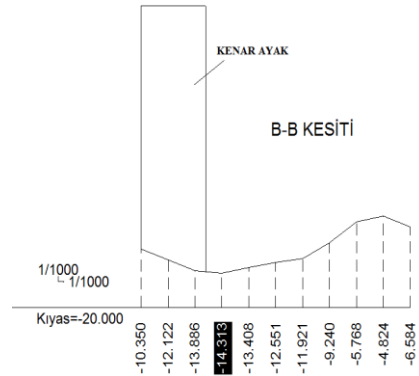
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

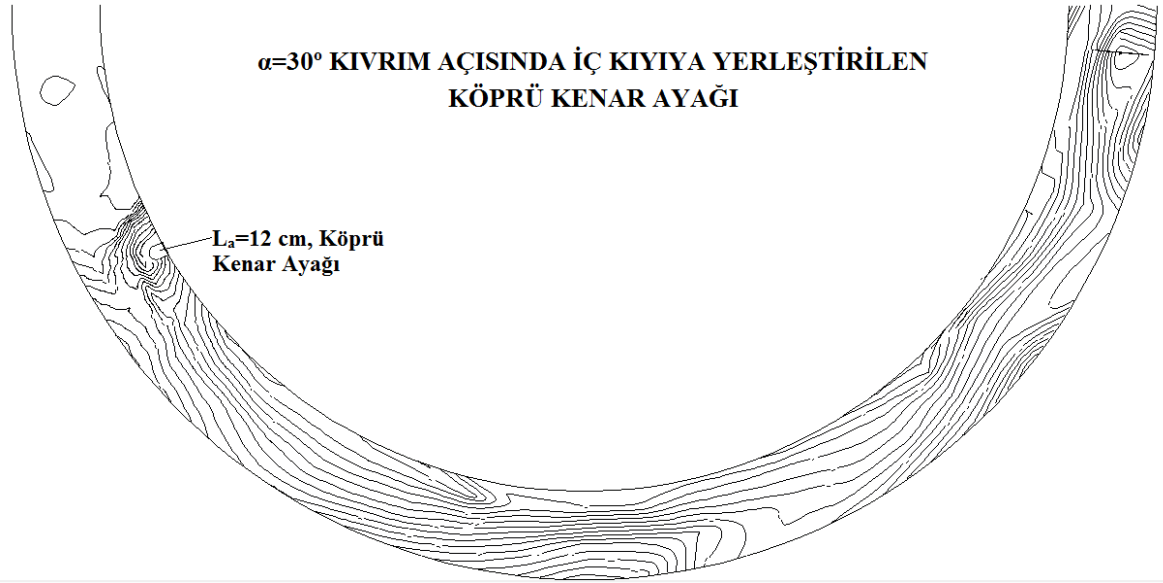


(c) A-A Kesiti

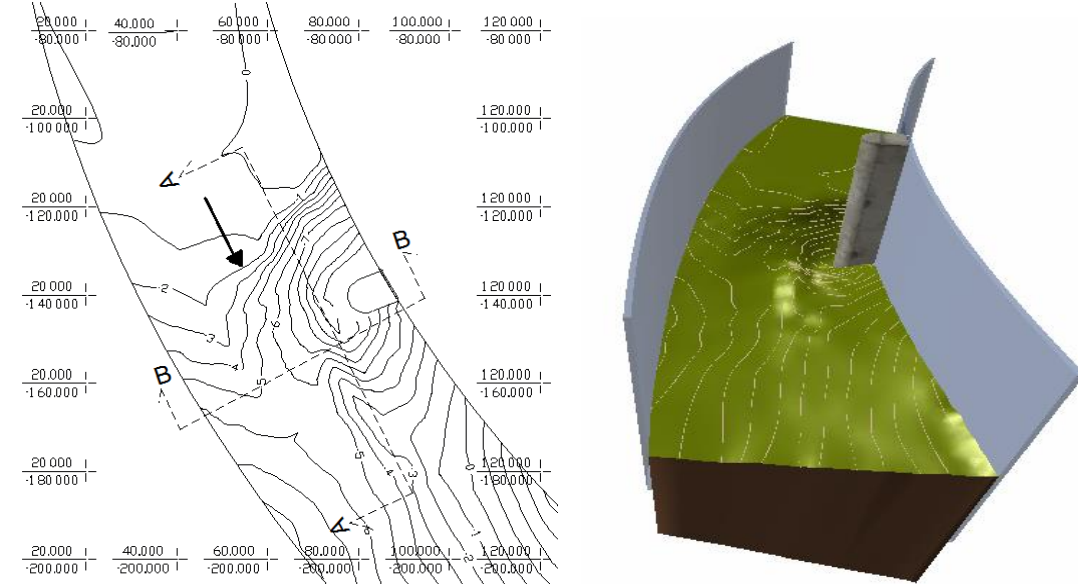


(d) B-B Kesiti

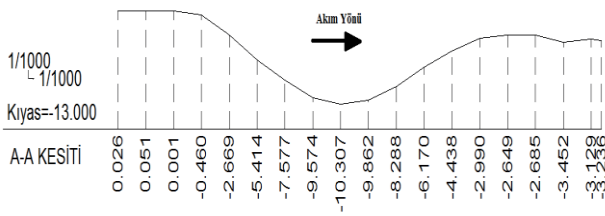
Şekil 6.28 $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



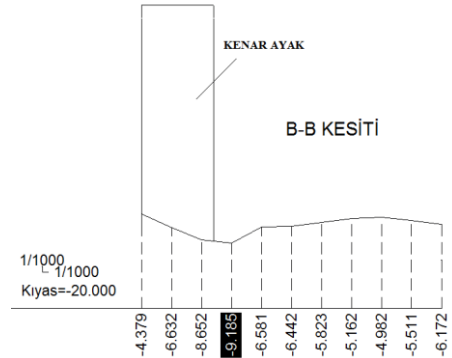
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayığı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti



(d) B-B Kesiti

Şekil 6.29 $\alpha=30^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayığı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=60^\circ$ kıvrım açısına dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.30(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise membadan gelen malzeme taşınan malzemeyi karşıladığından pek fazla oyulma olmamıştır. Ancak kıvrımlı kanal boyunca helikoidal akım nedeniyle ayak sonrasında da oyulma gözlenmiştir.

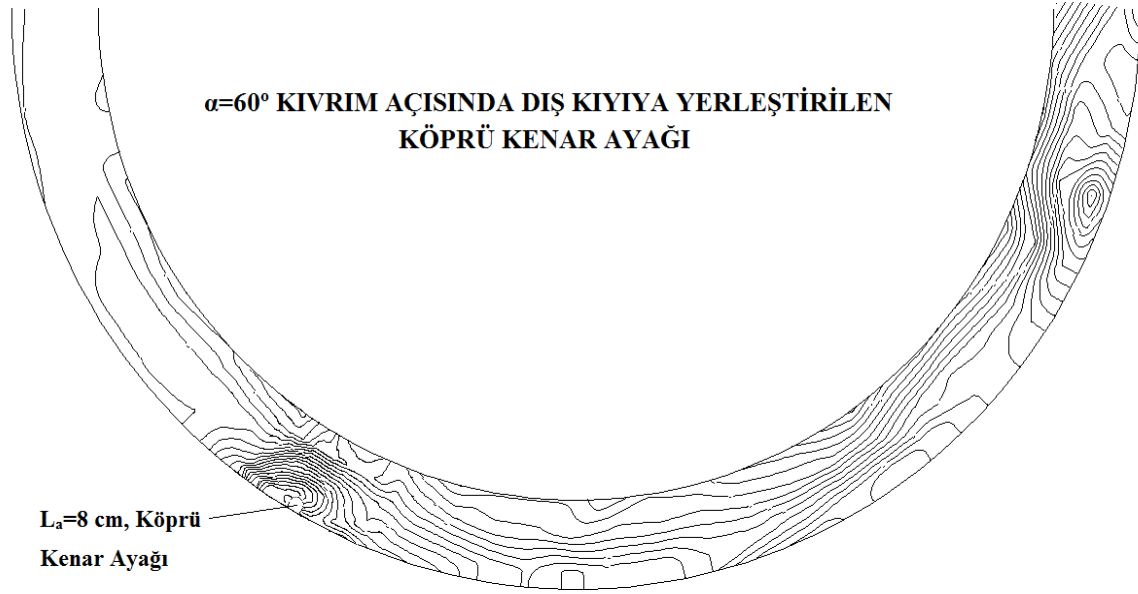
Şekil 6.30(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada kenar ayak etrafında -18'e ulaştığı görülmektedir. Burada oyulma membada -17 cm iken mansapta -13 cm olduğu yani maksimum oyulmanın memba tarafında olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şekllinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.30(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.30(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. Burada maksimum oyulmanın mansapta -13.813 cm olduğu görülmektedir.

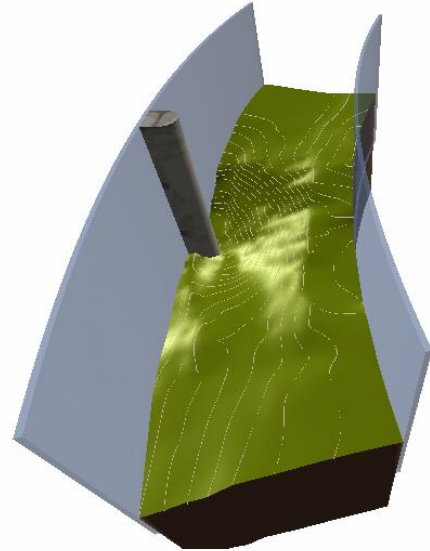
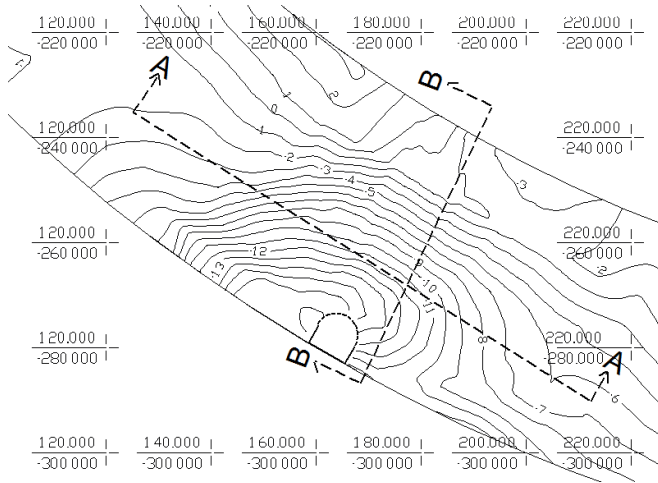
$\alpha=60^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.31(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

Şekil 6.31(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -10 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şekllinden, oyulmanın kenar ayak etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

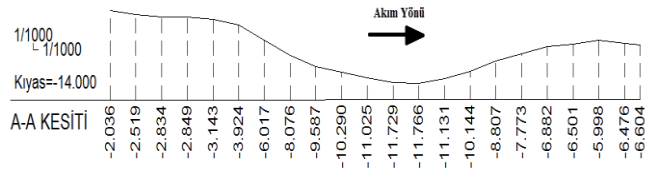
Şekil 6.31(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.31(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -7.717 cm olduğu görülmektedir.



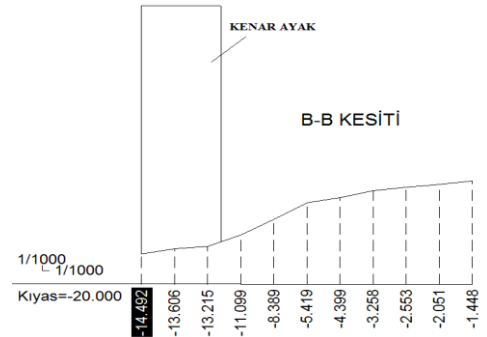
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayığı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

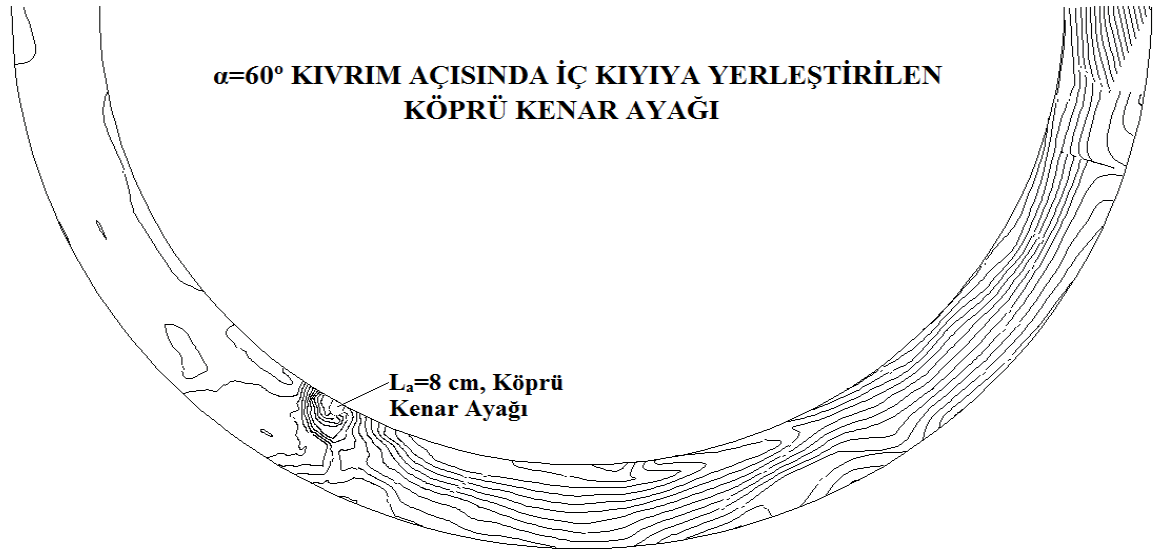


(c) A-A Kesiti

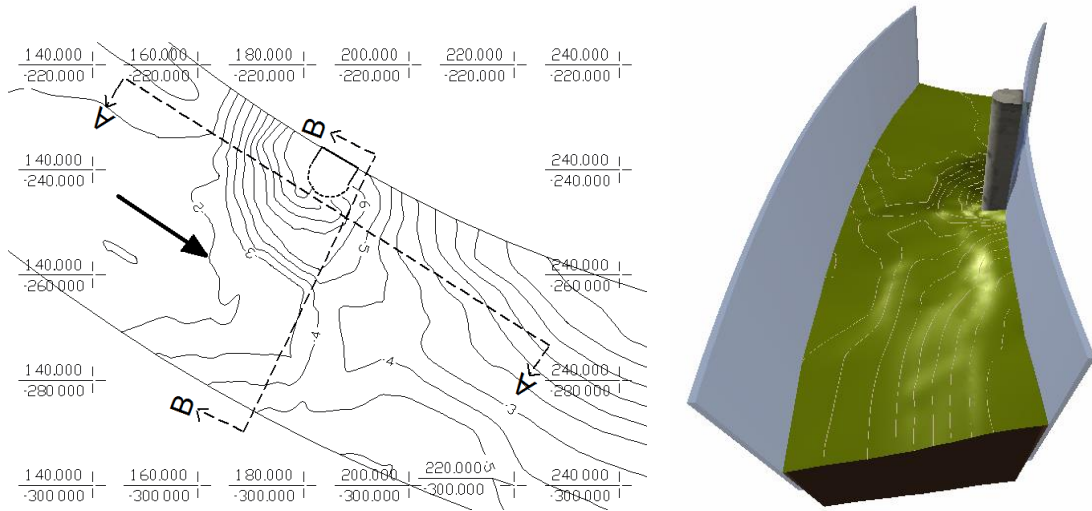


(d) B-B Kesiti

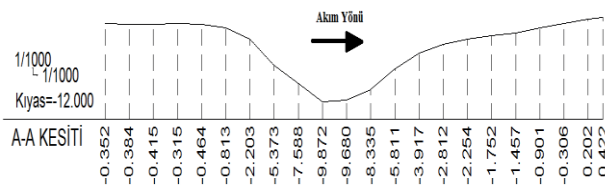
Şekil 6.30 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayığı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



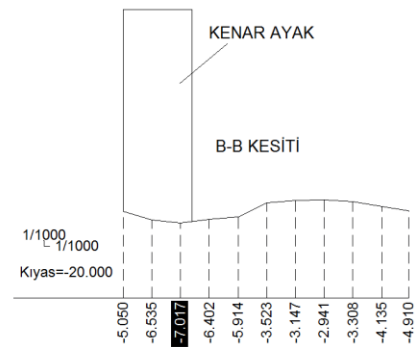
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayığı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti



(d) B-B Kesiti

Şekil 6.31 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayığı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=60^\circ$ kıvrım açısına dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.32(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

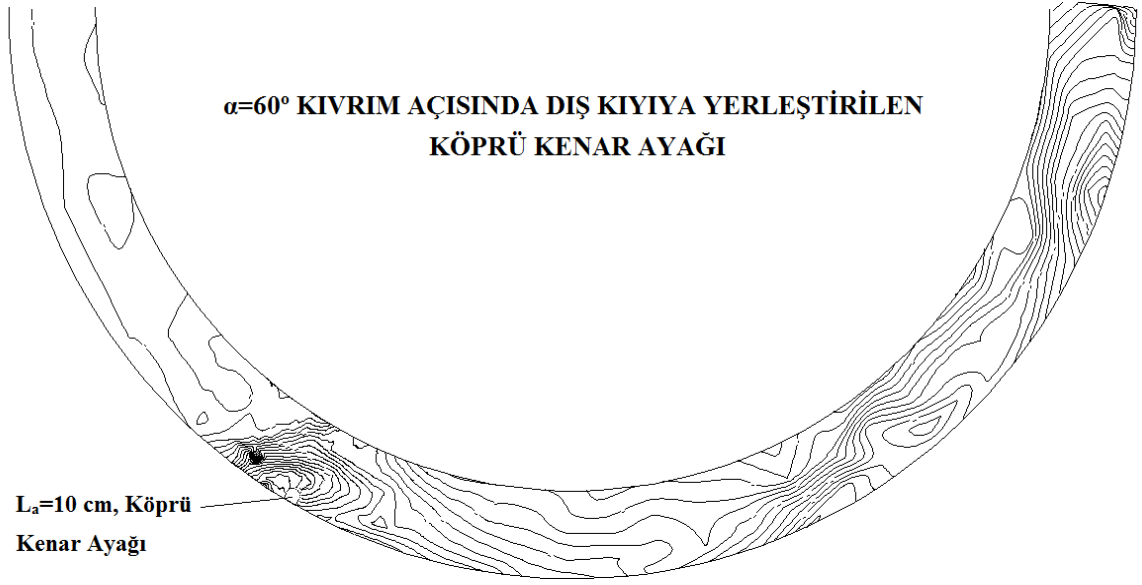
Şekil 6.32(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada kenar ayak etrafında -16 cm'ye ulaştığı görülmektedir. Burada oyulma membada -16 cm iken mansapta -12 cm olduğu yani maksimum oyulmanın memba tarafında olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.32(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.32(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. Burada maksimum oyulmanın mansapta -13.119 cm olduğu görülmektedir.

