T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KÖPRÜ KENAR AYAKLARINDA GÖZLENEN MAKSİMUM OYULMA DERİNLİĞİNİ VEREN YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Talib Khayoon ALHAMDLLAH

DANIŞMAN
Doç. Dr. Ömer KÖSE

AKSARAY, 2019

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 172303801 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Ali Talib Khayoon Alhamdllah tarafından hazırlanan "KÖPRÜ KENAR AYAKLARINDA GÖZLENEN MAKSIMUM OYULMA DERINLIĞINI VEREN YÖNTEMLERIN KARŞILAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç.Dr. Ömer KÖSE
Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Doç. Dr. Mehmet Ali HINIS
Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan MARTI
Konya Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum .....

Tez Savunma Tarihi: 20/05/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Mehmet Ali HINIS
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sundugum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştugunu. çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak oldugunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Ali Talib Khayoon ALHAMDLLAH

TEŞEKKÜR

Yönlendirmeleri ve tez konusunu seçerken bana bütün inceliği ile her konuda yardımcı olan tez danışmanım Sn. Doç. Dr. Ömer KÖSE'ya teşekkürlerimi sunarım. Bütün hayatımın her alanında yanımda olan değerli aileme de teşekkür ederim.

Ali Talib Khayoon ALHAMDLLAH

AKSARAY, 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR ..... İ
İÇİNDEKİLER ..... İİ
ÖZET ..... İİİ
ABSTRACT ..... İİV
ŞEKİLLER DİZİNİ V
TABLOLAR DİZİNİ ..... Vİ
SIMGELER DIZINI ..... Vİİ
1. GİRİŞ 1
1.1 Çalışmanın Önemi 2
1.2 Çalışmanın Amacı 2
2. LİTERATÜR TARAMASI 3
3. KÖPRÜ KENAR AYAKLARINDAKİ YEREL OYULMA 9
3.1. Köprü Kenar Ayaklarındaki Oyulmaların Sınıflandırılması 9
3.1.1 Kanaldaki köprü kenar ayağı konumuna göre sınıflandırma 11
3.1.2 Köprüdeki alanlara göre sınıflandırma 15
3.1.3 Hareket eden sürüntüye göre sınıflandırma 15
3.2 Kanal Türüne ve Geçiş Köprüsüne Bağlı Köprü Koşulları 15
3.3. Köprü Kenar Ayaklarındaki Oyulmalarla İlgili Parametreler 19
3.3.1 Kanal geometrisinin etkisi 19
3.3.2 Yaklaşan akıntı hızının etkisi 20
3.3.3 Zamanın etkisi 21
3.3.4 Sürüntülerin boyutu ve tane boyut dağılımının etkisi 21
3.3.5 Yaklaşan akım derinliğinin etkisi 22
3.3.6 Köprü kenar ayağı şeklinin etkisi 23
3.3.7 Köprü kenar ayağı uzunluğunun, daralma oranının ve açılma oranının etkisi 24
3.3.8 Köprü kenar ayaklarının dizilişinin etkisi 25
4. KÖPRÜ KENAR AYAĞINDAKİ OYULMA FORMÜLLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI 26
4.1 Seçilen Modeller 27
4.2 Deneysel Veriler 31
4.3 Formüllerin Performansları 36
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 55
KAYNAKLAR 58
EKLER 63
Ek A. Formüler ile deneysel verilerin karşılaştırılması 63
ÖZGEÇMİŞ 82

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KÖPRÜ KENAR AYAKLARINDA GÖZLENEN MAKSİMUM OYULMA DERİNLİĞİNİ VEREN YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Ali Talib Khayoon ALHAMDLLAH
Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ömer KÖSE

ÖZET

Son 50 yıl içerisinde, köprü ayaklarında meydana gelen yerel oyulmaların derinliğini belirlemek amacıyla birçok denklem geliştirilmiştir. Bu formüllerin çoğu laboratuvar deneylerine dayalı olarak geliştirilmiş ve çok az bir kısmı sahadan elde edilen verilere dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Sahadan kısıtlı koşullarda alınan veri setlerinden elde edilen sonuçlar gerçek vakalarda oyulma derinliğini belirlemek amacıyla geliştirilen formüllerde bazen belirsizliğe yol açmaktadır. Ayrıca, köprülerin ekonomik ve güvenli bir biçimde tasarlanması köprü ayakları etrafındaki yerel oyulmaların doğru biçimde tahmin edilmesine bağlıdır. Köprü ayağı etrafındaki yerel oyulmanın zamana bağlı değişimi özellikle sel olaylarında oyulma derinliğinin tam ve eksiksiz tahmin edilmesine olanak sağlayabilmektedir. Dolayısıyla, oyulma derinliğine bağlı olarak köprü temelinin tasarlanması denge oyulma derinliğine göre daha doğru sonuçlar vermektedir. Bu çalışmanın temel amacı, köprü kenar ayağında meydana gelen oyulmalarla ilgili altı adet denklemin performanslarının deneysel veriler ile karşılaştırılmasıdır.

Anahtar Kelimeler: Köprü, Erozyon, Oyulma, Köprü ayağı, Dikey duvar.

Mayıs, 2019; 82 sayfa

M.Sc. THESIS

COMPARISON THE PERFORMANCE OF MAXIMUM SCOUR DEPTH FORMULA AT ABUTMENT

Ali Talib Khayoon ALHAMDLLAH
Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ömer KÖSE

ABSTRACT

Over the last 50 years, several equations have been derived and developed to determine the local scour depth at bridge abutments. Many of these formulas are derived based on laboratory experiments, and just a number of these formulas have already been derived using the field data. To determine the scour depth in real cases sometime the result using of field datasets at limited conditions leads to uncertainty in the using of abutment-scour formulas. The economical and safe design of bridges depend on accurate forecasting of the local scour around the abutment, which the temporal variation of local scour at abutment can provide an exact prediction of scour depth, particularly during the flood. Therefore, design of foundation level based on temporal scour depth is more accurate than that for equilibrium scour depth, therefore the main purpose of the present work is to compare the performance of six bridge abutment scour equations with experimental data.

Keywords: Bridge, Erosion, Scour, Abutment, Vertical wall.

May, 2019; 82 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. At nalı girdapı.....2
Şekil 3.1. Akıntı özelliklerinin etkileşimi sonucunda ortaya çıkan oyulma ve erozyon 10
Şekil 3.2. Su yolundaki toprak ve sürüntü koşullarının değişimi 10
Şekil 3.3. Oyulma koşulu A için saha örneği..... 12
Şekil 3.4. Oyulma koşulu B için saha örneği..... 12
Şekil 3.5. Kanat duvarı ayağı için oyulma koşulu C örneği. 13
Şekil 3.6. Köprü ayağı oyulma koşulları 14
Şekil 3.7. Sınıf I 16
Şekil 3.8. Sınıf I 17
Şekil 3.9. Sınıf II 17
Şekil 3.10. Sınıf II 18
Şekil 3.11. Sınıf III 18
Şekil 4.1. Kanalın Görüntüsü.....33
Şekil 4.2. Oyulma deliğinin koordinatlarını ölçmek için kullanılan ölçüm ekipmanı 33
Şekil 4.3. Coleman vd.'nin formülü ile 45 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması..... 36
Şekil 4.4. Oliveto vd.'nin formülü ile 45 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması 37
Şekil 4.5. Orsi vd.'nin formülü ile 45 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.. 37
Şekil 4.6. Cardos vd.'nin formülü ile 45 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması 38
Şekil 4.7. Yanmaz vd.'nin formülü ile 45 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması..... 38
Şekil 4.8. Kothyari vd.'nin formülü ile 45 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması..... 39
Şekil 4.9. 45 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı..... 41
Şekil 4.10. 40 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı..... 44
Şekil 4.11. 35 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı..... 46
Şekil 4.12. 30 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı..... 48
Şekil 4.13. 25 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı..... 50
Şekil 4.14. 20 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı..... 52
Şekil 4.15. 15 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı..... 54

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Köprü ayaklarında şekil faktörleri 24
Tablo 3.2. Köprü ayakları için kθ katsayısı 25
Tablo 4.1. Deneyin kapsamı 34
Tablo 4.2. Deneysel zamana bağlı oyulma derinliği 35
Tablo 4.3. 45 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı 40
Tablo 4.4. 45 lt/s debi düzeyinde korelasyon katsayısı ve belirleme katsayısı 42
Tablo 4.5. 40 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı 43
Tablo 4. 6. 40 lt/s debi düzeyinde korelasyon katsayısı ve belirleme katsayısı 44
Tablo 4.7. 35 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı 45
Tablo 4.8. 35 lt/s debi düzeyinde korelasyon katsayısı ve belirleme katsayısı 46
Tablo 4.9. 30 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı 47
Tablo 4.10. 30 lt/s debi düzeyinde korelasyon katsayısı ve belirleme katsayısı 48
Tablo 4.11. 25 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı 49
Tablo 4.12. 25 lt/s debi düzeyinde korelasyon katsayısı ve belirleme katsayısı 50
Tablo 4.13. 20 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı 51
Tablo 4.14. 20 lt/s debi düzeyinde korelasyon katsayısı ve belirleme katsayısı. 52
Tablo 4.15. 15 lt/s debi düzeyinde formüllerin performansı 53
Tablo 4.16. 15 lt/s debi düzeyinde korelasyon katsayısı ve belirleme katsayısı. 54

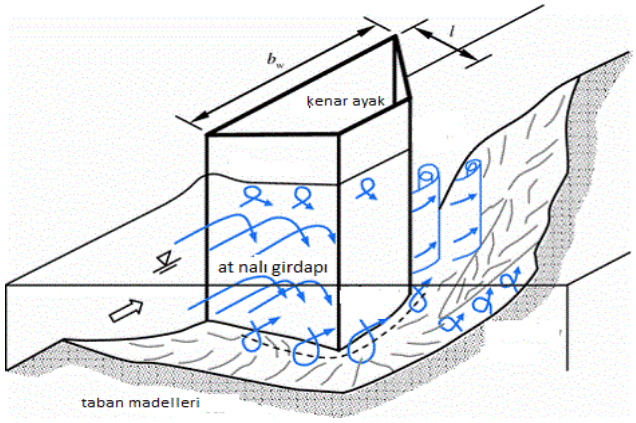
SİMGELER DİZİNİ

$\mathbf{b}$	Kenar Ayak Genişliği
$\mathbf{D}$	Ayak Çapı
$\mathbf{d_{50}}$	Taban Malzemesinin Medyan Dane Çapı
$\mathbf{d_s}$	Oyulma Derinliği
$\mathbf{d_{se}}$	Denge Oyulma Derinliği
$\mathbf{F_r}$	Yaklaşan akıntı Froude sayısı
$\mathbf{F_d}$	Yoğunluk Tane Froude Sayısı
$\mathbf{F_{dm}}$	Yoğunluk Ölçümüne Dair Froude Sayısı
$\mathbf{g}$	Yerçekimi İvmesi
$\mathbf{K_\theta}$	Diziliş Faktörü
$\mathbf{Ks}$	Şekil Faktörü
$\mathbf{L}$	Kenar Ayak Uzunluğu
$\mathbf{Q_f}$	Akım Debisi
T	Göreceli Zaman
$\mathbf{T_s}$	Boyutsuz Zaman
$\mathbf{t_e}$	Denge Zamanı
$\mathbf{t}$	Zaman
$\mathbf{u}$	Ortalama Yaklaşım Akımı Hızı
$\mathbf{u_c}$	Tabanda Hareketi Başlatan Ortalama Kritik Yaklaşım Akım Hızı
$\mathbf{u_{*c}}$	Kritik Kayma Gerilmesi Hızı
$\mathbf{u_*}$	Kayma Gerilmesi Hızı
$\mathbf{y}$	Yaklaşım Akım Derinliğini
$\boldsymbol{\sigma}$	Dane Büyüklüğü Dağılımının Geometrik Standart Sapması
$\boldsymbol{\sigma_g}$	Geometrik Standart Sapması
$\boldsymbol{\tau}$	Sürüntü Taneleri için Kesme Gerilimi
$\boldsymbol{\tau_c}$	Sürüntü Taneleri için Kritik Kayma Gerilimi
$\boldsymbol{\theta_a}$	Eğim Açısı
$\boldsymbol{\rho}$	Su Yoğunluğu
$\boldsymbol{\rho_s}$	Taban Malzemesi Yoğunluğu
$\boldsymbol{\upsilon}$	Suyun Kinematik Viskozitesi

1. GİRİŞ

Köprü kenar ayakları etrafında oluşan yerel oyulma derinliği köprülerin çökmesinde rol oynayan en önemli faktörlerden biridir. Yerel oyulma derinlikleri, köprü kenar ayağına temas eden akıntıların oluşturduğu atnalı girdaplarına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır, Şekil 1.1 gösterilmiş. Federal Karayolları İdaresi tarafından 1973'te yapılan bir çalışmada, toplamda çöken 383 köprünün %25'inde köprü orta ayaklarındaki, %72'sinde ise köprü kenar ayaklarında hasar tespit edildiği aktarılmıştır (Richardson vd., 1993). Yeni Zelanda Ulusal Karayolları Kurulu'na sunulan bir raporda (Sutherland, 1986) 1960-1984 yılları arasında kayıtlara geçen 108 köprü çökmesi vakasının 29'unun köprü kenar ayakları etrafındaki oyulmalara bağlı ortaya çıktığını ortaya koymuştur. (Kandasamy ve Melville, 1998) göre, Yeni Zelanda'daki Bola Kasırgası esnasında meydana gelen 10 köprü çökmesinin 6'sının köprü kenar ayaklardaki oyulmalarla ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Yeni Zelanda Bilimsel ve Endüstriyel Araştırmalar Bakanlığı'na sunulan bir başka raporda, (Macky, 1990) toplam harcamaların yaklaşık %50'sinin köprü bakım ve onarımı için yapıldığını, bu harcamaların %70'inin ise köprü kenar ayaklarındaki oyulmaların onarımına kullanıldığını belirtmiştir. Ardahan İli'inde, Hanak-Çamlıçatak yolunun 8-600 Km. sinde bulunan ALTAŞ (Ur) köprüsü, 06.03.2004 tarihinde karların ani erimesi ve akabinde yağan yoğun yağmur neticesinde oluşan selden ve bundan dolayı kopan büyük buz kütlelerinin debuşeyi kapatarak basınç oluşturmasından dolayı çelik ayaklara darbe yapması sonucu hasar görmüştür. Bitlis-Mutki-Meydan (13-75) Kontrol Kesim Nolu İl Yolu 06.03.2004-07.03.2004 tarihlerinde havanın ısınması ile karların aniden erimesi ve çok şiddetli yağışlarında aynı zamanda oluşması sebebiyle aşırı doğal sel felaketine maruz kalmıştır Bilindiği üzere söz konusu il yolu'nun birçok kesimi yörenin en büyük ve taşkın akan Mutki Deresi yatağı'nın içinde imlada geçmektedir.Bu sebebden dolayı dere yatağına sığmayacak derceede büyük olan taşkın hemen yanıbaşındaki yolun büyük kesimini tahrip etmiş ve birçok sanat yapısınıda hemen hemen tamamen yıkmıştır. Ağrı-Patnos yolunun 5+000 Km. Sinde bulunan DAMBAT köprüsü, 17.04.2004 tarihinde meydana gelen selden dolayı hasar görmüş. 06 Nisan 2012 Cuma günü Çaycuma ilçesi içinde ve Filyos Çayı üzerindeki çift köprüden eski olanının (tasarım 1948, yapım 1950), taşkın nedeniyle kısmen yıkılması sonucu uğranılan can kaybı ve ayrıca sel sularına kapılan cesetlerin uzun süredir bulunamaması büyük bir üzüntüye yol açmış bulunmaktadır. Bu konu, son yıllarda

yoğun bir şekilde araştırılan karmaşık bir sorun haline gelmiştir. Oyulma derinliğinin doğru tahmin edilebilmesi, ekonomik açıdan köprü yapımını etkileyen bir unsurdur. Oyulma derinliğinin olduğundan fazla tahmin edilmesi köprü temelinin çok derin seviyelere atılmasına yol açacak; bunun sonucu olarak da köprü maliyetleri artmış olacaktır.



Şekil 1.1. At nalı girdapı.

1.1 Çalışmanın Önemi

Köprülerin ekonomik ve güvenli bir biçimde tasarlanabilmesi, köprü ayakları etrafındaki yerel oyulmaların hatasız olarak tahmin edilmesine bağlıdır. Yerel oyulmanın zaman içerisindeki (bilhassa sel olayları esnasındaki) değişimi oyulma derinliği ile ilgili kesin bir tahmin yapma olanağı sunabilmektedir. Dolayısıyla, zamana bağlı oyulma derinliğine dayalı olarak temel seviyesinin tasarlanması denge durumundaki oyulma derinliğine göre daha az hatalı sonuçlar vermektedir.

1.2 Çalışmanın Amacı

Son 50 yıl içerisinde, köprü kenar ayaklarında oluşan yerel oyulma derinliklerini belirleyebilmek amacıyla birçok denklem ortaya atılmış ve geliştirilmiş; bu formüllerden birçoğu laboratuvar deneylerine dayalı olarak geliştirilmiş ve sadece birkaçı sahadan elde edilen verilerden elde edilmiştir. Sınırlı koşullar altında sahadan elde edilen veri setleri bazen köprü ayaklarındaki oyulmalarla ilgili formüllerin kullanımında belirsizliğe yol açmaktadır. Çalışmanın temel amacı laboratuver verisi kullanılarak altı adet köprü kenar ayağı oyulma denkleminin performanslarını karşılaştırmaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Zamana bağlı olarak ortaya çıkan yerel oyulmalar birçok çalışmada tahmin edilmiş olup, denge oyulma derinliği için çeşitli tanımlar ortaya atılmıştır. Aşağıda zamana bağlı değişen oyulma derinliği ile ilgili farklı çalışmalar ve sahadan elde edilen veriler kullanılarak geliştirilen formüller verilmiştir.

Chabert ve Engeldinger, (1956) zamana bağlı yerel oyulma araştırmaları ile ilgili çalışmalarında, köprü ayaklarında meydana gelen temiz su oyulmaları ve taban oyulmaları üzerinde zamanın ve hızın etkisine literatürde muhtemelen ilk kez değinen araştırmacılar olmuştur. Çalışmada kullanılan kanalının genişliği 0.80 m olup çapları 0.05 ile 0.15 m arasında değişen dört farklı ayak, tanecik boyutları 0.26 ve 3.2 mm arasında dört üniform kum ve 0.10 m, 0.20 m ve 0.35 m olmak üzere üç farklı akım derinliği mevcuttu. İkinci kanal ise 3 mm'lik bir üniform kum içermekte olup 3.0 m genişliğinde idi. 0.150 m'lik dairesel silindirin yanı sıra, altı farklı ayak biçimi de test edilmiş ve oyulma için optimum şartların sağlanması amacıyla ek deneyler yapılmıştı. Çalışmanın tamamı birkaç saatlik zaman dilimlerinden günler süren zaman dilimlerine kadar değişim gösteren toplamda 300 farklı testten oluşmaktaydı. Çalışmada, maksimum oyulma miktarının temiz su ve taban seviyesi arasındaki geçişlerde gerçekleştiği tespit edilmiş ve veri setinin büyüklüğüne rağmen genel anlamda oyulma ile ilişki tespit edilememiştir.

Wong, (1982) kısa dikey duvar ayakları etrafındaki zamana bağlı değişimleri incelemek amacıyla deneyler yapmış, köprü kenar ayaklarında ve orta ayaklarda meydana gelen maksimum oyulma derinliklerini karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonucunda, kenar ayaklarında meydana gelen yerel oyulmaların zamansal gelişiminin dairesel köprü ayaklarındaki oyulmalar ile tutarlılık gösterdiği ortaya çıkmıştır. Dairesel köprü ayakları için geliştirilen zaman-oyulma ilişkisinin dikey duvar ayakları modellerindeki yerel oyulma sürecinin zamansal gelişimini açıklamak için de kullanışlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, çalışmada köprü ayaklarının dikey ve eğimli olmak üzere iki tür şeklinde sınıflandırmaya tabi tutulması gerektiği önerilmiştir.

Raudkivi ve Ettema, (1983) üniform olmayan malzemeler kullanarak silindirik ayakların etrafındaki oyulma derinliklerinin zamansal değişimini gösteren bir grafik geliştirmiştir. Çalışma sonucunda temiz su oyulmalarının derinliğinin yatak

malzemelerinin sınıflandırılması ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Tane büyüklüğü dağılımının geometrik standart sapması arttıkça denge oyulma derinliği düşmektedir. 20-25 değerlerinin altında olan parçacık boyutları için payanda çapı kısaldıkça yerel oyulma derinliklerinin de azaldığı görülmüştür. Temiz su oyulmalarının maksimum derinliği göreceli derinlik (y/D) ve göreceli boyutun (D/d_{50}) fonksiyonu şeklinde hesaplanmaktadır. Burada y akım derinliğini, D ayak çapını, d_{50} ise medyan malzeme boyutunu temsil etmektedir. Ayrıca, ayak etrafında oluşan sarmal su akımın oyulma çukuruna doğru akışına bağlı olarak denge oyulma derinliğinin azaldığı da ifade edilmiştir.

Tey, (1984) tarafından yapılan çalışmada köprü kenar ayaklarının uzunluğunun oyulma mekanizmasına etkisini araştırmak amacıyla uzun köprü ayakları incelenmiştir. Çalışmada, köprü kenar ayaklarında eşik noktasına yaklaşan akıntıların meydana getirdiği yerel oyulmaların gelişimi ölçülmüştür (u/u_c = 0.87-0.99). Kısa ve uzun ayaklar y/L oranı ile tanımlanmıştır. Buna göre, kısa ayakların $y/L > 1$ değerine, uzun ayakların ise $y/L \leq 1$ değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Yanmaz ve Altınbilek, (1991) yaptıkları çalışmada silindirik ve kare biçimindeki köprü ayakları etrafında meydana gelen temiz su yerel oyulma derinliklerinin zamana bağlı değişimini belirlemek amacıyla yarı-deneysel bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem, köprü ayakları etrafındaki oyulma çukuruna sürüntü maddesi sürekliliği denkleminin uygulanmasını içermektedir. Çalışmada, köprü ayakları etrafındaki oyulma çukurunun şeklinin zaman içerisinde neredeyse hiç değişime uğramadığını ortaya koymuştur. Değişimin hızı ise zaman geçtikçe azalan bir ivme ile devam etmiştir. Köprü ayakları etrafındaki oyulma derinliğinin zamana bağlı değişimi, oyulma çukuruna sürüntü maddesi sürekliliği denkleminin uygulanması ile elde edilen diferansiyel denkleminin çözülmesi ile belirlenebilmektedir.

Kothyari vd., (1992) hareketli taban koşullarında oyulma derinliğinin zamansal değişiminin hesaplanması için bir şema ortaya koymuşlardır. Çalışmada hareketli taban koşullarında üniform sürüntü maddeleri içeren dairesel köprü ayakları etrafında oluşan maksimum oyulma derinliğinin ölçülmesi için bir denklem geliştirilmiştir. Bu denklem, oyulmanın zamansal değişiminin hesaplanması için ortaya atılan şemadan

yola çıkılarak oluşturulmuş ve akıntıdaki istikrarsızlıkların oyulma derinliği üzerindeki etkisi de ayrıca incelenmiştir.

Johnson, (1995) birçok farklı saha koşullarında köprü ayaklarındaki yerel oyulmalara ilişkin yedi formülün doğruluğunu ve kısıtlarını ele almıştır. Çalışmada, (Jones, 1983) çalışmasında ortaya konan sonuçların bazı köprü ayağı oyulması vakalarında geçerli olmayabileceği iddia edilmiştir. Jones, her bir oyulma denkleminin tüm veriyi (laboratuvar ve saha verileri olmak üzere) kapsadığını gözlemlemiştir. Test edilen saha vakalarının çoğu için bu durum geçerli olsa da, bazı oyulma denklemlerinin verilerin tamamını kapsamadığı (objektif sonuçlar vermediği) bazı durumlar da gözlemlenmiştir. (Breusers vd., 1977) ve (Hancu, 1971) denklemleri $u/u_c < 0.5$ için yanılgı içermektedir, bunun sebebi bu kadar düşük hızlarda oyulma gerçekleşme ihtimalinin olmadığı varsayımıydı. (Shen vd., 1969) ve Hancu'nun denklemlerinde ise birçok yanılgı bulunmaktaydı. Güvenlikle ilgili sebeplerden ötürü oyulmaların olduğundan daha düşük düzeyde tahmin edilmesi arzu edilir bir durum olmadığından, bu iki denklemin herhangi bir koşulda kullanılması tavsiye edilmemektedir. Jones'un bulgularına benzer olarak, bu çalışmanın sonucunda da bazı köprü ayağı oyulması denklemlerinin oyulmaları olduğundan fazla tahmin ettiği bulgulanmıştır. Genel olarak, (Melville ve Sutherland, 1988) denkleminde, oyulmaları olduğundan fazla tahmin etme durumu diğer tüm denklemlere göre daha fazladır.

Landers ve Mueller, (1996) tarafından seçilen beş formül kullanılarak sahadan elde edilen verilerin analizi ve karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan değerlendirmeler sahada yüksek debi koşullarında gerçekleştirilen 139 adet köprü ayağı oyulması ölçümüne dayalı olarak yapılmıştır. Ölçümler, ABD'de yapılmış olan 380'den fazla köprü ayağı oyulması ölçümünü içeren ve Landers ve Mueller tarafından yapılan ulusal oyulma çalışması kapsamındaki oyulma veri tabanından alınan ölçümlerden oluşmaktadır. Seçilen formüller Chinese, HEC-18, Froehlich, Larras, ve Shen ve diğerlerinin formülleri olmuştur. Çalışma bulgularına göre, seçilen formüllerden hiçbirinin oyulma derinliğini doğru biçimde tahmin edemediği ortaya konmuştur. Çalışma sonuçlarına göre denklemlerden bazılarının konservatif tasarım formülü olarak iyi sonuçlar verdiği, ancak birçok oyulma derinliğini ise gerçekte olduğundan yüksek miktarlarda tahmin ettiği gözlemlenmiştir.

Husain vd., (1998) laboratuvar ortamında d_{50} = 0.775 mm'lik üniform kum ile köprü ayaklarındaki yerel oyulmaları incelemişlerdir. Çalışmada temiz su koşullarında maksimum oyulma derinlikleri ve oyulmaların genişlikleri belirlenmiştir. Tasarım amaçlı olarak temiz su koşullarında oyulma tahmini yapabilmek için boyutsuz bir denklem geliştirilmiştir. Bu denklem köprü ayağının biçimi ve boyutu, sürüntü ve akıntı özellikleri bakımından tüm önemli değişkenleri içermektedir. Denklem daha önce yapılan araştırmalarda elde edilen verilerin yanı sıra deneysel verilerle doğrulanmıştır.

Melville ve Chiew, (1999) denge oyulma parametrelerinin fonksiyonu alınarak üniform sürüntülerde temiz su koşullarında silindirik köprü ayaklarındaki oyulmaların zamansal değişimlerini ortaya koyan deneysel bir denklem geliştirmişlerdir. Çalışmada ayrıca, denge koşulları için bir zaman cetveli de ortaya koymuşlardır. Çalışmada, denge oyulma çukurunun gelişimi boyunca belirli bir köprü ayağı için herhangi bir aşamada oyulma derinliğinin ve akıntı hızının tahminine olanak sağlayan bir yöntem geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda, akıntı hızına bağlı olmak üzere, zamanın %10'u sonrasında meydana gelen oyulma derinliğinin denge oyulma derinliğinin yaklaşık %50'si ile %80'i arasında olduğu tespit edilmiştir.

Cardoso ve Bettess, (1999) köprü ayaklarındaki yerel oyulmaları incelemiş ve taşkın yatağı üzerinde farklı mesafelere uzanan köprü ayakları kullanılarak iki aşamalı bir kanal üzerinde deney gerçekleştirmişlerdir. En büyük oyulma derinliklerine ulaşmak amacıyla taşkın yatağı üzerindeki koşullar taban materyallerinin kritik koşullarına yakın olacak şekilde hazırlanmıştır. Deneyde oyulmanın zamansal değişimi ve nihai oyulma derinliği ölçülmüştür. Yerel oyulmanın zamansal gelişimi Ettema ve Franzetti'nin ve Whitehouse'un deniz ortamındaki yatay silindirlerde oluşan oyulma teorileri ile aynı doğrultuda sonuç vermiştir. Melville, taşkın yataklarındaki köprü ayaklarında meydana gelen oyulmaların, ana kanaldaki akıntıyı taşkın yatağındaki akıntıdan ayıran hayali bir sınır olduğu varsayıldığında dikdörtgen biçimindeki kanallardaki oyulmalar ile tahmin edilebileceğini öne sürmüştür. Deney sonuçları, test edilen konfigürasyonlar için Melville'in önerisinin kabul edilebilir olduğunu doğrulamıştır. Çalışmada oyulmanın zamansal gelişiminde üç aşama tespit edilmiştir. Bunlar başlangıç aşaması, esas aşama ve denge aşaması şeklinde sıralanmaktadır. Elde edilen sonuçlar Melville ve Dongol, (1999) zarf eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç

olarak, zarf eğrilerindeki güvenlik payı ile karşılaştırıldığında, kanal geometrisinin etkisinin az olduğu tespit edilmiştir.

Kothyari ve Ranga Raju, (2001) tarafından ortaya atılan yöntem geçmiş çalışmalarda elde edilen verilerin kullanılmasına dayalı bir yöntemdir. Araştırmacılara göre, köprü ayaklarında ve mahmuzlarda meydana gelen oyulma süreçleri birbirine benzer süreçlerdir. Ancak köprü ayaklarında veya mahmuzlardan kanal duvarından yukarıya doğru hareket eden akıntının yol açtığı sınır katmanı etkisi ayaklarındaki durum ile kıyaslandığında daha az oyulmaya yol açmaktadır. Çalışmada ayrıca analog köprü ayağı kavramı da ortaya atılmıştır. Analog ayaklar, benzer hidrolik koşullar altında herhangi bir köprü ayağı ya da mahmuz ile aynı denge oyulma derinliğine sahip olduğu varsayılmaktadır. Köprü ayağı ya da mahmuz ve payanda etrafındaki akışa bağlı olarak ortaya çıkan sürükleme kuvvetine ilişkin parametrelerin analog ayakların çapıyla ilişkilendirmek açısından faydalı olduğu ortaya konmuştur. Daha sonra, mahmuz ve köprü ayağındaki oyulma derinliğinin ve denge oyulma derinliğinin zamansal değişimi, analog ayağın çapı baz alınarak oyulma denklemi ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından hem temiz su hem de hareketli taban koşullarındaki oyulmalarla ilgili laboratuvar verileri kullanılarak doğrulanmıştır.

Oliveto ve Hager, (2002) tarafından ortaya atılan deneysel oyulma denklemi, üniform olmayan sürüntü maddelerinde silindirik köprü ayakları ve kenar ayaklar etrafındaki temiz su oyulmalarında zamansal değişimler olduğunu göstermiştir. Bu varsayım, Zürih ETH'de yapılan laboratuvar gözlemleri ile test edilmiş ve mevcut literatürdeki veri setleri ile karşılaştırılmıştır. Akıntı koşulları kontrol altında tutulmak suretiyle yapılan laboratuvar deneylerinde temiz su koşulları altında kenar ayak ve köprü ayağı oyulmaları değerlendirilmiştir. Oyulmada meydana gelen zamansal değişimlerin z(t) üç temel parametreye bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Bunlar, (1) payandanın referans uzunluğu ($D^{2/3}y^{1/3}$) ve köprü ayağının referans uzunluğu ($b^{2/3}y^{1/3}$); (2) Yoğunluk ölçümüne dair Froude sayısı $F_{dm} = \sigma^{-1/3}u/(\acute{g}d_{50})^{1/2}$ (üniform taban malzemesi için $\sigma = 1$ olmak üzere) ve (3) benzerlik esaslarına göre geometrik özellikleri içeren göreceli zaman (T) olarak sıralanmıştır.

Mohamed vd., (2006) tarafından yapılan daha güncel bir çalışmada, Pakistan, Kanada, Hindistan ve Katar'da oyulmaya maruz kalan köprülerden elde edilen saha verileri

kullanılarak doğrulama süreci gerçekleştirebilmek için dört adet formül seçilmiştir. Seçilmiş olan formüller Colorado State Üniversitesi (CSU), Melville ve Sutherland, Jain ve Fisher, ve Lauren ve Toch tarafından geliştirilen formüllerdir. Denklemlerin minimum öngörü hatası ile belirlenmesi için üç adet istatistiki test uygulanmıştır. Bunlar ortalama mutlak hata (OMH), ortalama karesel hata (OKH) ve Theil katsayısıdır (TC). Yapılan testlere göre, Colorado State Üniversitesi formülüyle yapılan maksimum yerel oyulma derinliği tahminindeki hata, diğer üç formülle yapılan tahminlerdeki hataya kıyasla daha düşüktür. Colorado State Üniversitesi formülü için hesaplanan OMH, OKH ve TC değerleri sırasıyla 0.11, 0.93 ve 1.24 olarak bulunmuştur.