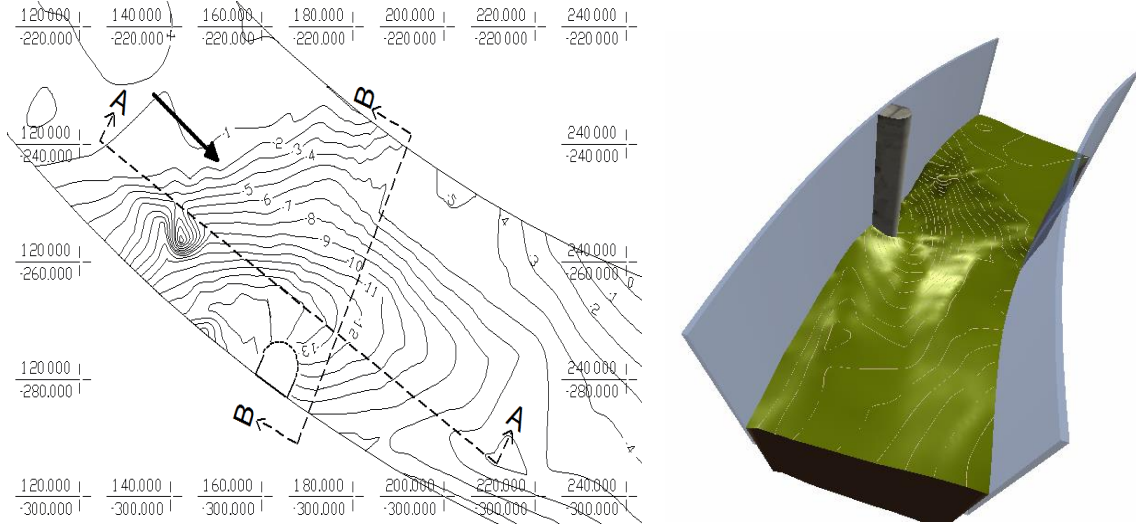
$\alpha=60^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.33(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

Şekil 6.33(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -11 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayak etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

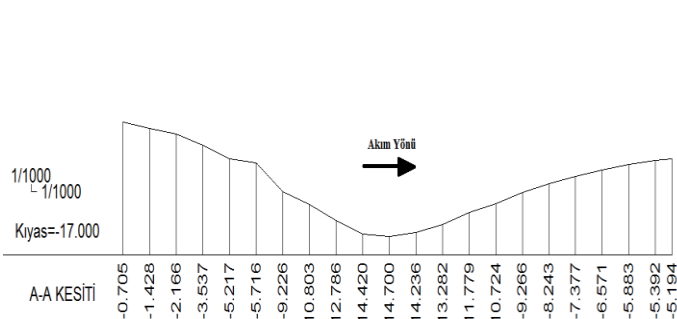
Şekil 6.33(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.33(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -8.522 cm olduğu görülmektedir.



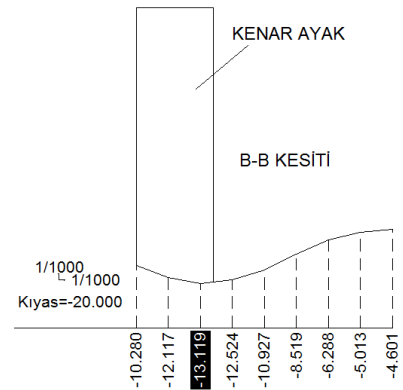
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayığı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

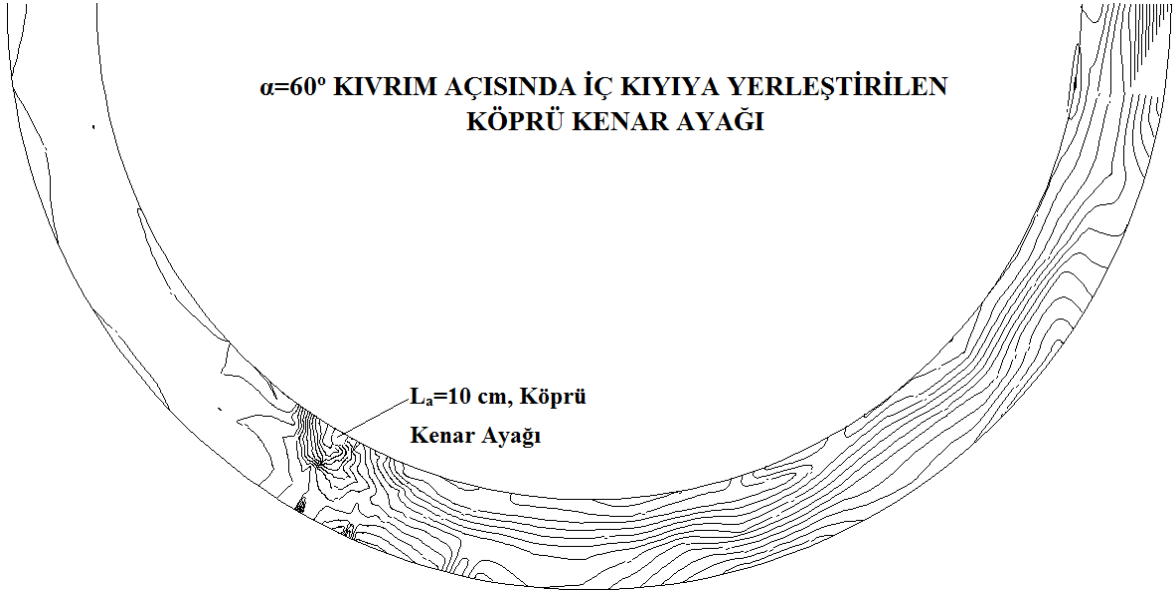


(c) A-A Kesiti

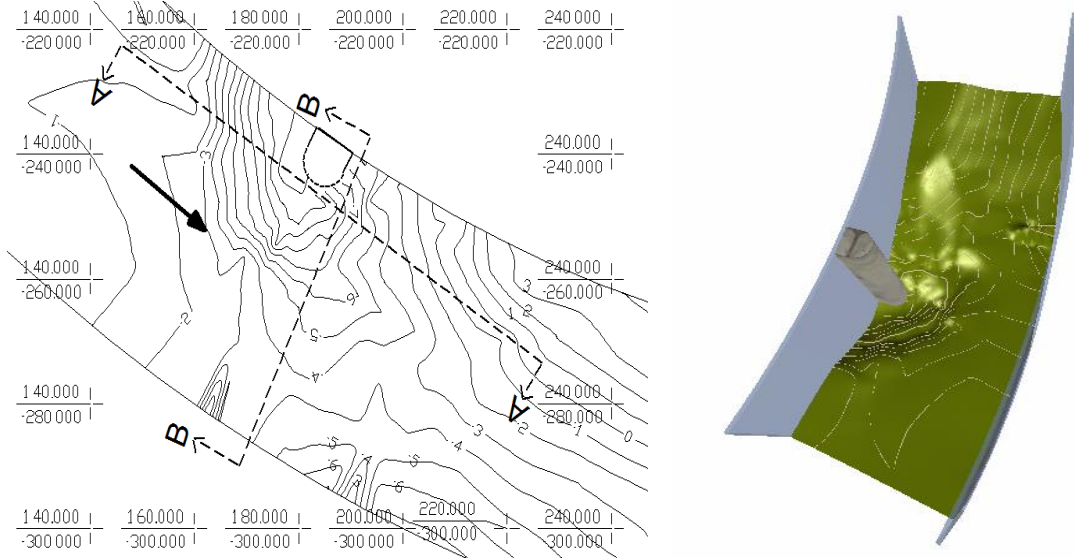


(d) B-B Kesiti

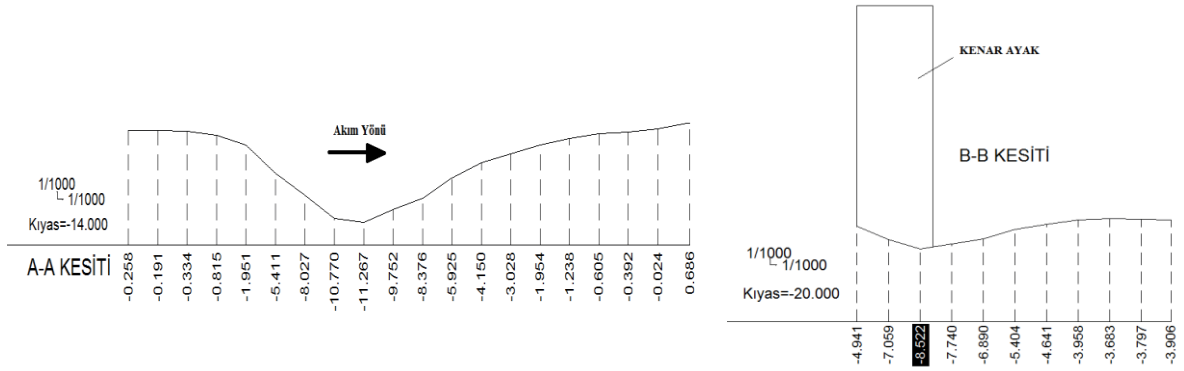
Şekil 6.32 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayığı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti

(d) B-B Kesiti

Şekil 6.33 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=60^\circ$ kıvrım açısına dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.34(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise membadan gelen malzeme taşınan malzemeyi karşıladığından pek fazla oyulma olmamıştır. Ancak kıvrımlı kanal boyunca helikoidal akım nedeniyle ayak sonrasında da oyulma gözlenmiştir.

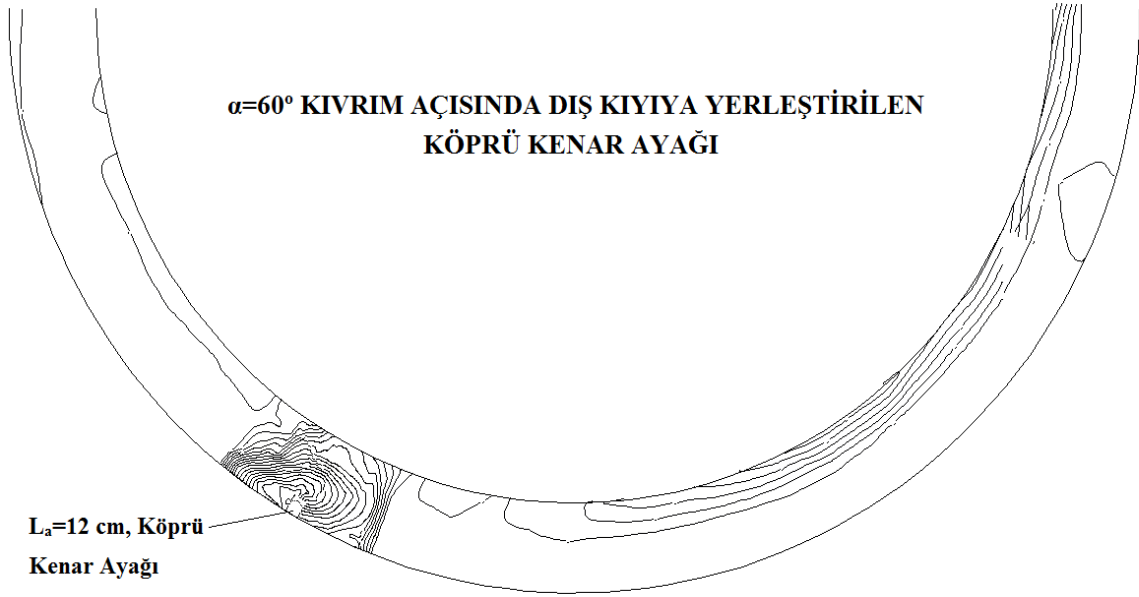
Şekil 6.34(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada kenar ayak etrafında -19 cm'ye ulaştığı görülmektedir. Burada maksimum oyulmanın memba tarafında olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.34(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.34(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. Burada maksimum oyulmanın mansapta -15.712 cm olduğu görülmektedir.

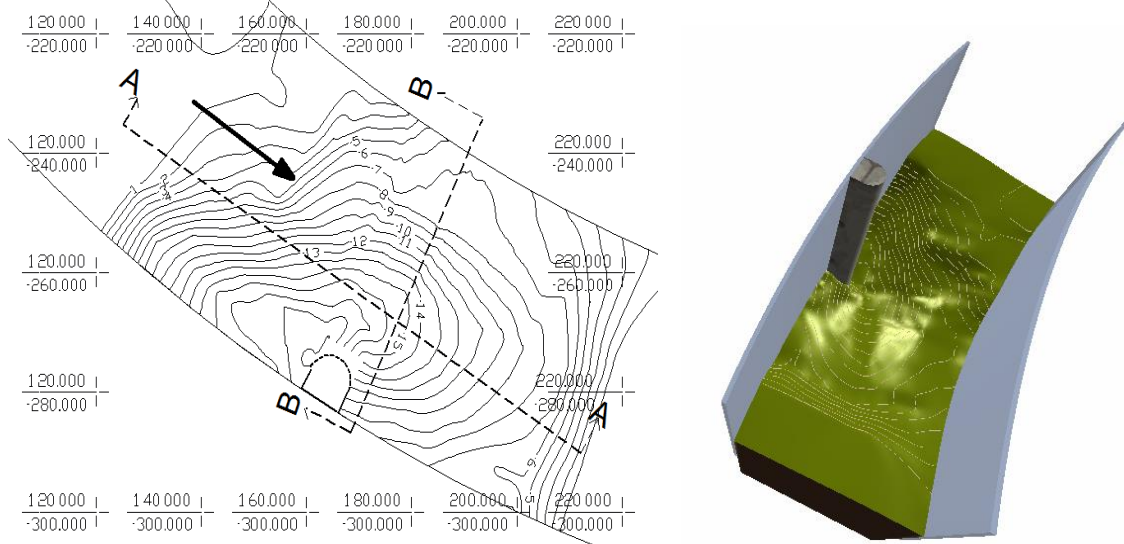
$\alpha=60^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.35(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

Şekil 6.35(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -11 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayak etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

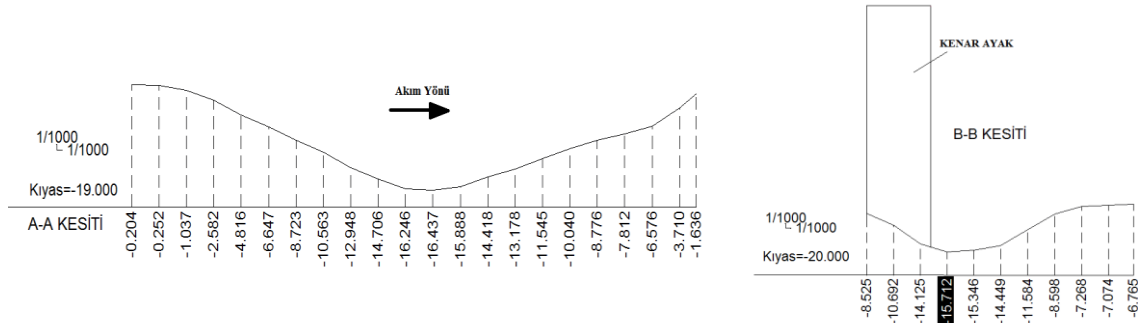
Şekil 6.35(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.35(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -12.084 cm olduğu görülmektedir.



(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



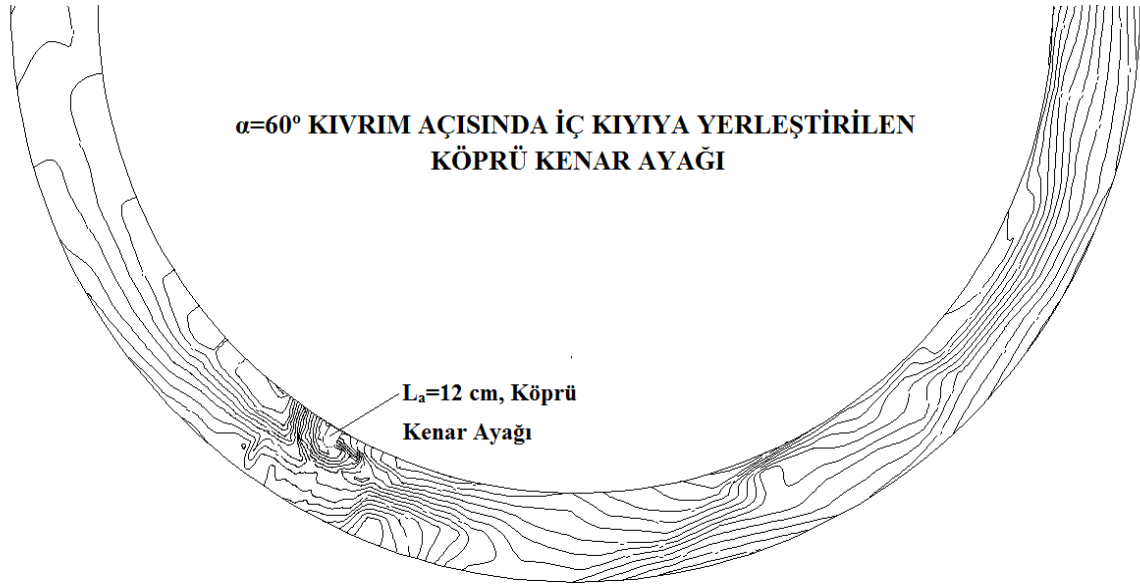
(b) Köprü kenar ayacı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



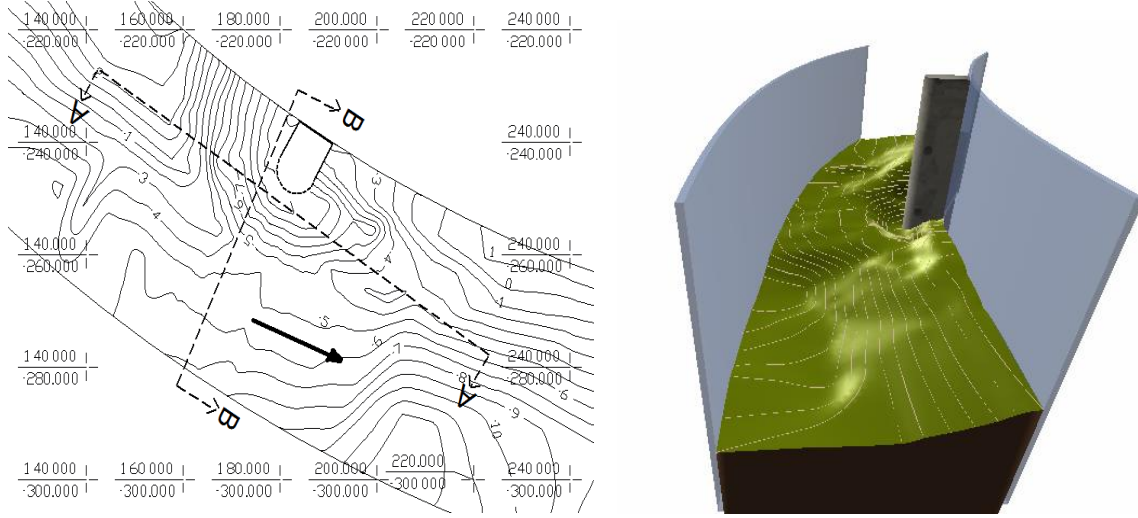
(c) A-A Kesiti

(d) B-B Kesiti

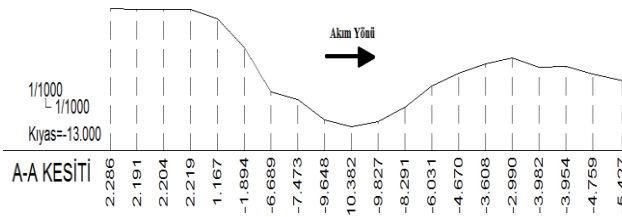
Şekil 6.34 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayacı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



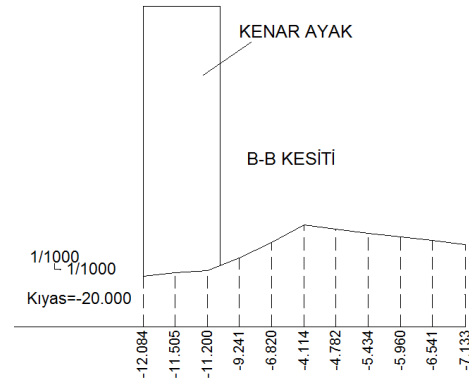
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayığı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti



(d) B-B Kesiti

Şekil 6.35 $\alpha=60^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayığı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.36(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması, oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise membadan gelen malzeme taşınan malzemeyi karşıladığından pek fazla oyulma olmamıştır. Ancak kıvrımlı kanal boyunca helikoidal akım nedeniyle ayak sonrasında da oyulma gözlenmiştir.