Aminuddin vd., (2015), temiz su koşullarında birleşik köprü ayaklarında meydana gelen yerel oyulmaların zamansal değişimini deneysel olarak incelemiştir. Birleşik ayaklar daha büyük bir diktörtgen temel üzerine kurulmuş dikdörtgen biçiminde ayaklardır. Kanal yatağının genel seviyesine oranla üst yüzey temeli üç farklı konumda yer almıştır. Tüm deneylerde, oyulma derinliği temelin üstüne hızla ilerlemiş ve oyulma gelişimi belirli bir süre temel kısmında duraklatılmıştır (gecikme süresi). Gecikme süresinin uzunluğu ayakların boyutuna, temel büyüklüğüne ve temel seviyesine göre değişmektedir. Birleşik ayak ve kenar ayaklarının karşılaştırılması sonucunda payandalardaki zamana bağlı oyulma derinliği de birleşik ayaklardakine benzerlik göstermektedir. Ayrıca, temel seviyesinin, boyutunun ve hız oranının (U/Uc) temel parametreler olduğu ve maksimum oyulma derinliğini ve gecikme süresini etkilediği belirtilmiştir. Gecikme süresinin sel olayları sonrasında köprülerin onarımını kolaylaştırdığı da aktarılmıştır.

3. KÖPRÜ KENAR AYAKLARINDAKİ YEREL OYULMA

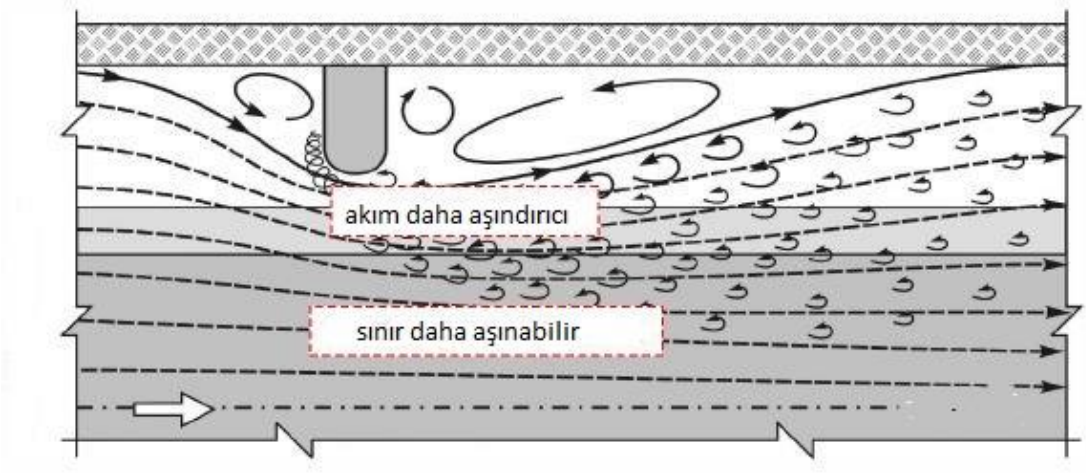
Köprü kenar ayaklarındaki oyulma derinliğinin boyutlarını tahmin edebilmek için birçok denklem geliştirilmiştir. Literatürde geniş bir kanal ölçümü veri tabanı bulunmaktadır. Kenar ayağın etrafındaki oyulma derinliği ise ayağa doğru yaklaşan akıntı ve ona bağlı oluşan at nalı çevrintisine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Oyulma derinliğinin doğru biçimde tahmin edilmesi köprülerde ekonomik açıdan etki yaratmaktadır. Oyulma derinliğinin olduğundan daha fazla olarak tahmin edilmesi temel seviyesinin daha derin olmasına yol açar ve dolayısıyla ekonomik açıdan gereksiz maliyetler ortaya çıkar. Diğer yandan, oyulma derinliğinin olduğundan daha az tahmin edilmesi ise sığ bir temel atılmasına yol açarak köprü temelinin akıntıya maruz kalmasına sebep olur ve köprü güvenliği tehlikeye atılmış olur.

Köprü kenar ayaklarındaki yerel oyulmaların zamansal değişimi, bilhassa sel olaylarında, oyulma derinliğinin tam ve kesin olarak tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla, köprü temelinin zamansal oyulma derinliğine bağlı olarak tasarlanması denge oyulma derinliğine nazaran daha doğru sonuç vermektedir. Köprü kenar ayağındaki yerel oyulmaların zamana bağlı değişimi hidrolik mühendisliğin temel konularından biridir. Son zamanlarda, oyulmanın zamansal değişimi denge oyulma derinliğinden daha çok vurgulanmaktadır. Konu ile ilgili araştırmaların çoğu köprü kenar ayakları üzerine yapılmıştır. Benzer şekilde, literatürde yer alan birçok oyulma derinliği denklemi de köprü kenar ayaklarındaki yerel oyulmalara odaklanmıştır.

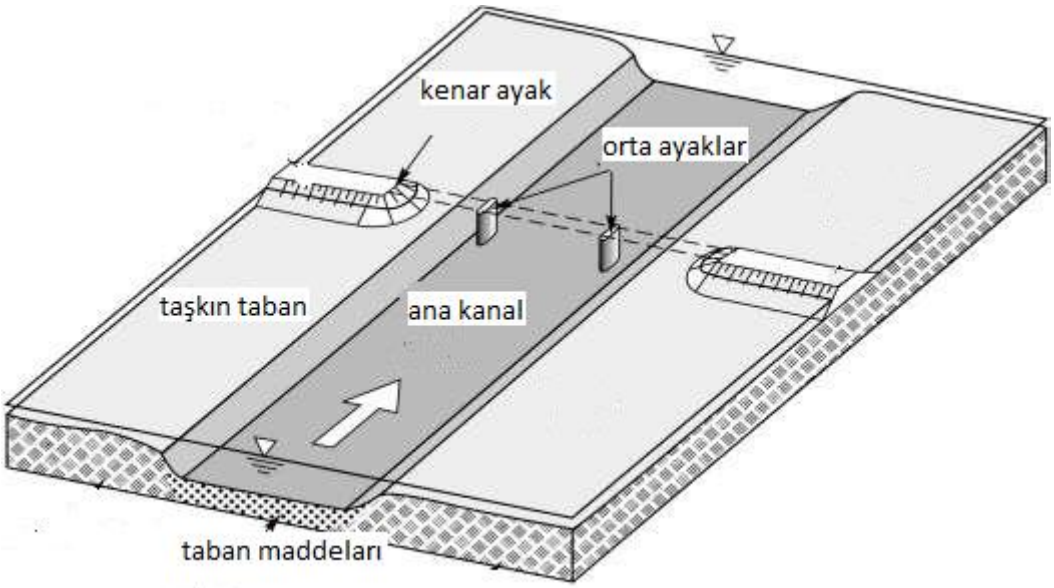
3.1 Köprü Kenar Ayaklarındaki Oyulmaların Sınıflandırılması

Bir köprü kenar ayağında meydana gelen oyulmaların derinliği birçok kritere göre sınıflandırılabilir. Bu kriterlerden biri oyulmanın kanaldaki konumudur (ana kanal yatağı, taşkın yatağı ve toprak dolgu). Ayrıca, oyulma derinlikleri köprünün bulunduğu alana ve taban maddesine göre de sınıflandırma yapılabilmektedir.

Şekil 3.1'de farklı bölgeler ve oyulma kapasiteleri verilmiş, Şekil 3.2.'de ise toprağın ve su yolunda bulunan sürüntü maddelerinin farklı koşulları sunulmuştur.



Şekil 3.1. Akıntı özelliklerinin etkileşimi sonucunda ortaya çıkan oyulma ve erozyon (Ettema vd., 2010).



Şekil 3.2. Su yolundaki toprak ve sürüntü koşullarının değişimi (Ettema vd., 2010).

3.1.1 Kanaldaki köprü kenar ayağı konumuna göre sınıflandırma

Köprü kenar ayaklarındaki oyulma derinlikleri (Terry vd., 2011) tarafından köprü kenar ayağının konumuna göre oyulma koşulu A, B ve C olmak üzere üç gruba ayrılmıştır.

1. Oyulma türü A: Bu oyulma türü, ana kanal yatağında meydana gelen ve kanal yatağının taşkın yatağına göre daha aşınabilir olduğu oyulma türüdür. Şekil 3.6a'da ana kanal yatağındaki oyulmanın stabil olmayan kanal yatağına ve sonucunda da kenarda meydana gelen çökmeye nasıl yol açtığı gösterilmektedir. Çöken kenar toprak dolgunun ve köprü kenar ayağının altını oyarak yerel olarak yıkılmaya sebep olmaktadır. Şekil 3.3'de Oyulma türü A'ya örnek sunulmuştur.
2. Oyulma türü B: Taşkın yatağı etrafında meydana gelen oyulmadır. Genellikle temiz su oyulmalarına benzer şekilde meydana gelir. Bunun nedeni taşkın yatağı üzerinde taşınan sürüntü miktarı genellikle düşüktür. Şekil 3.6b'de taşkın yatağı etrafındaki oyulma görülmektedir. Oyulma çukuru toprak dolguyu destabilize etmekte ve toprak dolgudaki toprağın oyulma çukurunun içine dökülmesine neden olmaktadır. Şekil 3.4'te Oyulma türü B'ye örnek sunulmuştur.
3. Oyulma türü C: Oyulma türü A ve B sonucunda toprak dolgu köprü ayağında oyuk açarak kolonun açığa çıkmasına neden olur. C türünde, açığa çıkan kolondaki oyulma köprü ayaklarında oyulmaya benzer bir süreç izler. Bu süreç Şekil 3.6c'de gösterilmektedir. Türü B için belirtilen aynı sebeplerden dolayı, bu oyulma türü da temiz su oyulmalarındaki gibi meydana gelmektedir. Şekil 3.5'te Oyulma türü C'ye örnek verilmiştir.



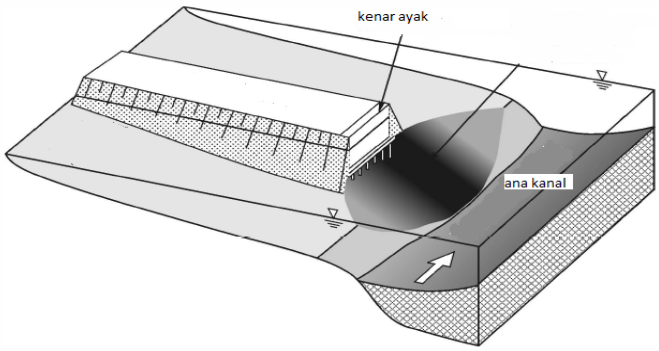
Şekil 3.3. Oyulma türü A için saha örneği (Terry vd., 2011).



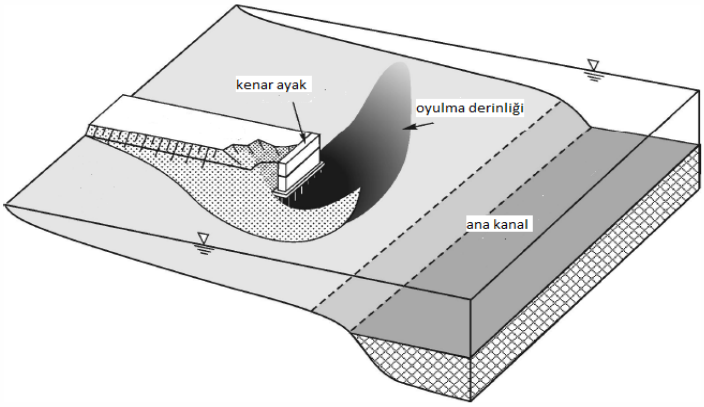
Şekil 3.4. Oyulma türü B için saha örneği (Terry vd., 2011).



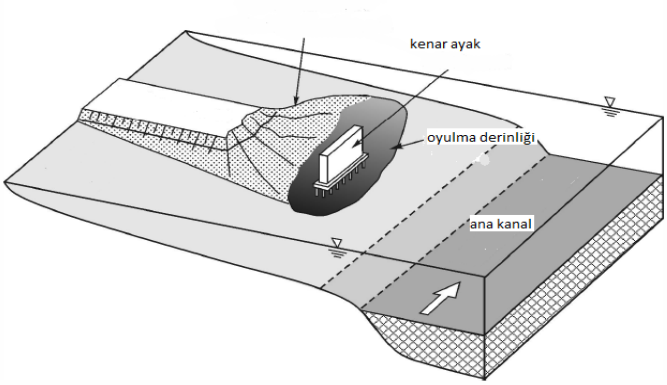
Şekil 3.5. Kanat duvarı ayağı için oyulma türü C örneği (Terry vd., 2011).



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.6. Köprü kenar ayağı oyulma türüler: (a) Oyulma türü A – ana kanal yatağındaki hidrolik oyulma nehir yatağında bozulmaya yol açar, bunun sonucunda toprak dolguda da bozulma meydana gelir; (b) Oyulma türü B – taşkın yatağındaki hidrolik oyulma nehir yatağında bozulmaya yol açar; (c) Oyulma türü C – toprak dolgu kolonu açığa çıkarır, böylece oyulma süreci kenar ayakta meydana gelen oyulmaya benzer şekilde ilerler (Ettema vd., 2010).

3.1.2 Köprüdeki alanlara göre sınıflandırma

Richardson J. vd., (1991) köprülerdeki alanlara göre oyulmaları üç gruba ayırmıştır: Nehir yatağında birikme ya da aşınma, köprüdeki daralmaya bağlı oyulma ve köprü ayaklarında ya da kenar ayaklarında meydana gelen yerel oyulmalar. Birikme ya da aşınma akarsu yatağında ya da yükseltide doğal ya da insan kaynaklı süreçlere bağlı olarak meydana gelen uzun vadeli değişimlerdir. Daralmaya bağlı oyulmalar köprüdeki yukarı yöndeki genişliğe kıyasla daralan kısımlara bağlı olarak köprü etrafında meydana gelen akarsu yatağı seviyesinin aşağı inmesidir. Yerel oyulmalar ise kenar ayak ya da köprü ayağı gibi engellere bağlı olarak akıntının hızlanmasından dolayı ortaya çıkar. (Richardson ve Davis, 2001) kanal kenarlarında ya da yakınlarındaki köprü ayaklarının oyulmalara daha müsait olduğunu belirtmiştir.

3.1.3 Hareket eden sürüntüye göre sınıflandırma

Akıntı tarafından taşınan sürüntü miktarına bağlı olarak, (Chabert ve Engeldinger, 1956) yerel oyulmaları temiz su oyulması ve taban oyulması olmak üzere iki kategoriye ayırmıştır.

Yang vd., (1996), temiz su oyulmalarının oyulma çukuruna akıntı tarafından sürüntü maddeleri taşınmadığı durumlarda meydana geldiğini ifade etmiştir. Diğer yandan, taban oyulması ise oyulma çukurunun akıntı tarafından devamlı olarak sürüntü maddesi ile doldurulması ile meydana gelmektedir. Yani, akıntıya bağlı olarak ortaya çıkan kuvvet toprak direncini aşarak akıntının ortalama hızı sürüntünün sürüklenmesi için gerekli olan kritik hızı aşması durumunda taban oyulması ortaya çıkmaktadır ($u > u_c$). (Abdul Karim vd., 2004), maksimum temiz su oyulma derinliğinin taban oyulması derinliğine kıyasla yaklaşık %10 daha büyük olduğunu tespit etmiştir.

3.2 Kanal Türüne ve Geçiş Köprüsüne Bağlı Köprü Koşulları

Oyulma süreçlerinin iyi anlaşılabilmesi ve hangi oyulma denkleminin kullanılması gerektiğinin belirlenebilmesi için üç koşul bulunmaktadır. Kanal türüne ve geçiş köprüsüne bağlı olarak Sınıf I, II ve II olmak üzere 3 adet kategoriye ayrılmıştır:

1. Sınıf I: Oyulmuş bölgelerdeki nispeten daha dar köprü geçişlerini ifade etmektedir. Şekil 3.7 ve 3.8'de gösterilmiştir.

2. Sınıf II: Birleşik kanallar üzerindeki daha geniş geçişleri ifade etmektedir. Şekil 3.9 ve 3.10'da gösterilmektedir.
3. Sınıf III: Örgülü kanallar üzerindeki daha geniş geçişleri ifade etmektedir. Şekil 3.11'da gösterilmiştir.

Sınıf I ve III laboratuvarda model olarak kullanmak için en basit türler olarak değerlendirilmektedir ve laboratuvar verilerinin çoğu bu türler kullanılarak elde edilmektedir. Ancak, sınıf II tahmin edilmesi en zor olan türdür. Bunun nedeni, ana kanal ve taşkın yatağı akıntıları arasında bir etkileşim olmasıdır.



Şekil 3.7. Sınıf I (Terry vd., 2011).



Şekil 3.8. Sınıf I (Terry vd., 2011).



Şekil 3.9. Sınıf II (Terry vd., 2011).



Şekil 3.10. Sınıf II (Terry vd., 2011).



Şekil 3.11. Sınıf III (Terry vd., 2011).

3.3 Köprü Kenar Ayaklarındaki Oyulmalarla İlgili Parametreler

Köprü kenar ayaklarındaki oyulma olgusunda rol oynayan birtakım parametreler bulunmaktadır. (Abdul Karim vd., 2004) bu parametreleri şu şekilde gruplandırmaktadır:

1. Kanal geometrisi parametreleri: Eğim, kesitsel biçim ve genişlik
2. Köprü kenar ayağı parametreleri: Şekil, boyut, yüzey koşulları ve ana akıntıya bağlı yönelme
3. Sürüntü parametreleri: Medyan boyutu, tane büyüklüğü dağılımı, kütle yoğunluğu, yatırılma açısı ve kohezyon
4. Akışkan parametreleri: Yoğunluk, viskozik, yerçekimi ivmesi ve sıcaklık
5. Akıntı koşulları parametreleri: Ortalama akıntı hızı, akıntı derinliği, sürüklenme hızı ve pürüzlülük
6. Oyulma süresi

3.3.1 Kanal geometrisinin etkisi

Nehirlerin yatay kesitleri coğrafi konuma bağlı olarak farklı şekiller alabilmektedir. (Terry vd., 2011), engebeli bölgelerde bir nehrin yatay kesiti dik eğime sahip parabolik iken, düz zeminde yatay kesit birleşik olup taşkın yatağı ve ana kanal mevcuttur. Dolayısıyla, engebeli bölgelerdeki köprülerin ayakları ana kanalın içerisine kurulur. Diğer yandan, düz arazilerdeki köprülerde ise tüm köprü ayakları taşkın yatağında son bulabilir ya da ana kanala uzanabilir.

Froehlich, (1989), yaklaşan akıntıya ilişkin Froude sayısını hesaplarken kanal geometrisinin etkisini göz önünde bulundurmuştur. Toprak dolgu ve köprü ayağı tarafından tıkanan alandaki ortalama hız ve derinliğe bağlı olarak sayıyı hesaplamıştır. (Melville ve Ettema, 1993) ve (Melville, 1995) tarafından kanal geometrisinin taşkın yatağı ve ana kanaldan oluşan birleşik bir kanalda bulunan köprü ayağındaki oyulma derinliği üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma, taşkın yatağına yayılan ve ana kanala uzanan köprü ayağı ile sınırlıdır. (Abdul Karim vd., 2004), kanal geometrisinin oyulma derinliği üzerindeki etkisinin K_G çarpan faktörü ile gösterildiğini ifade etmiştir. Bu faktör, birleşik kanalda yer alan köprü ayağındaki oyulma derinliğinin, birleşik kanalınkiyle aynı genişliğe sahip ve ana kanalınkiyle aynı derinliğe sahip

dikdörtgen kanalda yer alan köprü ayağındaki oyulma oranına oranı olarak tanımlanmaktadır. (Cardoso ve Bettess, 1999) köprü ayağı uzunluğunun ana kanalın ucuna kadar uzatılmasında kanal geometrisinin etkisini araştırmıştır. (Melville, 1995) çalışmasında, taşkın yatağındaki köprü ayaklarındaki oyulmaların dikdörtgen kanallardaki oyulmalar ile tahmin edilebileceğini öne sürmüştür. (Cardoso ve Bettess, 1999), oyulma deliği ana kanala uzandığında meydana gelen denge oyulmasına ulaşma zamanının, oyulma deliği taşkın yatağı ile sınırlı kaldığındaki denge oyulmasından daha kısa sürdüğünü tespit etmiştir.

3.3.2 Yaklaşan akıntı hızının etkisi

Birçok araştırmacı çalışmalarına yaklaşan akımın etkisini dahil etmişlerdir. (Garde vd., 1961) analizlerinde Froude sayısını kullanmışlar ve normal kanal akımına ilişkin Froude sayısının maksimum oyulma derinliğinde yaklaşan akımı hızının etkisini temsil ettiğini tespit etmişlerdir. (Kansasamy, 1989), akıntı Froude sayısının dahil edilmesine bağlı olarak akım derinliğindeki artışla birlikte oyulma derinliğinin de arttığını göstermiştir.

Terry vd., (2011) kayma hızının (u_*) yalnızca temiz su oyulmalarını taban oyulmalarından ayırt etmede değil aynı zamanda belirli bir sürüntü miktarı için akıntının aşındırıcı gücünü hesaplamada önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. (Melville ve Sutherland, 1988), sürüntü taşıyan akıntılar için temiz su koşullarından taban koşullarına geçişi temsil eden u_a hızını tanımlamıştır. Uniform sürüntüler için bu değer u_c'ye eşittir. Dolayısıyla, üniform olmayan sürüntüler için, $u/u_a>1$, if $u/u_a < 1$olduğunda taban koşulları baskın gelmekte olup oyulma ilerledikçe ve temiz su koşulları devam ettikçe yatak da korunmaktadır. (Laursen, 1963) ve (Melville, 1997) kayma hızını değerlendirmiştir. Dongol (1994), üniform ve üniform olmayan sürüntüler için taban koşullarında dikey-duvar, kanat duvarı ve dökme duvar ayaklarındaki oyulma derinliklerinin akıntı hızlarının etkisini incelemek için kapsamlı deneyler gerçekleştirmiştir. (Abdul Karim vd., 2004) ise temiz su koşulları altında, maksimum oyulma derinliğinin $u = u_c$. For $u/u_c > 1$durumunda, yani taban koşullarında gerçekleştiğini tespit etmiştir.

3.3.3 Zamanın etkisi

Köprü kenar ayaklarındaki zamana bağlı olarak meydana gelen yerel oyulmalar birçok çalışmada tahmin edilmeye çalışılmış ve denge oyulma derinliği için çeşitli tanımlamalar yapılmıştır. (Köse, 2007) tezinde denge koşullarında temiz su oyulmalarının çok uzun süreli akıntılarda meydana geldiğini, başka bir deyişle oyulmanın derinliğinin denge aşamasına gözle görülür biçimde ulaşmadığını ifade etmiştir. Temiz su koşullarında denge oyulma derinliğine zamanla ulaşılmaktadır. (Yanmaz, 2002), birçok çalışmanın denge koşulları altında gerçekleştirildiğini ve çalışmalarda T_s etkisinin ihmal edildiğini öne sürmüştür. (Lim, 1997), malzeme ve akıntı koşullarına dayalı olarak, temiz su koşullarında köprü ayağında denge oyulma derinliğine ulaşmak için gerekli olan sürenin 3-8 gün olduğunu belirtmiştir. (Kumar vd., 1999) 3 saatten fazla süre sonra oyulma derinliğinde 1 mm'den fazla değişme olmadığını tespit edince deneysel çalışmalarını durdurmuş, (Oliveto ve Hager, 2002) ise oyulma derinliğindeki ilerlemenin sonsuz olduğunu aktarmıştır. (Mia ve Nago, 2003) ise 1 saatlik zaman dilimi içerisinde oyulma derinliğinde meydana gelen değişimin 1 mm'den az olduğunu gözlemlemiştir. (Feal vd., 2006) dikey duvar ayaklarında denge koşullarına ulaşmak için gereken sürenin yaklaşık 6-21 gün olduğunu belirtmiştir. (Mohammadpour vd., 2013) oyulmanın büyük bölümünün deneylerin ilk saatlerinde gerçekleştiğini aktarmış ve çalışmalarının sonucunda oyulma derinliğinin %80-90'ının denge zamanının ilk %20-40'lık dilimi içerisinde gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. (Yanmaz ve Altınbilek, 1991), temiz su koşullarında denge oyulmalarına ilişkin olarak, köprü temeli tasarımının akıntının kısa süreli olduğu durumlara kıyasla daha iyi değerler verdiğini, bundan dolayı da köprü ayaklarında meydana gelen temiz su oyulmalarının zamansal değişiminin araştırılmasının önemli olduğunu ifade etmiştir. Bunun nedeni olarak ise, oyulma derinliğinin muhtemel genişlemesinin tahmin edilmesi ve güvenli köprü tasarımı için önemli bilgiler sağlaması olarak gösterilmektedir.

3.3.4 Sürüntülerin boyutu ve tane boyut dağılımının etkisi

Abdul Karim vd., (2004) sürüntülerin boyutu ve tane boyut dağılımının etkisini açıklamış ve en yaygın kullanılan iki parametrenin medyan sürüntü çapı d_{50} ve tane boyut dağılımının geometrik standart sapması $\sigma_g = [(d_{84}/d_{16})^{0.5}]$ (yatak sürüntülerinin

homojenlik düzeyinin bir ölçüsü) olduğunu ifade etmiştir. (Ahmad, 1953), maksimum oyulma derinliğinin sürüntü boyutundan bağımsız olduğunu belirtmiştir. (Garde vd., 1961) sürüntü boyutunun maksimum oyulma derinliği üzerinde etkisi olduğunu aktarmıştır. (Laursen, 1960) maksimum oyulma derinliğinin temiz su koşulları altıda sürüntü boyutundan etkilendiğini ancak taban oyulması koşullarında etkilenmediğini aktarmıştır. (Gill, 1972) iki farklı sürüntü boyutunda (d_{50} = 1.52 mm ve 0.914 mm) çalışma yapmış ve $\tau/\tau_c < 1$ değeri için iri taneli sürüntülerde küçük taneli sürüntülere kıyasla oyulma derinliğinin daha büyük olduğunu belirtmiştir. Burada τ_c = sürüntü taneleri için kritik kayma gerilimidir. Ancak, nihai kayma gerilimi değeri için küçük taneli sürüntüler daha büyük oyulma derinliğine yol açmaktadır. Kanat duvarı, dökme duvar tipi ve yarı dairesel köprü ayakları için, (Wong, 1982) τ_0/τ_c değeri için yatak sürüntüsü boyutu arttıkça oyulma derinliğinin de arttığını tespit etmiştir.

Ahmad, (1953) farklı yatak sürüntüleri için farklı oyulma oranları olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ona göre, küçük taneli sürüntüler iri taneli sürüntülere kıyasla daha hızlı bir şekilde oyulmaya yol açmaktadır. (Ramu, 1964) aynı sürüntü boyutu için, tane boyutu dağılımındaki bir değişiklik σ_g denge oyulma derinliğini etkilediğini gözlemlemiştir. (Ahmad, 1953) denge oyulma derinliğinin sürüntü tane boyutu dağılımına σ_g bağlı olduğunu iddia etmiştir. (Ettema, 1980) kenar ayaklardaki maksimum temiz su denge oyulma derinliğinin d_s sürüntü tane boyutu dağılımına σ_g bağlı olduğunu tespit etmiştir.

3.3.5 Yaklaşan akım derinliğinin etkisi

Laursen, (1952)'e göre, yaklaşan akım derinliği (y) oyulma derinliğinin belirlenmesi için önemli bir faktördür. (Gill, 1972) deneysel çalışmasının sonuçları, sürüklenme hızı oranının $u_* = u_{*c}$, sabit değeri için maksimum oyulma derinliğinin yaklaşan akıntı derinliği ile birlikte arttığını belirtmiştir. Ayrıca, yaklaşan akıntı derinliği arttıkça, maksimum oyulma derinliğinin azalan bir hızla arttığını gözlemlemiştir. (Kandasamy, 1989) çalışması oyulma derinliğinin y ile orantılı olarak arttığını ancak L'den bağımsız olduğunu ortaya koymuştur. Diğer yandan, orta düzeydeki akıntı derinliklerinde, oyulma derinliği hem y hem L'ye bağlıdır. Ancak, (Melville, 1992) kısa ve uzun köprü ayakları arasındaki ayrıma dikkat çekmiştir. Çalışmada kısa ayaklar için ($L / y \geq 1$) oyulma derinliğinin akıntı derinliğinden bağımsız olduğu, uzun ayaklar için ise (L / y

≥ 25) oyulma derinliğinin akıntı derinliğine bağlı olduğu sonucuna varmıştır. Ancak, köprü ayaklarının çoğu uzun ya da kısa değildir, bundan dolayı da oyulma derinliği hem h hem de L'den etkilenmektedir. (Dey ve Barbhuiya, 2004a) küçük akıntı derinlikleri için denge oyulma derinliğinin y'deki artışla birlikte ciddi miktarda arttığını, ancak yüksek akım derinliklerinde denge oyulma derinliğinin akıntı derinliğinden bağımsız olduğunu aktarmıştır.

Yaklaşan akıntı derinliğindeki artışla birlikte maksimum oyulma derinliğinin azalan bir hızda artış gösterdiği ve maksimum oyulma derinliğinin akıntı derinliğinden bağımsız olduğuna dair bir limit olduğu konusunda fikir birliği olduğu söylenebilir.

3.3.6 Köprü kenar ayağı şeklinin etkisi

Köprü ayağının şekli denge oyulma derinliği üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu etki birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. (Terry vd., 2011) köprü ayağı şeklinin etkisi, yarı dairesel, dökme duvar tipi ve kanat duvarı ayağı gibi aerodinamik biçimlerin zayıf çevrintiler oluşturduğunu, diğer yandan dikdörtgen kenar ayakları gibi engellerin ise güçlü ve karmaşık çevrinti oluşturma kapasitesine sahip olduğunu belirtmiştir. Sonuç olarak, engel durumunda nispeten büyük bir oyulma derinliği gözlemlenmiştir. Laboratuvardaki deneysel verilerden hareketle, (Garde vd., 1961) ve (Wong, 1982) dikey duvar ayaklarının dökme duvar ve kanat duvarı ayaklarına kıyasla daha büyük oyulma derinliği yarattığı sonucuna ulaşmıştır. (Melville, 1997), Tablo 3.1'de görüldüğü üzere şekil faktörünü (K_s) köprü ayaklarının şeklinin denge oyulma derinliği üzerindeki etkisini açıklamak için kullanmıştır. Dikey düzlem köprü ayağının en basit şekli olup referans olarak kullanılmıştır.

Tablo 3.1. Köprü Ayaklarında Şekil Faktörleri (Melville, 1997).

Köprü Ayağı Şekli	K_s
Dikey-duvar	1.00
Kanat duvarı	0.75
Dökme duvar (0.5H:1V)	0.60
Dökme duvar (1H:1V)	0.50
Dökme duvar (1.5H:1V)	0.45

3.3.7 Köprü kenar ayağı uzunluğunun, daralma oranının ve açılma oranının etkisi

Köprü kenar ayağı uzunluğu ve daralma oranı, köprü kenar ayaklarındaki maksimum oyulma derinliğinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Açılma oranının tersi daralma oranı olarak adlandırılmaktadır. (Kandasamy, 1989), köprü ayağının uzunluğu arttıkça açılma oranının azaldığını ve bu değişimin oyulma derinliği üzerindeki etkisinin hem daralma oranındaki azalmaya hem de köprü ayağı uzunluğundaki artışa bağlanabileceğini öne sürmüştür. (Garde vd., 1961) analizlerinde daralma oranını kullanmıştır. (Neill, 1973) daralma oranının bir ölçme parametresi olarak kullanılmasının, kısa bir köprü ayağının çok geniş bir kanala yayılması durumunda gerekçelendirilemeyeceğini ve daralmanın ikincil bir unsur olarak değerlendirilebileceğini savunmuştur. Aynı görüşten hareketle (Neill, 1973) sonuçların temelde daralma oranı açısından ifade edilmesinin yanıltıcı olacağını ifade etmiştir. (Cunha, 1975) devamlı sürüntü hareketi barındırmayan akıntılarda, oyulma derinliğinin daralma oranına bağlı olmadığını ve yalnızca yerel olgulardan etkilendiğini ortaya koymuştur.