Şekil 6.36(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada kenar ayak etrafında -16 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.36(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.36(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. Burada maksimum oyulmanın mansapta -15.83 cm olduğu görülmektedir.

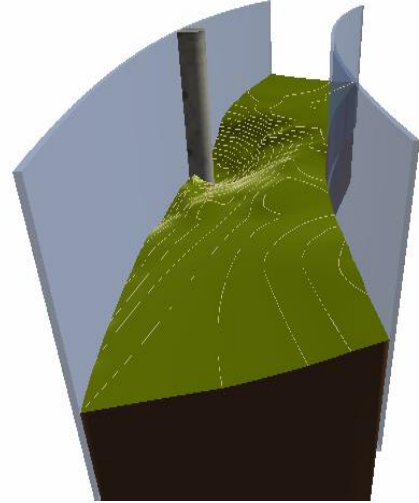
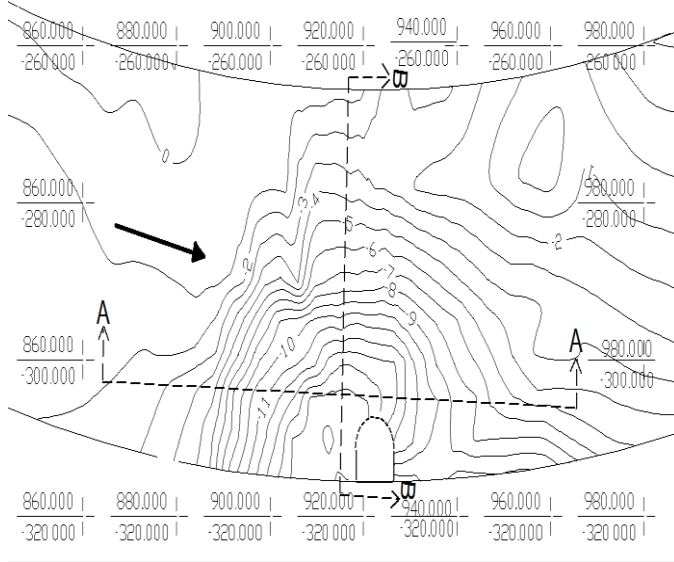
$\alpha=90^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.37(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise membadan gelen malzeme taşınan malzemeyi karşıladığından pek fazla oyulma olmamıştır. Ancak kıvrımlı kanal boyunca helikoidal akım nedeniyle ayak sonrasında da oyulma gözlenmiştir. Kanal girişinde ise membadan gelen malzeme taşınan malzemeyi karşıladığından pek fazla oyulma olmamış ancak daha sonra gelen malzeme yetersizliğinden dolayı oyulma artmıştır.

Şekil 6.37(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın mansapta yaklaşık -10 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayak etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

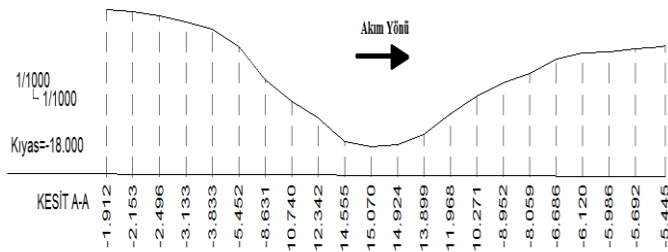
Şekil 6.37(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.37(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -6.935 cm olduğu görülmektedir.



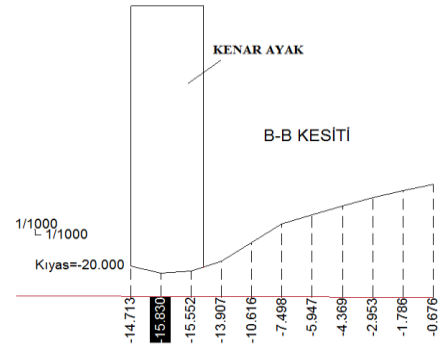
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

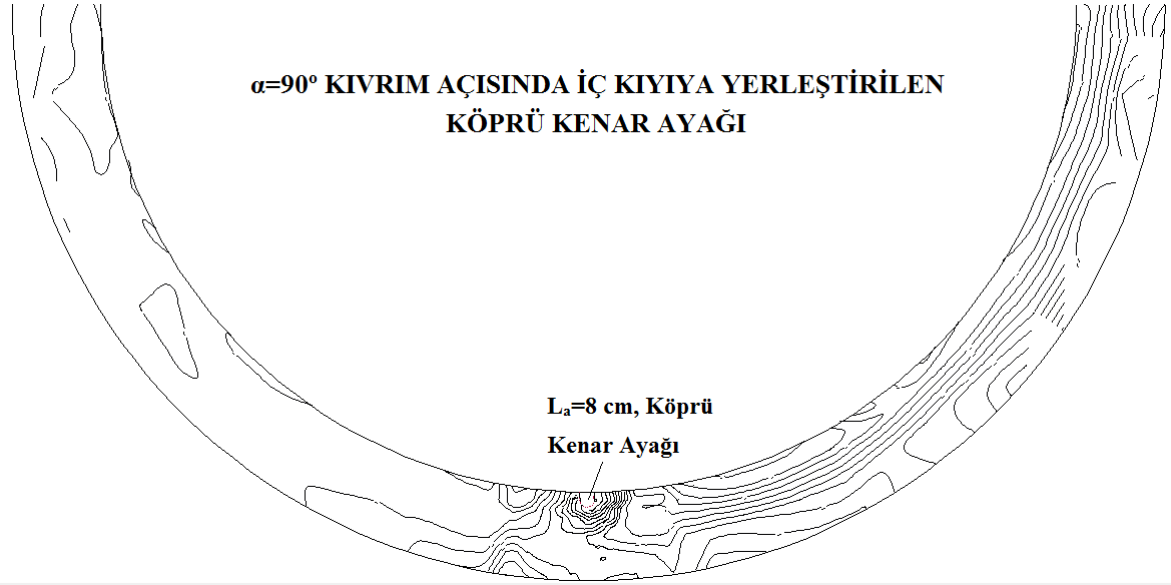


(c) A-A Kesiti

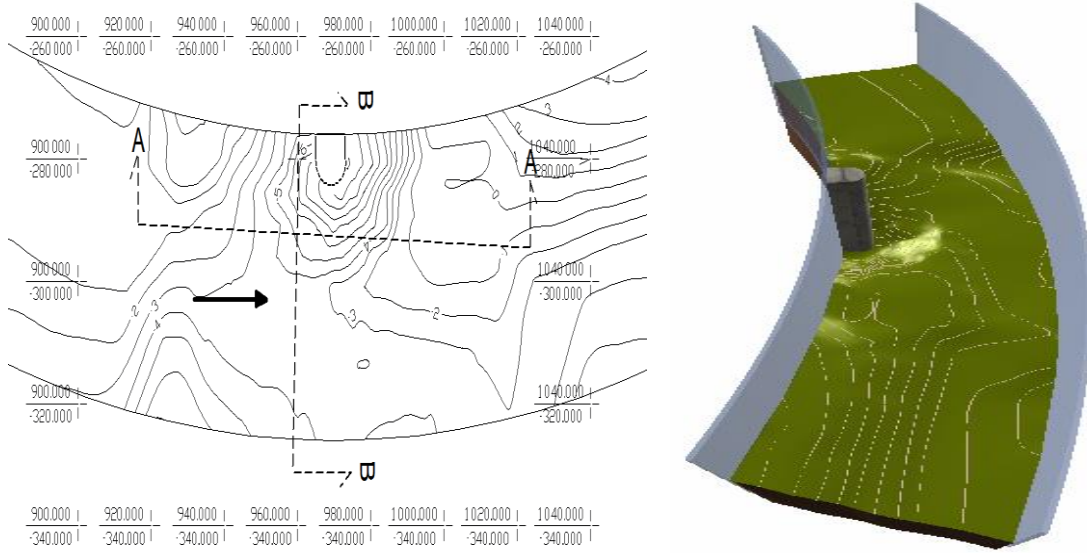


(d) B-B Kesiti

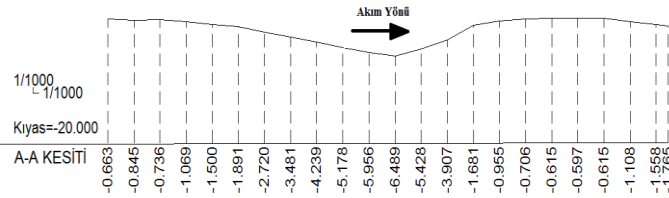
Şekil 6.36 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



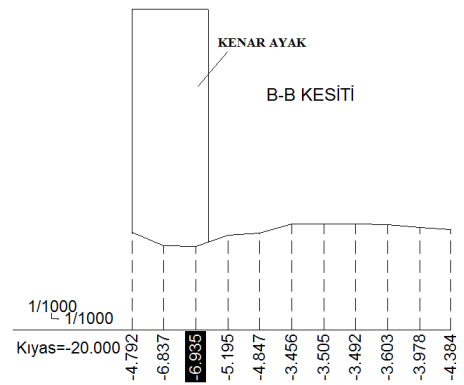
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti



(d) B-B Kesiti

Şekil 6.37 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=90^\circ$ kıvrım açısına dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.38(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

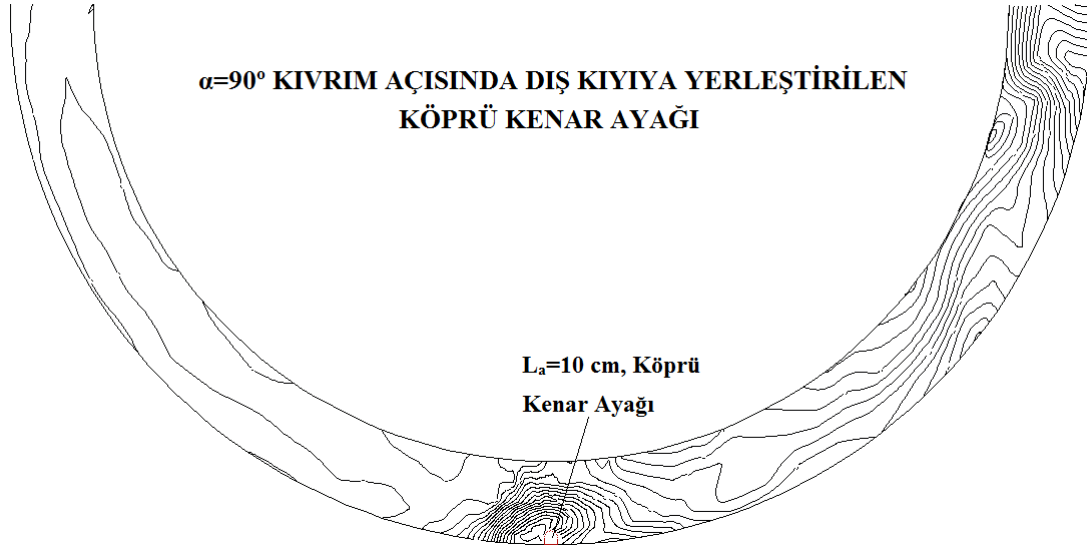
Şekil 6.38(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada kenar ayak etrafında -17 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.38(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.38(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. Burada maksimum oyulmanın mansapta -17.655 cm olduğu görülmektedir.

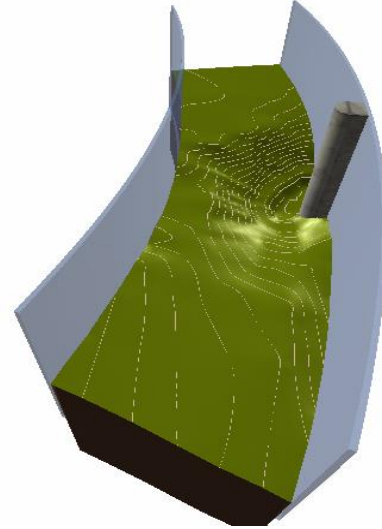
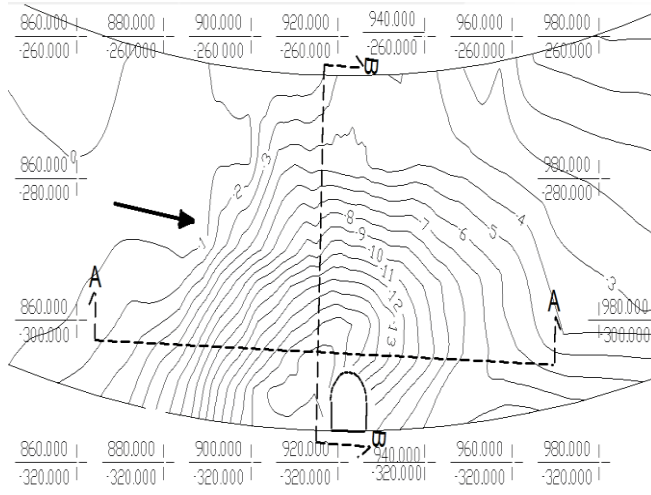
$\alpha=90^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.39(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise membadan gelen malzeme taşınan malzemeyi karşıladığından pek fazla oyulma olmamıştır. Ancak kıvrımlı kanal boyunca helikoidal akım nedeniyle ayak sonrasında da oyulma gözlenmiştir.

Şekil 6.39(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -10 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayak etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

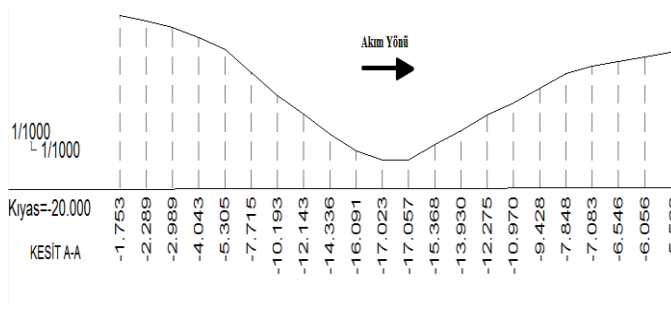
Şekil 6.39(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.39(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -8.725 cm olduğu görülmektedir.



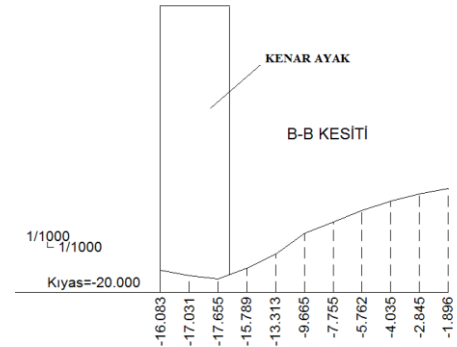
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

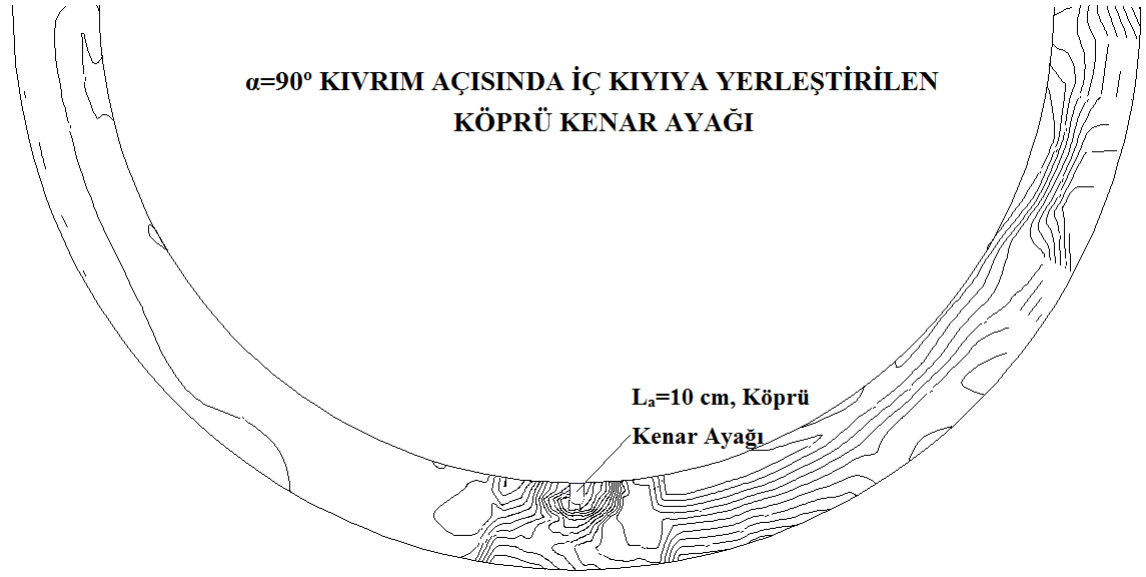


(c) A-A Kesiti

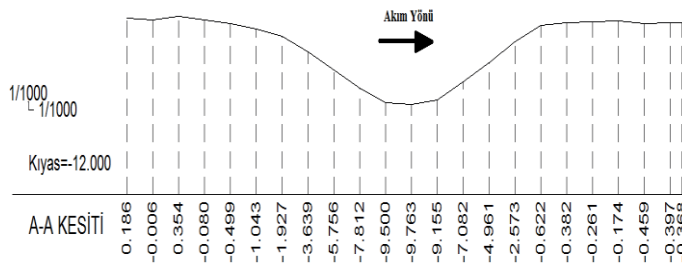
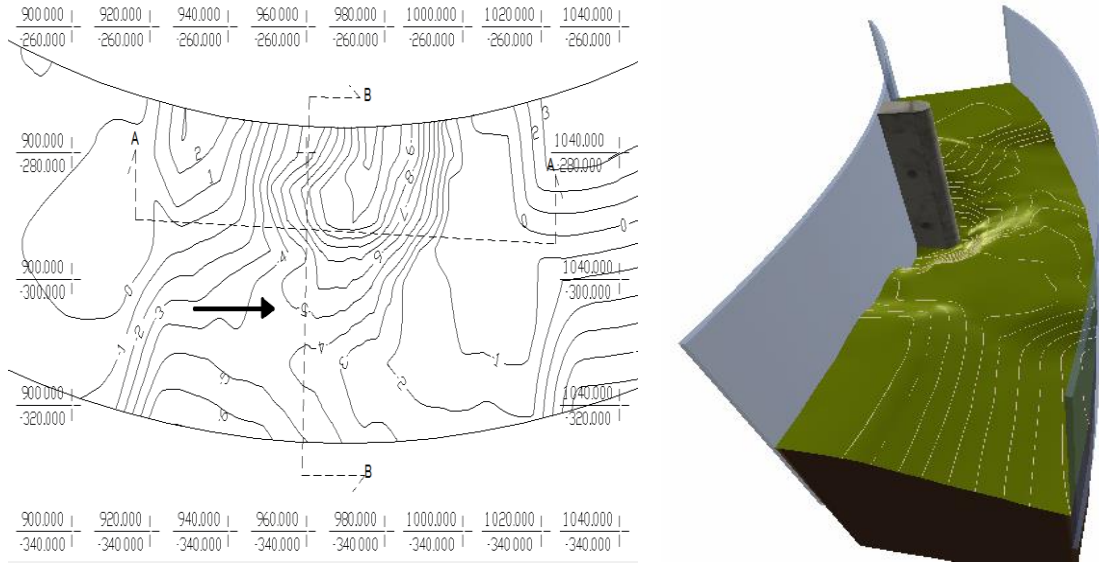