Laursen, (1963) oyulmanın yerel bir olgu olduğunu ve daralma oranından bağımsız olduğunu savunur. (Terry vd., 2011) köprü ayağı uzunluğunu bir ölçüm karakteri olarak ortaya atmış ve oyulma derinliği akıntının karşı kenarına ya da kanal duvarına uzanmadığı sürece, diğer koşullar aynı kalmak kaydıyla, sabit uzunluktaki bir köprü ayağında meydana gelen maksimum oyulma derinliğinin kanal genişliği ya da akıntıya bağlı olmaksızın aynı kalacağını ortaya atmıştır.

3.3.8 Köprü kenar ayaklarının dizilişinin etkisi

Köprü kenar ayağı dizilimine bağlı olarak yaklaşan akıntının açısı, atak açısı olarak adlandırılmakta ve oyulma derinliğini önemli ölçüde etkilemektedir. (Garde vd., 1961) aynı akıntı, sürüntü ve köprü kenar ayağı koşullarında, maksimum oyulma derinliğinin 90^0'lik eğimle mahmuzlarda en yüksek seviyede olduğunu aktarmıştır. (Zaghloul, 1983) en büyük denge oyulma derinliğinin yukarı yönlü mahmuz eğimlerinde görüldüğünü ve en küçük oyulma derinliğinin ise mahmuz aşağı yönlü olduğunda gerçekleştiğini ifade etmiştir. (Melville, 1992) tasarım denklemlerinde diziliş faktörünü (K_θ) dahil ederek köprü ayağı dizilişinin etkisini de çalışmalarına dahil etmiştir. Köprü ayaklarının dizilişi, ayağın düzleminin eğim açısı (θa) tarafından belirlenmektedir. Genel olarak, oyulma derinliğinin θa'daki artışla birlikte arttığı tespit edilmiştir. (Melville, 1992) diziliş faktörünün yalnızca uzun köprü ayaklarına ($L/ y \geq 3$) uygulanabileceğini iddia etmiştir. Kısa köprü ayakları ($L / y \geq 1$) için diziliş etkileri $K_\theta = 1$ olmak üzere ihmal edilebilecek düzeydedir. İki sınır arasındaki köprü ayağı uzunlukları için ise, lineer enterpolasyondan elde edilen K_θ değeri tavsiye edilmektedir.

Tablo 3.2. Köprü Ayakları için K_θ Katsayısı (Melville, 1992).

θ_a (°)	30	45	60	90	120	135	150
K_θ	0.90	0.95	0.98	1.0	1.05	1.07	1.08

4. KÖPRÜ KENAR AYAĞINDAKİ OYULMA FORMÜLLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Oyulma formüllerinin değerlendirilebilmesi için, önde gelen formüllerin oyulma tahminlerinin diğer çalışmaların deneysel verileri ile karşılaştırılması gerekmektedir. (Terry vd., 2011) ana parametrelerin benzer dizilişleri için karşılaştırmalar yapmışlar ve bu parametrelere örnek vermişlerdir. Örneğin, hareketli taban oyulması formülünü temiz su oyulma formülü ile karşılaştırmak uygun değildir. Ayrıca, aşınabilir köprü kenar ayaklarında ve temellerindeki oyulmalara ilişkin veriler ile katı köprü ayakları ve kazık temellerdeki oyulmalar ilişkin verilerin karşılaştırmaların farklı sonuçlar vereceği ifade edilmiştir. Bu durumda, diğer tüm faktörler eşit olmak kaydıyla oyulma derinliği tahminlerinin birbirinden ne kadar farklı olduğunun araştırılması yerinde olacaktır.

Oyulma formüllerinde göz önünde bulundurulması gereken bir diğer parametre ise verilerdeki belirsizlik ve formüllerin güven aralıkları olarak belirtilmiştir. Örneğin (Sturm, 2004) çalışmasında maksimum oyulma derinliği için en uygun formülde verilerin büyük kısmının % ±25 aralığına düştüğü tespit edilmiştir. Benzer şekilde, (Oliveto ve Hager, 2002) karşılaştırmalarında boyutsuz oyulma derinliği bağımsız bir değişken olarak boyutsuz zamanı da içermekte olup veri seti için % ±30 aralığında kaldığı aktarılmıştır.

Terry vd., (2011) bir diğer parametre olarak saha koşullarını göstererek oyulma formülleri ile saha verileri arasındaki karşılaştırmaların laboratuvar koşullarına göre daha zor olduğunu belirtmiştir. (Mueller ve Wagner, 2005) sahada ölçülen daralmayı ve oyulma derinliklerini HEC-18 tarafından önerilen formüllerden oluşturulan tahminlerle karşılaştırmış ve formüllerin sahadaki akım koşullarının karmaşıklığını açıklamadığı sonucuna varmıştır.

Örneğin, Wagner vd., (2006) tarafından oyulma formülleri ve saha verileri arasında yapılan karşılaştırmalar genel olarak Froehlich ve Sturm denklemi de dahil olmak üzere birçok oyulma formülünün oyulmaları olduğundan fazla tahmin ettiğini ortaya koymuştur. Bazı durumlarda, Sturm'un formülü saha verileri ile % ±25 aralığında örtüşmüş olup en belirgin örnek ise Minnesota'da bulunan Pomme de Terre Nehri'dir. Diğer yandan, Belle Plaine yakınlarındaki Minnesota Nehri örneğinde tahminler

gerçekte olduğundan fazla şekilde gerçekleşmiştir. İkinci örnekte, köprünün yukarı yönünde iki küçük yarıçaplı büklümü olan eğimli bir köprü geçişi oldukça karmaşık bir akım alanına yol açmıştır. Diğer örneklerde, saha verileri köprü geçişinde içerisinde bir miktar kil bulunan alüvyon ve alüvyonlu kum bulunmakta olup bu durum kritik hızın tahminini zorlaştırmaktadır.

Robert vd., (2011) kitaplarında oyulma formülleri ile saha verileri karşılaştırılırken dikkat edilmesi gereken diğer faktörlerden bahsetmiştir. Toprak dolgunun kuvveti, oyulmanın ölçülme süresi ve maksimum oyulma derinliği ile ilgili değerlendirmelerin yanı sıra, köprü kenar ayaklarındaki oyulmalar çoğu zaman yaklaşım kanalının yana doğru kayması ile ilişkilendirilmektedir.

4.1 Seçilen Modeller

Zaman (t) parametresine bağlı olarak, temiz su koşullarında dikdörtgen kenar ayaklarında meydana gelen yerel oyulmaların zamansal değişimini açıklamak amacıyla aşağıdaki formüller seçilmiştir:

a) Cardoso A.H. ve Bettess R. (1999)

1999 yılında Cardoso ve diğerleri tarafından, ana kanalın kenarına kadar uzanan farklı oyulma uzunlukları için köprü kenar ayaklarında meydana gelen yerel oyulmaları ölçmek amacıyla bir dizi laboratuvar deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde oyulmaların zamana bağlı gelişimi ve nihai oyulma derinliği gözlemlenmiştir. Ana kanaldaki ve taşkın yatağındaki akımlar arasında çok küçük miktarda etkileşim olmuştur. Akım çizgileri köprü kenar ayaklarının varlığına bağlı olarak taşkın yatağından ana kanalın içerisine anlamlı düzeyde herhangi bir akım sapması olduğuna dair sonuç vermemiştir. Bu sonuç Melville tarafından ortaya atılan, ana kanalda ve taşkın yatağındaki akımları ayıran hayali bir sınır olduğu varsayıldığı takdirde, taşkın yataklarındaki köprü kenar ayaklarında meydana gelen oyulmaların dikdörtgen kanallardaki oyulmalar ile tahmin edilebileceği iddiasını desteklemektedir. Denge derinliğine ortalama olarak 68 saatte ulaşılmış olup bu süre dikdörtgen laboratuvar kanallarında temiz su koşulları altında yerel oyulma testlerinin ortalama süresidir. Zamana bağlı oyulma formülü aşağıda verilmiştir:

$$\frac{d_s}{d_{se}} = 1 - \exp\left[-1.025\left(\frac{t}{T}\right)^{0.35}\right] \quad (4.1)$$

Burada (d_s), (t) zamanı içerisinde meydana gelen oyulmanın derinliği olup (d_{se}) denge derinliği, (t) zaman ve (T) ise d_s=0.632d_{se}. denkleminde gösterilen zaman ölçeğini temsil etmektedir.

b) Ballio F. ve Orsi E. (2000)

2000 yılında Francesco Ballio ve Enrico Orsi köprü ayakları etrafında temiz su oyulmalarını laboratuvar ortamında uzun süreli (3 günden 5 haftaya kadar) testlerle gözlemlemişler ve erozyon sürecinin zaman içindeki değişimi yerel ve küresel karakteristik değerler bağlamında analiz etmişlerdir. Şeffaf çeperlere sahip (15 m uzunluğunda, 1.0 m genişliğinde) devirmeli hidrolik bir kanal kısmen bir sürüntü katmanı ile doldurulmuştur (yoğunluğu ρs = 15.7 kN/m3). Ortalama çapı d_{50} = 5.0 mm ve standart sapma σ_g = 1.3 mm olarak belirlenmiştir, böylece sürüntü boyutu yaklaşık olarak üniform olarak değerlendirilmiştir. Köprü kenar ayağı b = 0.10 m ve L = 0.40 m boyutlarında bir plastik cam prizmadan oluşmakta olup kanalın ortasına yerleştirilmiştir. Testte daha küçük bir engel daha (b = 0.05 m, L = 0.20 m) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, köprü kenar ayaklarındaki oyulma derinliklerindeki zamana bağlı değişimlerin niteliksel açıdan köprü kenar ayaklarında oluşan oyulmalara benzer olmakla birlikte niceliksel açıdan farklı olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, kenar ayaklar için analitik ifadelerin katsayılarda birtakım düzenlemeler yapıldıktan sonra ölçülmüş değerlere adapte edilebileceği de tespit edilmiştir. Formül aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur:

$$\frac{d_s}{d_{se}} = 1 - e^{-\alpha_b\left[\frac{t.u}{\lambda p}\right]^{\beta p}} \quad (4.2)$$

Burada (d_s), (t) süresi içerisindeki oyulma derinliği, (d_{se}) denge oyulma derinliği, α_b = 0.028, u = ortalama yaklaşan akım hızı, $\lambda_p = (b.h)^{1/2}$, (t) zaman ve β_p =0.33 şeklindedir.

c) Oliveto G. ve Hager W. H. (2002)

Giuseppe Oliveto ve Willi H. Hager tarafından Zürih, İsviçre'de toplanan büyük bir veri seti kapsamında toplamda altı farklı sürüntü test edilmiş olup bunlardan üçü

üniform sürüntülerdir. Deneylerde benzerlik ve akım direnci değerlendirilmiş ve oyulmaların zamana bağlı değişimi için bir denklem oluşturularak mevcut literatür verileri ile teyit edilmiştir. Oyulmadaki zamana bağlı değişimler (d_s) referans uzunluğu ($b^{2/3}h_0^{1/3}$), yoğunluk ölçümüne dair froude sayısı (F_{dm}) ve göreceli zaman (T) olmak üzere üç temel parametreye bağlıdır. Bu çalışmadaki öneri, mevcut literatürdeki teyit edilebilir veri setleri ile doğrulanmış olup tüm bu veri setleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Zamana dayalı formül aşağıda verilmiştir:

$$\frac{d_s}{L_R} = 0.068N\sigma_g^{-0.5}.F_d^{1.5}.\log T \tag{4.3}$$

Burada (d_s), (t) süresi içerisinde meydana gelen oyulma derinliği, $L_R = (h_0\, b^2)^{1/3}$, (N) biçim faktörü, dikdörtgen ayak için N = 1.25, (σ_g) sürüntünün geometrik standart sapması, (F_d) yoğunluğa bağlı tane Froud sayısı ve $t_R = L_R/[\ \sigma_g^{1/3}\ (g'\ .\ d_{50})^{0.5}]$ iken $T = t/t_R$ ve (g'), $g(\rho_s-\rho)/\rho$'ye işaret etmektedir.

d) Coleman S.E., Lauchlan C.S. ve Melville B.W. (2003)

Araştırmacılar, test edilen her bir akım-köprü ayağı-sürüntü kombinasyonu için düz yatak koşullarından denge koşullarına kadar farklı koşullar altında maksimum yerel oyulma derinliğindeki zamana bağlı değişimleri kaydederek analiz etmiştir. Ayrıca, oyulma gelişimi ile ilgili analizlerinde daha önce yapılmış olan deneysel oyulma çalışmalarında elde edilen sonuçları da dahil etmişlerdir. Akım ve sürüntü parametrelerine göre oyulma oranlarında ve derinliklerindeki değişimler kısa köprü ayakları için (akım derinliği/ayak uzunluğu = y/L > 1) ve uzun köprü ayakları için (y/L ≤ 1) olmak üzere farklı olduğu tespit edilmiştir. Araştırmada kullanılan formül aşağıda sunulmuştur:

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \exp\left[-0.07\left(\frac{u}{u_c}\right)^{-1}\left|\ln\frac{t}{t_e}\right|^{1.5}\right] \tag{4.4}$$

Burada (d_s), (t) süresi içerisindeki oyulma derinliği, (d_{se}) denge oyulma derinliği, (u) ortalama yaklaşan akım hızı, (u_c) kritik akım hızı, (t) zaman periyodu ve (t_e) ise denge derinliğine ulaşma süresini temsil etmektedir.

e) Yanmaz M. ve Köse Ö. (2006)

Çalışmada, Ankara'da bulunan Devlet Su İşleri'ne bağlı Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi'nin hidrolik laboratuvarında Melih Yanmaz ve Ömer Köse tarafından deneyler yürütülmüştür. Deneylerde, maksimum oyulma derinliklerinin köprü ayaklarının yukarı bakan kısımlarında gerçekleştiği, diğer yandan maksimum artışın ise ayağın arka yüzünde meydana geldiği gözlenmiştir. Ayrıca, maksimum oyulma derinlikleri ile artışların olduğu konumlar arasındaki yatay mesafelerin köprü ayağı küçüldükçe azaldığı da tespit edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda dikdörtgen ayakları etrafındaki oyulma derinliğinin zamansal değişimi için ampirik bir formül geliştirilmiştir:

$$\frac{d_s}{L} = 0.25F_d^{0.85}\left(\frac{L}{y}\right)^{0.15}(\log T_s)^{0.6} \tag{4.5}$$

Burada (d_s) maksimum oyulma derinliğini, L köprü kenar ayağının uzunluğunu, (F_d) yoğunluğa bağlı kısmi froud sayısı, y yaklaşan akım derinliği, (T_s) ise boyutsuz zamanı temsil etmektedir. Bu önerilen yöntemde $t.d_{50}\ (\Delta.g.d_{50})^{0.5}/L^2$. şeklinde ifade edilmiştir. Bu denklemin koşulu $1.12 \ll \frac{L}{y} \ll 2.84$ şeklinde gösterilmiştir.

f) Kothyari U.C., Hager W. H. ve Oliveto G. (2007)

Zürih, İsviçre'de bulunan Hidroloji ve Buzul Bilimleri Laboratuvarı'nda oyulmaların zamansal gelişimi ile ilgili kapsamlı çalışmalar yürütülmüştür. Umesh C. Kothyari; Willi H. Hager ve Giuseppe Oliveto tarafından köprü temelinde meydana gelen oyulmaların zamansal değişimleri için yeni bir formül geliştirilmiştir. Bu formül gerçek ve sürüklenme Froude sayıları arasındaki fark ile oyulma derinliği arasında ilişki kurularak aralarındaki benzerliğe dayalı olarak geliştirilmiştir. Bu yeni formül VAW oyulma veri seti ile geçerlilik bakımından teyit edilmiş ve mevcut literatürdeki veriler ile desteklenmiştir.

$$\frac{d_s}{L_R} = 0.272\sigma_g^{-0.5}.\left(F_d - F_{d\beta}\right)^{2/3}.\log T \tag{4.6}$$

Burada (d_s), (t) zamanı içerisindeki oyulma derinliği, $L_R = (h\ b^2)^{1/3}$, (σ_g) sürüntünün geometrik standart sapması, (F_d) yoğunluğa bağlı tanecik Froud sayısı ve $T = t/t_R$ (t_R)'nin $t_R = L_R/[\ \sigma_g^{1/3}\ (g'\ .\ d_{50})^{0.5}]$'yi ifade ettiği ve burada (g')'nin $g' = g(\rho_s-\rho)/\rho$'yi ifade ettiği belirtilmiştir.

($F_{d\beta}$) parametresi $F_{d\beta} = [F_{di} - 1.26\ .\ \Sigma\ .\ \Sigma_s\ .\ \Sigma_{ca}\ .\ \beta^{\Sigma/4}(R_h/d_{50})^{1/6}]\sigma^{1/3}$ ile verilmiştir. $\Sigma_s = \Sigma_{ca} = 1$ ve $\Sigma = 5/4$ iken olup (β) D/B ya da b/B faktör mukavemeti ve (F_{di}) yaklaşan akımdaki sürüntü hareketi için yoğunluğa bağlı parçacık Froud sayısı, (R_h) hidrolik yarıçap, (d_{50}) parçacık boyutu ve (σ) sürüntü homojenlik parametresi olarak belirtilmiştir. Shield'ın boyutsuz parçacık boyutu (D_*) ve kinematik sıvı viskozitesini (v) içeren diyagramına göre, (F_{di}) parametresi aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$F_{di} = 2.33D_*^{-0.25}(R_h/d_{50})^{1/6} \quad \text{akışkanlık rejimi } D_* \leq 10 \text{ iken} \tag{4.7}$$

$$F_{di} = 1.08D_*^{1/12}(R_h/d_{50})^{1/6} \quad \text{geçiş rejimi } 10 \leq D_* \leq 150 \tag{4.8}$$

$$F_{di} = 1.65(R_h/d_{50})^{1/6} \quad \text{pürüzlü yüzey rejimi } D_* \geq 150 \text{ iken} \tag{4.9}$$

Burada $D_* = (g'/v^2)^{1/3}d_{50}$ olup (R_h) hidrolik yarıçaptır.

Oliveto G. ve Hager W.H., (2002) denklemi Kothyari U.C., Hager W. H. ve Oliveto G. tarafından geliştirilmiştir. Burada (F_{di}) ile sembolize edilen viskozik etkisi göz önüne alınmıştır. Denklem 3'teki şekil unsuru Denklem 6'da ($F_{d\beta}$) parametresine dahil olmadığı için gerekli görülmemiştir.

4.2 Deneysel Veriler

Daha önce bahsedilen altı adet köprü kenar ayağı oyulma denkleminin performanslarının karşılaştırılması için kullanılacak deneysel veriler Köse, (2007) tarafından Ankara'da bulunan Devlet Su İşleri'ne bağlı Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi'nin hidrolik laboratuvarında elde edilmiştir. Deney koşulları aşağıda verilmiştir. Köprü kenar ayağının şekli 12.5 cm uzunluk ve 20 cm genişliğe sahip dikdörtgendir. Tüm deneyler 30 m uzunluğunda, 1.25 m genişliğinde ve 1 m derinliğinde ve 0.001 yatak eğim sahip bir kanal kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kanal Şekil 4.1'de görülmektedir. Yatak malzemesi 1.8 mm boyutunda kuvars kumundan oluşmaktadır. Geometrik standart sapma yaklaşık olarak 1.4'tür. Su debisi 15-20-25-30-35-40-45 lt/s olup su 30 cm çapında çelik borudan bir pompa vasıtasıyla 60 m3 kapasiteye sahip bir su deposundan yukarıdaki bir su deposuna pompalanmıştır.

Yukarıdaki depoda suyun debisi bir vana aracılığıyla kontrol edilmiştir. Türbülansı azaltmak amacıyla kaynak depo ile kanalın girişi arasında küçük bir havuz mevcuttur. Ayrıca, kanala enlemesine iki sıra delikli tuğla bloklar yerleştirilerek kanalın girişinde akımdaki çalkantıya azaltmak amaçlanmıştır. Kanalın duvarları test bölümü hariç betondan yapılmıştır. Şekil 4.2'de test alanının şematik görüntüsü görülmektedir. Kanal pürüzlülük katsayısı $n = (1/Q_f)AR_h^{2/3}S_0^{1/2}$ Manning formülü ile belirlenmiştir. Burada (n) Manning pürüzlülük katsayısı, (Q_f) ise m^3/s cinsinden debi, (A) bölümler arası m^2 cinsinden akım alanı, (R_h) m cinsinden hidrolik yarıçap ve (S_o) kanal meyilidir. Manning pürüzlülük katsayısı 0.014 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1. Kanalın Görüntüsü (Köse, 2007).



Şekil 4.2. Oyulma deliğinin koordinatlarını ölçmek için kullanılan ölçüm ekipmanı (Köse, 2007).

Tablo 4.1. Deneyin Kapsamı.

Deneme no.	D_{50}	L	Q_r	y	u_*	u_{*c}	u	F_r	u_c	u/u_c	F_d
	mm	cm	lt/s	cm	m/s	m/s	m/s		m/s		
1	1.80	12.50	45	8.91	0.028	0.029	0.40	0.43	0.52	0.77	2.34
2	1.80	12.50	40	8.30	0.027	0.029	0.39	0.43	0.51	0.75	2.28
3	1.80	12.50	35	7.50	0.026	0.029	0.37	0.43	0.50	0.74	2.16
4	1.80	12.50	30	6.80	0.025	0.029	0.35	0.43	0.49	0.71	2.05
5	1.80	12.50	25	6.06	0.023	0.029	0.33	0.43	0.48	0.68	1.93
6	1.80	12.50	20	5.20	0.022	0.029	0.31	0.42	0.47	0.65	1.75
7	1.80	12.50	15	4.40	0.020	0.029	0.27	0.41	0.45	0.6	1.58

Tablo 4.1'de deney koşulları görülmektedir. Burada, (D_{50}) ortalama sürüntü boyutu, (L) dikdörtgen ayağının uzunluğu, (Q_r) debi, (y) yaklaşan akım derinliği, (u_*) kayma gerilmesi hızı, (u_*c) kritik kayma gerilmesi hız, (u) ortalama yaklaşım akımı hızı, (F_r) yaklaşan akıntı Froud sayısı, (u_c) ortalama kritik yaklaşım akımı hızı ve (F_d) yoğunluğa bağlı parçacık Froud sayısını sembolize etmektedir.

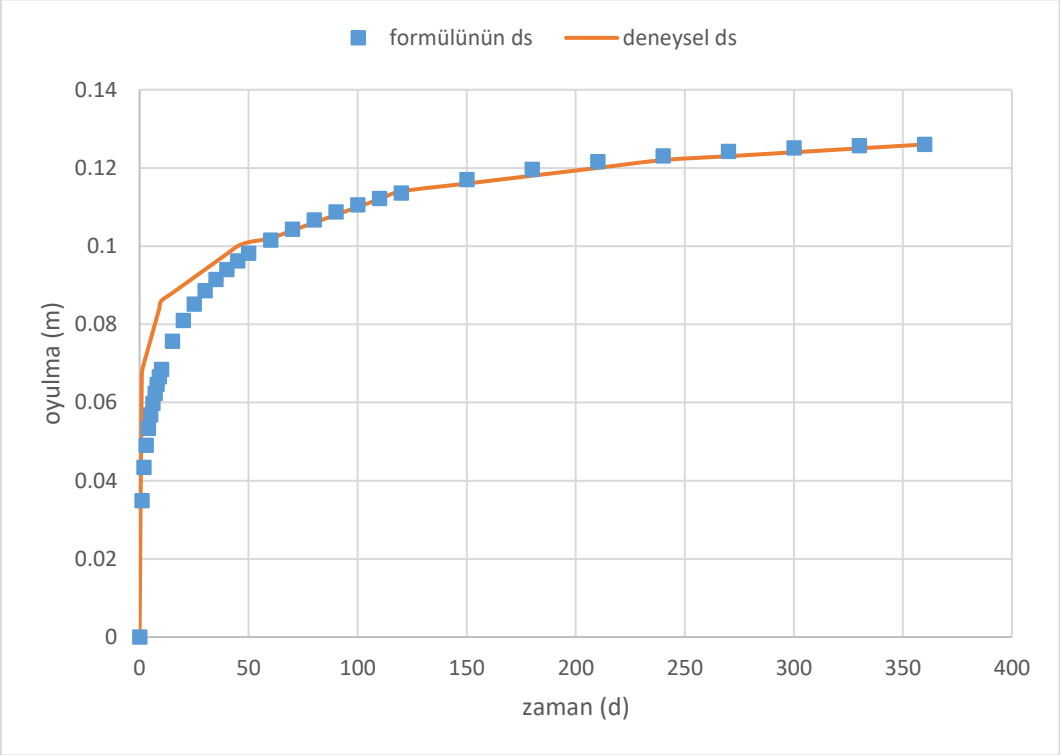
Zamana bağlı oyulma derinliği (ds) zamana (t) bağlı olarak ölçülmüş olup her bir debi için (15-20-25-30-35-40-45) lt/s geçen süre 6 saattir. İlk 10 dk. boyunca her 1 dk.'da, 10-50 dk. arasında her 5 dk.'da, 50-120 dk. arasında her 10 dk.'da ve 120-360 dk. arasında her 30 dk.'da bir ölçüm yapılmıştır. Tablo 4.2'de her bir debi için deneysel zamana bağlı oyulma derinliği gösterilmektedir.

Tablo 4.2. Deneysel zamana bağlı oyulma derinliği.

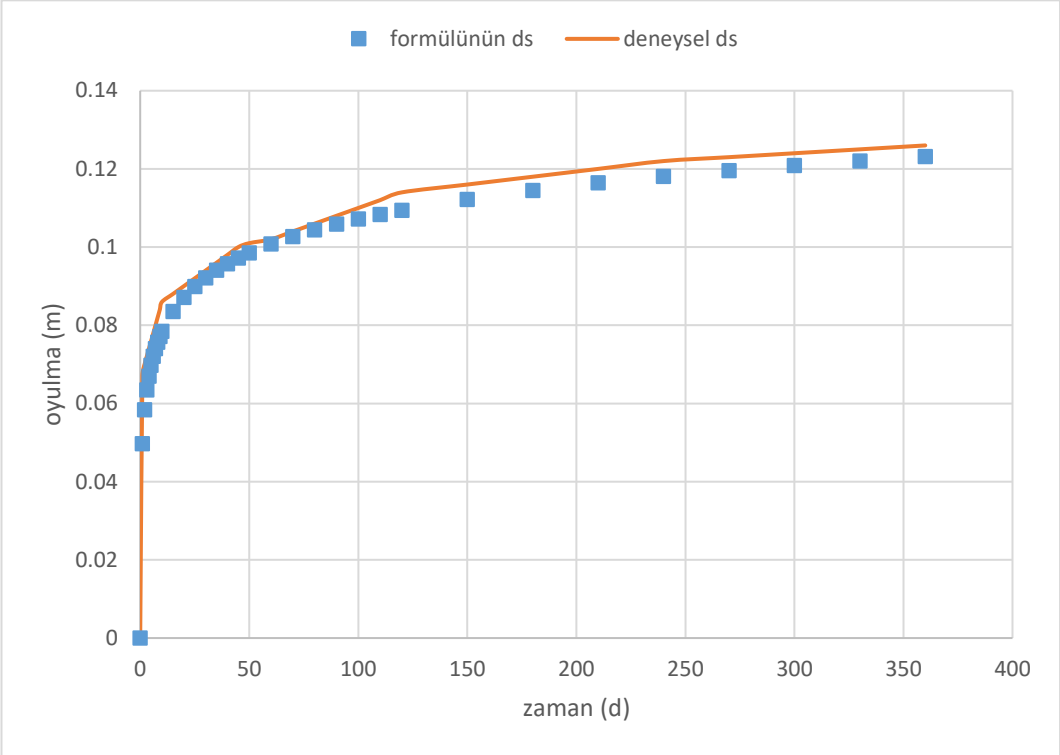
Zaman (sn.)	Zaman (dk.)	Deneysel zamana bağlı oyulma derinliği (m)						
		Q = 45 It/s	Q = 40 It/s	Q = 35 It/s	Q = 30 It/s	Q = 25 It/s	Q = 20 It/s	Q = 15 It/s
60	1	0.067	0.06	0.058	0.05	0.044	0.034	0.024
120	2	0.07	0.067	0.065	0.056	0.052	0.043	0.031
180	3	0.072	0.07	0.068	0.059	0.053	0.045	0.033
240	4	0.074	0.072	0.07	0.061	0.054	0.047	0.034
300	5	0.076	0.073	0.071	0.063	0.055	0.048	0.035
360	6	0.078	0.074	0.072	0.065	0.056	0.048	0.036
420	7	0.08	0.075	0.073	0.066	0.057	0.048	0.037
480	8	0.082	0.076	0.074	0.067	0.058	0.049	0.037
540	9	0.084	0.077	0.075	0.068	0.059	0.049	0.038
600	10	0.086	0.078	0.076	0.069	0.06	0.049	0.038
900	15	0.088	0.083	0.081	0.071	0.063	0.05	0.039
1200	20	0.09	0.086	0.084	0.073	0.066	0.051	0.04
1500	25	0.092	0.088	0.086	0.075	0.068	0.052	0.041
1800	30	0.094	0.09	0.088	0.077	0.07	0.052	0.041
2100	35	0.096	0.092	0.09	0.079	0.072	0.053	0.042
2400	40	0.098	0.094	0.092	0.081	0.074	0.053	0.042
2700	45	0.1	0.096	0.094	0.083	0.076	0.054	0.042
3000	50	0.101	0.097	0.095	0.085	0.077	0.054	0.043
3600	60	0.102	0.099	0.097	0.088	0.079	0.055	0.043
4200	70	0.104	0.101	0.099	0.09	0.081	0.056	0.043
4800	80	0.106	0.103	0.101	0.092	0.083	0.057	0.043
5400	90	0.108	0.105	0.103	0.094	0.085	0.058	0.043
6000	100	0.11	0.107	0.105	0.096	0.086	0.059	0.043
6600	110	0.112	0.108	0.106	0.098	0.087	0.06	0.043
7200	120	0.114	0.109	0.107	0.1	0.088	0.061	0.043
9000	150	0.116	0.112	0.11	0.104	0.091	0.063	0.044
10800	180	0.118	0.115	0.113	0.107	0.094	0.065	0.044
12600	210	0.12	0.117	0.115	0.109	0.097	0.067	0.044
14400	240	0.122	0.119	0.117	0.111	0.099	0.069	0.044
16200	270	0.123	0.12	0.118	0.113	0.101	0.071	0.045
18000	300	0.124	0.121	0.119	0.114	0.103	0.072	0.045
19800	330	0.125	0.122	0.12	0.115	0.104	0.073	0.045
21600	360	0.126	0.123	0.121	0.116	0.105	0.074	0.045

4.3 Formüllerin Performansları

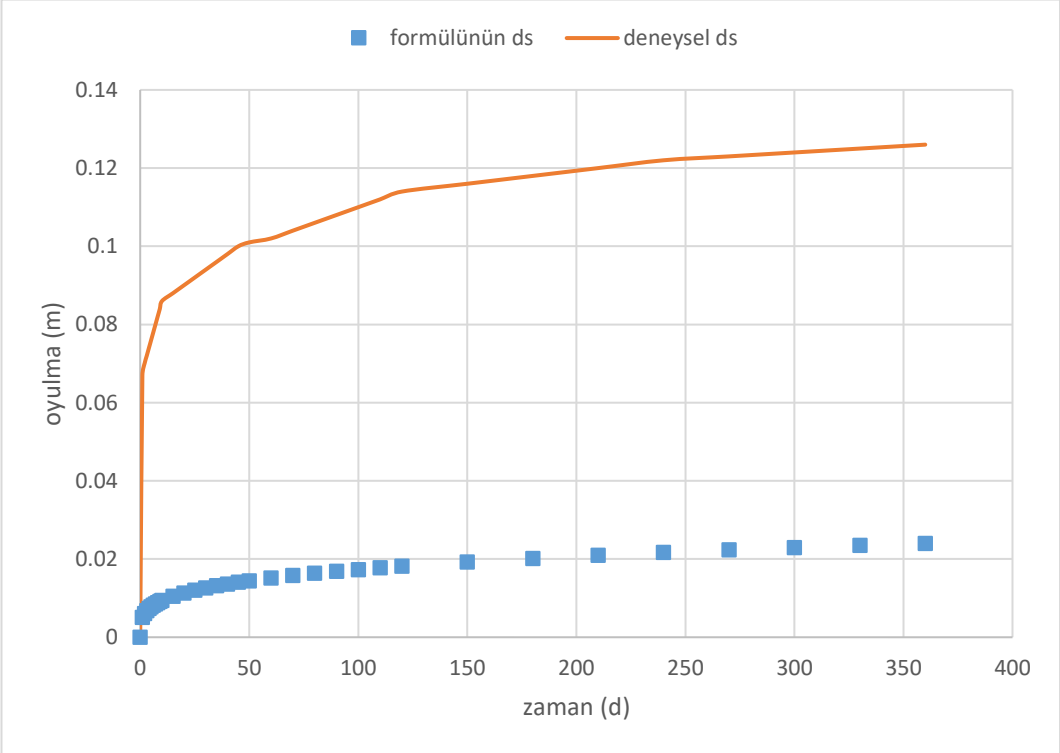
Seçilen formüller deneysel veriler kullanılarak ayaktaki zamana bağlı oyulmanın derinliğini tahmin etmek amacıyla kullanılmış ve seçilen formüllerde Tablo 4.1'de verilen kullanılmıştır. Seçilen formüllerden elde edilen zamana bağlı oyulmaların derinlikleri ile deneysel zamana bağlı oyulma derinlikleri karşılaştırılarak performans değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Özetlemek amacıyla Şekil 4.3'ten 4.8'e kadar her bir formül için yalnızca 45 lt/s'deki karşılaştırmalar verilmiştir.



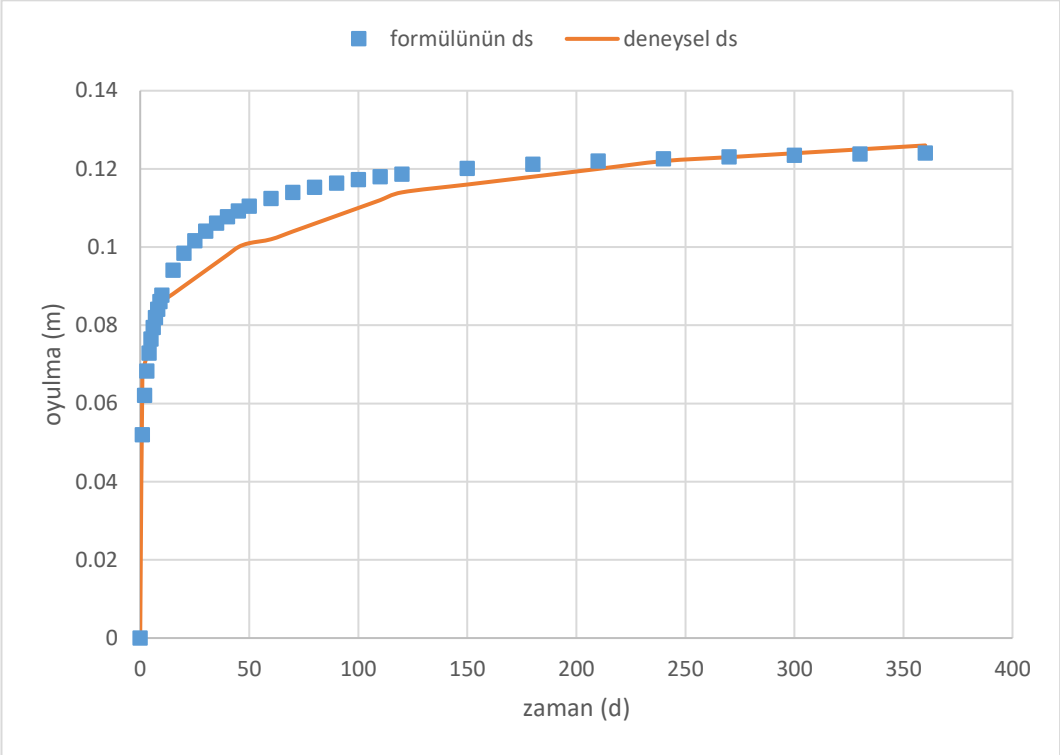
Şekil 4.3. Coleman vd.'nin formülü ile 45 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



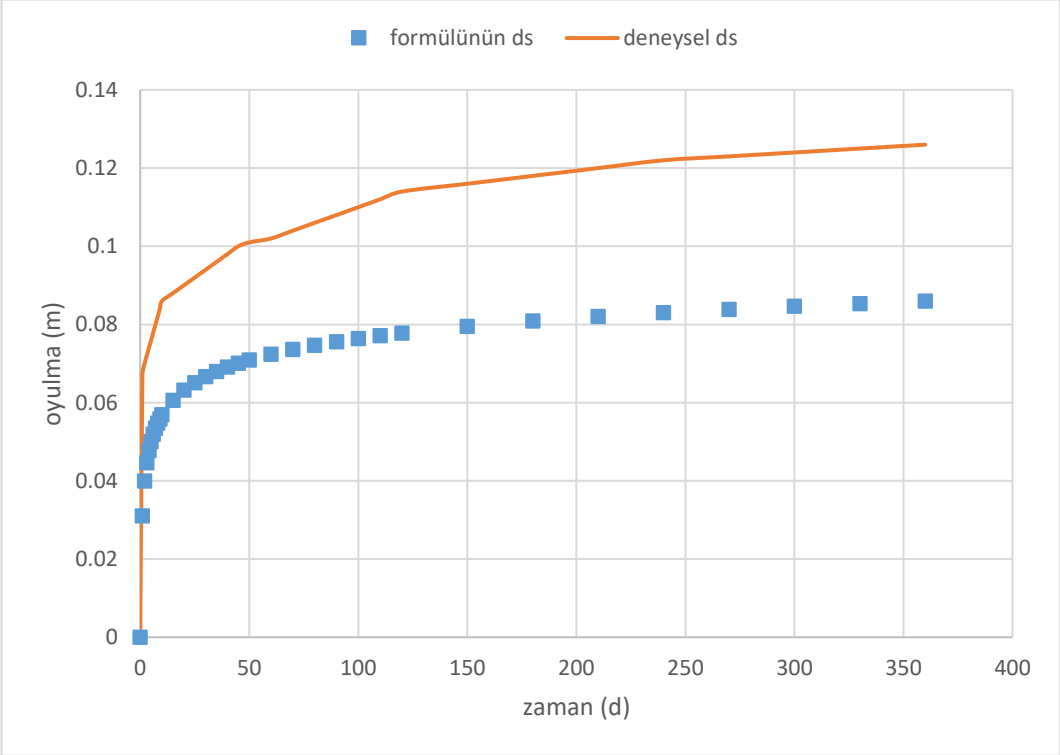
Şekil 4.4. Oliveto vd.'nin formülü ile 45 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



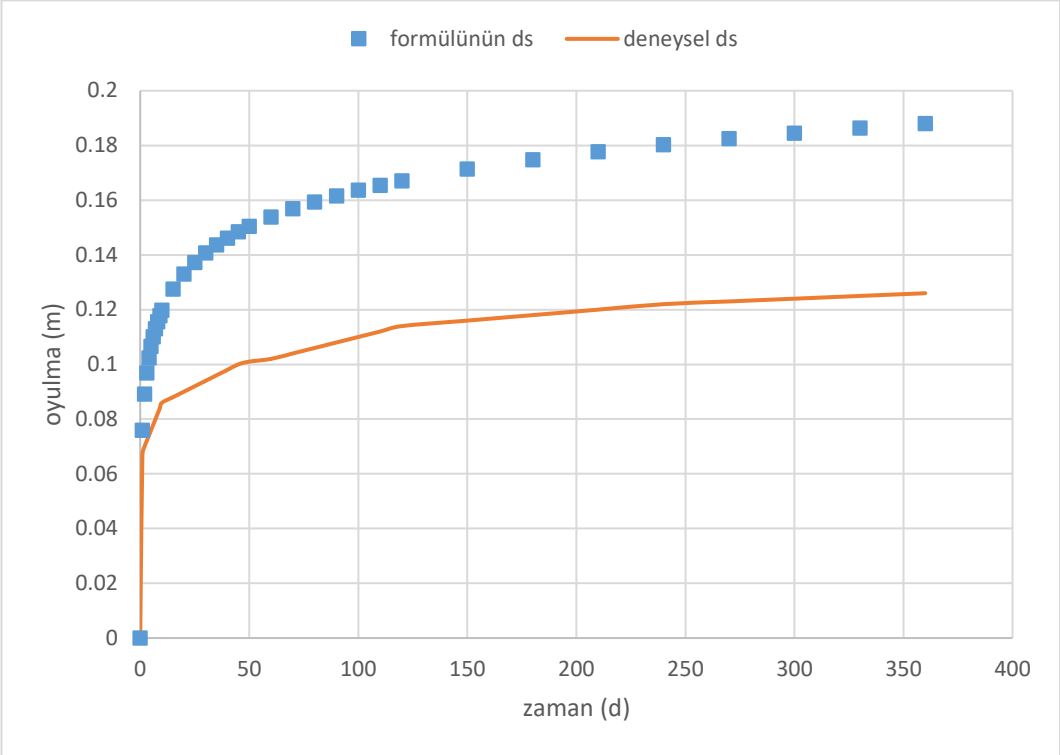
Şekil 4.5. Orsi vd.'nin formülü ile 45 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



Şekil 4.6. Cardos vd.'nin formülü ile 45 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



Şekil 4.7. Yanmaz vd.'nin formülü ile 45 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



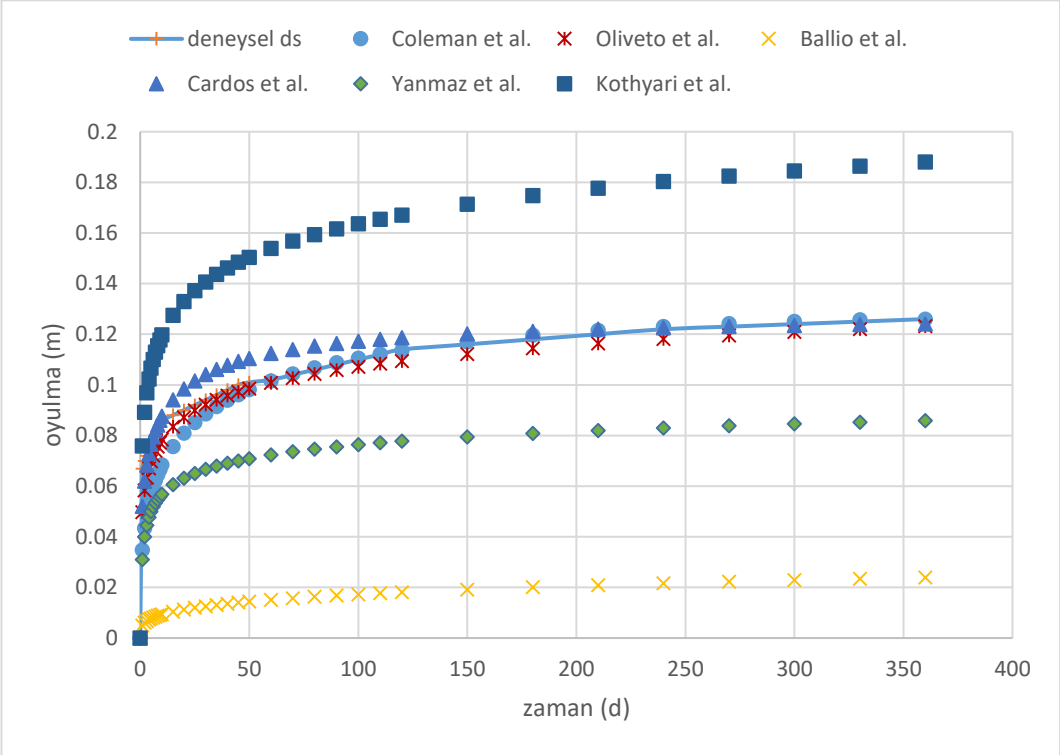
Şekil 4.8. Kothyari vd.'nin formülü ile 45 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.

Tablo 4.3'ten 4.16'ya kadar farklı debi değerlerine sahip formüllerden elde edilen zamana bağlı oyulma derinlikleri ve farklı korelasyon katsayıları görülmektedir. Şekil 4.9'dan 4.15'e kadar deneysel zamana bağlı oyulma derinliği ile formüllerden elde edilen oyulma derinliğinin karşılaştırmasını göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, formüllerden elde edilen zamana bağlı oyulma derinliğinin deneysel oyulma derinliğine ne kadar yakın olduğu görülmektedir.

Ölçümlerde korelasyon katsayısı (r) ve determinasyon katsayısı (r^2) kullanılmıştır. Korelasyon katsayısı, deneysel oyulma derinliği ile formüllerden elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği arasındaki doğrusal ilişkinin kuvvetini ve yönünü göstermektedir. 0.8'in üzerinde bir korelasyon genel olarak güçlü olarak değerlendirilmekte iken 05'in altında bir korelasyon değeri zayıf olarak görülmektedir. determinasyon katsayısı ise en uygun çizgiye yakın zamana bağlı oyulma derinliğinin yüzdesini temsil etmektedir.

Tablo 4.3. 45 lt/s debi için formüllerin performansı.

Zaman (dk.)	Zamana bağlı oyulma derinliği (m)					
	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
1	0.05201	0.005021	0.04976	0.034855	0.030994	0.075972
2	0.062072	0.00607	0.058404	0.04344	0.039947	0.089169
3	0.068355	0.006779	0.06346	0.049089	0.044603	0.096888
4	0.072938	0.007331	0.067047	0.053373	0.047719	0.102365
5	0.076538	0.007789	0.06983	0.056849	0.050045	0.106613
6	0.079493	0.008183	0.072103	0.059785	0.051893	0.110085
7	0.081993	0.008532	0.074025	0.062331	0.053423	0.113019
8	0.084153	0.008845	0.075691	0.064582	0.054724	0.115562
9	0.08605	0.009131	0.077159	0.0666	0.055855	0.117804
10	0.087737	0.009394	0.078473	0.068431	0.056854	0.11981
15	0.094095	0.010475	0.083529	0.075675	0.060594	0.127529
20	0.098415	0.011313	0.087117	0.08097	0.063157	0.133006
25	0.101617	0.012006	0.089899	0.085139	0.065098	0.137255
30	0.104118	0.012603	0.092173	0.088569	0.066655	0.140726
35	0.106142	0.013129	0.094095	0.091476	0.067954	0.143661
40	0.107822	0.013601	0.09576	0.09399	0.069065	0.146203
45	0.109245	0.01403	0.097229	0.096201	0.070036	0.148445
50	0.110468	0.014426	0.098543	0.098169	0.070896	0.150451
60	0.112469	0.015134	0.100816	0.10154	0.072369	0.153922
70	0.114043	0.015758	0.102738	0.104345	0.0736	0.156857
80	0.115317	0.016317	0.104404	0.106728	0.074654	0.159399
90	0.116371	0.016826	0.105872	0.108788	0.075576	0.161642
100	0.117258	0.017294	0.107186	0.110589	0.076395	0.163648
110	0.118014	0.017727	0.108375	0.11218	0.07713	0.165462
120	0.118667	0.018131	0.10946	0.113597	0.077797	0.167119
150	0.12018	0.019206	0.112242	0.117046	0.079491	0.171367
180	0.121247	0.020127	0.114516	0.119624	0.080858	0.174838
210	0.122037	0.020937	0.116438	0.121592	0.082001	0.177773
240	0.122641	0.021662	0.118103	0.123106	0.082983	0.180315
270	0.123117	0.02232	0.119572	0.124263	0.083843	0.182558
300	0.123498	0.022923	0.120886	0.12512	0.084607	0.184564
330	0.123809	0.023481	0.122074	0.125709	0.085295	0.186378
360	0.124067	0.024002	0.123159	0.126	0.085919	0.188035



Şekil 4.9. 45 lt/s debi için formüllerin performansı.

Tablo 4.3'te 45 lt/s debi için seçilen formüllerde 360 dk. süre içerisinde zamana bağlı oyulma derinliği sonuçları sunulmuştur. Zaman ölçümleri farklı periyotlar halinde yapılmıştır. Oliveto ve diğerlerinin formülü zamana bağlı deneysel oyulma derinliğini çok iyi biçimde temsil etmekte olup sonuçlarda herhangi bir dalgalanma gözlenmemiştir. Yani deneysel verilerin üzerinde ya da altında bir sonuç çıkmamıştır. Ballio ve diğerlerinin formülü deneysel verilere göre en düşük sonuçları vermiştir. Kothyari ve diğerlerinin formülü deneysel verilere göre en yüksek sonuçları vermiştir. Cardos ve diğerleri, Coleman ve diğerleri ve Yanmaz ve diğerlerinin formülleri ise deneysel verilere göre yüksek ve düşük olmak üzere çeşitli sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Seçilen formüllerin zamana bağlı oyulma derinliği sonuçları deneysel verilerin sonuçları ile karşılaştırılmış olup sonuçlar Şekil 4.9'da görülmektedir. 45 tl/s düzeyinde r ve r^2 sonuçları Tablo 4.4'te verilmiştir.

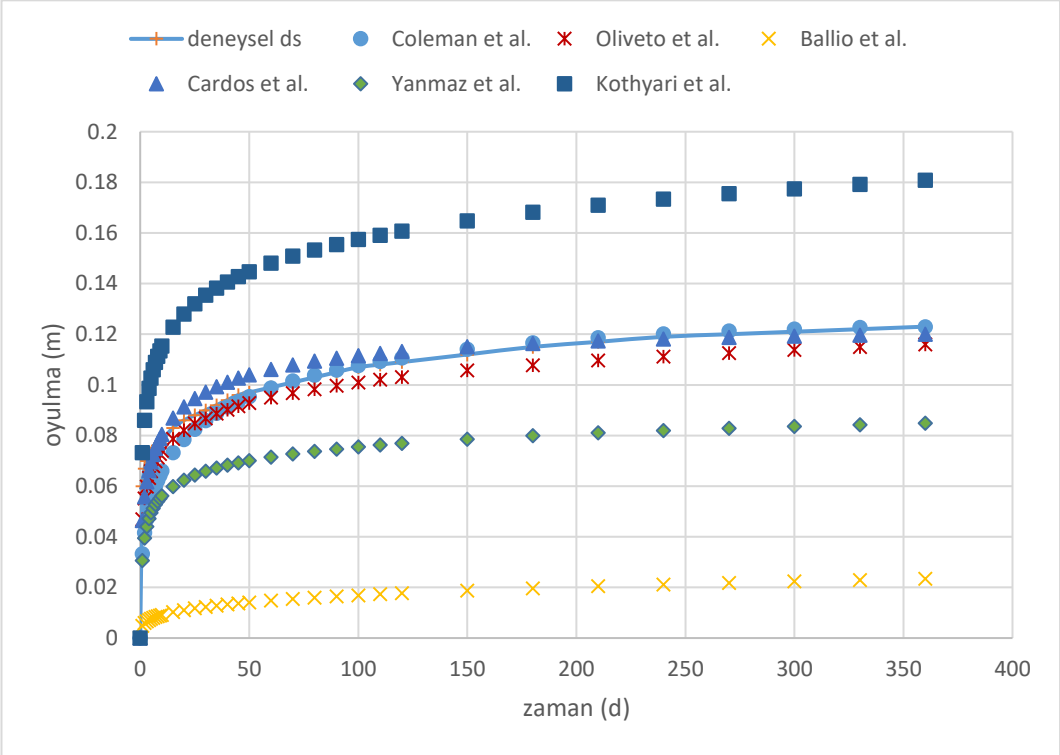
Tablo 4.4. 45 lt/s debi için korelasyon katsayısı ve determinasyon katsayısı.

	İstatistiki değer	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
r^2	$0 \rightarrow 1$	0.956	0.879	0.984	0.934	0.971	0.984
r	$-1 \rightarrow +1$	0.978	0.937	0.992	0.966	0.985	0.992

determinasyon katsayısına göre, Oliveto ve diğerlerinin ve Kothyari ve diğerlerinin çalışmalarının sonuçlarının %98'i zamana bağlı oyulma derinliği ölçümlerinde 1 değerine en yakın sonuçları vermiştir. Korelasyon katsayısı, Oliveto vd. ve Kothyari vd.'nin +1 değerine çok yakın olduğu ve çok yüksek pozitif değere sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.5. 40 lt/s debi için formüllerin performansı.

Zaman (dk.)	Zamana bağlı oyulma derinliği (m)					
	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
1	0.046512	0.004915	0.047017	0.033281	0.030641	0.073318
2	0.055865	0.005942	0.055136	0.041635	0.039492	0.085979
3	0.061786	0.006636	0.059886	0.047148	0.044096	0.093385
4	0.066147	0.007176	0.063255	0.051337	0.047176	0.098639
5	0.069602	0.007625	0.065869	0.05474	0.049476	0.102715
6	0.072458	0.008011	0.068005	0.057617	0.051303	0.106045
7	0.07489	0.008352	0.06981	0.060114	0.052815	0.108861
8	0.077003	0.008658	0.071374	0.062323	0.054101	0.1113
9	0.078868	0.008938	0.072754	0.064305	0.055219	0.113451
10	0.080535	0.009195	0.073988	0.066103	0.056207	0.115375
15	0.086892	0.010253	0.078737	0.073227	0.059905	0.122781
20	0.091288	0.011074	0.082107	0.078443	0.062438	0.128036
25	0.094595	0.011752	0.084721	0.082553	0.064357	0.132112
30	0.09721	0.012336	0.086856	0.085937	0.065897	0.135442
35	0.099349	0.012851	0.088662	0.088807	0.067181	0.138258
40	0.101143	0.013313	0.090226	0.091291	0.068279	0.140697
45	0.102676	0.013733	0.091606	0.093475	0.069239	0.142848
50	0.104005	0.01412	0.09284	0.09542	0.07009	0.144772
60	0.106205	0.014813	0.094975	0.098755	0.071546	0.148102
70	0.10796	0.015423	0.096781	0.10153	0.072762	0.150918
80	0.109399	0.015971	0.098345	0.10389	0.073805	0.153357
90	0.110602	0.016469	0.099724	0.105929	0.074716	0.155508
100	0.111626	0.016927	0.100959	0.107714	0.075525	0.157433
110	0.112509	0.017351	0.102075	0.109291	0.076252	0.159174
120	0.113278	0.017746	0.103094	0.110695	0.076912	0.160763
150	0.115089	0.018798	0.105708	0.114114	0.078587	0.164839
180	0.116397	0.019699	0.107843	0.116671	0.079938	0.168169
210	0.117386	0.020491	0.109649	0.118624	0.081068	0.170985
240	0.118156	0.021201	0.111213	0.120127	0.082039	0.173424
270	0.118773	0.021844	0.112593	0.121275	0.082889	0.175575
300	0.119276	0.022435	0.113827	0.122127	0.083645	0.177499
330	0.119692	0.022981	0.114943	0.122711	0.084324	0.17924
360	0.120042	0.02349	0.115962	0.123	0.084941	0.180829



Şekil 4.10. 40 lt/s debi için formüllerin performansı.

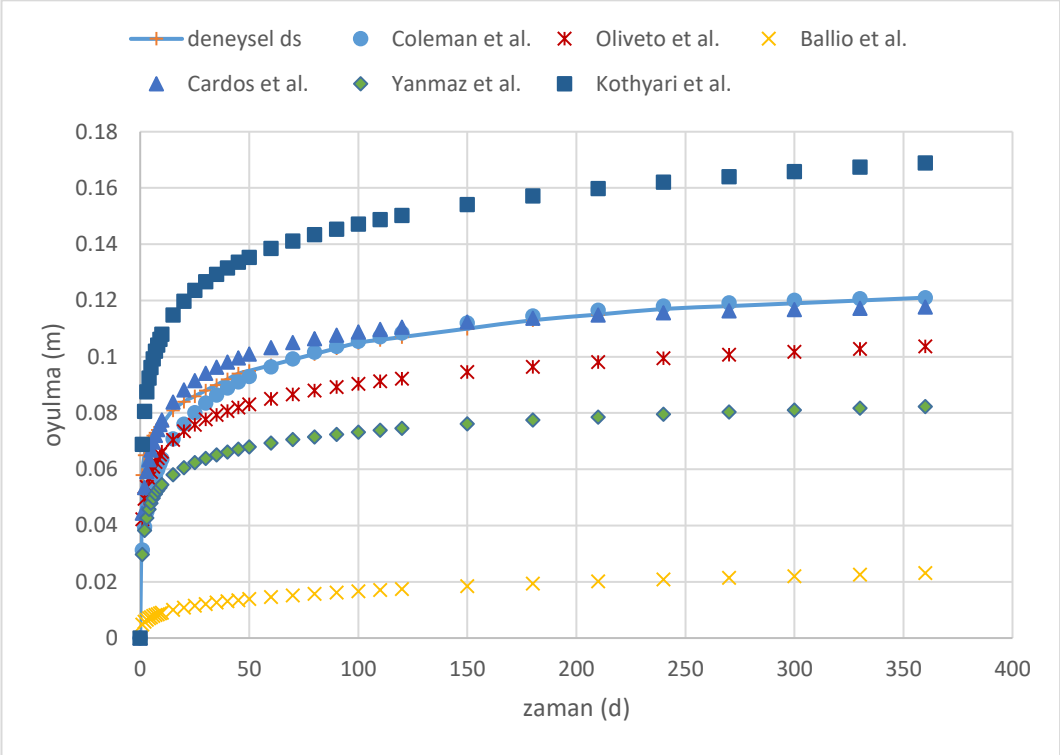
Tablo 4.5'te seçilen formüllerin 40 lt/s için zamana bağlı oyulma derinliği sonuçları verilmiştir. Sonuçlara göre en iyi temsil eden formül Oliveto vd.'nin formülü olup bunun nedeni ise dalgalanma olmaksızın deneysel verilere en yakın sonucu vermiş olmasıdır. Şekil 4.10'da seçilen formüllerin zamana bağlı oyulma derinliği sonuçları ile deneysel verilerin oyulma sonuçları arasındaki karşılaştırma verilmiştir. Korelasyon katsayısı, Oliveto vd. ve Kothyari vd.'nin formüllerinin güçlü pozitif değerlere sahip olduğunu ve determinasyon katsayısının %98 olduğunu göstermektedir. Tablo 4.6'da her bir formül için r ve r^2 değerleri verilmiştir. Ballio vd.'nin formülü diğerleriyle karşılaştırıldığında en düşük değere sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 4.6. 40 lt/s debi için korelasyon katsayısı ve determinasyon katsayısı.

	İstatistiki değer	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
r^2	$0 \rightarrow 1$	0.962	0.901	0.989	0.946	0.974	0.989
r	$-1 \rightarrow +1$	0.980	0.949	0.994	0.972	0.987	0.994

Tablo 4.7. 35 lt/s debi için formüllerin performansı.

Zaman (dk.)	Zamana bağlı oyulma derinliği (m)					
	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
1	0.04445	0.004832	0.042267	0.031341	0.029713	0.068858
2	0.053493	0.005842	0.049505	0.039503	0.038296	0.080649
3	0.05924	0.006525	0.053739	0.04492	0.042761	0.087547
4	0.063487	0.007056	0.056743	0.049051	0.045747	0.092441
5	0.066859	0.007497	0.059073	0.052414	0.047977	0.096237
6	0.069653	0.007876	0.060977	0.055263	0.049749	0.099338
7	0.072036	0.008211	0.062586	0.05774	0.051215	0.10196
8	0.07411	0.008513	0.063981	0.059933	0.052463	0.104232
9	0.075944	0.008788	0.065211	0.061904	0.053547	0.106235
10	0.077586	0.009041	0.066311	0.063694	0.054505	0.108028
15	0.083867	0.010081	0.070545	0.0708	0.05809	0.114925
20	0.088235	0.010888	0.073549	0.076017	0.060547	0.119819
25	0.091534	0.011555	0.075879	0.080137	0.062408	0.123615
30	0.094153	0.012129	0.077782	0.083534	0.063901	0.126716
35	0.096302	0.012635	0.079392	0.086418	0.065146	0.129339
40	0.098111	0.013089	0.080786	0.088917	0.066212	0.13161
45	0.09966	0.013503	0.082016	0.091116	0.067142	0.133614
50	0.101006	0.013883	0.083116	0.093076	0.067967	0.135406
60	0.103243	0.014564	0.08502	0.09644	0.069379	0.138507
70	0.105035	0.015165	0.08663	0.099241	0.070559	0.14113
80	0.106509	0.015703	0.088024	0.101626	0.07157	0.143401
90	0.107748	0.016193	0.089254	0.103688	0.072453	0.145405
100	0.108804	0.016643	0.090354	0.105494	0.073238	0.147197
110	0.109717	0.01706	0.091349	0.10709	0.073943	0.148818
120	0.110515	0.017449	0.092258	0.108512	0.074583	0.150299
150	0.112405	0.018483	0.094588	0.111978	0.076207	0.154094
180	0.113779	0.019369	0.096492	0.114572	0.077517	0.157196
210	0.114824	0.020148	0.098101	0.116554	0.078613	0.159818
240	0.115643	0.020846	0.099496	0.118081	0.079555	0.16209
270	0.116302	0.021478	0.100726	0.119247	0.080379	0.164093
300	0.116842	0.022059	0.101826	0.120112	0.081111	0.165886
330	0.117291	0.022596	0.102821	0.120707	0.08177	0.167507
360	0.11767	0.023097	0.10373	0.121	0.082369	0.168987



Şekil 4.11. 35 lt/s debi için formüllerin performansı.

Seçilen formüllerin 35 lt/s için zamana bağlı oyulma derinliği sonuçları Tablo 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.11'de zamana bağlı deneysel oyulma derinliği ile seçilen formüllerden elde edilen oyulma derinliğinin karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Oliveto vd.'nin formülü deneysel verileri en iyi şekilde temsil etmiş olup sonuçlarda dalgalanma olmaksızın en yakın sonucu vermiştir.

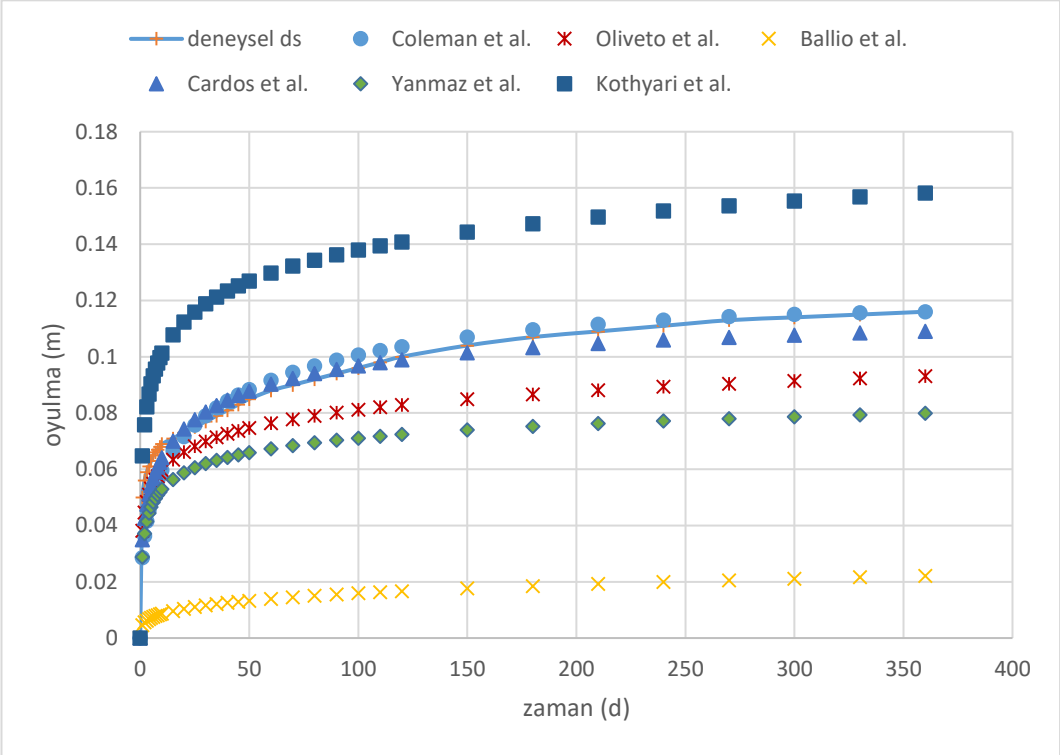
Tablo 4.8'de korelasyon katsayısı ve determinasyon katsayısı sonuçlarına yer verilmiştir. Buna göre, Oliveto vd. ve Kothyari vd.'nin formülleri 1 değerine en yakın değerlere sahip olup sonuçların %99'u deneysel verileri temsil etmektedir. Ballio vd.'nin formülü ise diğer formüllerle kıyaslandığında en düşük değere sahiptir ve diğer formüllerin deneysel verileri daha iyi temsil ettiği gözlenmiştir.

Tablo 4.8. 35 lt/s debi için korelasyon katsayısı ve determinasyon katsayısı.