(d) B-B Kesiti

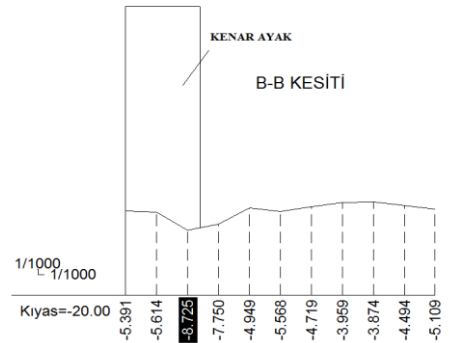
Şekil 6.38 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(c) A-A Kesiti



(d) B-B Kesiti

Şekil 6.39 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=90^\circ$ kıvrım açısına dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.40(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

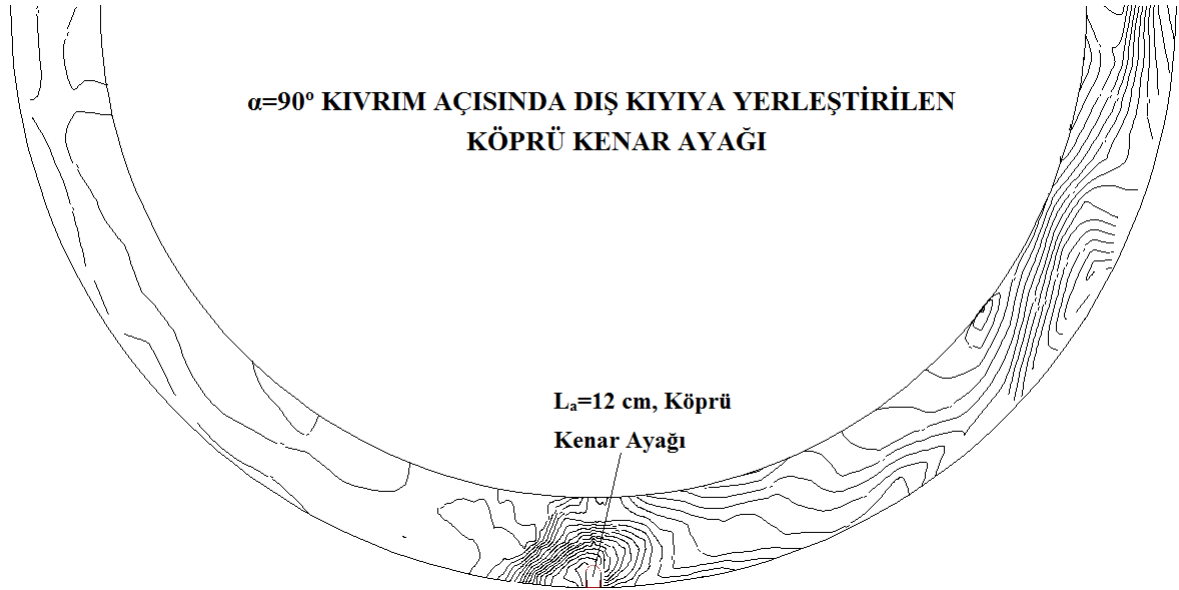
Şekil 6.40(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada kenar ayak etrafında -17 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.40(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.40(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. Burada maksimum oyulmanın mansapta -17.443 cm olduğu görülmektedir.

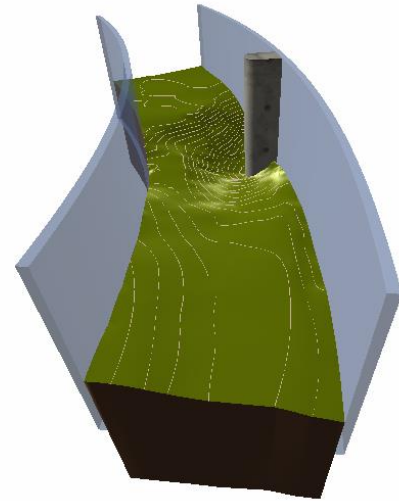
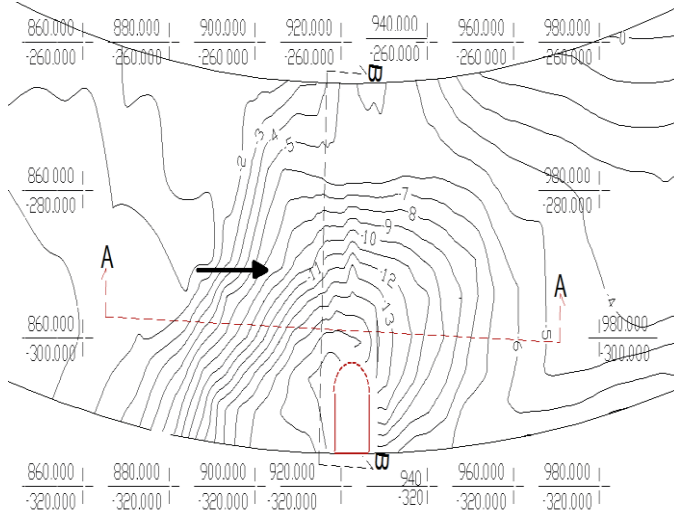
$\alpha=90^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.41(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

Şekil 6.41(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -14 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayak etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

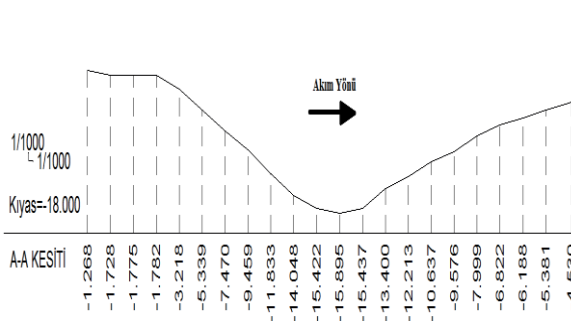
Şekil 6.41(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.41(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -13.399 cm olduğu görülmektedir.



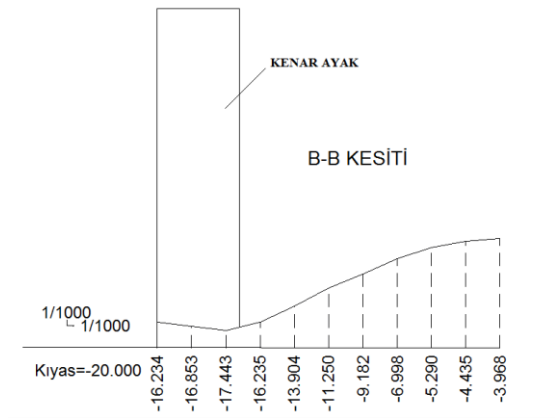
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

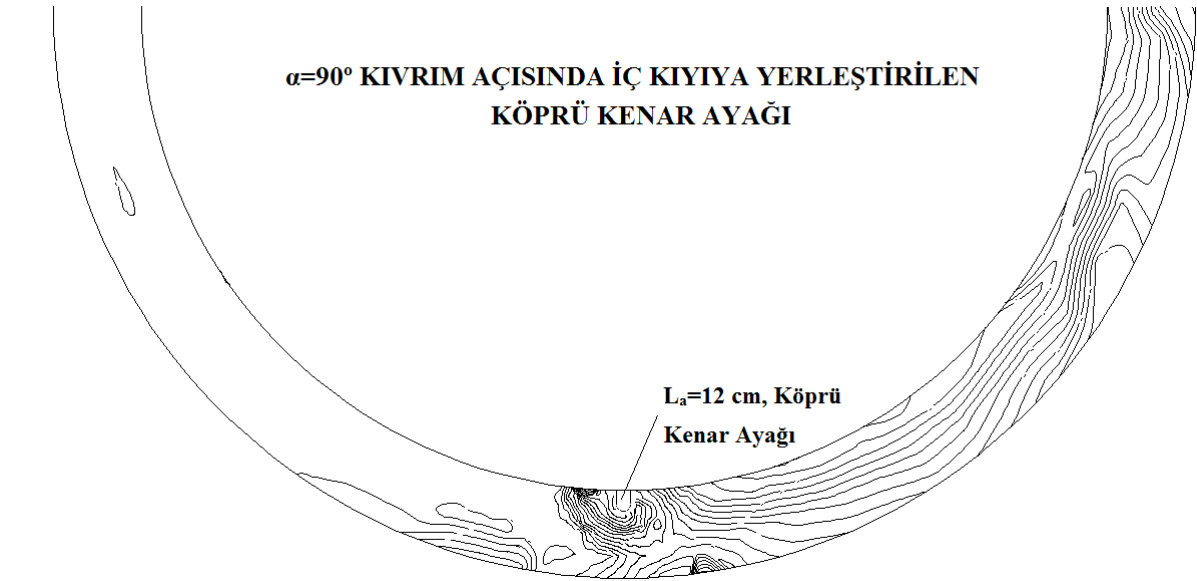


(c) A-A Kesiti

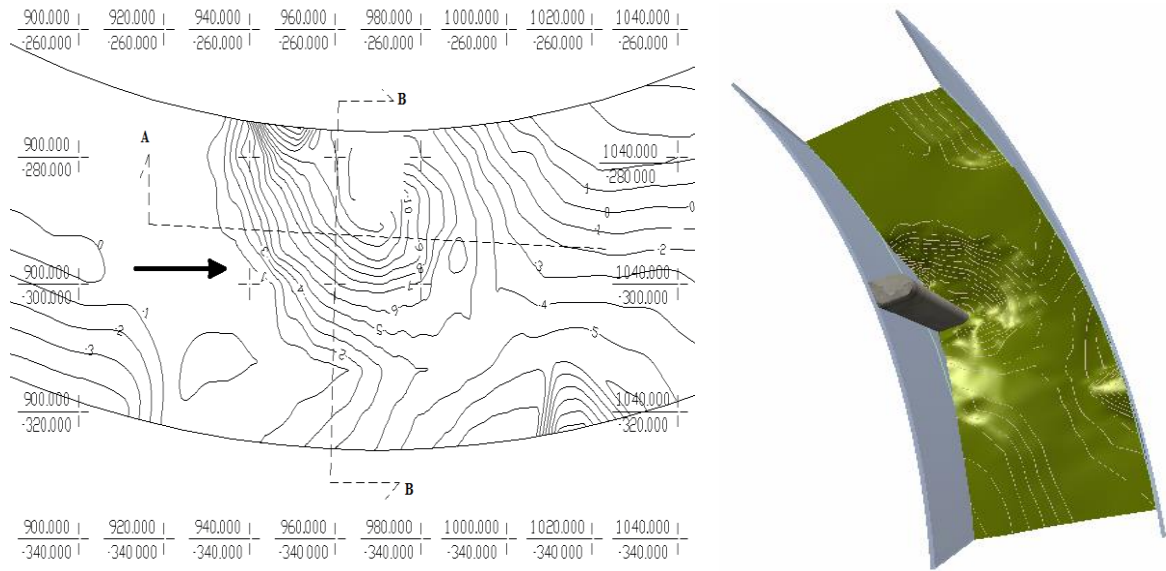


(d) B-B Kesiti

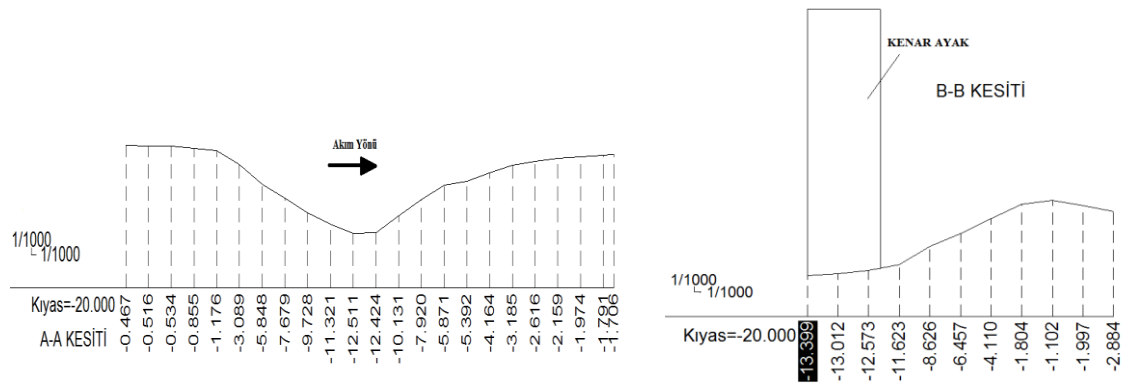
Şekil 6.40 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayığı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti

(d) B-B Kesiti

Şekil 6.41 $\alpha=90^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayığı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=120^\circ$ kıvrım açısına dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.42(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise yaklaşık $\alpha=100^\circ$ 'ye kadar pek fazla oyulma olmamış ancak daha sonra oyulma artmıştır.

Şekil 6.42(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada kenar ayak etrafında -15 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.42(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.42(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. Burada maksimum oyulmanın mansapta -14.832 cm olduğu görülmektedir.

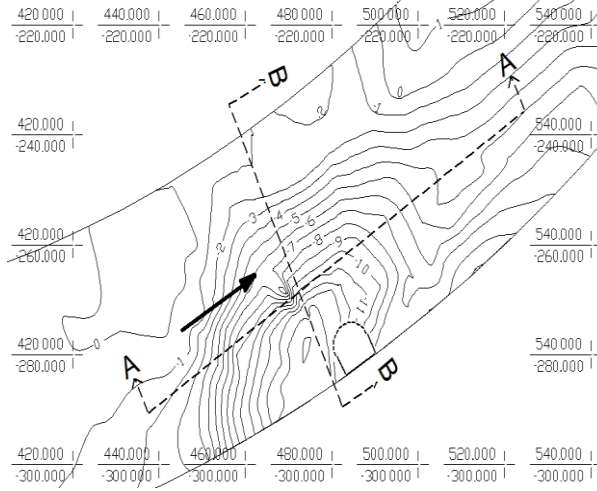
$\alpha=120^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.43(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise yaklaşık $\alpha=65^\circ$ 'ye kadar pek fazla oyulma olmamış ancak daha sonra oyulma artmıştır.

Şekil 6.43(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -8 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayak etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

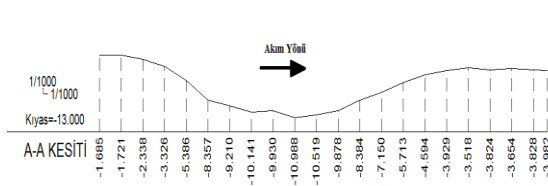
Şekil 6.43(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.43(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -20 cm olduğu görülmektedir.



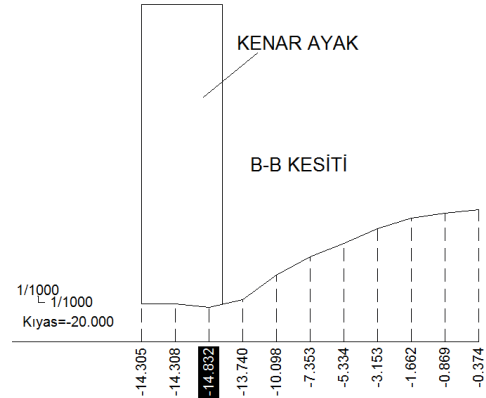
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

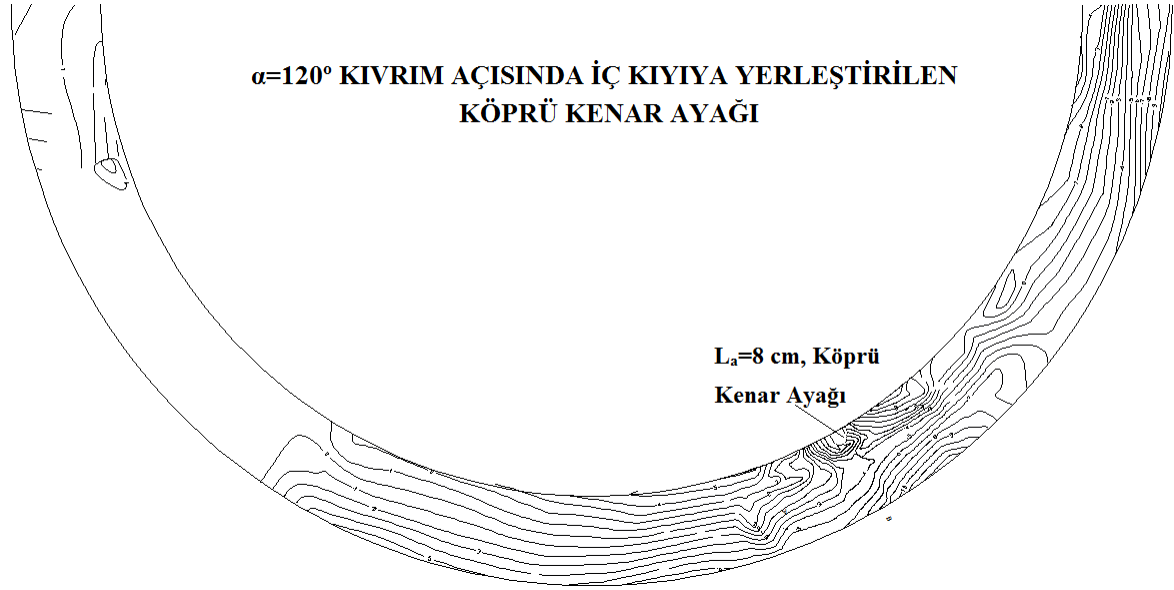


(c) A-A Kesiti

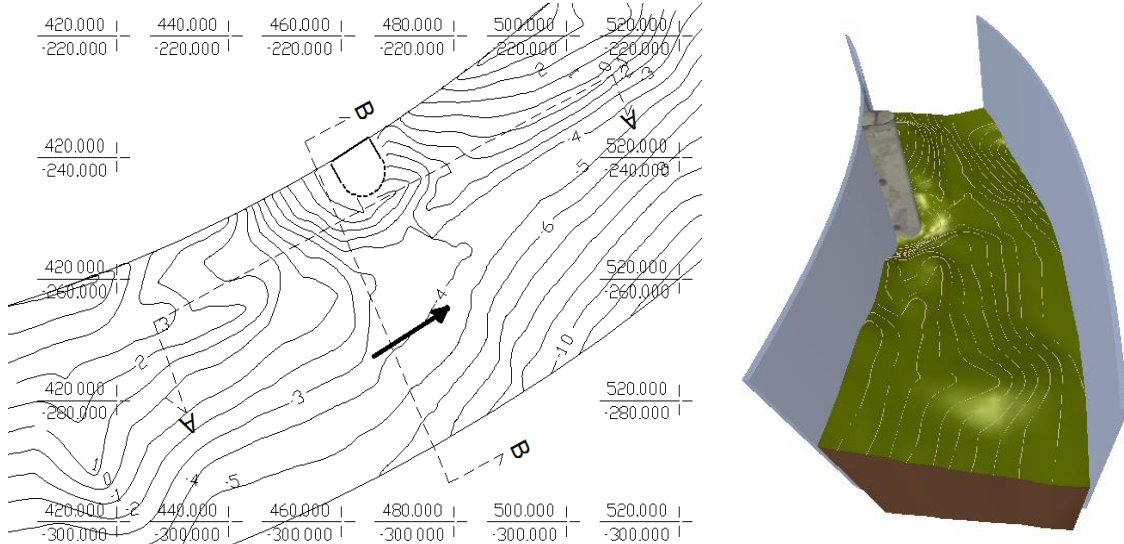


(d) B-B Kesiti

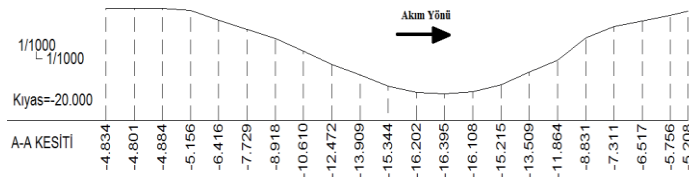
Şekil 6.42 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



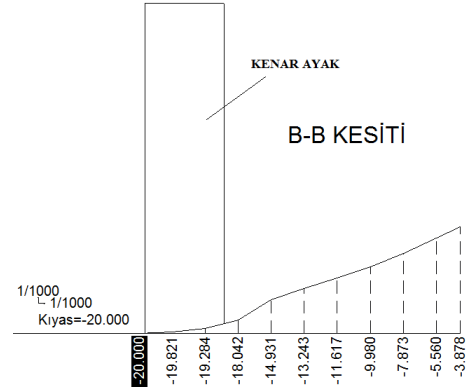
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayığı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti



(d) B-B Kesiti

Şekil 6.43 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayığı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=120^\circ$ kıvrım açısına dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.44(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise yaklaşık $\alpha=70^\circ$ 'ye kadar pek fazla oyulma olmamış ancak daha sonra oyulma artmıştır.