	İstatistiki değer	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
r^2	$0 \rightarrow 1$	0.964	0.907	0.990	0.946	0.974	0.990
r	$-1 \rightarrow +1$	0.982	0.952	0.995	0.972	0.987	0.995

Tablo 4.9. 30 lt/s debi için formüllerin performansı.

Zaman (dk.)	Zamana bağlı oyulma derinliği (m)					
	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
1	0.035007	0.004624	0.03813	0.02862	0.028843	0.064798
2	0.042614	0.00559	0.044606	0.036375	0.037174	0.075805
3	0.047562	0.006244	0.048395	0.041555	0.041508	0.082243
4	0.051282	0.006752	0.051083	0.04552	0.044407	0.086812
5	0.054279	0.007174	0.053169	0.048758	0.046572	0.090355
6	0.056792	0.007537	0.054872	0.051506	0.048292	0.09325
7	0.058959	0.007858	0.056313	0.053899	0.049715	0.095698
8	0.060864	0.008147	0.05756	0.056022	0.050926	0.097819
9	0.062563	0.00841	0.058661	0.057931	0.051978	0.099689
10	0.064096	0.008652	0.059646	0.059668	0.052908	0.101362
15	0.070086	0.009648	0.063434	0.066577	0.056389	0.107801
20	0.07438	0.01042	0.066123	0.071666	0.058774	0.112369
25	0.077705	0.011058	0.068208	0.075694	0.06058	0.115913
30	0.080402	0.011607	0.069911	0.079021	0.062029	0.118808
35	0.082658	0.012092	0.071352	0.081849	0.063238	0.121256
40	0.084589	0.012527	0.072599	0.084302	0.064272	0.123376
45	0.086269	0.012922	0.0737	0.086464	0.065175	0.125246
50	0.087751	0.013286	0.074685	0.088391	0.065976	0.12692
60	0.090262	0.013939	0.076388	0.091702	0.067347	0.129815
70	0.092323	0.014513	0.077829	0.094464	0.068492	0.132263
80	0.094056	0.015029	0.079076	0.096817	0.069473	0.134383
90	0.095542	0.015497	0.080177	0.098853	0.070331	0.136253
100	0.096833	0.015928	0.081162	0.100637	0.071093	0.137927
110	0.097968	0.016327	0.082052	0.102215	0.071777	0.13944
120	0.098977	0.016699	0.082865	0.103621	0.072398	0.140822
150	0.101434	0.017689	0.08495	0.107052	0.073975	0.144365
180	0.103295	0.018537	0.086654	0.109622	0.075246	0.147261
210	0.104761	0.019283	0.088094	0.111588	0.07631	0.149708
240	0.105949	0.019951	0.089342	0.113102	0.077224	0.151829
270	0.106932	0.020557	0.090443	0.114259	0.078024	0.153699
300	0.10776	0.021112	0.091427	0.115118	0.078735	0.155372
330	0.108467	0.021627	0.092318	0.115709	0.079375	0.156886
360	0.109078	0.022106	0.093131	0.116	0.079956	0.158268



Şekil 4.12. 30 lt/s debi için formüllerin performansı.

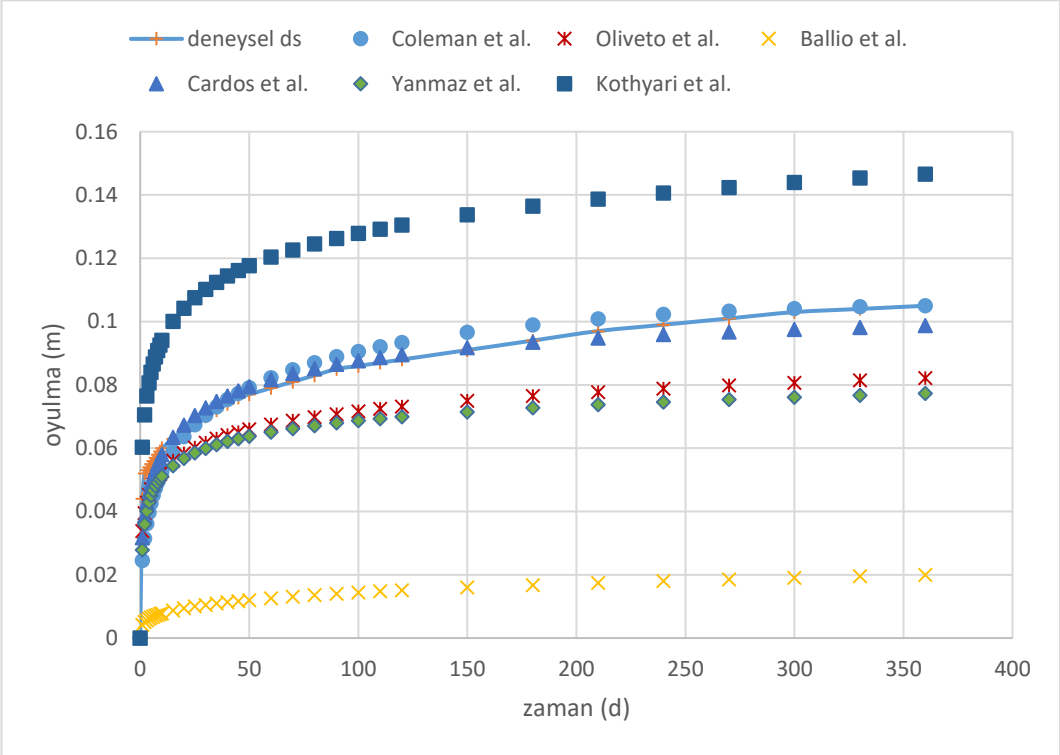
30 lt/s için elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği Tablo 4.9'da verilmiş ve elde edilen veriler ile deneysel veriler arasındaki karşılaştırma Şekil 4.12'de sunulmuştur. Oliveto vd.'nin formülü deneysel veriyi çok iyi düzeyde temsil etmektedir ve dalgalanma olmaksızın deneysel veriye en yakın sonucu vermiştir. Tablo 4.10'da korelasyon katsayısı ve determinasyon katsayısına yer verilmiştir. Buna göre, Oliveto vd. ve Kothyari vd.'nin formülleri 1 değerine en yakın r^2 değerine sahiptir ve sonuçların %97'si deneysel verileri temsil etmektedir. Ballio vd.'nin 'nin formülü ise diğer formüllerle kıyaslandığında en düşük değere sahiptir ve diğer formüllerin değerleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.10. 30 lt/s debi için korelasyon katsayısı ve determinasyon katsayısı.

	İstatistiki değer	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
r^2	$0 \rightarrow 1$	0.959	0.944	0.976	0.950	0.956	0.976
r	$-1 \rightarrow +1$	0.979	0.972	0.988	0.974	0.978	0.988

Tablo 4.11. 25 lt/s debi için formüllerin performansı.

Zaman (dk.)	Zamana bağlı oyulma derinliği (m)					
	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
1	0.031687	0.004184	0.033834	0.024531	0.027879	0.060368
2	0.038573	0.005059	0.039528	0.031471	0.035932	0.070527
3	0.043052	0.00565	0.042859	0.03614	0.040121	0.076469
4	0.046419	0.00611	0.045222	0.039729	0.042923	0.080686
5	0.049132	0.006492	0.047055	0.042669	0.045016	0.083956
6	0.051407	0.00682	0.048552	0.04517	0.046678	0.086628
7	0.053368	0.007111	0.049819	0.047352	0.048054	0.088888
8	0.055092	0.007372	0.050915	0.049291	0.049224	0.090845
9	0.05663	0.00761	0.051883	0.051038	0.050241	0.092571
10	0.058018	0.007829	0.052748	0.052629	0.05114	0.094115
15	0.06344	0.00873	0.056079	0.058974	0.054504	0.100058
20	0.067326	0.009428	0.058442	0.063665	0.056809	0.104274
25	0.070336	0.010006	0.060275	0.067386	0.058555	0.107544
30	0.072777	0.010503	0.061773	0.070466	0.059957	0.110217
35	0.07482	0.010942	0.063039	0.073088	0.061124	0.112476
40	0.076567	0.011335	0.064136	0.075365	0.062124	0.114433
45	0.078088	0.011693	0.065103	0.077374	0.062997	0.116159
50	0.07943	0.012022	0.065969	0.079167	0.063771	0.117703
60	0.081703	0.012613	0.067467	0.08225	0.065096	0.120376
70	0.083568	0.013133	0.068733	0.084825	0.066203	0.122635
80	0.085137	0.013599	0.06983	0.087021	0.067151	0.124592
90	0.086482	0.014023	0.070797	0.088923	0.067981	0.126318
100	0.08765	0.014413	0.071663	0.090591	0.068717	0.127862
110	0.088678	0.014774	0.072446	0.092067	0.069378	0.129259
120	0.089591	0.015111	0.07316	0.093384	0.069979	0.130534
150	0.091815	0.016007	0.074993	0.096598	0.071502	0.133805
180	0.0935	0.016774	0.076491	0.099008	0.072732	0.136477
210	0.094827	0.017449	0.077757	0.100854	0.07376	0.138736
240	0.095902	0.018053	0.078854	0.102276	0.074643	0.140693
270	0.096792	0.018601	0.079822	0.103363	0.075417	0.14242
300	0.097541	0.019104	0.080687	0.104171	0.076104	0.143964
330	0.098181	0.01957	0.08147	0.104726	0.076722	0.145361
360	0.098734	0.020003	0.082185	0.105	0.077284	0.146636



Şekil 4.13. 25 lt/s debi için formüllerin performansı.

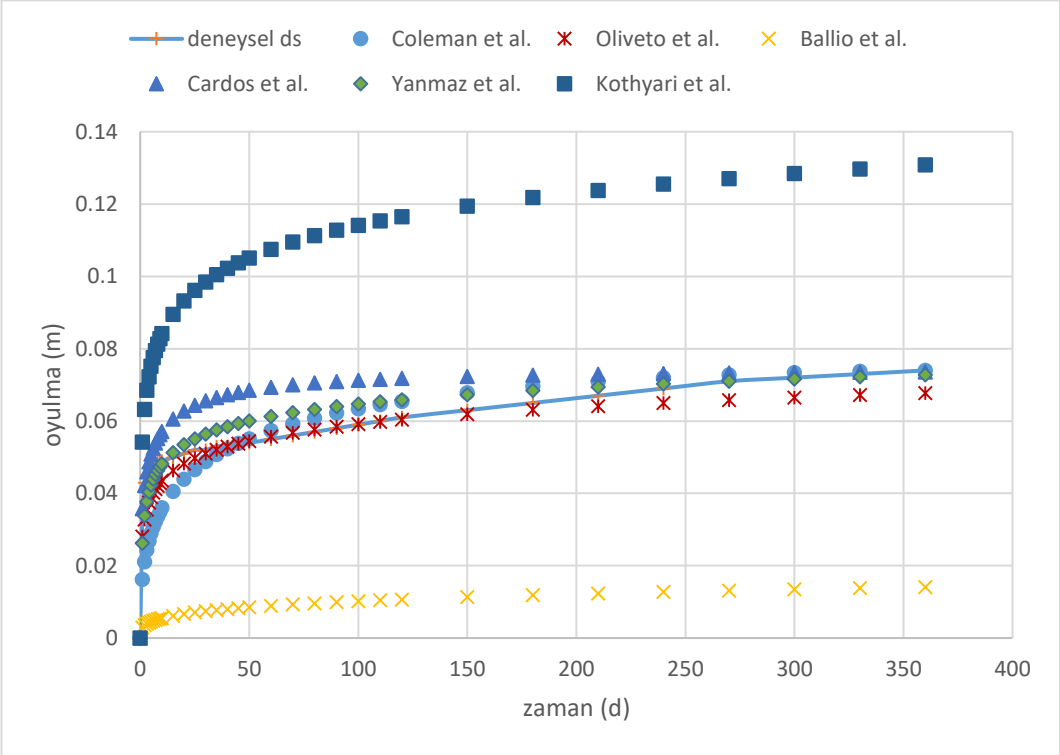
25 lt/s için seçilen formüllerin elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği Tablo 4.11'de verilmiş ve elde edilen veriler ile deneysel veriler arasındaki karşılaştırma Şekil 4.13'te sunulmuştur. Oliveto vd.'nin formülü deneysel veriyi güçlü biçimde temsil etmektedir ve deneysel veriye en yakın sonucu vermiştir. Tablo 4.12'de korelasyon katsayısı ve determinasyon katsayısına yer verilmiştir. Buna göre, Oliveto vd. ve Kothyari vd.'nin formülleri 1 değerine en yakın değere sahiptir ve sonuçların %97'si deneysel verileri temsil etmektedir.

Tablo 4.12. 25 lt/s debi için korelasyon katsayısı ve determinasyon katsayısı.

	İstatistiki değer	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
r^2	$0 \rightarrow 1$	0.963	0.950	0.978	0.952	0.958	0.978
r	$-1 \rightarrow +1$	0.981	0.974	0.989	0.976	0.978	0.989

Tablo 4.13. 20 lt/s debi için formüllerin performansı.

Zaman (dk.)	Zamana bağlı oyulma derinliği (m)					
	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
1	0.035797	0.00296	0.028104	0.016257	0.026248	0.05425
2	0.042139	0.003579	0.032775	0.021077	0.033831	0.063267
3	0.04598	0.003997	0.035508	0.024345	0.037774	0.068542
4	0.04872	0.004323	0.037447	0.02687	0.040413	0.072285
5	0.050832	0.004592	0.038951	0.028946	0.042383	0.075188
6	0.052539	0.004825	0.04018	0.030717	0.043948	0.07756
7	0.053962	0.00503	0.041219	0.032266	0.045243	0.079565
8	0.055176	0.005215	0.042119	0.033644	0.046345	0.081302
9	0.05623	0.005383	0.042912	0.034888	0.047303	0.082835
10	0.057157	0.005538	0.043623	0.036022	0.048149	0.084205
15	0.06056	0.006176	0.046355	0.04056	0.051317	0.08948
20	0.062782	0.00667	0.048294	0.043928	0.053487	0.093223
25	0.064376	0.007078	0.049798	0.046608	0.055131	0.096126
30	0.065586	0.00743	0.051027	0.04883	0.05645	0.098498
35	0.066541	0.00774	0.052066	0.050725	0.05755	0.100503
40	0.067317	0.008018	0.052966	0.052374	0.058491	0.102241
45	0.06796	0.008271	0.05376	0.05383	0.059313	0.103773
50	0.068503	0.008504	0.05447	0.055131	0.060042	0.105144
60	0.069368	0.008922	0.055698	0.05737	0.061289	0.107516
70	0.070028	0.009289	0.056737	0.059244	0.062331	0.109521
80	0.070546	0.009619	0.057637	0.060843	0.063224	0.111258
90	0.070964	0.009919	0.058431	0.06223	0.064005	0.112791
100	0.071308	0.010195	0.059141	0.063447	0.064698	0.114161
110	0.071594	0.01045	0.059784	0.064525	0.065321	0.115401
120	0.071836	0.010688	0.06037	0.065487	0.065886	0.116533
150	0.072375	0.011322	0.061874	0.067839	0.067321	0.119436
180	0.072737	0.011864	0.063103	0.069604	0.068478	0.121808
210	0.072992	0.012341	0.064142	0.070957	0.069447	0.123814
240	0.073179	0.012769	0.065042	0.072	0.070278	0.125551
270	0.073321	0.013156	0.065835	0.072798	0.071006	0.127083
300	0.073431	0.013512	0.066545	0.073391	0.071654	0.128454
330	0.073517	0.013841	0.067188	0.073799	0.072236	0.129694
360	0.073587	0.014147	0.067774	0.074	0.072764	0.130826



Şekil 4.14. 20 lt/s debi için formüllerin performansı.

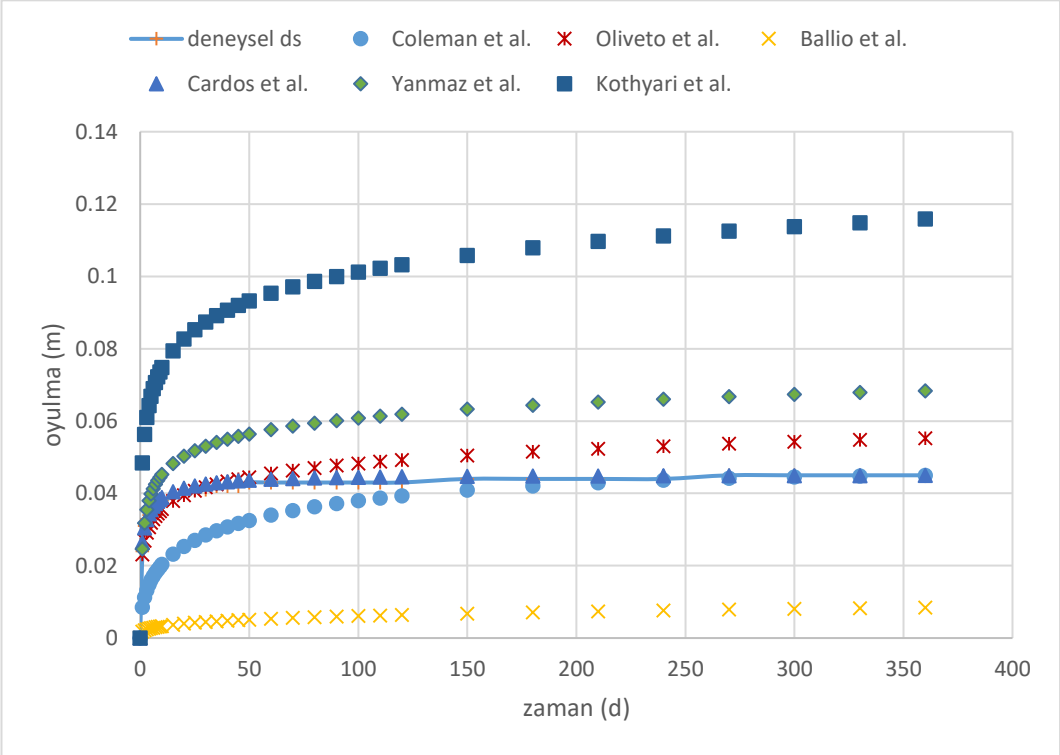
20 lt/s için seçilen formüllerin elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği Tablo 4.13'te verilmiş ve elde edilen veriler ile deneysel veriler arasındaki karşılaştırma Şekil 4.14'te sunulmuştur. Oliveto vd.'nin formülü deneysel veriyi güçlü biçimde temsil etmektedir ve deneysel veriye en yakın sonucu vermiştir. Tablo 4.14'de korelasyon katsayısı ve determinasyon katsayısına yer verilmiştir. Buna göre, Oliveto vd. ve Kothyari vd.'nin formüllerinin sonuçların %93'ü deneysel verileri temsil etmektedir. Coleman vd.'nin formülü ise diğerlerine kıyasla en düşük değere sahiptir.

Tablo 4.14. 20 lt/s debi için korelasyon katsayısı ve determinasyon katsayısı.

	İstatistiki değer	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
r^2	$0 \rightarrow 1$	0.877	0.834	0.938	0.825	0.920	0.938
r	$-1 \rightarrow +1$	0.936	0.913	0.968	0.908	0.959	0.968

Tablo 4.15. 15 lt/s debi için formüllerin performansı.

Zaman (dk.)	Zamana bağlı oyulma derinliği (m)					
	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
1	0.026509	0.001773	0.023109	0.008505	0.024675	0.048417
2	0.030515	0.002144	0.026899	0.011314	0.031803	0.056359
3	0.032815	0.002395	0.029117	0.013257	0.035511	0.061004
4	0.034389	0.00259	0.03069	0.014777	0.037991	0.064301
5	0.035564	0.002752	0.03191	0.016036	0.039843	0.066857
6	0.036487	0.002891	0.032907	0.017118	0.041314	0.068946
7	0.037238	0.003014	0.03375	0.018069	0.042532	0.070713
8	0.037864	0.003125	0.03448	0.018919	0.043568	0.072243
9	0.038396	0.003226	0.035124	0.019689	0.044468	0.073592
10	0.038855	0.003319	0.035701	0.020394	0.045264	0.074799
15	0.040464	0.003701	0.037918	0.023236	0.048241	0.079445
20	0.041443	0.003997	0.039491	0.025365	0.050282	0.082741
25	0.042106	0.004242	0.040712	0.027071	0.051827	0.085298
30	0.042584	0.004453	0.041709	0.028493	0.053067	0.087387
35	0.042946	0.004639	0.042552	0.029711	0.054101	0.089153
40	0.043228	0.004806	0.043282	0.030774	0.054985	0.090683
45	0.043454	0.004958	0.043926	0.031716	0.055758	0.092033
50	0.043637	0.005098	0.044502	0.03256	0.056443	0.09324
60	0.043918	0.005348	0.045499	0.034017	0.057616	0.095329
70	0.04412	0.005569	0.046342	0.03524	0.058595	0.097095
80	0.044271	0.005767	0.047072	0.036287	0.059435	0.098625
90	0.044387	0.005947	0.047717	0.037197	0.060169	0.099975
100	0.044478	0.006112	0.048293	0.037998	0.060821	0.101182
110	0.044552	0.006265	0.048814	0.038708	0.061406	0.102274
120	0.044611	0.006408	0.04929	0.039343	0.061937	0.103271
150	0.044736	0.006789	0.05051	0.040899	0.063286	0.105828
180	0.044812	0.007114	0.051507	0.04207	0.064374	0.107917
210	0.044861	0.007401	0.05235	0.04297	0.065284	0.109683
240	0.044895	0.007657	0.05308	0.043665	0.066066	0.111213
270	0.044918	0.00789	0.053725	0.044197	0.066751	0.112563
300	0.044935	0.008104	0.054301	0.044593	0.067359	0.11377
330	0.044948	0.008301	0.054822	0.044865	0.067906	0.114862
360	0.044958	0.008486	0.055298	0.045	0.068403	0.115859



Şekil 4.15. 15 lt/s debi için formüllerin performansı.

15 lt/s için elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği Tablo 4.15'te verilmiş ve elde edilen veriler ile deneysel veriler arasındaki karşılaştırma Şekil 4.15'te sunulmuştur. Cardos vd.'nin formülü deneysel veriyi güçlü biçimde temsil etmektedir. Tablo 4.16'da korelasyon katsayısı ve determinasyon katsayısına yer verilmiştir. Buna göre, Cardos vd.'nin formülü en yüksek değere sahiptir, daha sonrasında sırayla Yanmaz vd., Oliveto vd. ve Kothyari vd. gelmektedir. Bu sonuçlara göre, Cardos vd.'nin formülü Oliveto vd. ve Kothyari vd.'nin formüllerinin aksine, düşük debiler için güçlü sonuçlar vermektedir. Oliveto vd. ve Kothyari vd.'nin formülleri düşük debiler için istikrarsız sonuçlar vermektedir. Diğer formüller ise düşük boşaltım düzeylerinde Cardos vd., Oliveto vd. ve Kothyari vd. ile kıyaslandığında zayıf sonuçlar vermiştir.

Tablo 4.16. 15 lt/s debi için korelasyon katsayısı ve determinasyon katsayısı.

	İstatistiki değer	Cardos vd.	Ballio vd.	Oliveto vd.	Coleman vd.	Yanmaz vd.	Kothyari vd.
r^2	$0 \rightarrow 1$	0.994	0.614	0.878	0.673	0.889	0.878
r	$-1 \rightarrow +1$	0.997	0.784	0.937	0.820	0.943	0.937

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Köprü ayaklarında oluşan zamana bağlı oyulmaların derinlikleri ile ilgili altı formül, deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. debi miktarındaki değişimlerin formüllerin performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, seçilen formüller farklı debi değerlerinde deneysel veriler kullanılarak uygulanmıştır.

İstatistiki test olarak korelasyon katsayısı ve determinasyon katsayısı kullanılmıştır. Zamana bağlı deneysel oyulma derinliği ile seçilen formüllerden elde edilen zamana bağlı oyulma derinliği arasındaki ilişkinin kuvvetini ve yönünü ölçmek amacıyla korelasyon katsayısı kullanılmıştır. Deneysel veriler ile açıklanan zamana bağlı oyulma derinliğinin yüzdesini göstermek amacıyla da determinasyon katsayısından yararlanılmıştır.

Oyulma derinliği formüllerinin sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre Kothyari vd.'nin formülü tüm debi değerlerinde deneysel veri hattının üzerinde en uzak değerleri veren formül, Ballio vd.'nin formülü ise tüm debi değerlerinde deneysel veri hattının altında en uzak değerleri veren formül olduğu tespit edilmiştir.

Cardos vd.'nin formülü ise 45, 40, 35, 30, 25 ve 20 lt/s değerlerinde deneysel verilere yakın sonuç vermiştir. Ancak, yine de formül sonuçları ile deneysel veriler arasında farklılıklar gözlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, aynı debi değerlerinde deneysel verilerin üzerinde ve altında sonuçlar vermiştir. En küçük debi değeri olan 15 lt/s düzeyinde ise deneysel verilere çok yakın sonuç verdiği görülmüştür. Bu durum, bu formülün en küçük debi değerlerinde sonuç verdiği şeklinde yorumlanmıştır.

Coleman vd.'nin sonucu da 45, 40, 35, 30, 25 ve 20 lt/s değerlerinde deneysel verilere yakın olmakla birlikte deneysel verilerden farklılıklar gözlenmiştir. Bu debi değerlerinde ilk zaman periyodunda deneysel verinin altında sonuçlar verirken, ikinci zaman periyodunda ise deneysel verinin üzerinde değerler verdiği gözlenmiş olup; bu durum15 lt/s için farklı gerçekleşmiştir. 15 lt/s için, zaman periyodunun tamamı boyunca deneysel verinin altında sonuçlar vermiştir. Dolayısıyla, bu formülün deneysel verileri yeterli ölçüde temsil etmediği sonucuna varılmıştır.

Yanmaz vd., (2006) formülü 45, 40, 35, 30 ve 25 It/s değerlerinde deneysel verilerin altında sonuçlar verirken 20 ve 15 lt/s değerlerinde deneysel verilerin üzerinde sonuç vermiştir. Ancak bu sonuçların tüm debi değerlerinde deneysel verilerden bir miktar uzak olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla, bu formülün de deneysel verileri yeterli ölçüde temsil etmediği sonucuna varılmıştır.

Oliveto vd.'nin formülü ise deneysel verilerle en yüksek uyum sağlayan formül olmuştur. Formülün sonuçları deneysel verilere son derece yakın olup hiçbir debi değerinde farklılık gözlenmemiştir. Ancak sadece 15 lt/s değerinde deneysel verilerin üzerinde sonuç gözlenmiştir. Bu durum formülün 45, 40, 35, 30, 25 ve 20 lt/s değerlerinde en iyi sonuçları verdiği şeklinde yorumlanmıştır. Bunun nedeni ise Oliveto vd.'nin formülünün temelde u/uc şeklinde hesaplanan eşik Froude sayısına (Ft) dayalı olmasıdır. Yaptıkları deneylerde Oliveto vd. (2002) farklı bir seriden (Ft) yararlanmış ve sadece $0.62< Ft < 1.25$ aralığında Froude sayısı ile iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Diğer seri (Ft) ise daha ılımlı bir tahmin ortaya koymuştur. Köse'nün deneysel verilerine göre Ft (u/uc), $0.6 < Ft < 0.77$şeklinde hesaplanmış ve $Ft = 0.6$ olarak alındığında formülün iyi bir tahmin ortaya koyamadığı aktarılmıştır. Bu durum (Ft) faktörünün formülün sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği şeklinde yorumlanmıştır.

Diğer bir sebep olarak ise deneylerde N şekil faktörünün etkilerinin ayrı ayrı değerlendirilmesidir. Yani, dairesel köprü ayağı için N=1 olarak alınırken dikdörtgen biçimindeki ayaklar için N=1.25 olarak alınmıştır. Ayrıca (L_R) geometri faktörünün etkisi de aynı şekilde dikdörtgen ayak için (b^2 h)1/3 olarak, dairesel ayak için ise (D^2 h)1/3 olarak alınmıştır. Referans süresi ise (t) yerine $t_R = L_R/[\ \sigma g1/3\ (g'\ .\ d_{50})0.5]$ olarak alınmıştır. Kothyari vd.'nin (2007) formülünde tüm debi değerlerinde L_R ve t_R olarak kullanılmasının r ve r^2 değerleri ile tamamen aynı değerleri verdiği aktarılmıştır.

Korelasyon katsayısı sonuçlarına göre, tüm formüllerin güçlü ve pozitif değerlere sahip olduğu gözlenmiş ve determinasyon katsayısı sonuçlarına göre tüm formüllerin deneysel verileri iyi biçimde temsil ettiği görülmüştür. Oliveto vd. ve Kothyari vd., (2007) formüllerinin diğer formüllere kıyasla deneysel verilerle en yüksek uyumu sağlayan formüller olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, gelecekte yapılacak çalışmalar için birtakım öneriler getirilmiştir. Bu önerilerden biri, formül sonuçlarının başka deneysel verilerle ve saha verileriyle karşılaştırılmasıdır. Ayrıca, farklı debi değerleri kullanılarak formül sonuçlarının karşılaştırılması da önerilmektedir. Farklı şekiller kullanılarak formüllerin karşılaştırılması ve köprü kenar ayağında meydana gelen oyulmaların derinliği için bir formül geliştirilmesi de öneriler arasındadır.

KAYNAKLAR

Ahmad, M., 1953. Experiments on design and behavior of spurdikes, Proceedings of IAHR Conference.

Abdul, K., Barbhuiya ve Dey, S., 2004. Local scour at abutments: A review. Sadhana, 29, 5, 449-476.

Ballio, F. ve Orsi, E., 2001. Time evolution of scour around bridge abutments. Water Engineering Research, 2, 4, 243-259.

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

Chabert, J. ve Engeldinger, P., 1956. Study of scour around bridge piers. Rep. Prepared for the Laboratoire National d'Hydraulique.

Cardoso, A. H. ve Bettess, R., 1999. Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments. Journal of Hydraulic Engineering, 125, 4, 388-399.

Cunha, D. L., 1975, July. Time evolution of local scour. In Proc. 16th Conf. Int. Assoc. Hydraulic Research (Delft: IAHR), 285-299.

Coleman, S. E., Lauchlan, C. S. ve Melville, B. W., 2003. Clear-water scour development at bridge abutments. Journal of Hydraulic Research, 41, 5, 521-531.

Dey, S. ve Barbhuiya, A. K., 2004, June. Clear water scour at abutments. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 157, 2, 77-97.

Dongol, D. M. S. ve Melville, B. W., 1994. Local scour at bridge abutments. Department of Civil Engineering, University of Auckland.

Ettema, R., Nakato, T. ve Muste, M., 2010. Estimation of scour depth at bridge abutments. National Cooperative Highway Research Program, Final Rep. for NCHRP Project, 24, 20.

Ettema, R., 1980. Scour at bridge piers. Rep. No. 216. Auckland: School of Eng., Univ. of Auckland.

Froehlich, D. C., 1989. Local scour at bridge abutments. In Proceedings of the 1989 national conference on hydraulic engineering, 13-18.

Fael, C. M. S., Simarro-Grande, G., Martín-Vide, J. P. ve Cardoso, A. H., 2006. Local scour at vertical-wall abutments under clear-water flow conditions. Water resources research, 42, 10.

Garde, R. J., Subramanya, K. S. ve Nambudripad, K. D., 1961. Study of scour around spur-dikes. Journal of the Hydraulics Division, 87, 6, 23-37.

Gill, M. A., 1972. Erosion of sand beds around spur dikes. Journal of the Hydraulics Division, 98, 9.

Ghani, A. A. ve Mohammadpour, R., 2016. Temporal variation of clear-water scour at compound Abutments. Ain Shams Engineering Journal, 7, 4, 1045-1052.

Hancu, S., 1971. Sur le calcul des affouillements locaux dams la zone des piles des ponts. In Proceedings of the 14th IAHR Congress, Paris, France, 3, 299-313.

Husain, D., Quraishi, A. A. ve ALIBRAHIM, A., 1998. Local scour at bridge abutments. Engineering Sciences, 10, 1.

Johnson, P. A., 1995. Comparison of pier-scour equations using field data. Journal of Hydraulic Engineering, 121, 8, 626-629.

Jones, J. S., 1984. Comparison of prediction equations for bridge pier and abutment scour. Transportation research record, 950.

Kothyari, U. C., Hager, W. H. ve Oliveto, G., 2007. Generalized approach for clear-water scour at bridge foundation elements. Journal of hydraulic Engineering, 133, 11, 1229-1240.

Kothyari, U. C. ve Ranga Raju, K. G., 2001. Scour around spur dikes and bridge abutments. Journal of hydraulic research, 39, 4, 367-374.

Kothyari, U. C., Garde, R. C. J. ve Ranga Raju, K. G., 1992. Temporal variation of scour around circular bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, 118, 8, 1091-1106.