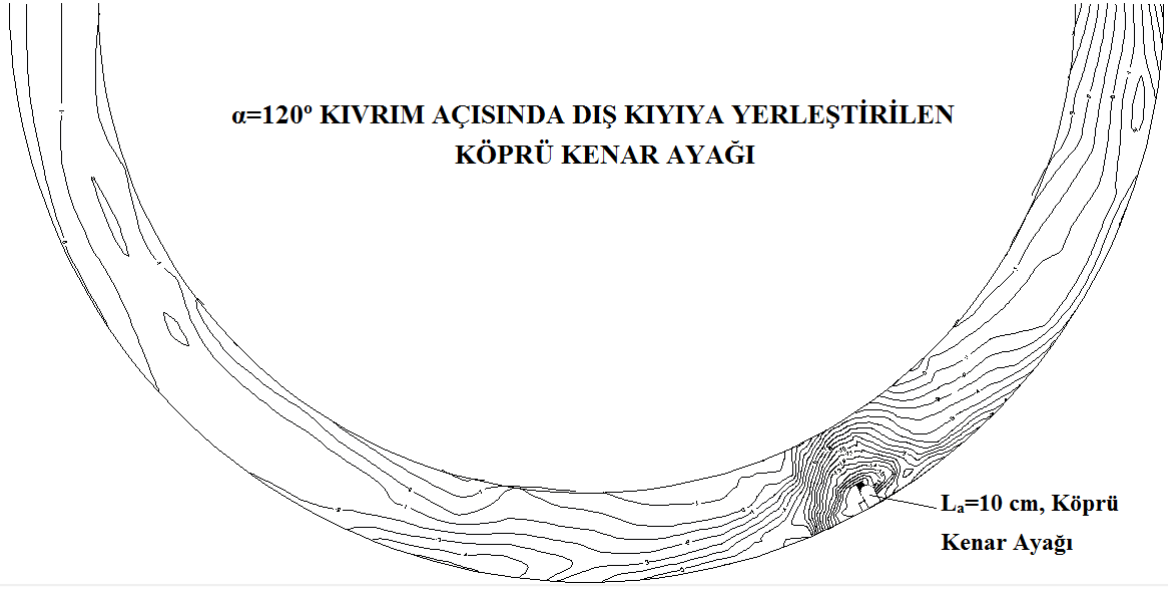
Şekil 6.44(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada kenar ayak etrafında -20 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.42(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.44(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. Burada maksimum oyulmanın mansapta -20 cm olduğu görülmektedir.

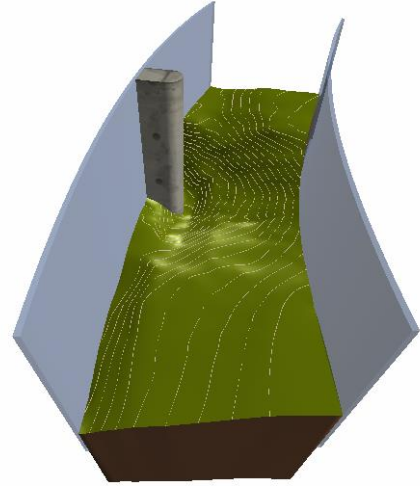
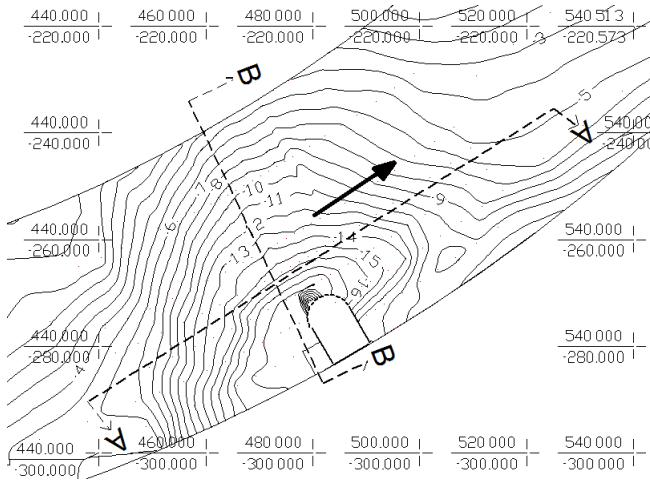
$\alpha=120^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.45(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise yaklaşık $\alpha=65^\circ$ 'ye kadar pek fazla oyulma olmamış ancak daha sonra oyulma artmıştır.

Şekil 6.45(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -12 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayak etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

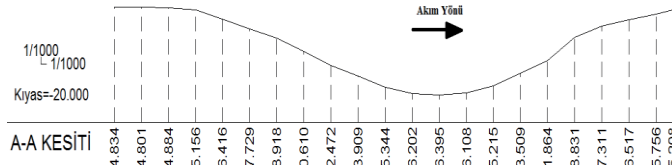
Şekil 6.45(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.45(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -11.749 cm olduğu görülmektedir.



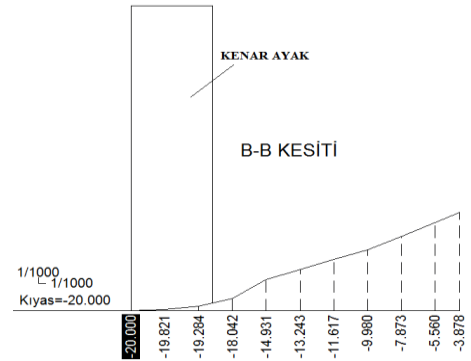
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

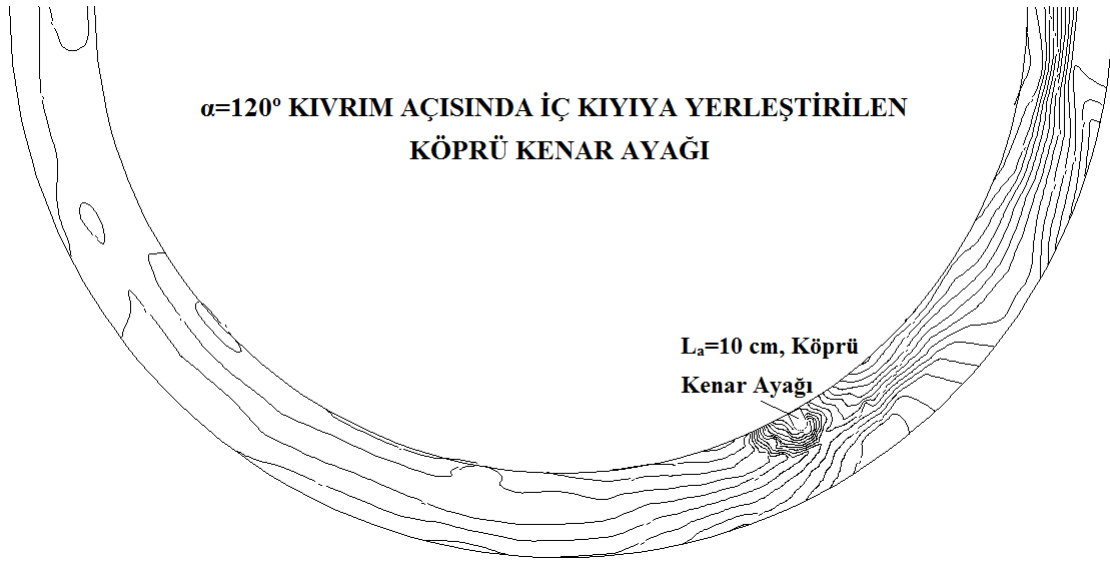


(c) A-A Kesiti

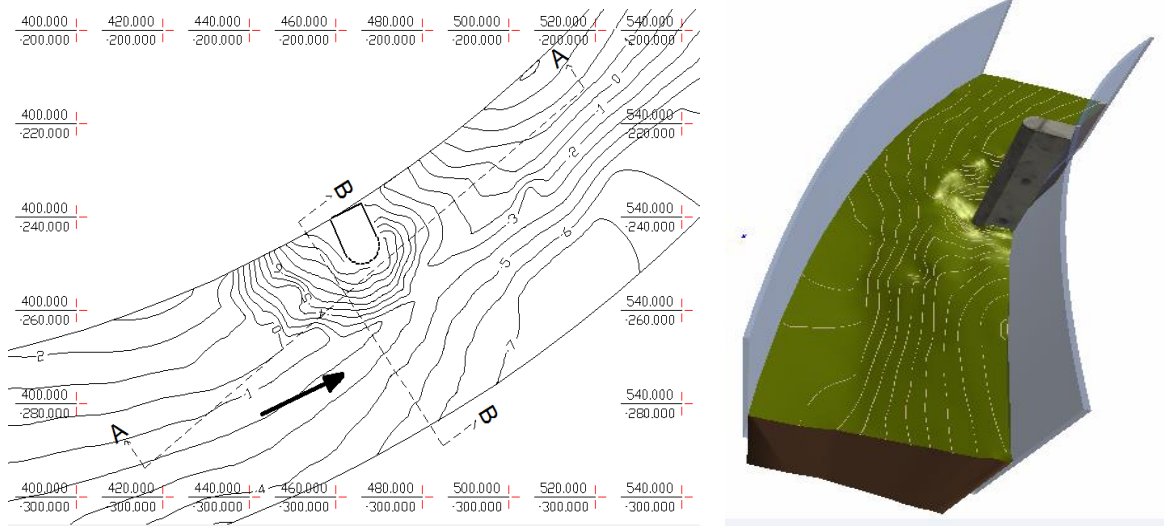


(d) B-B Kesiti

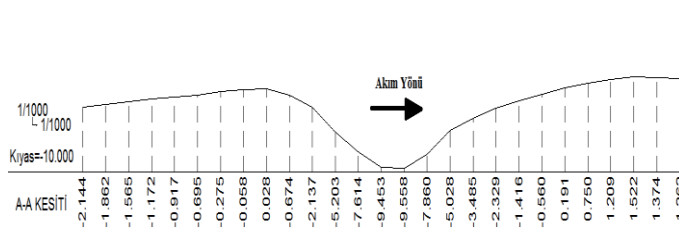
Şekil 6.44 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



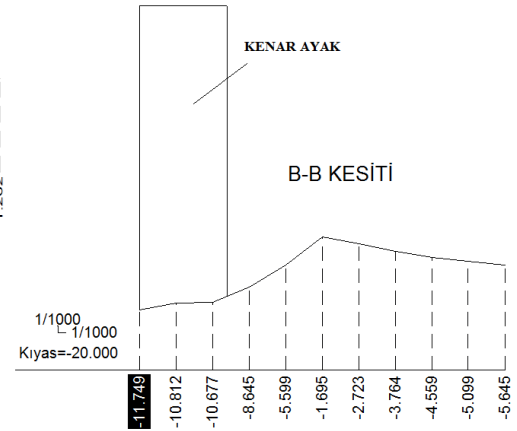
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayığı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti



(d) B-B Kesiti

Şekil 6.45 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayığı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=120^\circ$ kıvrım açısına dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.46(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise yaklaşık $\alpha=100^\circ$ 'ye kadar pek fazla oyulma olmamış ancak daha sonra oyulma artmıştır.

Şekil 6.46(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada kenar ayak etrafında -19 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.46(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.46(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. Burada maksimum oyulmanın mansapta -19.767 cm olduğu görülmektedir.

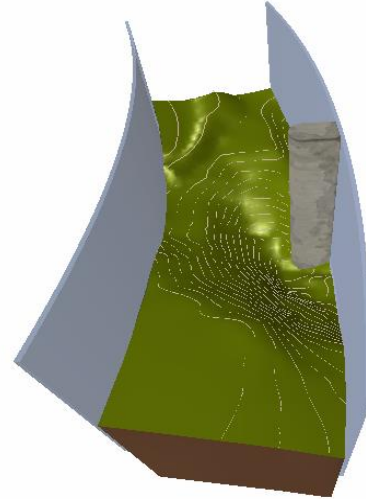
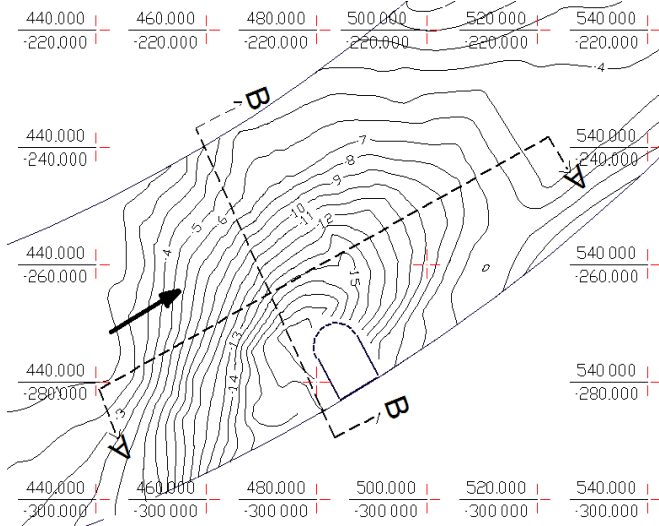
$\alpha=120^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.47(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir. Kanal girişinde ise yaklaşık $\alpha=100^\circ$ 'ye kadar pek fazla oyulma olmamış ancak daha sonra oyulma artmıştır.

Şekil 6.47(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -11 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayak etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

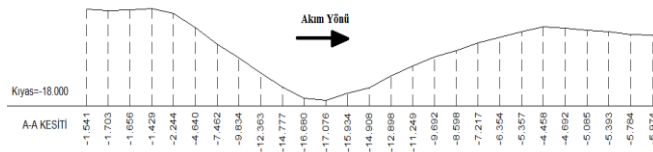
Şekil 6.47(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.47(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -10.857 cm olduğu görülmektedir.



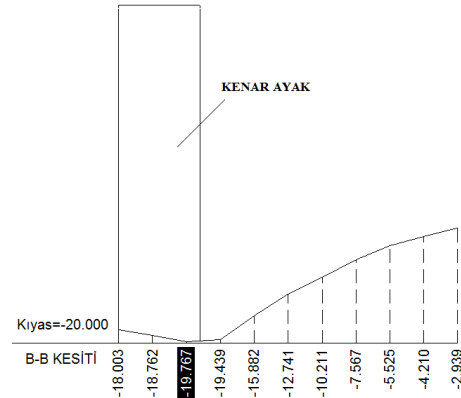
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayığı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

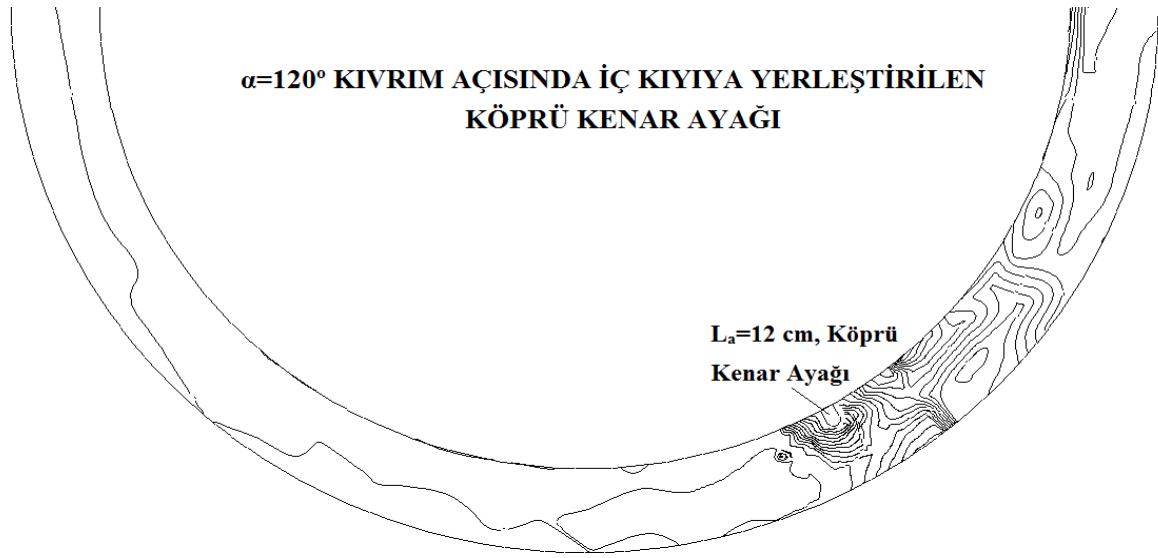


(c) A-A Kesiti

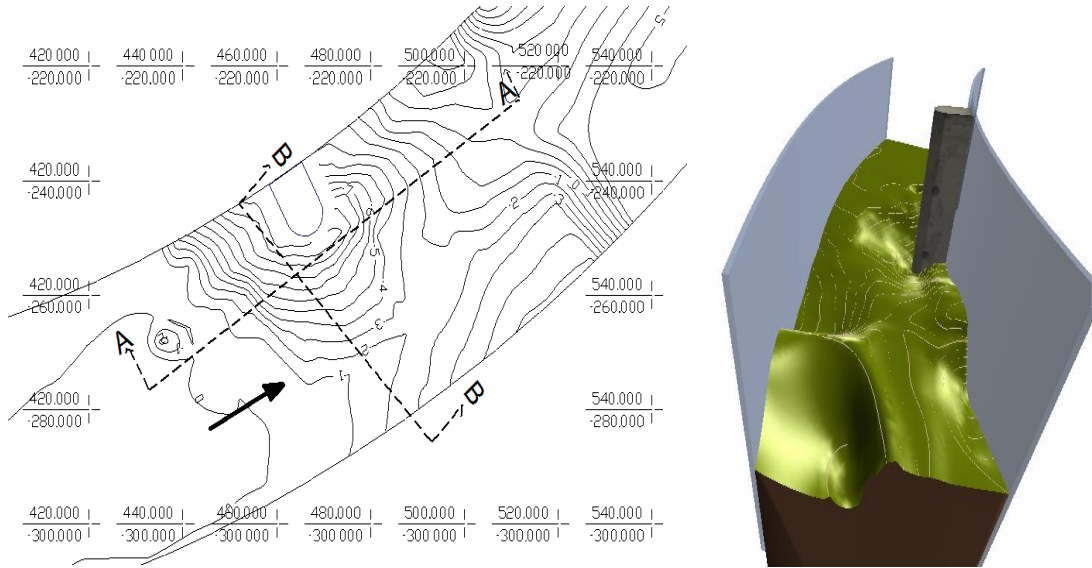


(d) B-B Kesiti

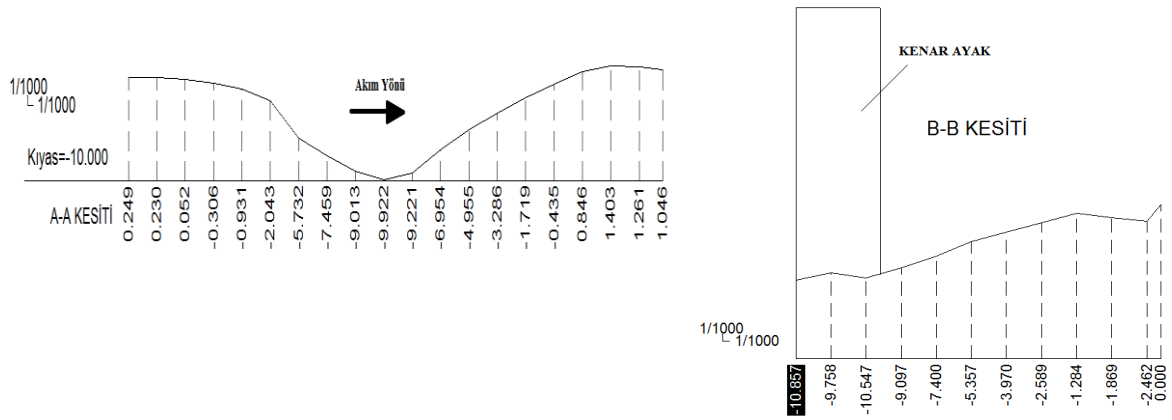
Şekil 6.46 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayığı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti

(d) B-B Kesiti

Şekil 6.47 $\alpha=120^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=150^\circ$ kıvrım açısına dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.48(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

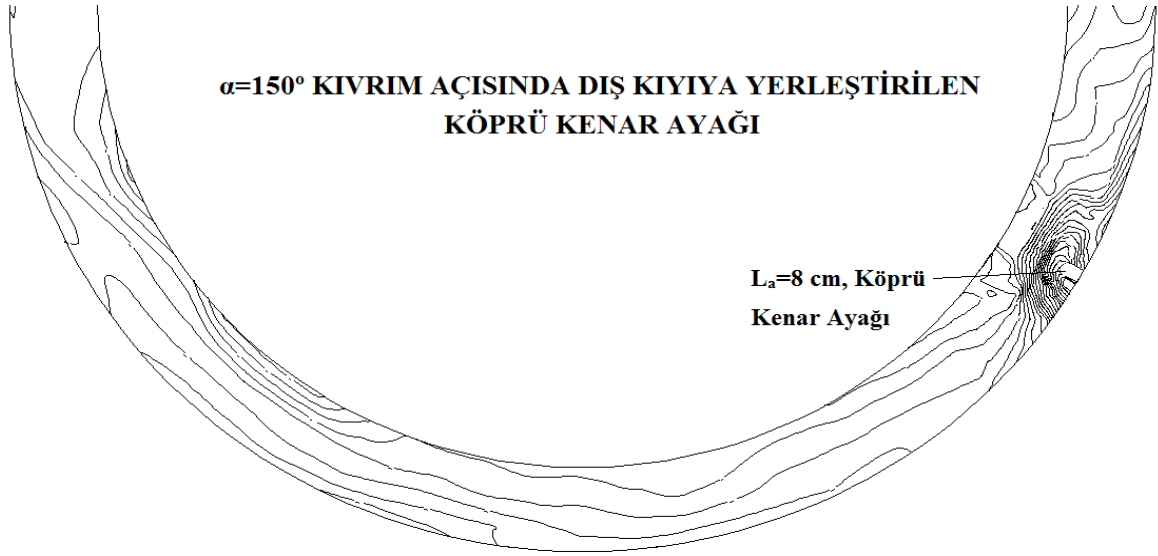
Şekil 6. 48(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada kenar ayak etrafında -19 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.48(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.48(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. Burada maksimum oyulmanın mansapta -18.88 cm olduğu görülmektedir.

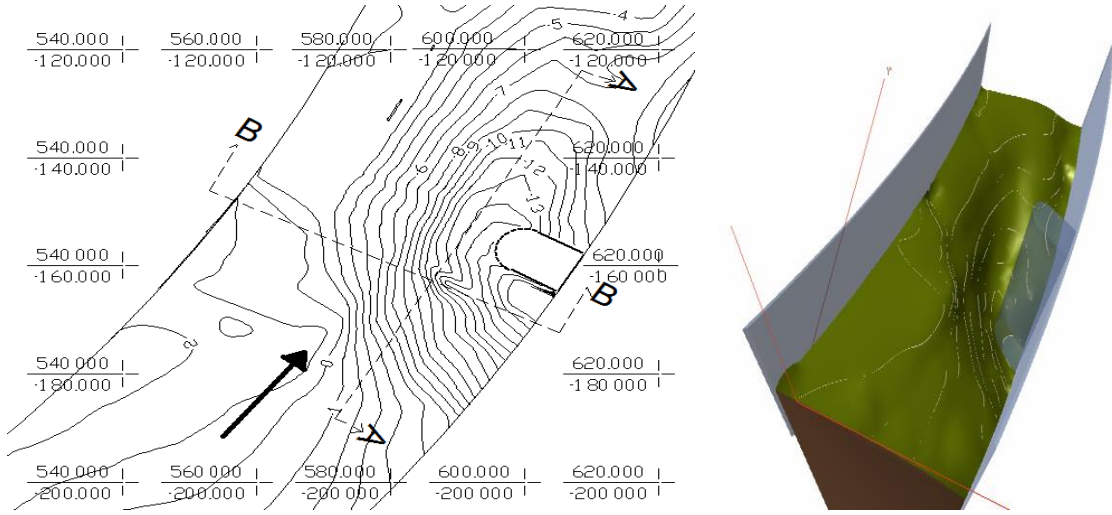
$\alpha=150^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.49(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

Şekil 6.49(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -9 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayak etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

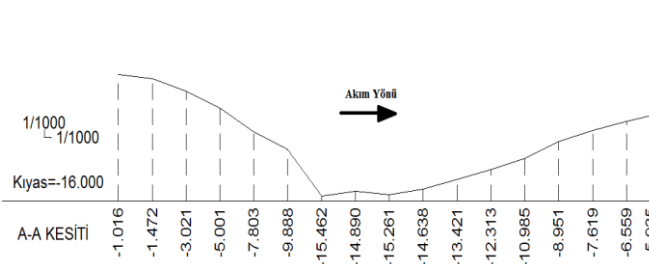
Şekil 6.49(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.49(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -9.161 cm olduğu görülmektedir.



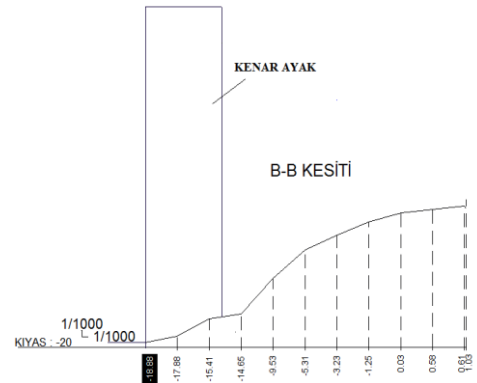
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

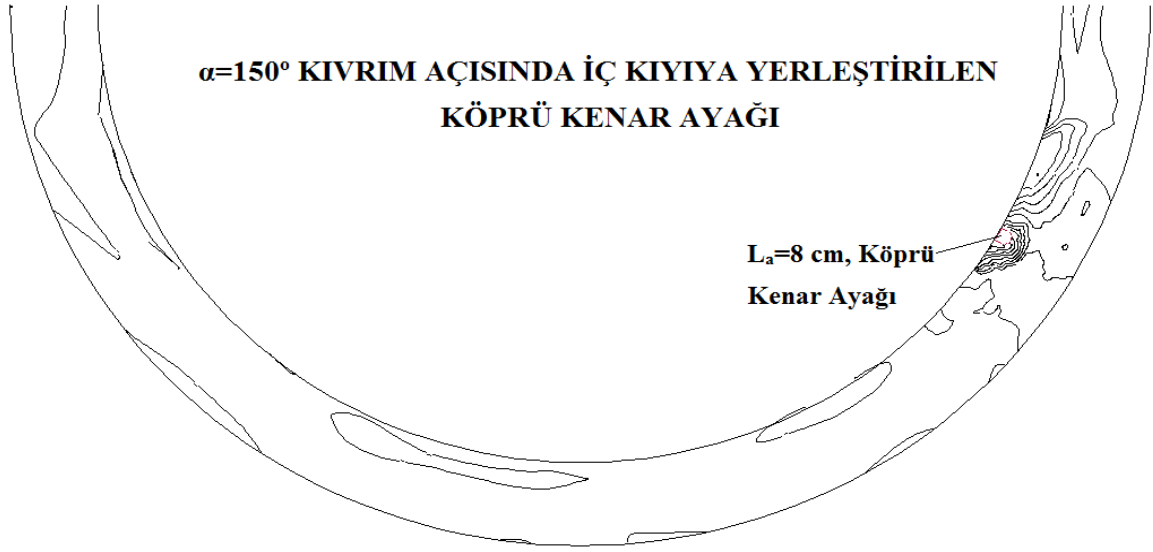


(c) A-A Kesiti

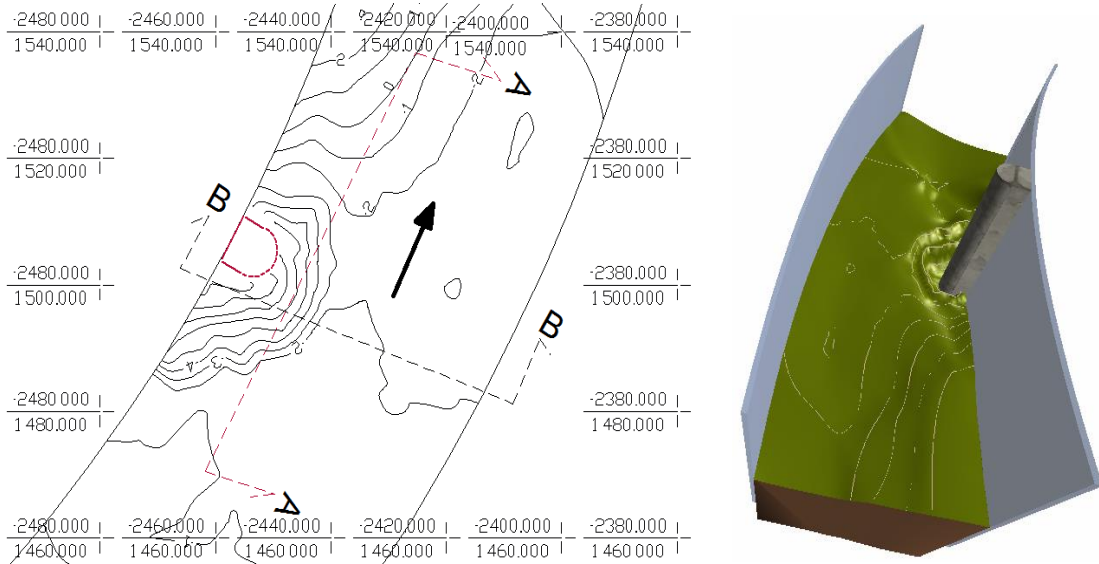


(d) B-B Kesiti

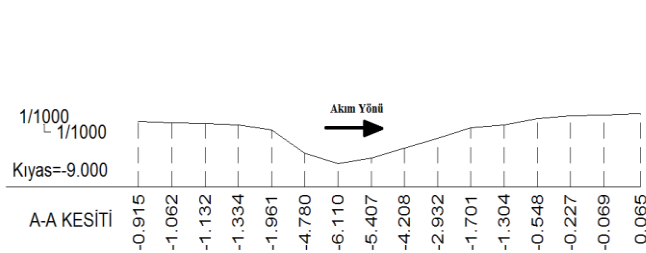
Şekil 6.48 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



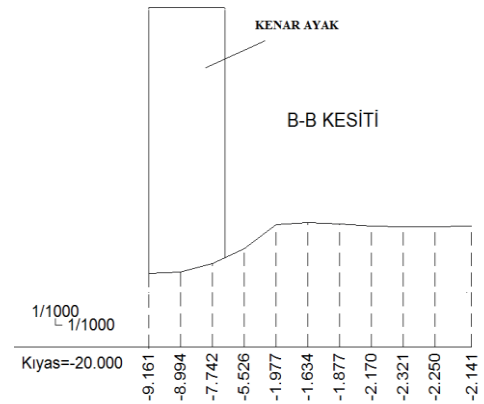
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti



(d) B-B Kesiti

Şekil 6.49 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=8$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=150^\circ$ kıvrım açısına dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.50(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

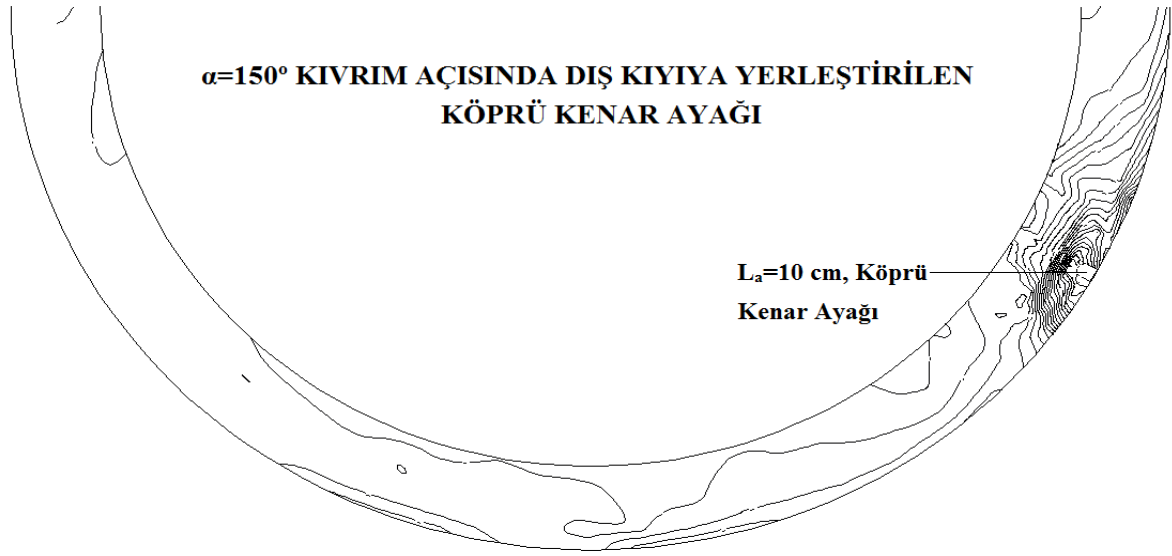
Şekil 6.50(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada kenar ayak etrafında -18 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.50(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.50(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. Burada maksimum oyulmanın mansapta -17.67 cm olduğu görülmektedir.

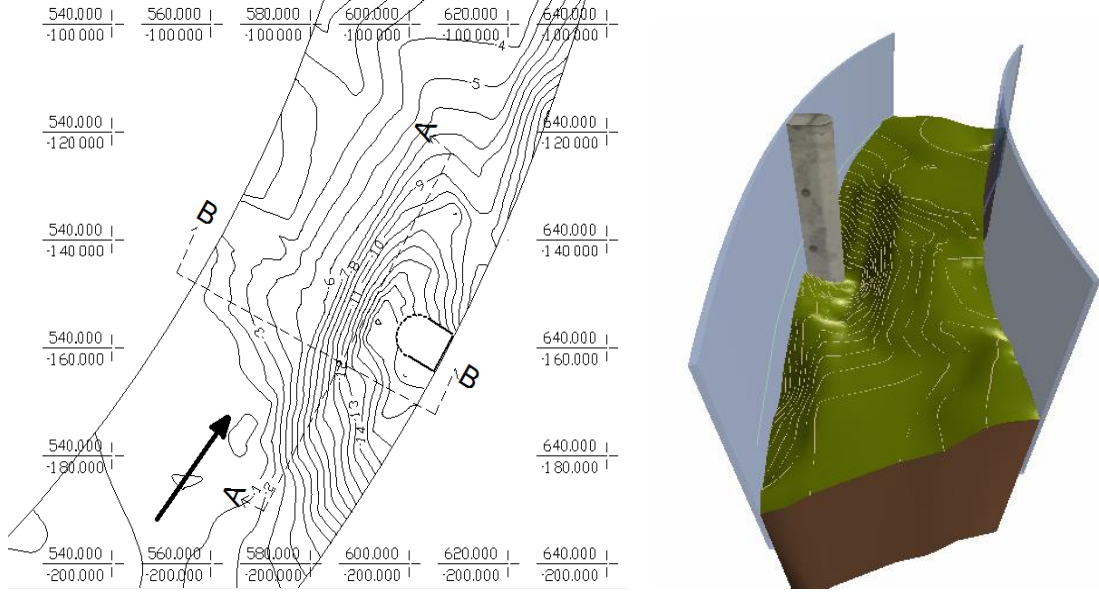
$\alpha=150^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.51(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

Şekil 6.51(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -9 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayak etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

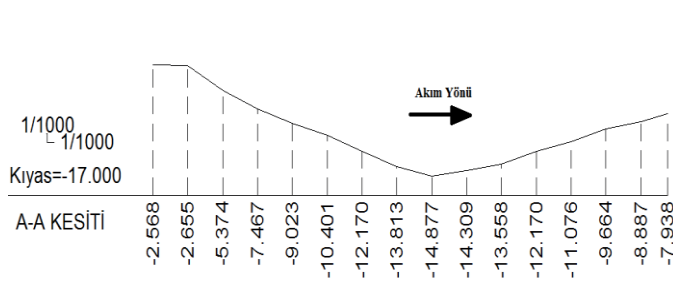
Şekil 6.51(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.51(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -10.66 cm olduğu görülmektedir.