Kandasamy, J. K. ve Melville, B. W., 1998. Maximum local scour depth at bridge piers and abutments. Journal of hydraulic research, 36, 2, 183-198.

Kandasamy, J. K., 1989. Abutment scour. Rep. No. 458, School of Engineering.

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.

Köse, Ö., 2007. Analytical and Experimental Investigation of Temporal Variation of Clear Water Scour Depth at Bridge Abutments. Thesis presented to Middle East Technical University, Ankara, Turkey, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, ODTÜ.

Laursen, E. M., 1960. Scour at bridge crossings: Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, 86, 5, 118-135.

Laursen, E. M., 1963. An analysis of relief bridge scour. Journal of the Hydraulics Division, 89, 3, 93-118.

Landers, M. N. ve Mueller, D. S., 1996. Evaluation of selected pier-scour equations using field data. Transportation research record, 1523, 1, 186-195.

Laursen, E. M., 1952. Observations on the nature of scour. Proceedings of 5th Hydrauric Conference., state University of Iowa. Bulletin, 34, 179-197.

Lim, S. Y., 1997. Equilibrium clear-water scour around an abutment. Journal of Hydraulic Engineering, 123, 3, 237-243.

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., 1997. Pier and abutment scour: integrated approach. Journal of hydraulic Engineering, 123, 2, 125-136.

Melville, B. W., 1995. Bridge abutment scour in compound channels. Journal of Hydraulic Engineering, 121, 12, 863-868.

Melville, B. W., Ettema, R. ve Nakato, T., 1993. Flow Problems at Water Intake Pump Sumps–A Review. EPRI Research Project RP3456-01 Final Report, IIHR, The University of Iowa, Iowa City, IA, USA.

Melville, B. W., 1992. Local scour at bridge abutments. Journal of Hydraulic Engineering, 118, 4, 615-631.

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

Mueller, D. S. ve Wagner, C. R., 2005. Field observations and evaluations of streambed scour at bridges, FHWA-RD, 3-52.

Macky, G. H., 1990. Survey of roading expenditure due to scour, Department of Scientific and Industrial Research, Hydrology Centre, Christchurch, New Zealand.

Mia, M. F. ve Nago, H., 2003. Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier. Journal of Hydraulic Engineering, 129, 6, 420-427.

Mohammadpour, R., Ghani, A. A. ve Azamathulla, H.M., 2013. Estimation of dimension and time variation of local scour at short abutment. International journal of river basin management, 11, 1, 121-135.

Mohamed, T. A., Pillai, S., Noor, M. J. M. M., Ghazali, A. H., Huat, B. K. ve Yusuf, B., 2006. Validation of some bridge pier scour formulae and models using field data. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 19, 1, 31-40.

Neill, C. R., 1973. Guide to bridge hydraulics. Thomas Telford.

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.

Ramu, K. L. V., 1964. Effect of sediment size on scour. ME Thesis, University of Rooikee.

Raudkivi, A. J. ve Ettema, R., 1983. Clear-water scour at cylindrical piers. Journal of Hydraulic Engineering, 109, 3, 338-350.

Richardson, J. R. ve Richardson, E. V., 1993. The fallacy of local abutment scour equations. In Hydraulic Engineering, ASCE, 749-754.

Richardson, E. V., Simons, D. B. ve Lagasse, P. F., 2001. River engineering for highway encroachments: Highways in the river environment. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute.

Richardson, J. R. ve Wacker, A. M., 1991. Bridge scour and stream instability countermeasures. In Hydraulic Engineering, ASCE, 317-322.

Robert, E., Melville, B. W. ve Constantinescu, G., 2011. Evaluation of bridge scour research: Pier scour processes and predictions. Washington, DC, USA: Transportation Research Board of the National Academies.

Sutherland, A. J., 1986. Reports on bridge failure. RRU Occasional Paper, National Roads Board, Wellington, New Zealand.

Shen, H. W., Schneider, V. R. ve Karaki, S., 1969. Local scour around bridge piers. Journal of the Hydraulics Division.

Sturm, T. W., Melville, B. W. ve Ettema, R., 2011. Evaluation of Bridge-Scour Research, Abutment and Contraction Scour Processes and Prediction. National Academies Press.

Sturm, T. W., Williams, S., Biglari, B., Hughes, P., Campbell, J. ve Chrisochoides, A., 2004. Enhanced abutment scour studies for compound channels. Georgia Institute of Technology.

Tey, C. B., Raudkivi, A. J. ve Melville, B. W., 1984. Local Scour at Bridge Abutments: A Report Submitted to the Roard [ie Road] Research Unit of the National Roads Board. Department of Civil Engineering, University of Auckland.

Wong, W. H., 1982. Scour at bridge abutments. Rep. No. 275, School of Engineering, University of Auckland, New Zealand.

Wagner, C. R., Mueller, D. S., Parola, A. C., Hagerty, D. J. ve Benedict, S. T., 2006. Scour at contracted bridges. NCHRP Web-Only Document, 83.

Yang, C. T., Molinas, A. ve Wu, B., 1996. Sediment transport in the Yellow River. Journal of Hydraulic Engineering, 122, 5, 237-244.

Yanmaz, A. M., 2002. Dynamic reliability in bridge pier scouring. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 26, 4, 367-376.

Yanmaz, A. M. ve Kose, O., 2006. Time-wise variation of scouring at bridge abutments. Sadhana, 32, 3, 199-213.

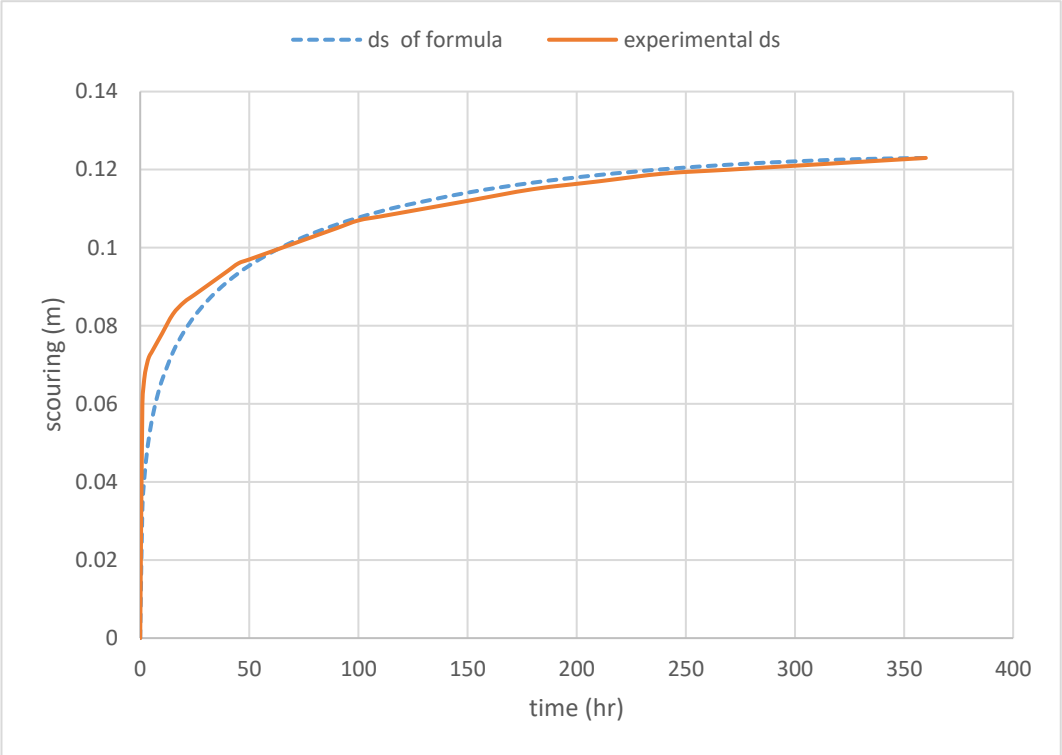
Yanmaz, A. M., 2002. Köprü hidroliği. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık.

Yanmaz, A. M. ve Altinbilek, H. D. G. A., 1991. Study of time-depenbent local scour around bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, 117, 10, 1247-1268.

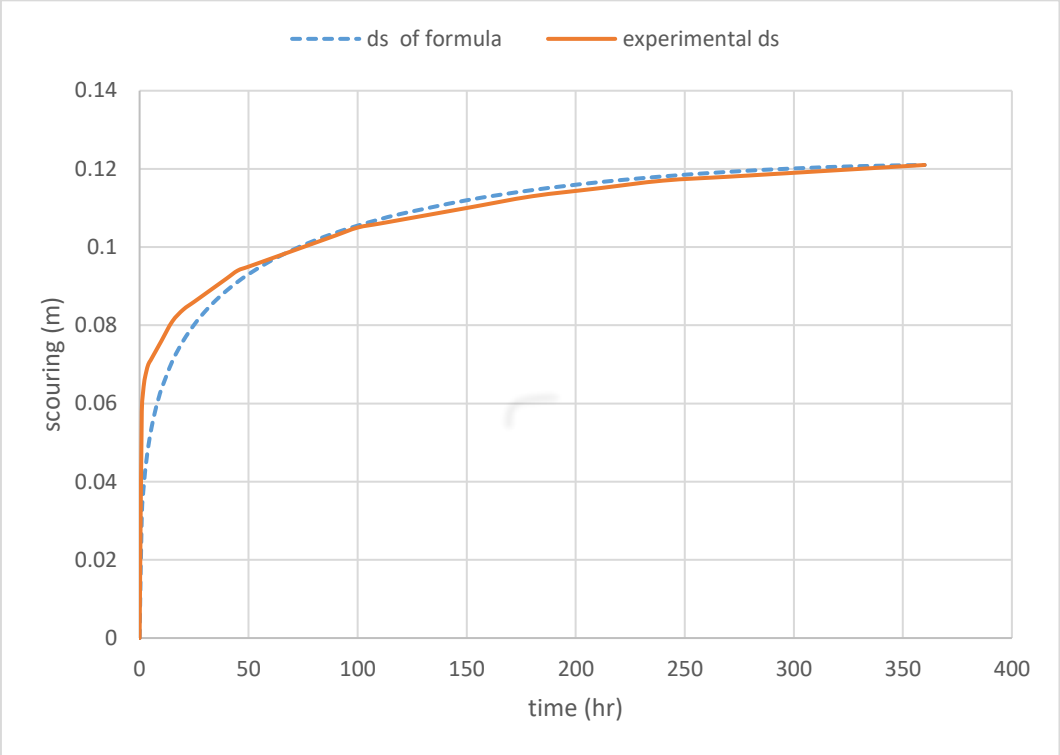
Zaghloul, N. A., 1983. Local scour around spur-dikes. Journal of Hydrology, 60, 4, 123-140.

EKLER

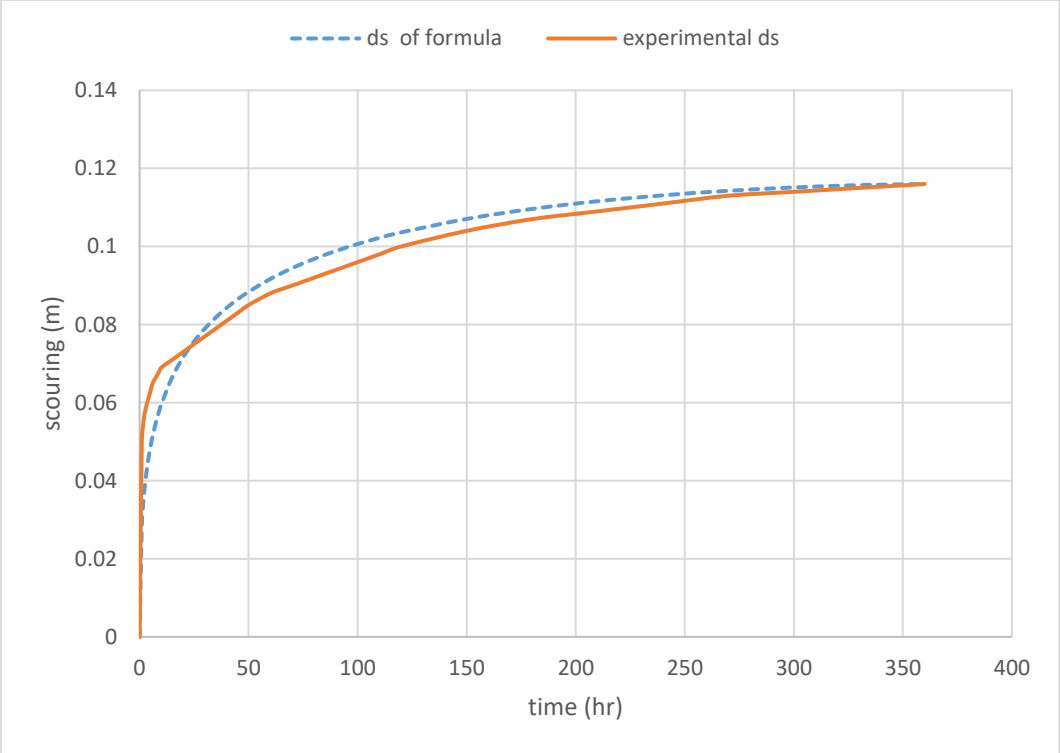
EK A. Formüler ile deneysel verilerin karşılaştırılması



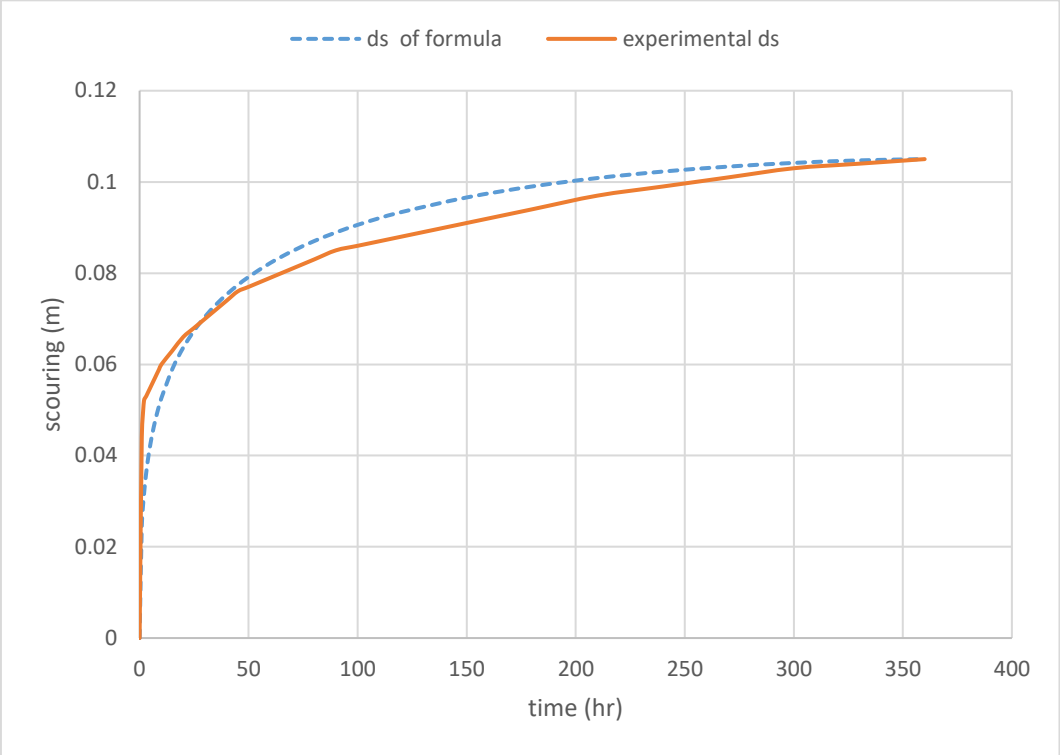
Şekil A.1. Coleman vd.'nin formülü ile 40 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



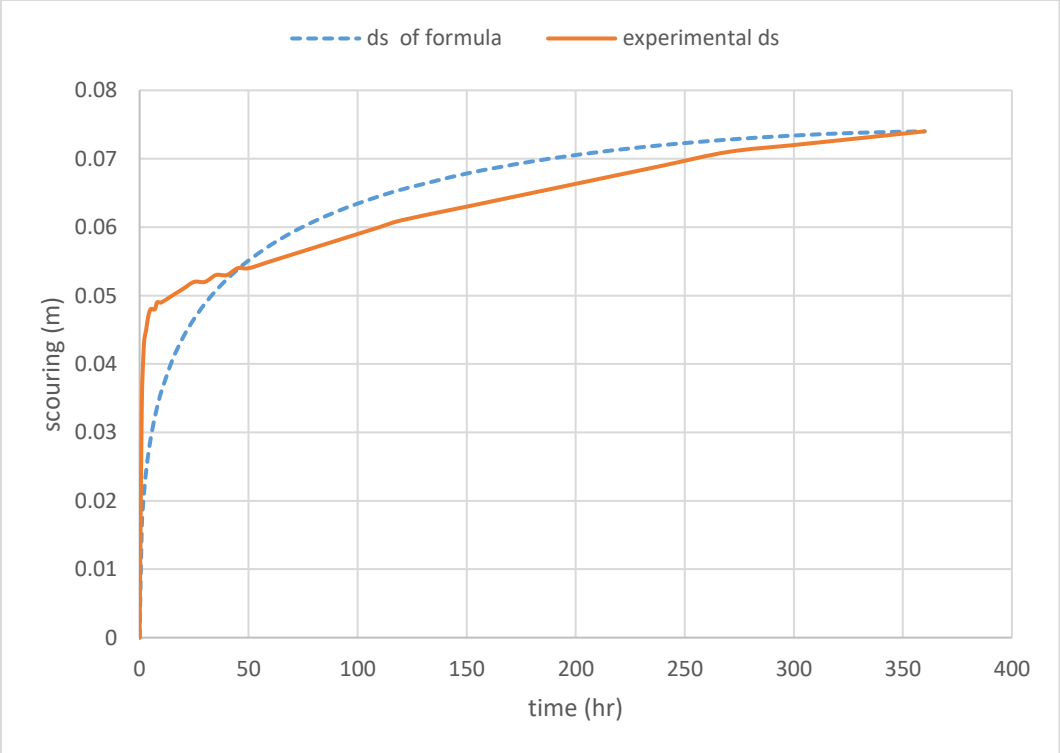
Şekil A.2. Coleman vd.'nin formülü ile 35 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



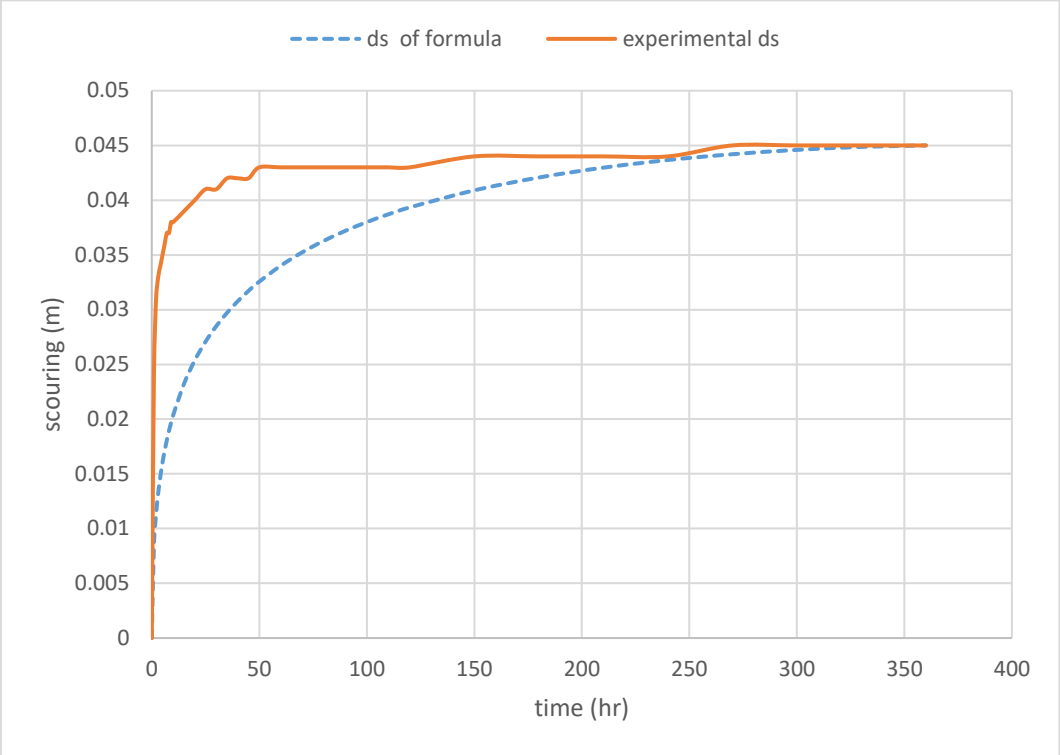
Şekil A.3. Coleman vd.'nin formülü ile 30 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



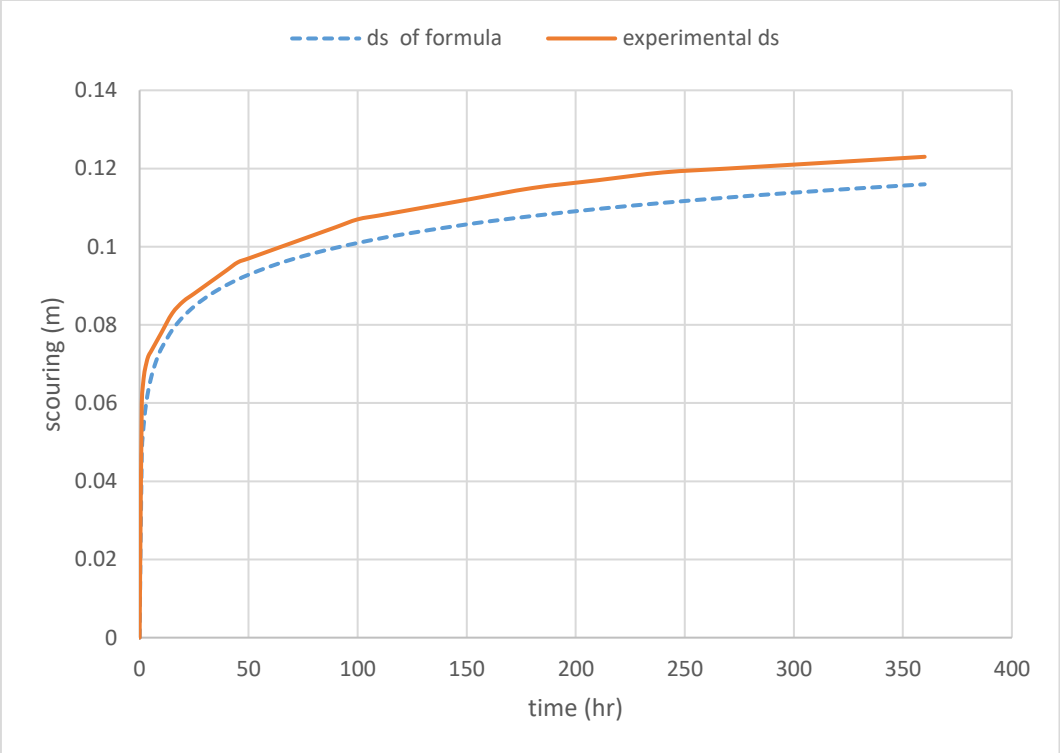
Şekil A.4. Coleman vd.'nin formülü ile 25 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



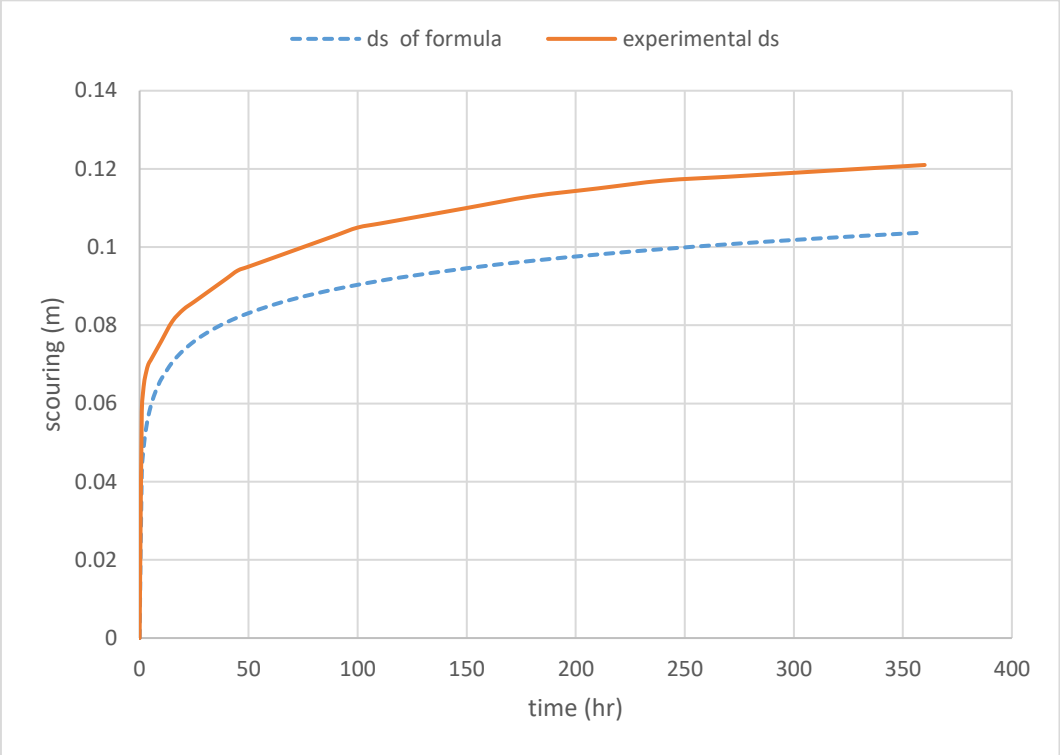
Şekil A.5. Coleman vd.'nin formülü ile 20 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



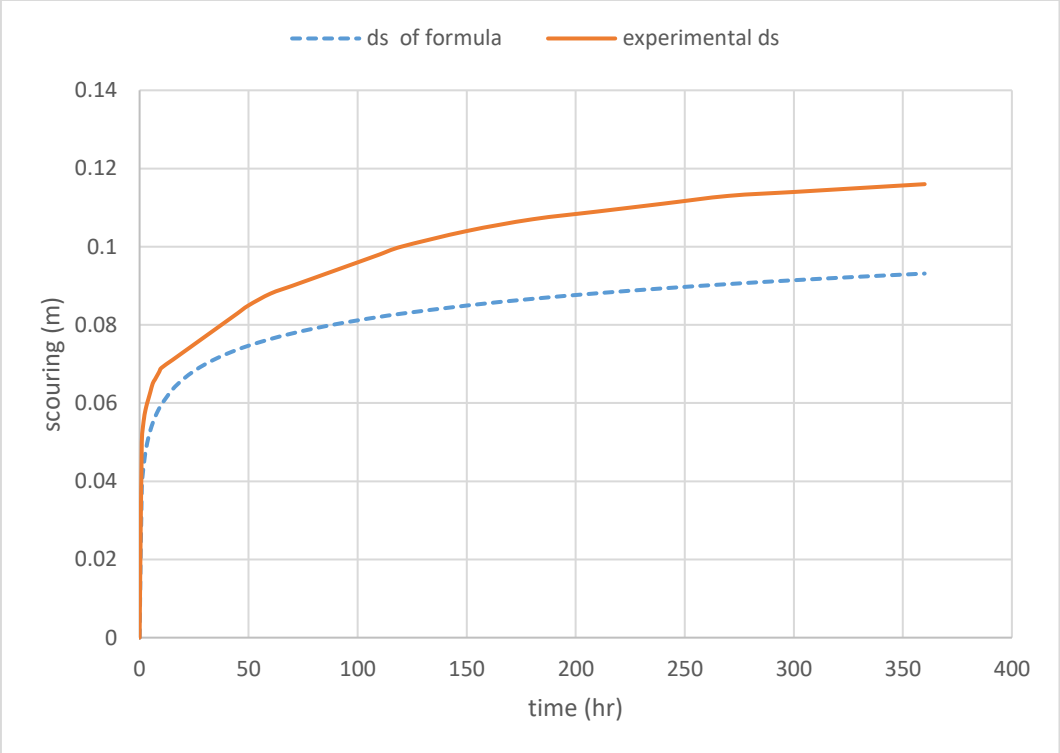
Şekil A.6. Coleman vd.'nin formülü ile 15 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



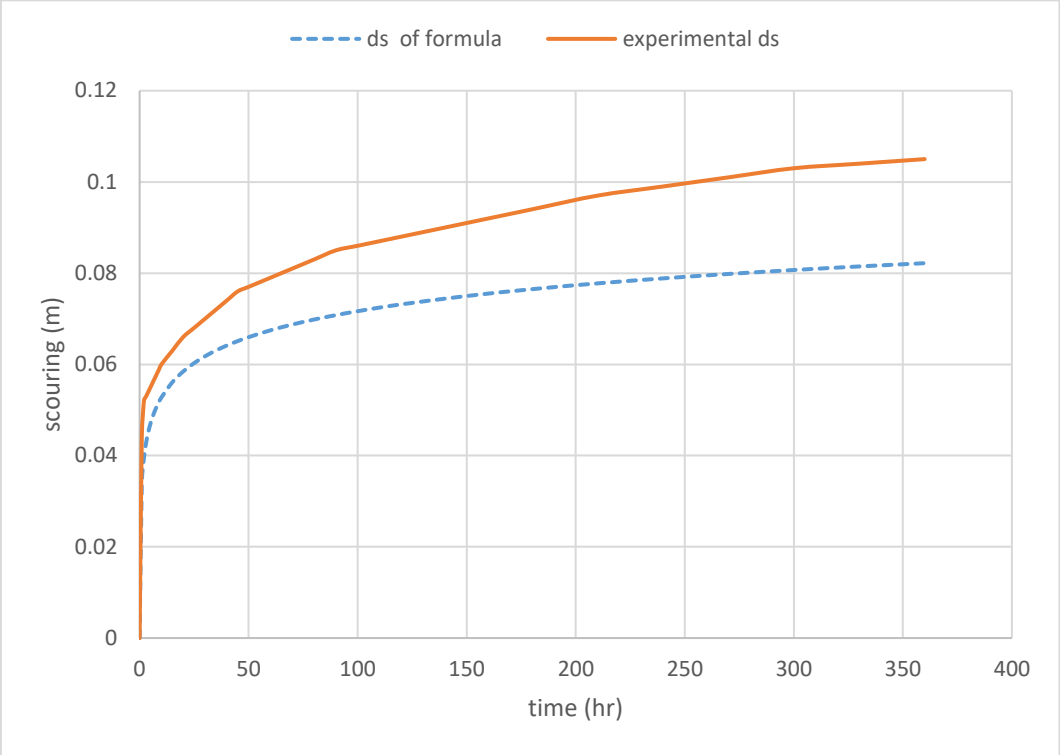
Şekil A.7. Oliveto vd.'nin formülü ile 40 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



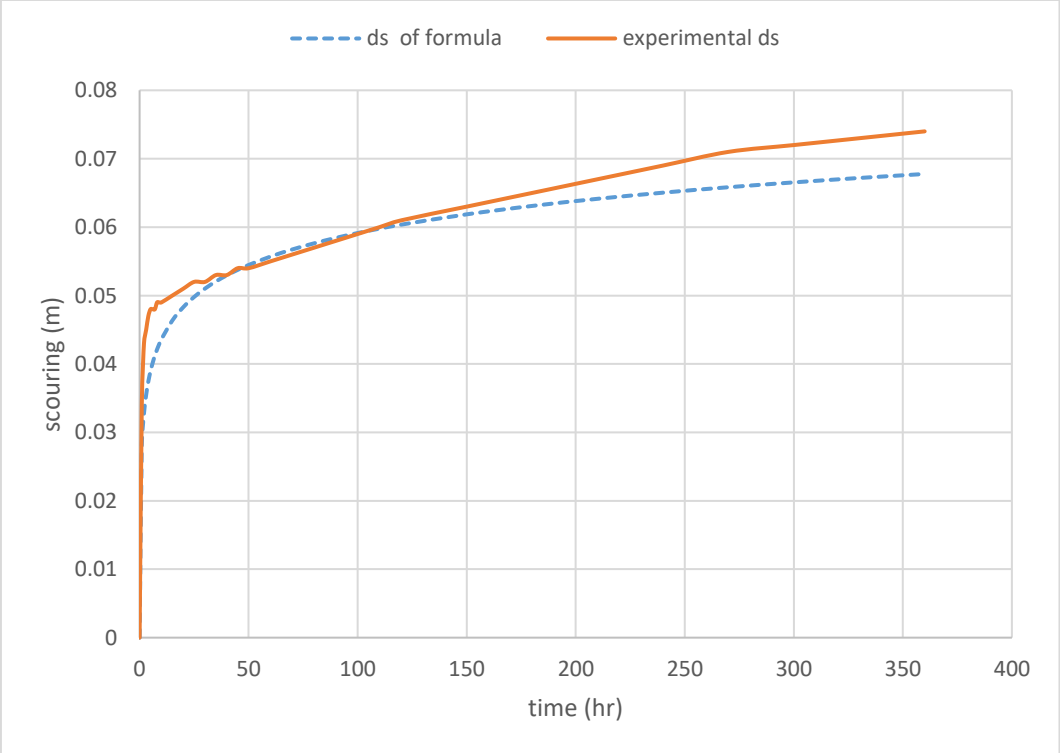
Şekil A.8. Oliveto vd.'nin formülü ile 35 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