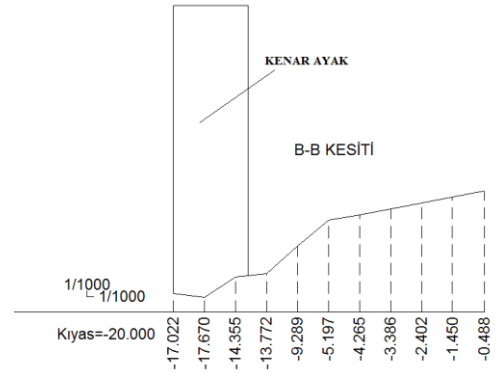
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

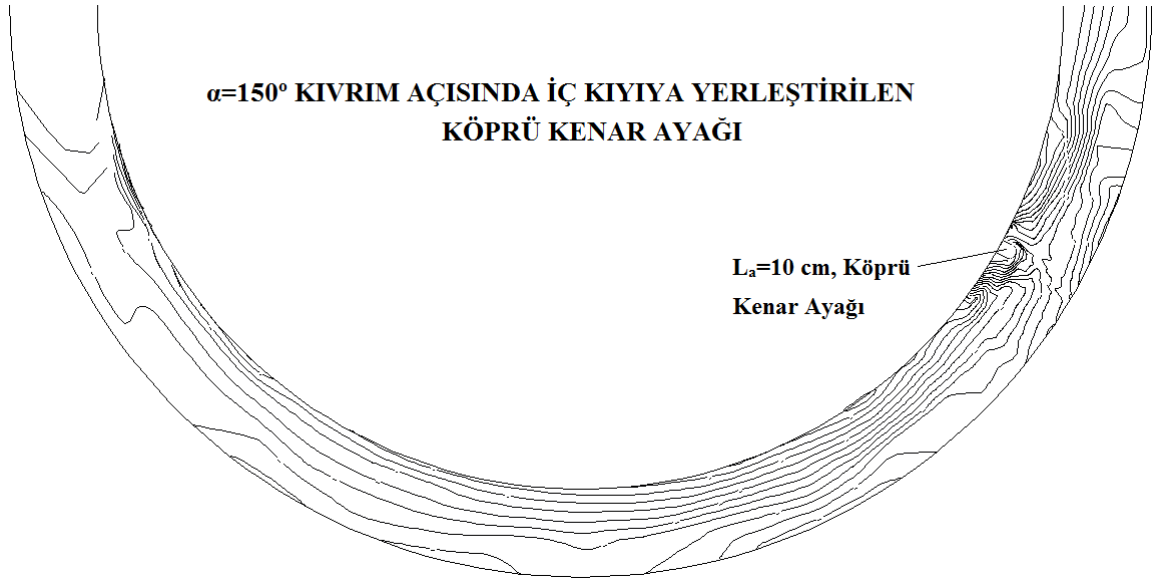


(c) A-A Kesiti

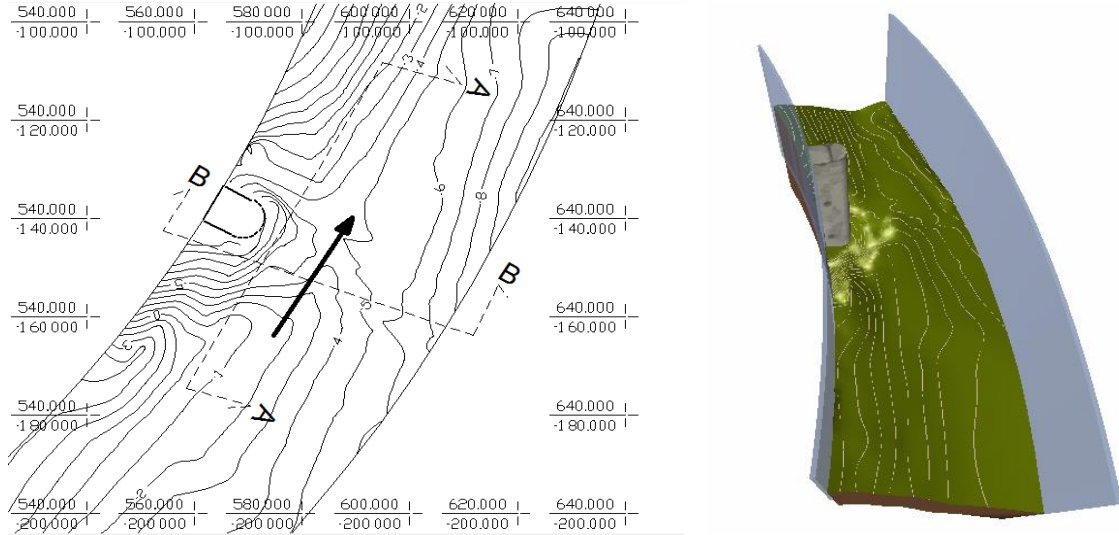


(d) B-B Kesiti

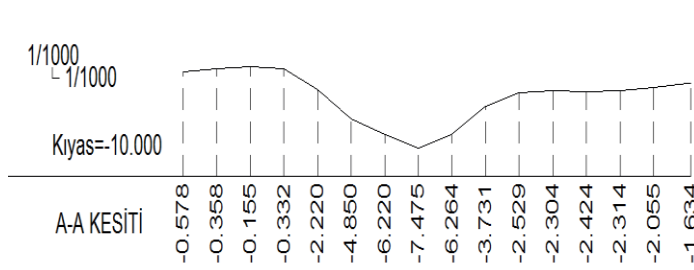
Şekil 6.50 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



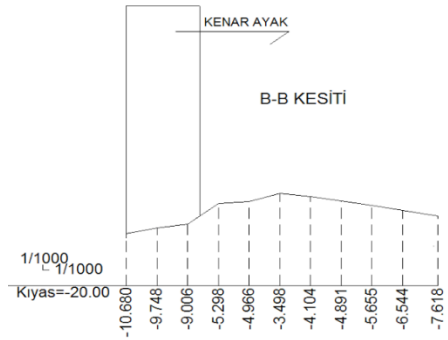
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti



(d) B-B Kesiti

Şekil 6.51 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=10$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

$\alpha=150^\circ$ kıvrım açısına dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.52(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

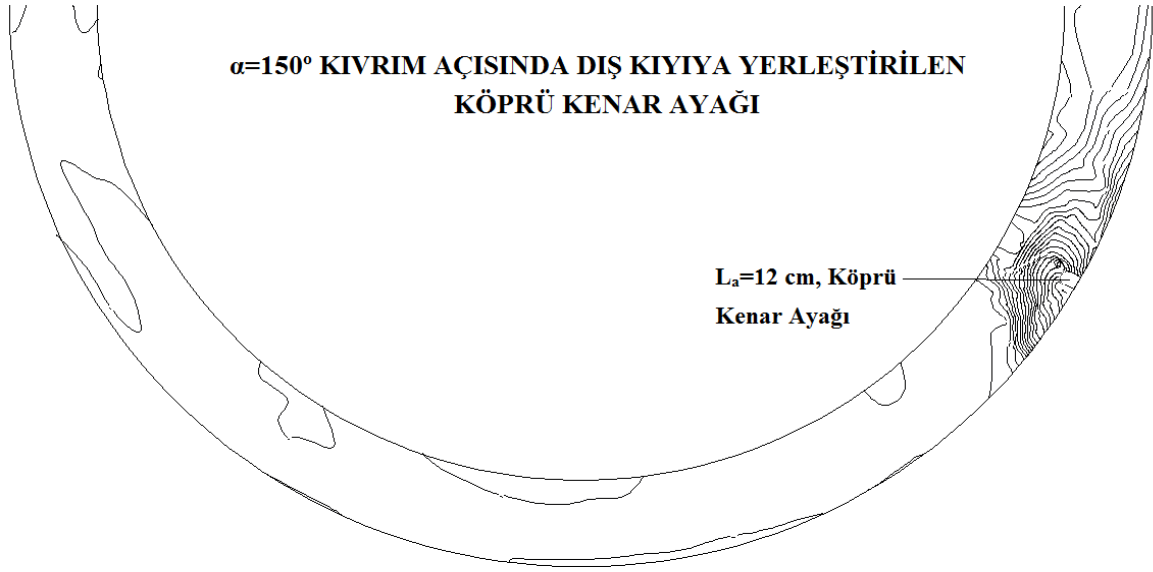
Şekil 6.52(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada kenar ayak etrafında -19 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayağın etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

Şekil 6.52(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.52(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. Burada maksimum oyulmanın mansapta -18.851 cm olduğu görülmektedir.

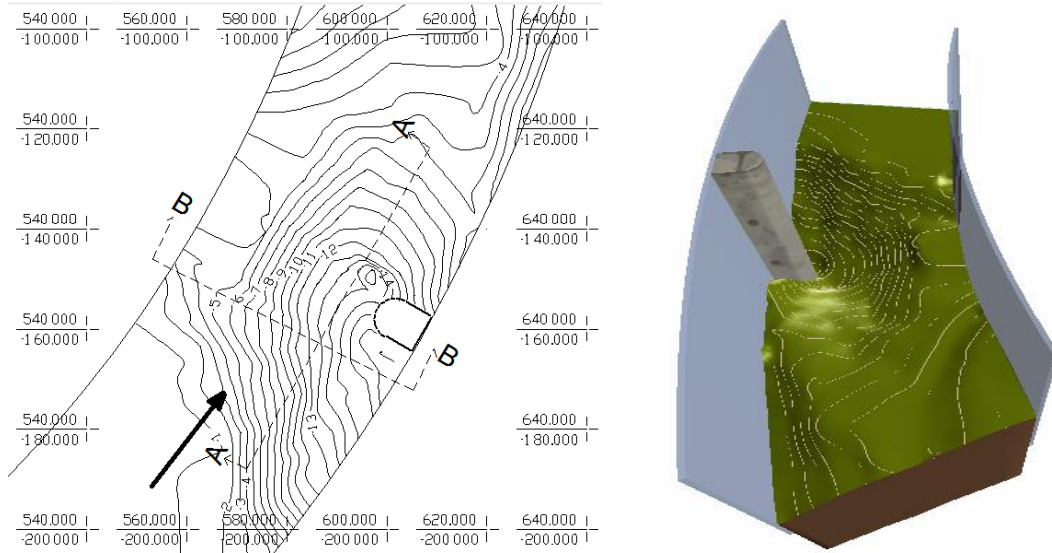
$\alpha=150^\circ$ kıvrım açısına iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm köprü kenar ayağı etrafında kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi Şekil 6.53(a)'da gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde kenar ayak etrafında eğrilerin daha sık olması oyulmanın burada daha çok oluştuğunu temsil etmektedir.

Şekil 6.53(b)'de ise kenar ayak etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu şekiller üzerinde eş yükselti eğrileri de gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde maksimum oyulmanın membada yaklaşık -12 cm olduğu görülmektedir. Deneyler sonrasında elde edilen üç boyutlu oyulma şeklinden, oyulmanın kenar ayak etrafında nasıl değiştiği incelenebilmektedir.

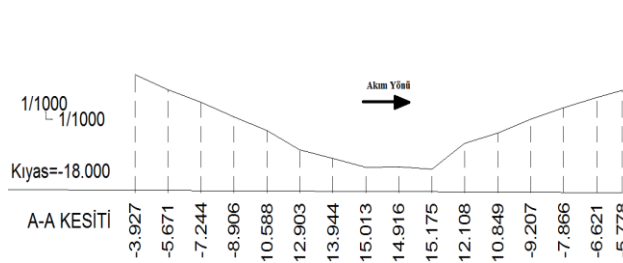
Şekil 6.53(c)'de ise köprü kenar ayağı ucu hizasında akım yönünde elde edilen A-A kesiti verilmiştir. Şekil 6.53(d)'de ise köprü kenar ayağı doğrultusunda elde edilen B-B kesiti verilmiştir. B-B kesitindeki maksimum oyulmanın -12.321 cm olduğu görülmektedir.



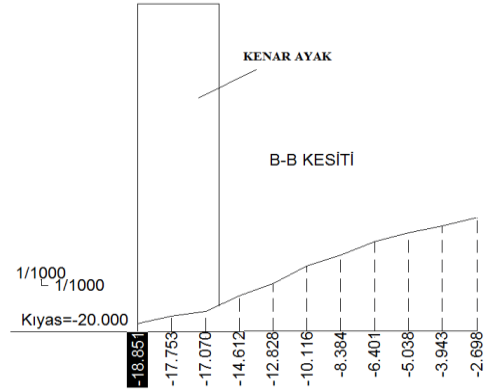
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi

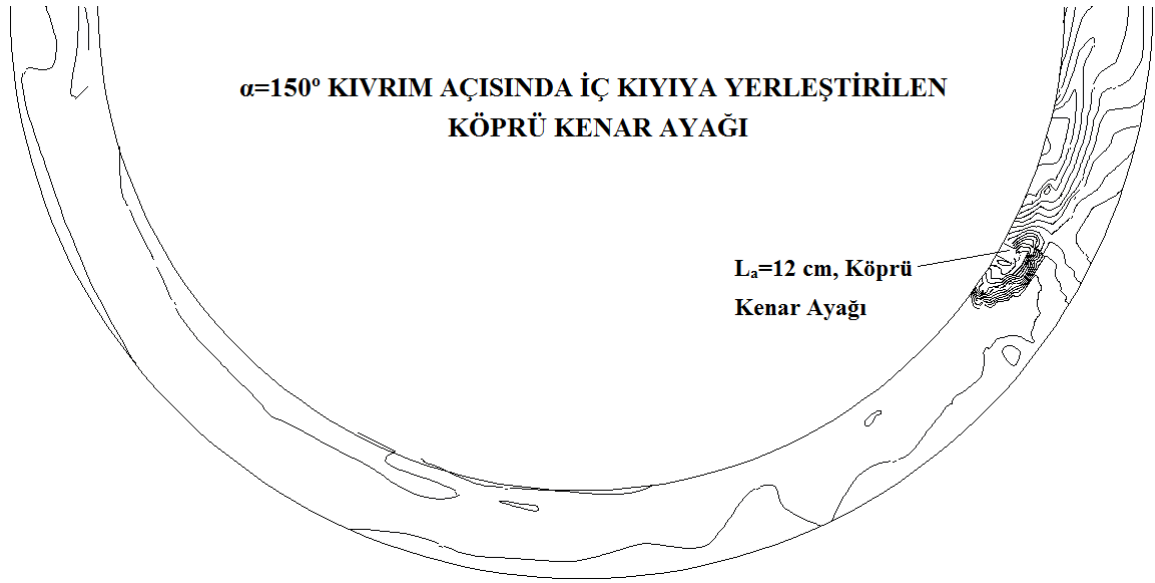


(c) A-A Kesiti

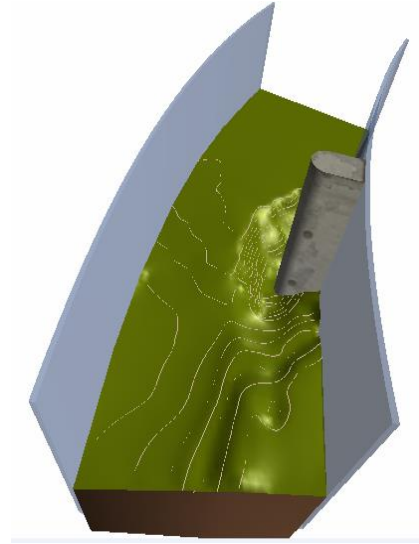
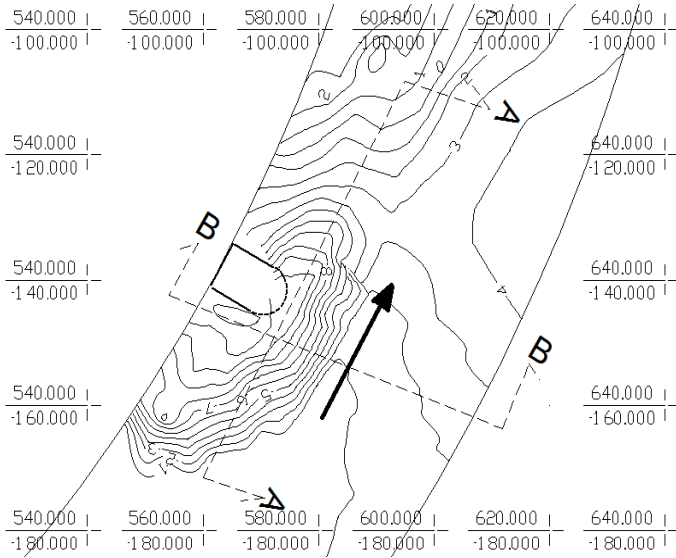


(d) B-B Kesiti

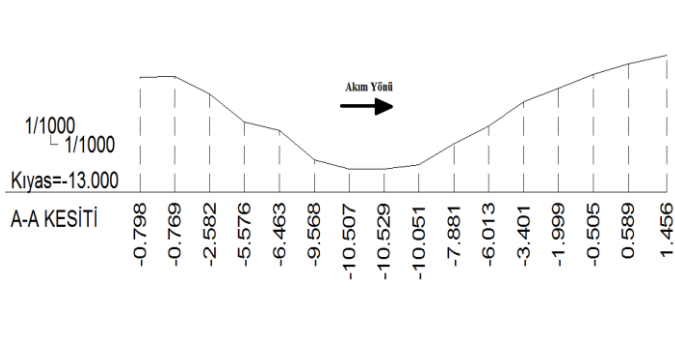
Şekil 6.52 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında dış kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi



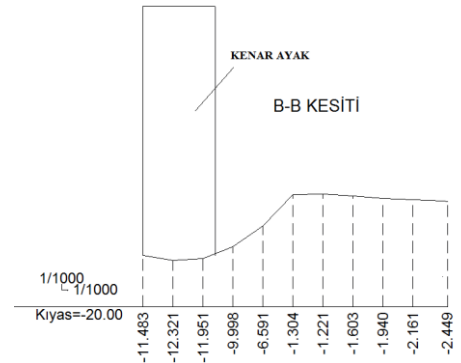
(a) Kıvrımlı kanal boyunca taban topoğrafyasının değişimi



(b) Köprü kenar ayağı etrafında topoğrafyanın değişimi ve üç boyutlu gösterimi



(c) A-A Kesiti



(d) B-B Kesiti

Şekil 6.53 $\alpha=150^\circ$ kıvrım açısında iç kıyıya yerleştirilen $L_a=12$ cm'lik köprü kenar ayağı etrafında ve kıvrımlı kanal boyunca topoğrafyanın değişimi

SONUÇLAR

30°, 60°, 90°, 120° ve 150°'lik kıvrım açılarında köprü kenar ayağı etrafında oluşan yerel oyulmalar, temiz su oyulması durumu için deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bu bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Kıvrımlı kanalda akım olayının karmaşık yapısından dolayı kıvrımın her açısında oyulmanın farklı olduğu gözlenmiştir. Maksimum oyulma derinliği hakkında genel olarak şu sonuca ulaşılmaktadır. Kıvrımlı kanallarda da, düz kanallardaki gibi akım şiddeti (V/V_{kr}) arttığında oyulma derinliği de artmaktadır.
- Maksimum oyulma derinliği, $\alpha=150^\circ$ 'de ve $L_a=8$ cm'lik ayak uzunluğunda dış kıyı ve iç kıyıda maksimum oyulma derinlikleri elde edilmiştir. $\alpha=90^\circ$ 'de ve $L_a=10$ cm'lik ayak uzunluğunda dış kıyı ve iç kıyıda maksimum oyulma derinlikleri elde edilmiştir. $\alpha=120^\circ$ 'de ve $L_a=12$ cm'lik ayak uzunluğunda dış kıyı ve iç kıyıda maksimum oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Buradan kıvrımlı kanalda $\alpha=90^\circ$ 'den (akımın yönünün değiştiği bölgeden) itibaren oyulma derinliği maksimum olduğu görülmektedir.
- Kıvrımlı kanalın $\alpha=30^\circ$, 60° , 90° , 120° ve 150° 'lik açılarda ana kanalın iç ve dış kıyısına yerleştirilen köprü kenar ayaklarında kenar ayağı uzunluğunun artmasıyla genellikle maksimum oyulma derinliği azalmıştır.
- Kuyruk çevrintilerinin etki uzunluğu at nalı çevrintilerinkinden daha fazladır. Ancak at nalı çevrintilerinin şiddeti kuyruk çevrintilerinin şiddetinden daha fazla olduğundan maksimum oyulmalar ayağın memba yüzünde görülmektedir. Bunun başka bir nedeni memba yüzünden sökülen tanelerin bir kısmının düşen akım hızı nedeniyle ayağın mansap yönüne birikmesidir. Bu çalışmada da maksimum oyulma, kenar ayağın memba duvarı etrafında oluşmaktadır.
- Kıvrımlı kanal boyunca topoğrafya incelendiğinde ise kıvrımda kenar ayağın yerleştirildiği kıvrım açısından itibaren oyulmanın başladığı görülmektedir. Kenar ayaktan önce memba tarafında taban profilinde değişimin çok az olduğu tespit edilmiştir.
- Oyulma çukuru memba şev eğiminin en büyük değeri $\alpha=60^\circ$ 'de meydana gelmiştir. Tüm kıvrım açıları için ortalama memba şev eğimi 1/4.13 olarak belirlenmiştir.
- Oyulma çukuru mansap şev eğiminin en büyük değeri $\alpha=150^\circ$ 'de meydana gelmiştir. Tüm kıvrım açıları için ortalama mansap şev eğimi 1/5.07 olarak belirlenmiştir.