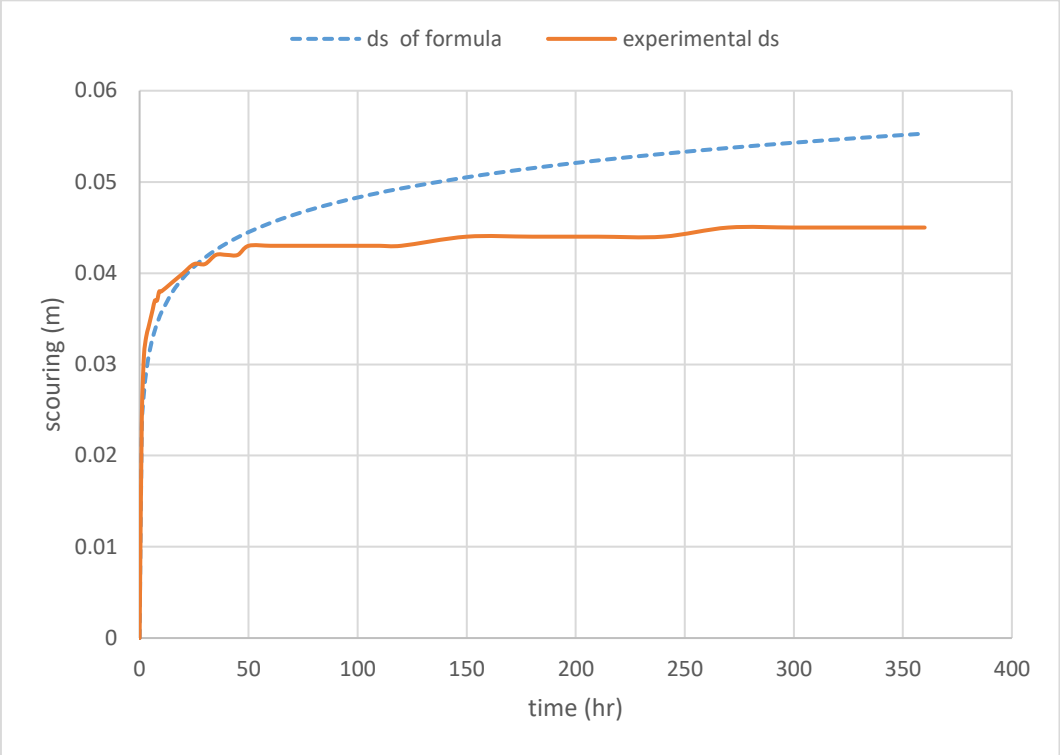
Şekil A.9. Oliveto vd.'nin formülü ile 30 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



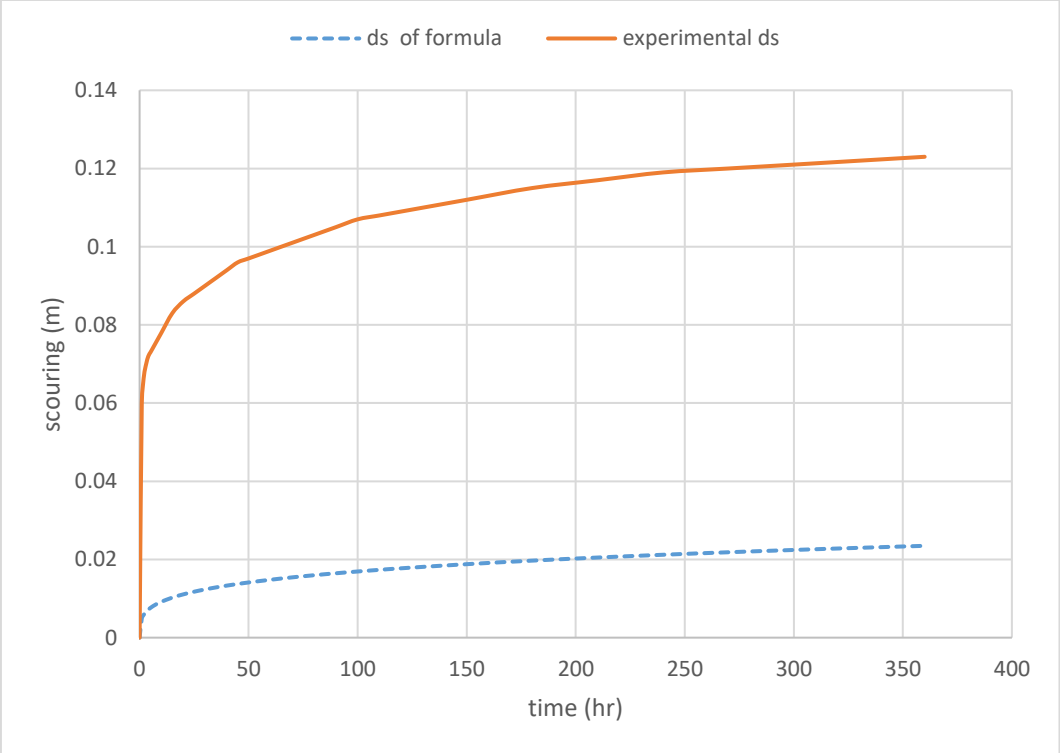
Şekil A.10. Oliveto vd.'nin formülü ile 25 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



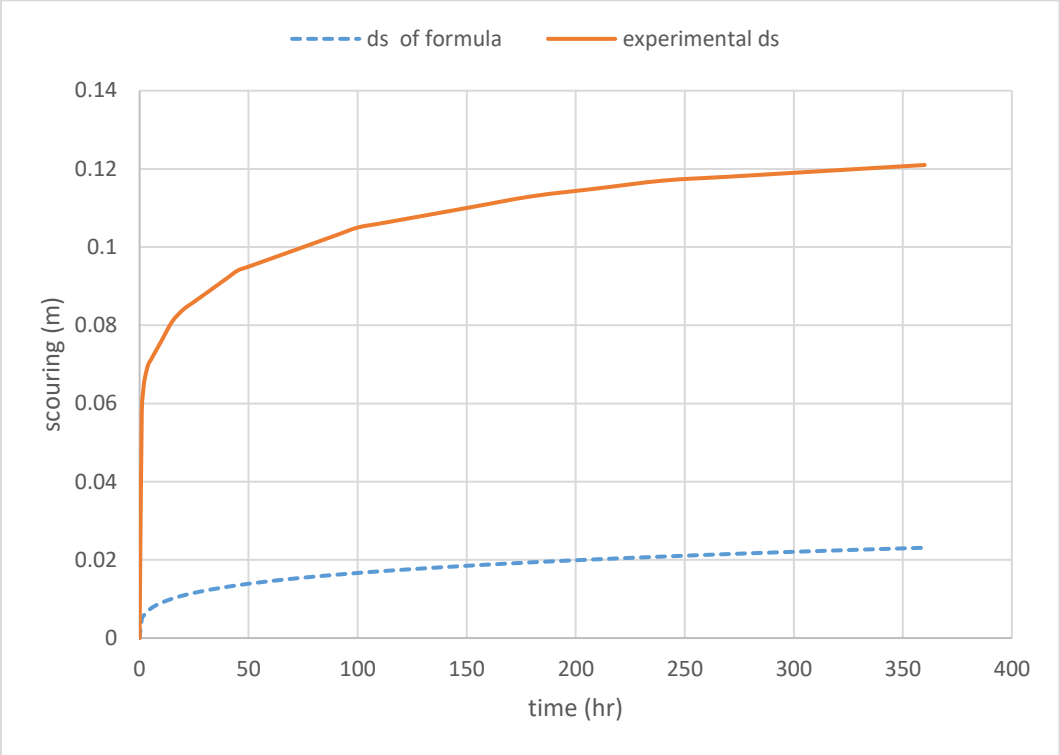
Şekil A.11. Oliveto vd.'nin formülü ile 20 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



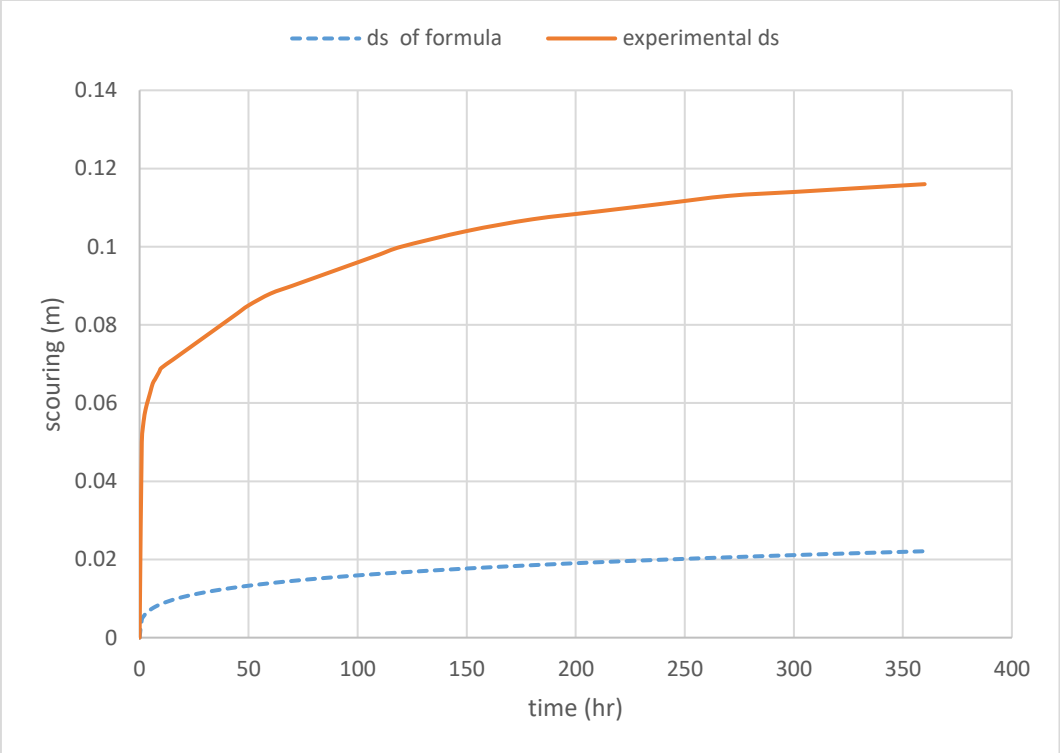
Şekil A.12. Oliveto vd.'nin formülü ile 15 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



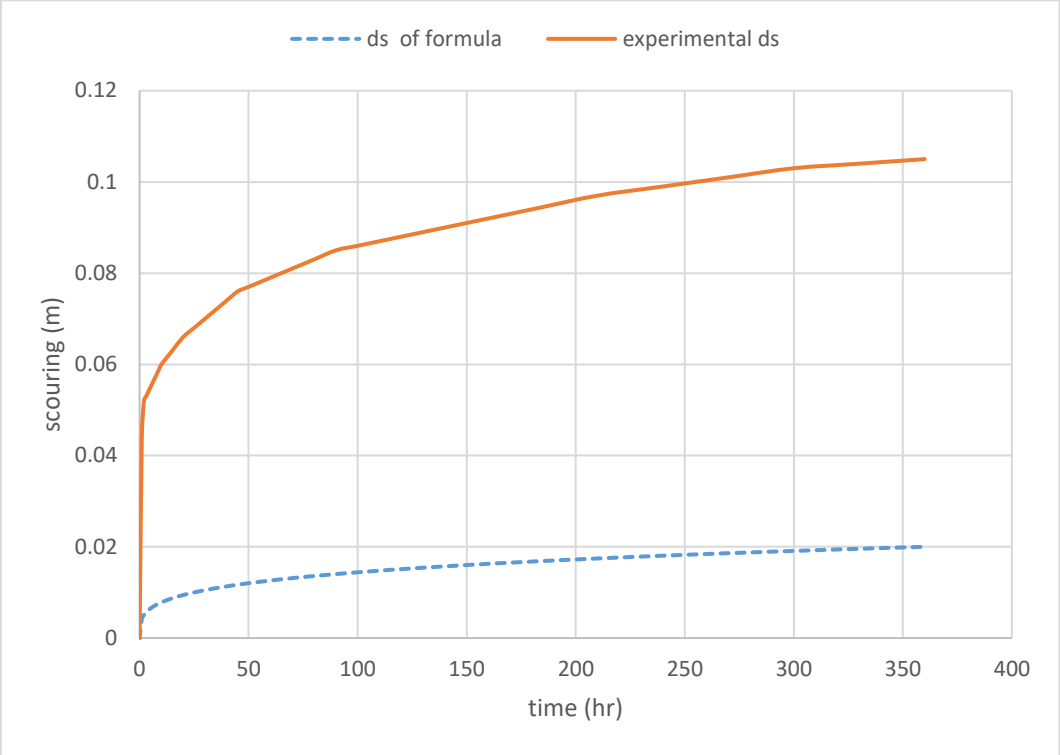
Şekil A.13. Orsi vd.'nin formülü ile 40 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



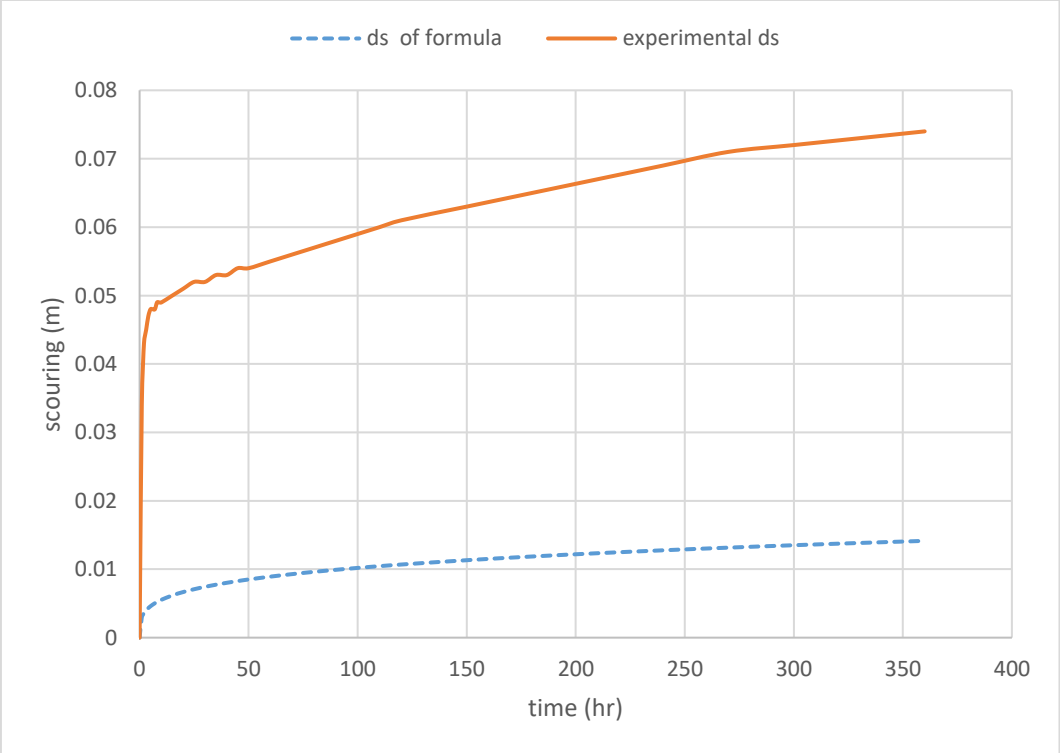
Şekil A.14. Orsi vd.'nin formülü ile 35 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



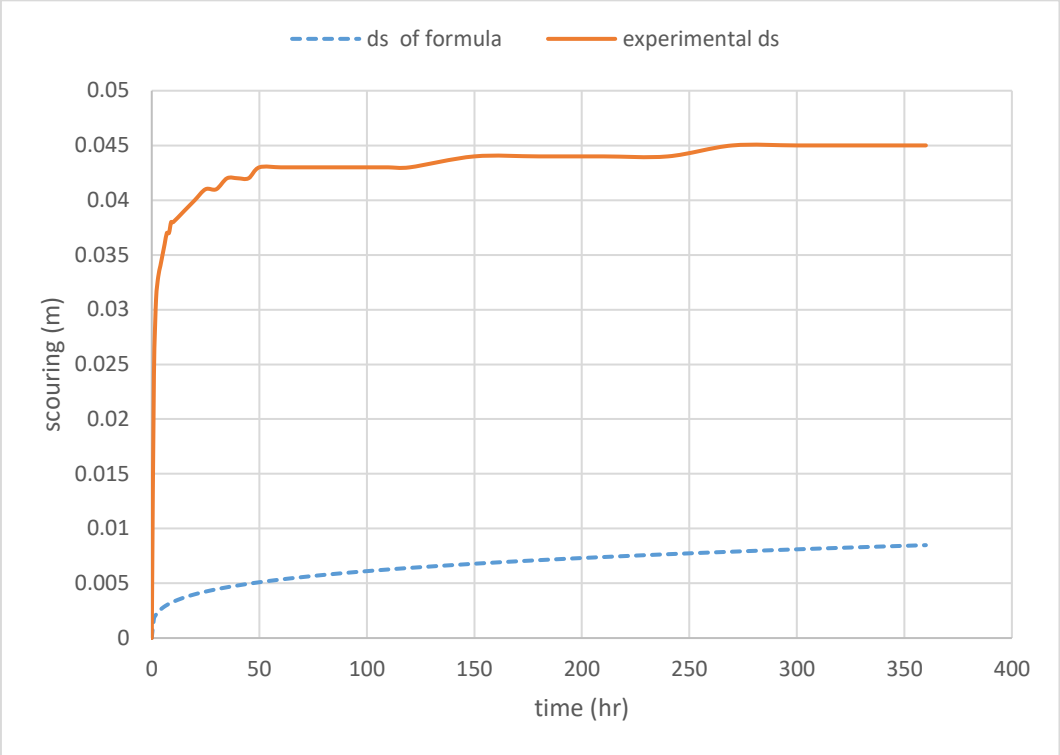
Şekil A.15. Orsi vd.'nin formülü ile 30 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



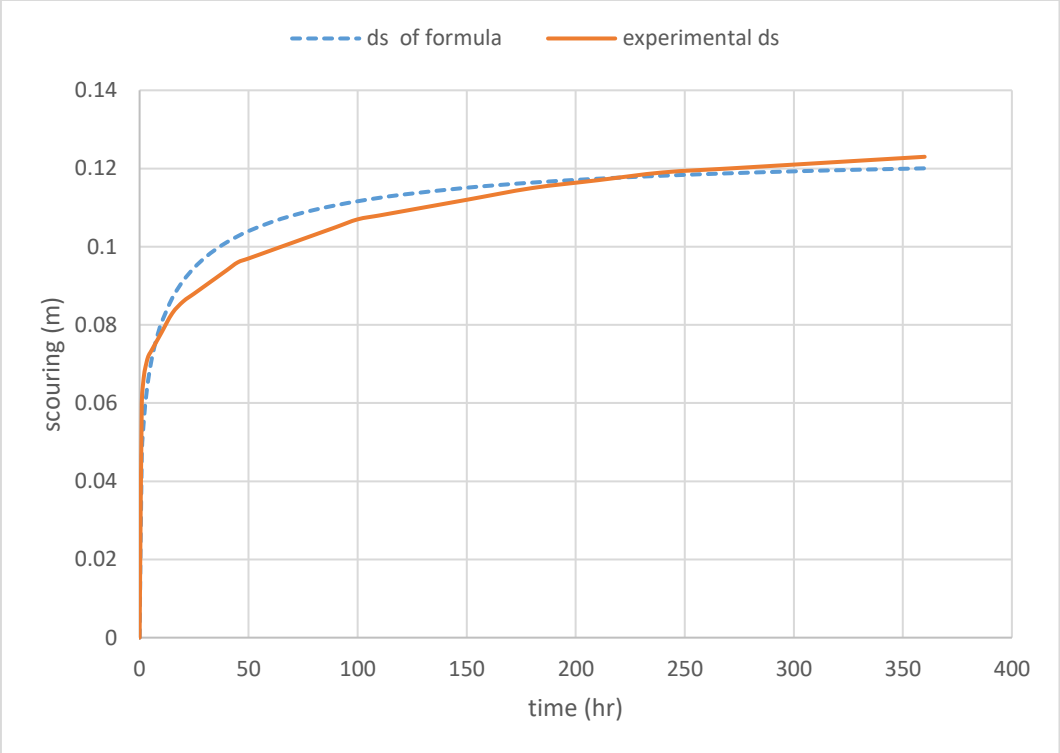
Şekil A.16. Orsi vd.'nin formülü ile 25 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



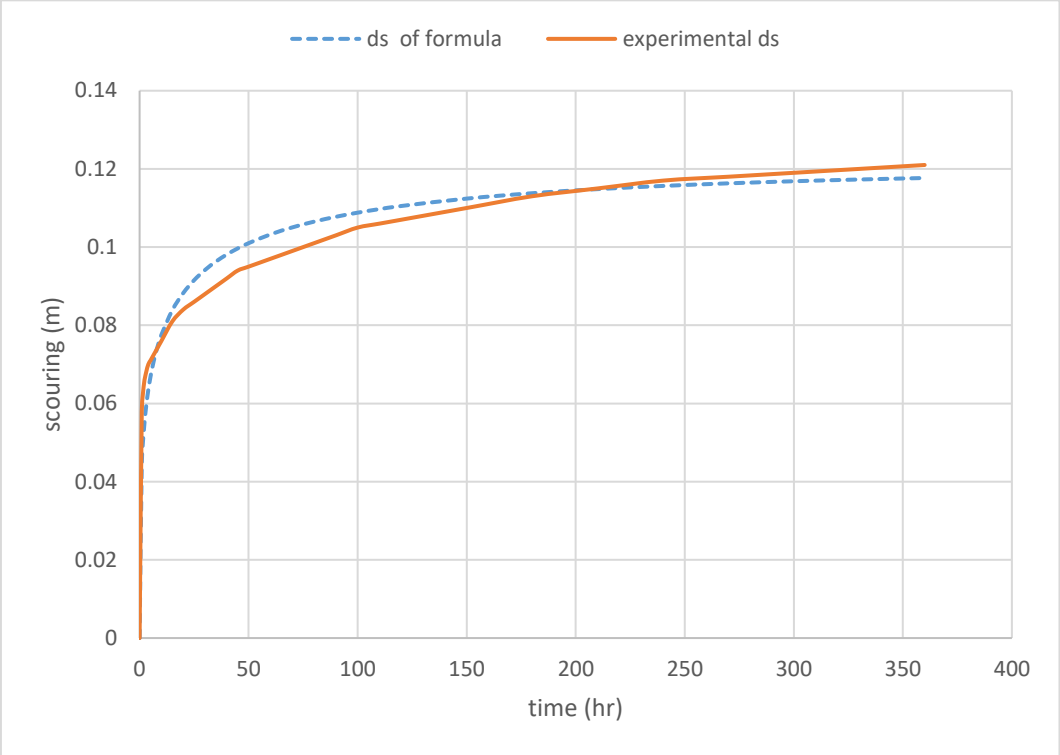
Şekil A.17. Orsi vd.'nin formülü ile 20 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



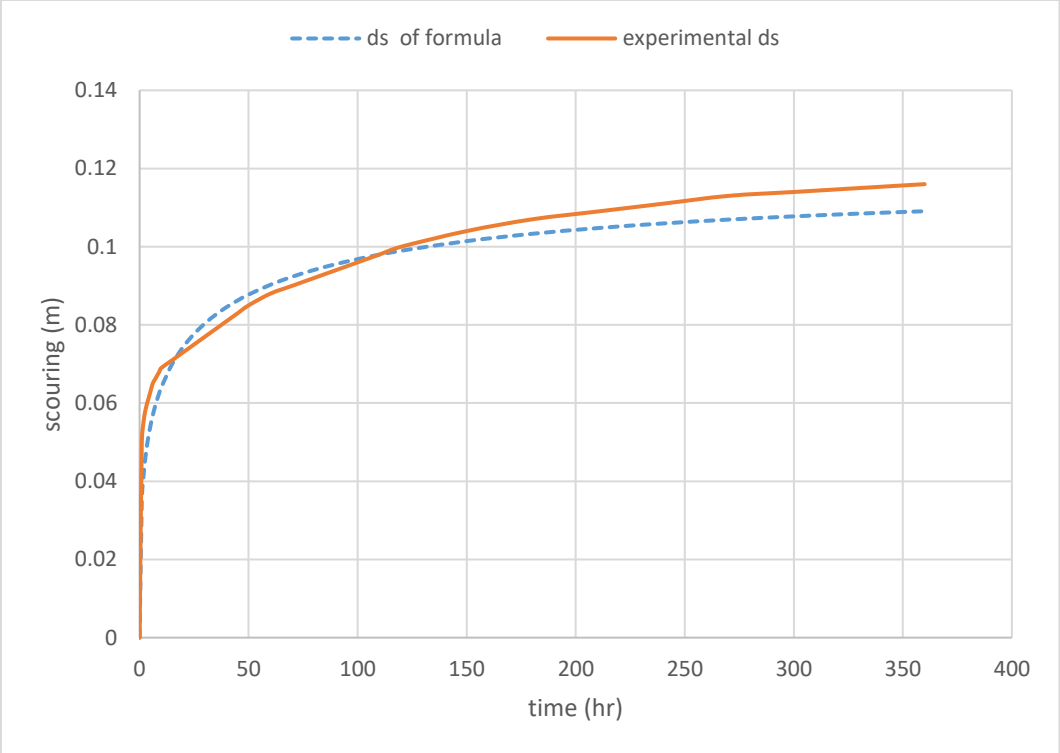
Şekil A.18. Orsi vd.'nin formülü ile 15 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



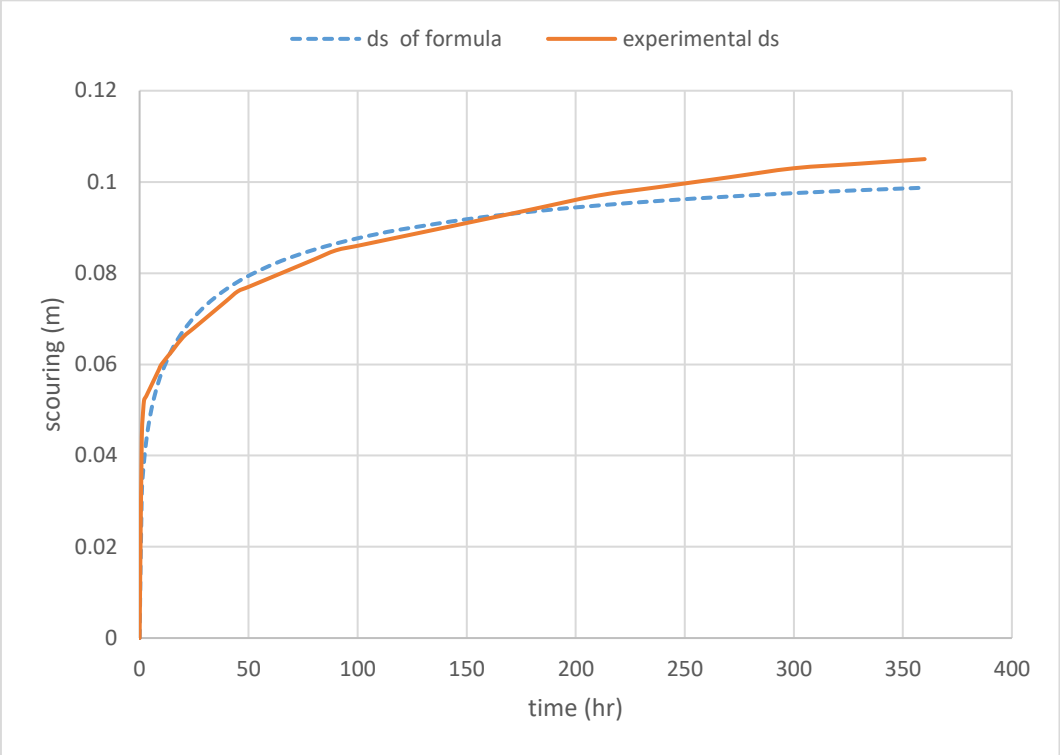
Şekil A.19. Cardos vd.'nin formülü ile 40 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



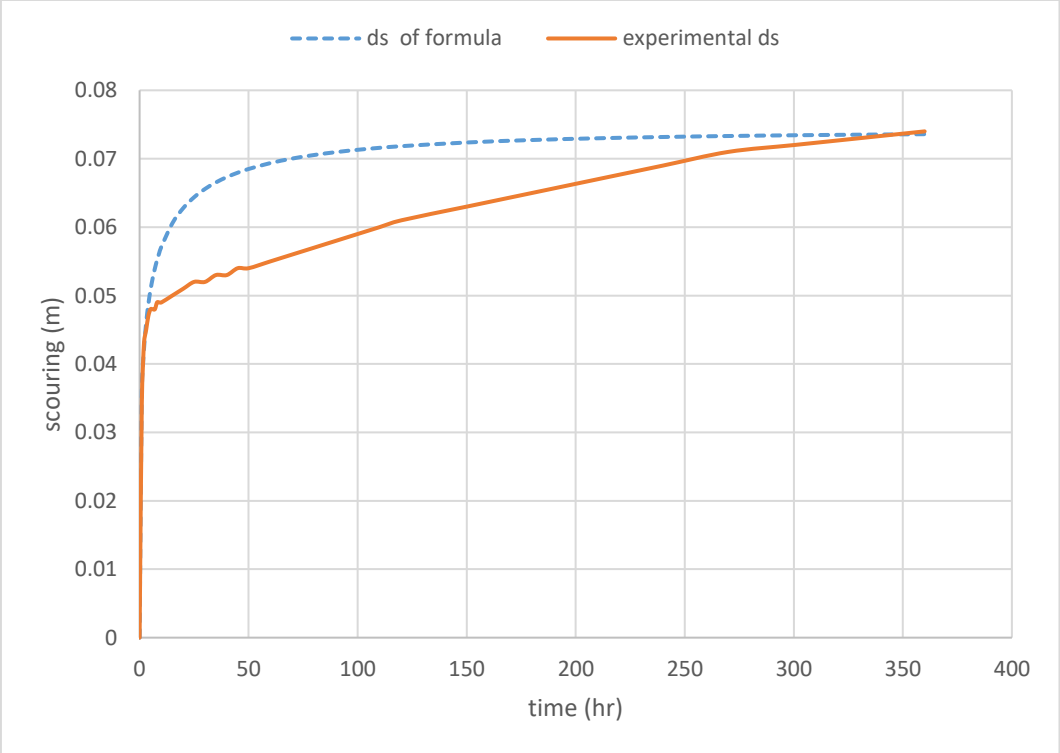
Şekil A.20. Cardos vd.'nin formülü ile 35 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



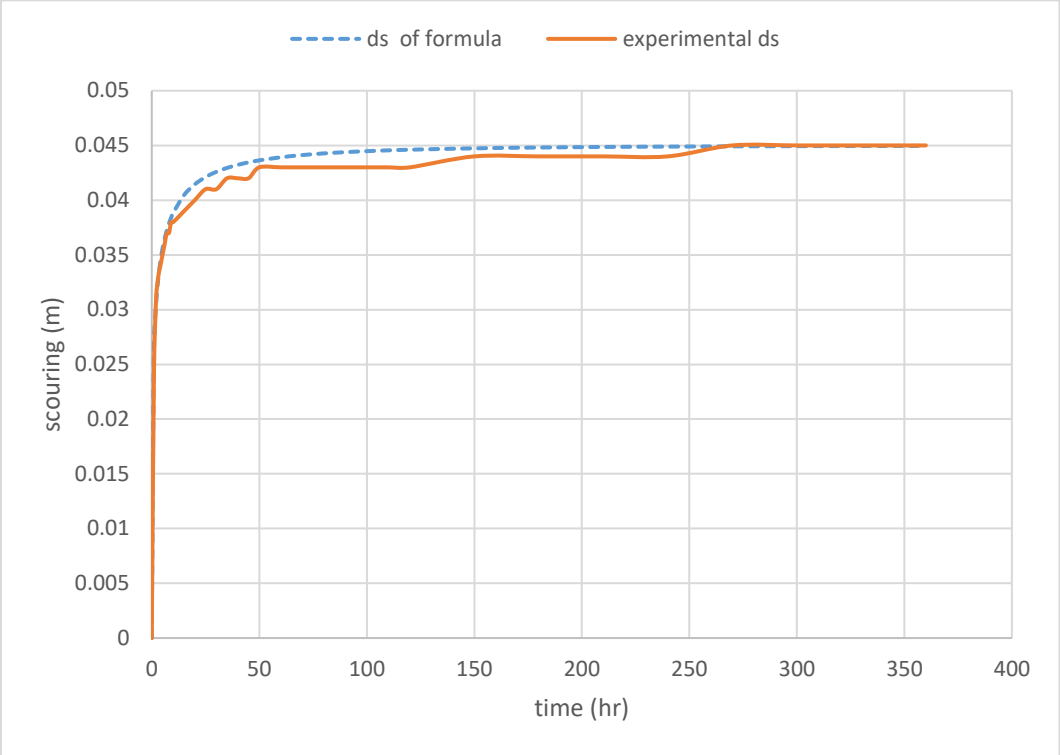
Şekil A.21. Cardos vd.'nin formülü ile 30 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



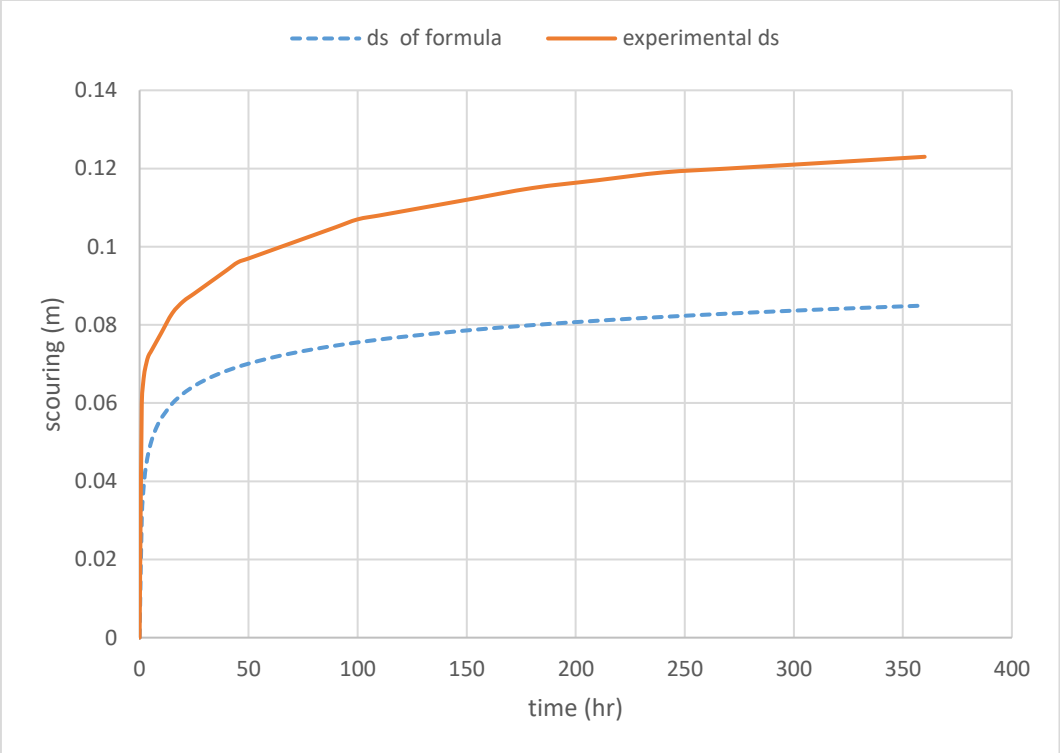
Şekil A.22. Cardos vd.'nin formülü ile 25 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



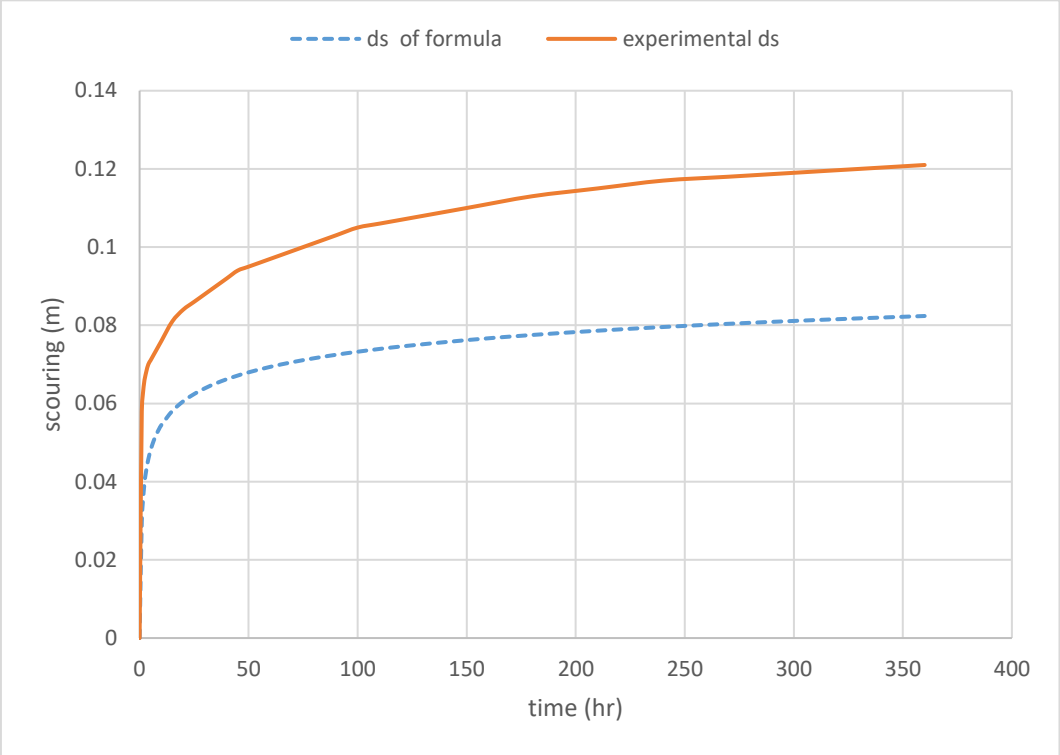
Şekil A.23. Cardos vd.'nin formülü ile 20 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



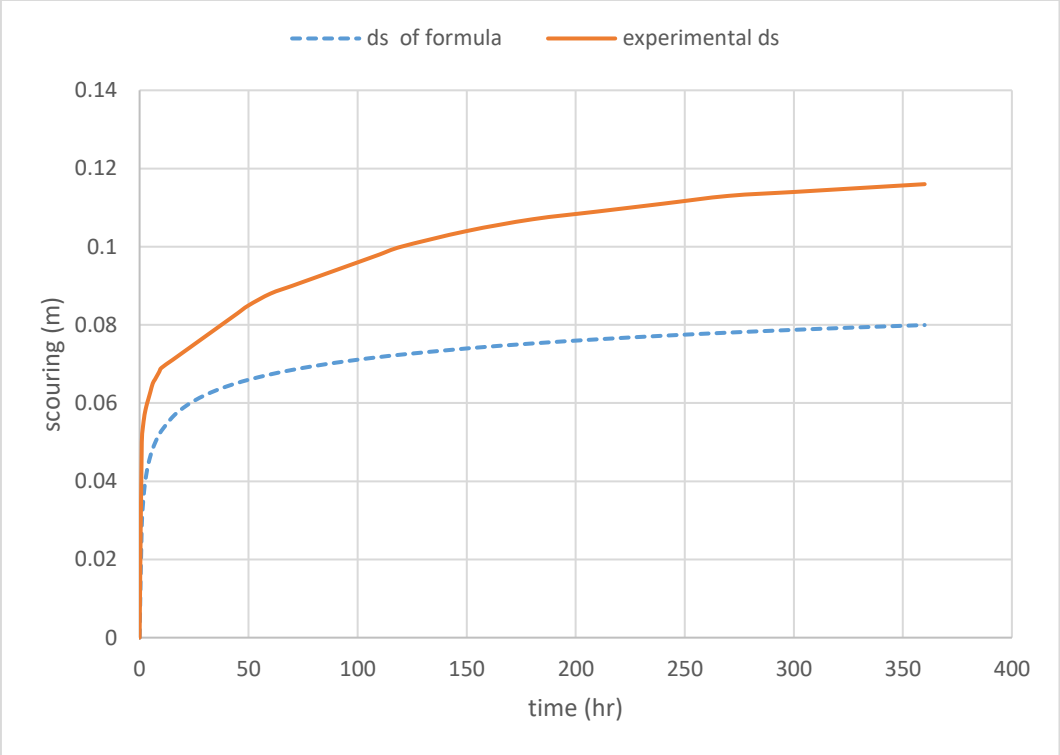
Şekil A.24. Cardos vd.'nin formülü ile 15 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



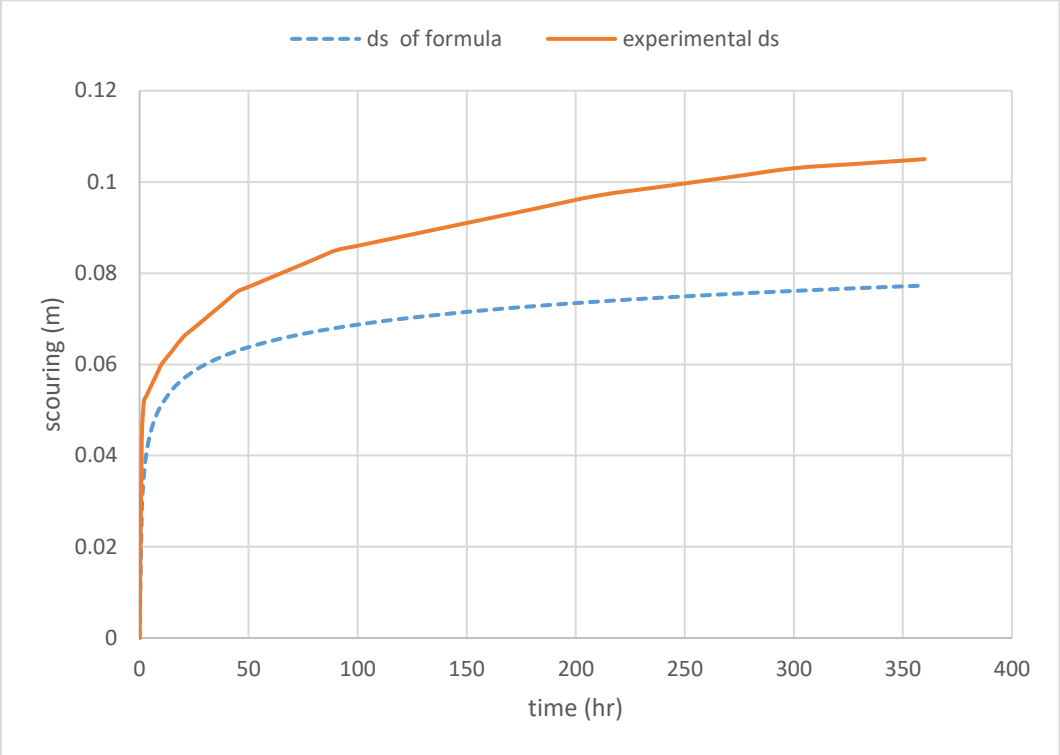
Şekil A.25. Yanmaz vd.'nin formülü ile 40 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



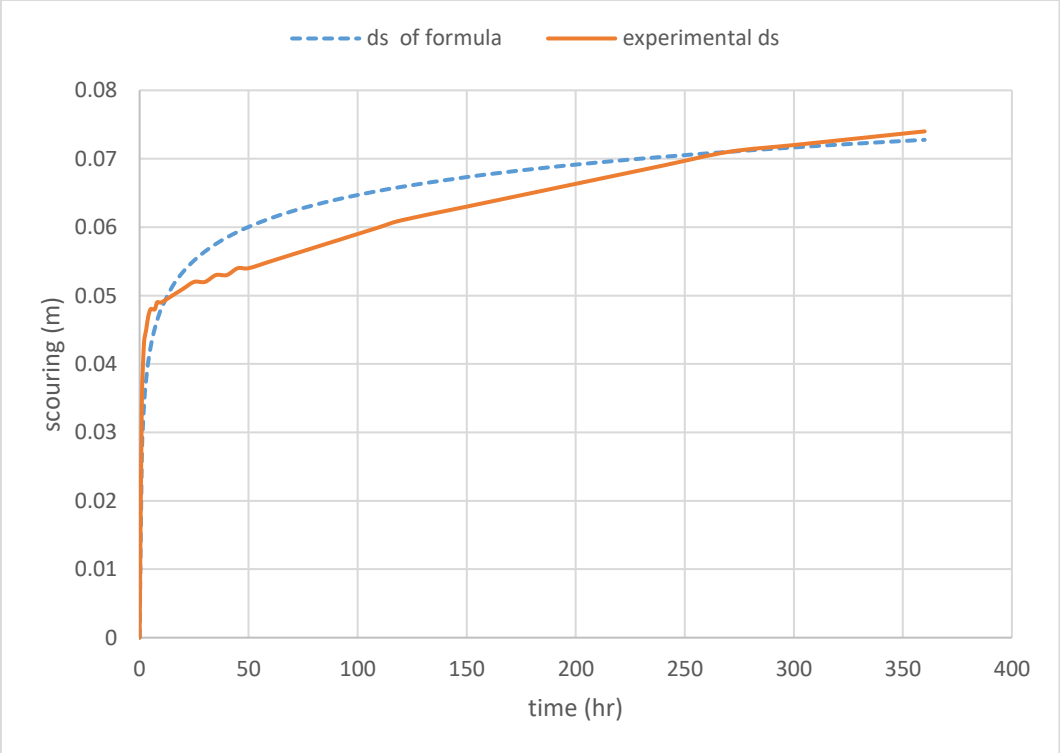
Şekil A.26. Yanmaz vd.'nin formülü ile 35 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



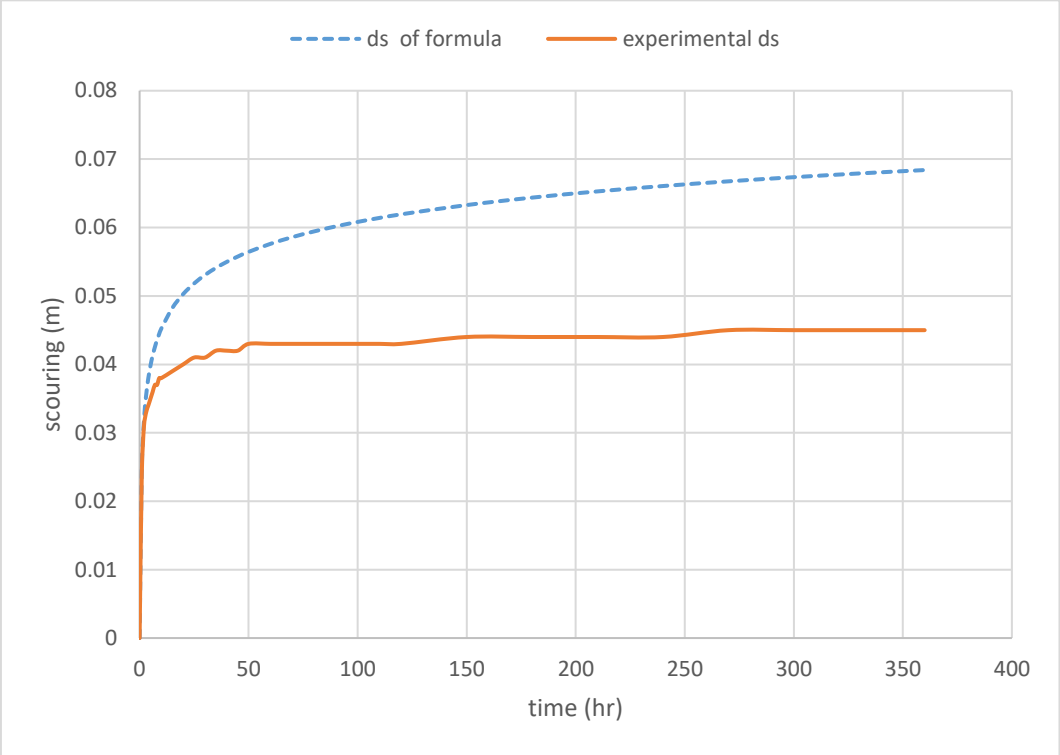
Şekil A.27. Yanmaz vd.'nin formülü ile 30 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



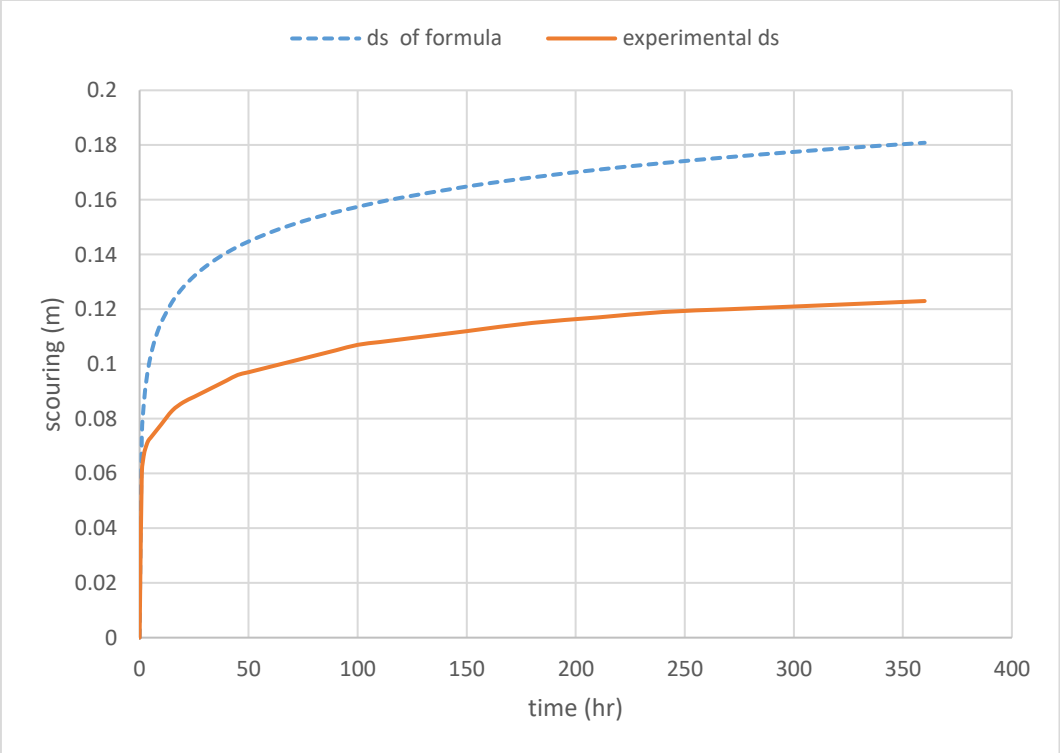
Şekil A.28. Yanmaz vd.'nin formülü ile 25 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



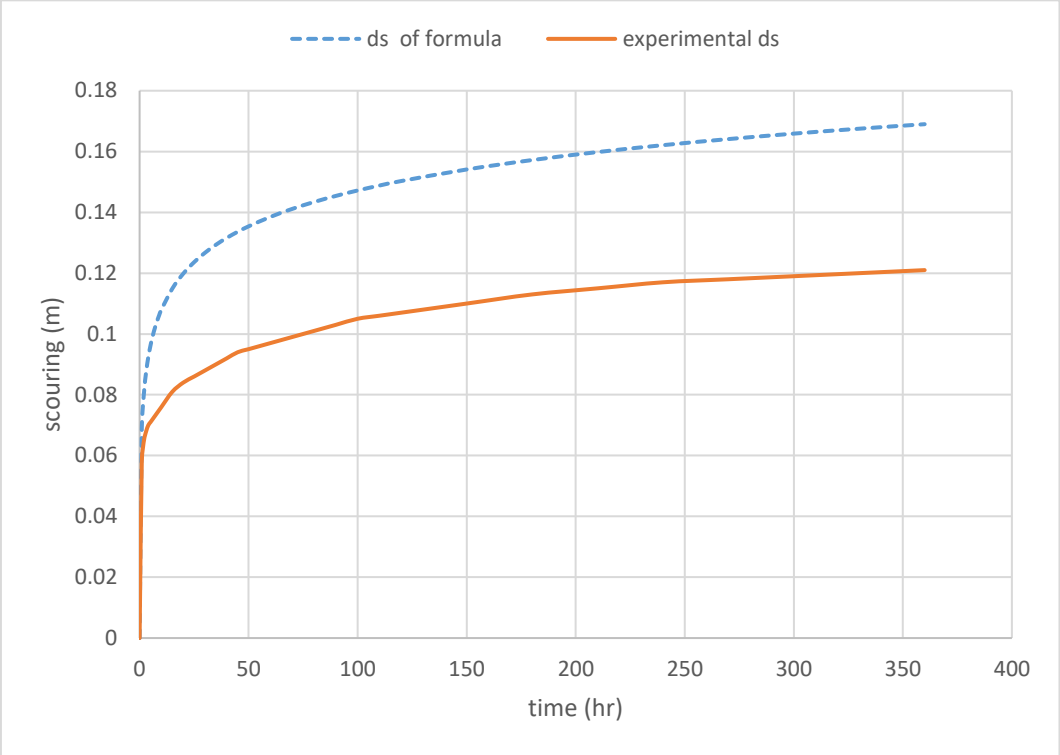
Şekil A.29. Yanmaz vd.'nin formülü ile 20 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



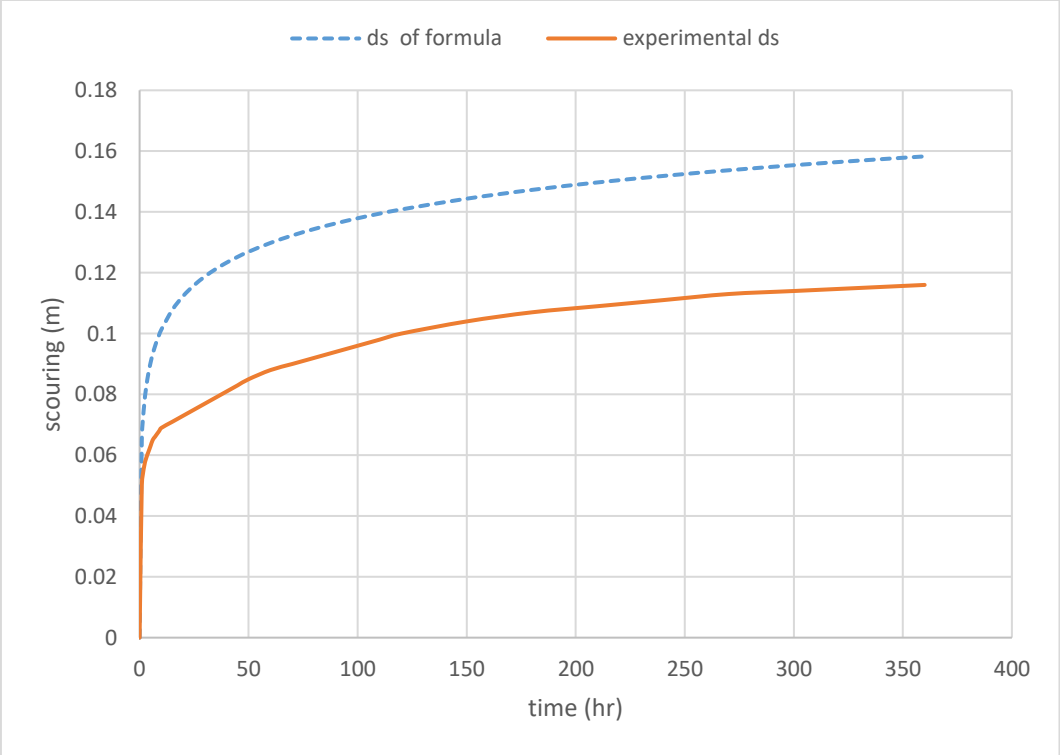
Şekil A.30. Yanmaz vd.'nin formülü ile 15 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



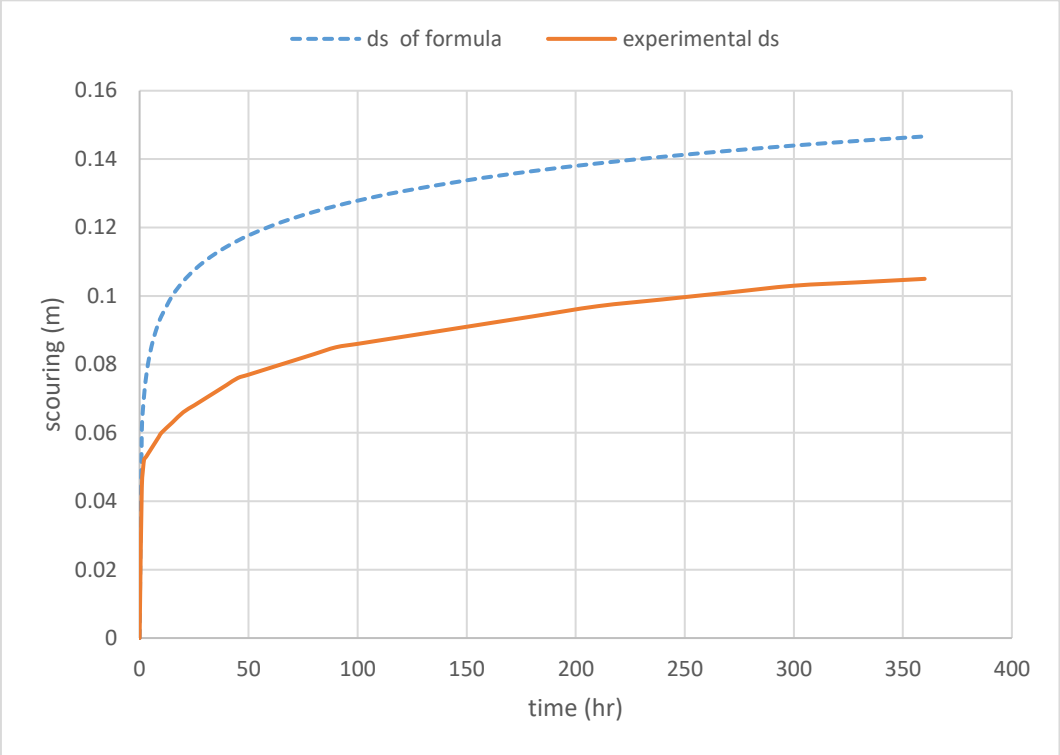
Şekil A.31. Kothyari vd.'nin formülü ile 40 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



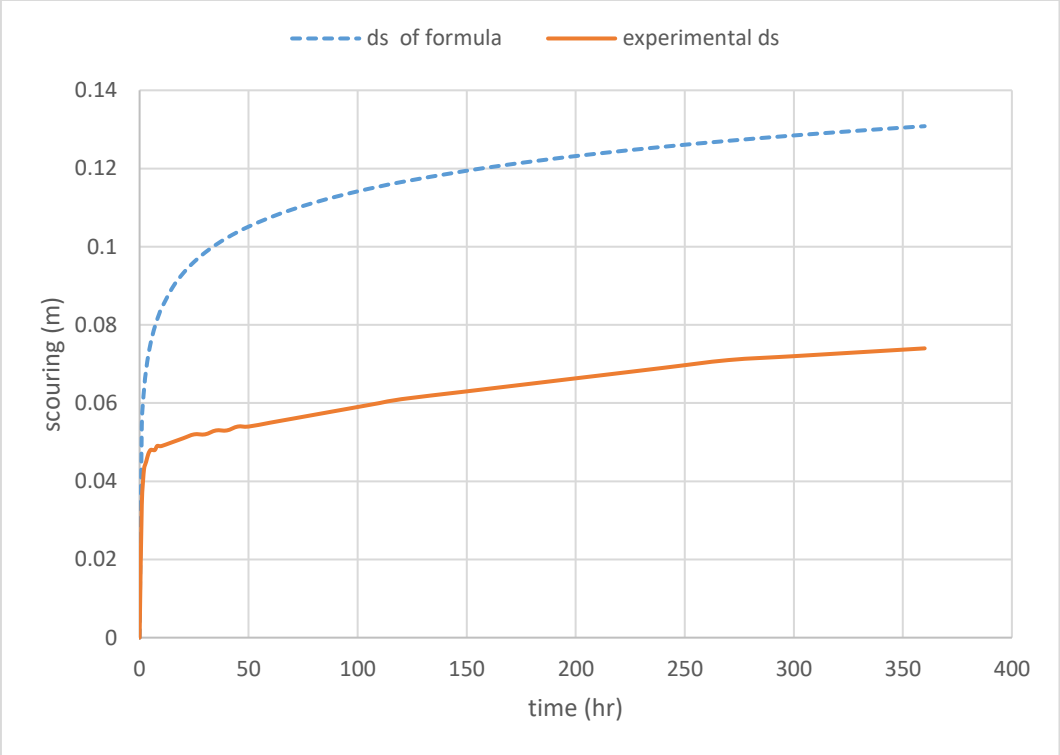
Şekil A.32. Kothyari vd.'nin formülü ile 35 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



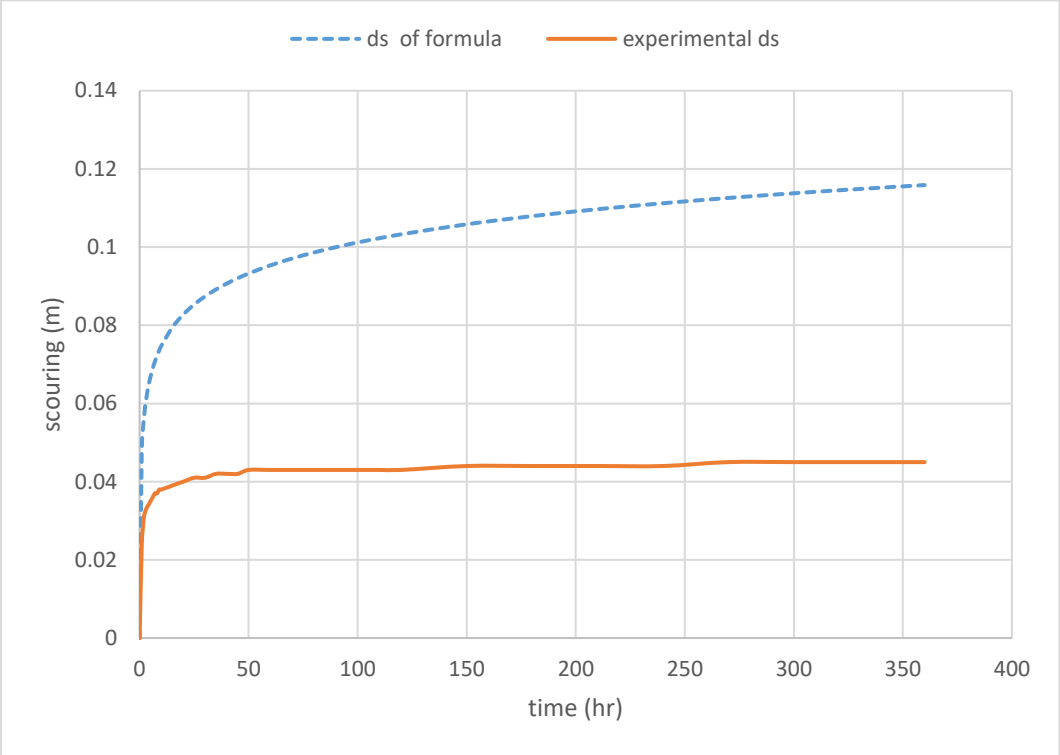
Şekil A.33. Kothyari vd.'nin formülü ile 30 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



Şekil A.34. Kothyari vd.'nin formülü ile 25 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



Şekil A.35. Kothyari vd.'nin formülü ile 20 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.



Şekil A.36. Kothyari vd.'nin formülü ile 15 lt/s'deki deneysel verilerin karşılaştırılması.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı **:** Ali Talib Khayoon ALHAMDLLAH

Doğum Tarihi ve Yeri **:** 08.01.1995 İRAK

E-Posta Adresi **:** alialkhakany90@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans **:** Thi Qar Üniversitesi 2012-2016

Yüksek lisans : Aksaray Üniversitesi 2017-2019