- Oyulma ukuru memba Şev eğimi test edilen tüm deneylerde mansap Şev eğiminden daha büyük olmuştur.
- Kıvrımlı kanallardaki sekonder akım ve maksimum hız yörüngesi, dış kıyıda oyulma i kıyıda ise yığılmalara sebep olarak taban topoğrafyasında değişime sebep olmaktadır. Dış kıyıda elde edilen maksimum oyulma çukuru derinlikleri i kıyıda oluşan oyulma derinliklerinden daha fazla olmuştur. Tüm deney verileri dikkate alındığında $d_{dış}=1.45\times d_{i}$ ifadesi elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

Ağaçcıoğlu, H. ve Yüksel, Y., 1995. “Kıvrımlı kanallarda yanal akımın kıvrım hız dağılımına etkisi”, İnşaat Mühendisliğinde gelişmeler II. Teknik kongre bildiriler kitabı, s.201-211, 18-20 Eylül, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.

Alabi, P.D., 2006. “Time development of local scour at a bridge pier fitted with a collar”, University of Saskatchewan, Saskatoon Saskatchewan, Canada.

Ayala, L. ve Grandon, F., 1994.” Effect of pier geometry on scour graded gravels proceedings”, National Conference on Hydraulic Engineering, Pp. 73-77.

Ballio F. ve Orsi E. 2000. “Time evolution of scour around bridge abutments”, *Water Eng. Res.*, 2 (4), 243-259.

Ballio, F., Teruzzi, A. ve Radice, A., 2009. “Constriction effects in clear-water scour at abutments”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 135:140-145.

Başak, V., 1977. “Doğrusal eksenli ve dairesel kesitli kazık grubu etrafındaki yerel oyulmalar”, D.S.D. Araştırma Dairesi.

Breusers, H. N. C ve Raudkivi., 1991. “Scouring, hydraulic structures design manual”, No.2 , A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, J.

Breusers, H. N. C ve Nicollet G., ve Shen, H. W., 1977. “Local scour around cylindrical piers”, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 15(3), 211-252.

Cardoso, A. H. ve Bettess, R., 1999. “Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments”, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125, 388-399.

Cardoso A. H. ve Fael C. M. S., 2009. “Protecting vertical wall abutments with riprap mattresses”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 135, 6, 457-465 ().

Carstenes, M.R. ve Sharma, H. R., 1975. “Local scour around large omstructions”, *Journal of Hydraulic Research, A. H. R.*

Carstenes, M.R. ve Sharma, H. R., 1966. “Similarity laws for localized scour”, *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 13-36.

Chiew Y.M. ve Melville B. W. 1987., “Local scour around bridge piers”, *Journal of Hydraulic Research*, 25 , 1, 15-26.

Chiew Y.M. ve Melville B.W., 1989. “Local scour at bridge piers with non-uniform sediments proceedings”, *Institution of Civil Engineers, Part 2: Research And Theory*, 87, 215-224.

Chiew Y. M., 1992. “Scour protection at bridge piers”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9).

Chiew Y. M., 1995. “Mechanics of riprap failure at bridge piers”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(9), 635–643.

Chiew, Y. M. ve Lim F. H., 2000. “Failure behavior of riprap layer at bridge piers under live-bed conditions”, *Journal of Hydraulic Engineering, Asce*, 126, 1, 43-55.

Chiew Y. M., 2004. “Local scour and riprap stability at bridge piers in a degrading channel”, *Journal of Hydraulic Engineering, Asce*, 130, 3, 218-226.

Coleman, S. E., Lauchlan, C. S. ve Melville, B.W., 2003. "Clear-water scour development at bridge abutments". Journal of Hydraulic Research, Vol. 41, No. 5, 521-531.

Deng L. ve Cai C., 2010. "Bridge scour: prediction, modeling, monitoring, and countermeasures – review", Pract. Period. Struct. Des. Constr., 15(2), 125–134.

Dey, S., 1997. "Local scour at piers", Part I: A Review of Developments of Research. International Journal of Sediment Research. Vol. 12, No.2, 23-45.

Dey S. ve Barbhuiya A.K., 2004. "Clear-water scour at abutments", Water Management, 157,2, 77-98.

Dey S., Chiew Y. M. ve Kadam M. S., 2008. "Local scour and riprap stability at an abutment in a degrading bed", Journal of Hydraulic Engineering, Asce, 134, 10, 1496-1502.

De Vriend, H. J. ve Struiksma, N., 1983. "Flow and bed deformation in river bends", Pub 317, Rivers'83, October 24-26, New Orleans.

Diab, R., Link, O. ve Zanke, U., 2010. "Geometry of developing and equilibrium scour holes at bridge piers in gravel", Canadian Journal of Civil Engineering, 37(4), 544-552.

Doğan A. E., 2008. "Effects of collars on scour reduction at bridge abutments", (mas. sc. thesis, Metu, Ankara.

Duarte, C. A. ve Sainz, J. A., 1999. "Riprap at bridge piers", Journal of Hydraulic Research, Vol. 37, No. 3, 291-302.

Emami Y., Salamatian S.A.ve Ghodsian M., 2008. "Scour at cylindrical bridge pier in a 180 degree channel bend", fourth international conference on scour and erosion, 255-262.

Froehlich, D. C., 1988. "Local scour around bridge abutments", Proceedings of ASCE National Hydraulic Conference, ASCE, 534-539.

Gill, M. A., 1970. "Bed erosion around obstructions in rivers", Doktora tezi, Londra Üniversitesi, Londra, İngiltere.

Gill, M. A., 1972. "Erosion of sand beds around spur dikes", Journal of Hydraulic Division, ASCE, 98(9), 1587-1602.

Govindasamy A.V., 2014. "Application of the observation method for scour to two texas bridges", Geo-Congress, 2640-2654, Journal of Hydraulic Engineering, 140:14-23.

Göğüş M. ve Köken M., 2011. "Köprü yan ayağı uzunluğunun akım karakteristiklerine ve taban oyulmasına etkisi", Ankara.

Gugten, C. A., 1982. "Scour around bridge piers at high flow velocities", ASCE, HY2, No.2.

Gutierrez R. R, Abad J.D., Choi M. ve Montoro H., 2014. "Characterization of confluences in free meandering rivers of the Amazon basin", Geomorphology, 220, 1-14.

Gümgüm F., 2012. "Dairesel kesitli orta ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulmalarının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi.

Güngör, M., 1997. “Akarsu Kıvrımlarına Yerleştirilen Köprü Kenar Ayakları Etrafındaki Yerel Oyulma Derinliğinin Araştırılması”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 132s.

Güngör M. ve Fırat, 2005. “Akarsu kıvrımlarında meydana gelen taban topoğrafyası ve yerel oyulma ile ilişkisi”, Pamukkale Üniversitesi Müh. Bilimleri Dergisi, 12(1), 1-6.

Günyaktı, A., 1988. “ Köprü ayakları etrafında oyulma derinliğinin grafik yöntemle tayini”, Mühendislik ve çevre bilimleri dergisi, TÜBİTAK, 12(1), 96-108.

Graf, W. H., 1996. “Fluvial Hydraulics”, John Wiley & Sons, N.Y.

Hancu, S., 1971. “Sur le calcul des affouillements loaux dans la zone des piles du pont”, 14th. I.A.H.R. Congress, 3:299-305, Paris.

Hjorth, P., 1975. “Studies on the nature of local scour”, Lund, Sweden.

Jain, S. C., ve Fischer, E. E., 1979. “Scour around bridge piers at high froude numbers”, Journal of hydraulic division, ASCE, 106(HY11), 1827-1842.

Jain, S. C., ve Fischer, E. E., 1979. “Scour around bridge piers at high froude numbers”, Rapor no: F.H.W.A.R.D.:79-104, Federal Highway Administration Washington D.C, ABD.

Johannesson, H. ve Parker, G., 1989. “Velocity redistribution in meandering rivers”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 8, 1019-1039.

Kandasamy J. K. ve Melville B. W., 1998. “Maximum local scour depth at bridge piers and abutments”, Journal of Hydraulic Engineering, Asce, 36, 2, 183-197.

Kayatürk S. Y., 2005. “Scour and scour protection at bridge abutments”, (Ph. D. Thesis), Metu, Ankara.

Komura, S., 1966. “Equilibrium depth of scour in long constrictions”, J. Hyd. Div., ASCE, 92(5), 17-37.

Kothyari, U. C., Hager, W. H. ve Oliveto, G., 2007. “Generalized approach for clear-water scour at bridge foundations elements”, Journal of Hydraulic Engineering, 133(11).

Köse Ö. ve Yanmaz M.A., 2010. “Köprü kenar ayaklarındaki oyulma güvenirliliği”, İMO Teknik Dergi, 4919-4934, Yazı 322.

Kumar V., Raju K.G.R. ve Vittal N., 1999. “Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars”, Journal of Hydraulic Engineering, 125, 12, 1302-1305.

Kumcu S.Y., Göğüş M. ve Kökpınar M. A., 2007. “Temporal scour development at bridge abutments with a collar”, Canadian Journal of Civil Engineering, 34, 4, 549.

Larras,J., 1963. “Profondeurs maximales d'erosion des fonds, mobiles autour des piles en riviere”, Annales des Ponts et Chaussees, No.4.,; Vol. 133.

Lauchlan C. S. ve Melville B. W., 2001. “Riprap protection at bridge piers”, Journal of Hydraulic Engineering, 127, 5, 412-418 ()

Laursen, E. M., 1958 “Scour at bridge crossings”, Bülten no:8, Iowa Highway Research Board, Ames, Iowa, ABD.

Laursen, E. M., 1963. “Scour at bridge crossings”, American society of civil engineers transactions, Vol. 127, Part 1, 166-209.

Laursen, E. M., 1980 “Predicting scour at bridge piers and abutments: A study to advance the methodology of assessing the vulnerability of bridge to floods”, Genel rapor no:3, Arizona department of transportation, ABD.

Leschziner, M. A. ve Rodi, W., 1979. “Calculation of strongly curved open channel flow”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol 105, No. HY10, 1297-1314.

Le Feuvre, A.R. ve Altınbilek, H.D., 1970. “Sediment pick up function”, Journal of Hydraulic Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.96, No.10, 2051-2063.

Leclerc, J.P., 1971. “Recherche des Lois Regissant les phenorr d’Affouillement au Pied des Pilles de Pont Premiers resulta”, Proc.I.A.H.R.

Lim S.Y., 1997. “Equilibrium clear water scour around and abutment”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(3), 237-243.

Li H., Barkdoll B. ve Kuhnle R., 2005. “Bridge abutment collar as a scour contermeasure”. Asce, Ewri.

Liu, H. K., Chang, F. M. ve Skinner, M. M., 1961. “Effect of bridge constriction on scour and backwater”, Mühendislik araştırma merkezi, Colarado Eyalet Üniversitesi, Fort Collins, ABD.

Masjedi A., Bejestan M.S. ve Esfandi A., 2010. “Reduction of local scour at a bridge pier fitted with a collar in a 180 degree flume bend (Case study: oblong pier)”, 9th International Conference on Hydrodynamics, 646-650.

Mayda O., 2013. “Köprü ayakları oluşan yerel oyulmaların hareketli taban durumunda deneysel ve nümerik olarak araştırılması”, Yüksek lisans tezi.

Melville, B. W., 1992. “Local scour at bridge abutments”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 118, No. 4, 615-631.

Melville, B. W., 1997. “Pier and abutment scour: Integrated approach”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(2), 125-136.

Melville, B. W. ve Sutherland A.J., 1988. “Design method for local scour at bridge piers”, Journal of Hydraulic Engineering, 114 (10), 1210-1226.

Melville B. W. ve Raudkivi A.J., 1996. “Effects of foundation geometry on bridge pier scour”, Journal of Hydraulic Engineering, 122, 4, 203-209.

Melville B. W. ve Chiew Y. M., 1999. “Time scale for local scour at bridge piers”, Journal of Hydraulic Engineering, 125, 1, 59-65.

Melville B. W. ve Coleman S.E., 1999. “Bridge scour”, Water Resources. Highlands Ranch, Colo.

Melville B. W., Ballegooy S. ve Coleman S.E., 2007. “Barkdoll b. riprap size selection at wing wall abutment”, Journal of Hydraulic Engineering, 133, 11, 1265-1269.

Mokhles M. Abou-Seida, Gamal H. Elsaheed, Tarek M. ve Mostafa, Elzahry F., 2012. “Local scour at bridge abutments in cohesive soil” Journal of Hydraulic Research, 50:2, 171-180.

Neill, C. R., “Guide to bridge hydraulics”, Roads and transportation associaton of Canada University of Toronto Press, Toronto, Kanada.

Nicollet, G.ve Ramette, M., 1971. “Affouillements au voisinage de piles de pont cylindriques circulaires”, Proc .1. A.H .R.

Oliveto G. ve Hager, W. H., 2002. “Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour”, Journal of Hydraulic Engineering, 128(9), 811–820.

Oliveto G. ve Hager, W. H., 2005. “Further results to time-dependent local scour at bridge elements”, Journal of Hydraulic Engineering, 131(2), 97–105.

Özalp M.C. 2013. “Experimental investigation of local scour around bridge pier groups” yüksek lisans tezi.

Raikar R. V. ve Dey S., 2005. “Clear-water scour at bridge piers in fine and medium gravel bed”, Canadian Journal of Civil Engineering, 32(4), 775–781.

Rahman M. ve Haquem., 2003. A. “Local scour estimation at bridge site, modification and application of lacey formula”, International Journal of Sediment Research, 18, 4, 333-339.

Raudkivi, A. J. ve Etterma, R., 1983. “Clear-Water scour at cylindrical piers”, Jour. of hydraulic eng., Vol 109, No. 3, 338-350.

Raudkivi, A. J. ve Etterma, R., 1985. “Scour at cylindrical bridge piers in armored beds”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol 111, No. 4, 713-731.

Raudkivi, A. J., 1986. “Functional trends of scour at bridge piers”, Jour. of hydraulic eng., ASCE, Vol 112, No. 6, 1-13.

Richardson, E. V., ve Davis, S. R., 1995. “Evaluating scour at bridges”. (3rd ed.) (6.1-6.6). Hydr. Engrg. Circular No. 18 (HEC-18), Rep. No. FHWA-IP-90-017, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Richardson, E. V., Harrison, L. J. ve Davis S. R., 2001. “Evaluating scour at bridges”, (4th Ed.) (6.1-6.6). Hydraulic Engineering, Circular No. 18 (Hec-18), Rep. No. Fhwa-01-001, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Shen, H. W., Schneider, V. R., ve Karaki, S. S., 1969. “Local scour around bridge piers”, Journal of Hydraulic Division, Vol 95, No. HY6, 1919-1940.

Sheppard D. M., Odeh, M. ve Glasser, T. 2004. “Large scale clear-water local pier scour experiments”, Journal of Hydraulic Engineering, 130.

Sheppard D. M., Melville B., ve Demir H., 2014. “Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 140, No. 1

Simons, D. B. ve Şentürk, F. “Sediment tranportation technology” Water resources publications, Littleton, Colarado, ABD.

Simarro G., Fael C.M.S. ve Cardoso A.H., 2011. “Estimating equilibrium scour depth at cylindrical piers in experimental studies”, Journal of Hydraulic Engineering, 137:1089-1093.

Singh, K. K., Verma, D. V. S. ve Tiwari, N. K., 1995. “Scour Protection at Circular Bridge Pier”, Sixth International Symposium on River Sedimentation, New Delhi, India, 1057-1068.

Sturm, S. M., 1999. “Abutment scour studies for compound channels”, U.S. Department of transportation, Federal Highway Administration, ABD.

Tekin F., 2012. “Koruycu plakalı ve plakasız yarı dairesel köprü kenar ayakları etrafında oluşan yerel oyulmanın karakteristikleri”, Yüksek Lisans Tezi, METU, Ankara.

Tison, L. J., 1940. “Erosion autour des piles de pont en riviere annales des travaux de belgique”, No.3. C.

Quesnot, C., 1970. “Affouillement autour des piles de ponts cylindriques circulaires”, L.N. Chatau, Paris.

Üç,S., 1979. “Akarsu kıvrımlarındaki köprü ayakları etrafında oluşan yerel oyulmalar”, İstanbul.

Üç S. ve Ağaçcıoğlu H., 1999. “Köprü ayaklarındaki oyulma derinliklerinin belirlenmesi ve bir uygulama”, Türkiye İnşaat Mühendisliği XV. Teknik Kongresi, Sayfa 643-659, Ankara.

Unger J. ve Hager W. H., 2006. “Riprap failure at circular bridge piers”, Journal of Hydraulic Engineering, 132, 4, 354-362.

Üç, S., 1988. “Vorteks yayılma frekansının oyulma derinliğine etkisi”, Doktora tezi, Yıldız Üniversitesi, İstanbul.

Vries,M., 1985. “Rivers”, I.H.E., Delft.

Yanmaz, A. M., 2002. Köprü Hidroliği. METU Press., Ankara.

Yanmaz, A.M., 1989. “Time dependent analysis of clear water scour around bridge piers”, Doktora tezi, ODTÜ, Ankara, Türkiye.

Yanmaz A. M., 2001. “Uncertainty of local scouring parameters around bridge piers”, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 25(2), 127-137.

Yanmaz A. M. ve Altınbilek H. D., 1991. “Study of time-dependent local scour around bridge piers”, Journal of Hydraulic Engineering, 117, 10, 1247-1268.

Yanmaz A. M., Köse Ö., 2007. “Time-wise variation of scouring at bridge abutments”, Sadhana, Vol. 32, Part 3, 199–213, Printed in India.

Yeh, K.C. ve Kennedy, J.F., 1993. “Moment model of nonuniform channel-bend flow. II: Erodible beds”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 119. No.7, July.

Yoon T. H., 2005. “Wire gabion for protecting bridge piers”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131, No 11, 942-949.

Zarrati A.R., Nazariha M. ve Mashahir M.B., 2006. “Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap”. Journal of Hydraulic Engineering, 132, 2, 9. 154-162.

Zengin, Ş., 2010. “Katı madde taşınımı ve dinamik yüklerin etkisi altında köprü ayaklarının, optimum boyutlandırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Ankara.

Zhai Yuan., 2010. “Time-dependent scour depth under bridge-submerged flow”, Civil Engineering Theses, Dissertations, And Student Research. Sf 4.

http://yunus.hacettepe.edu.tr/~kdirik/FJ_13_Akarsular.pdf

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Elazığ’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Elazığ’da tamamladı. 2006 yılında Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2007 yılında Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde başladığı yüksek lisans eğitimini 2010 yılında tamamladı. Tunceli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuğu var.

Meral KORKMAZ

MART-2015