

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

HARŞİT ÇAYI ÜZERİNDEKİ KÖPRÜ AYAKLARINDA OYULMALARIN
HEC-RAS İLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS

Ayşe GÜNDÜZ

OCAK-2026
GÜMÜŞHANE



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**HARŞİT ÇAYI ÜZERİNDEKİ KÖPRÜ AYAKLARINDA OYULMALARIN
HEC-RAS İLE İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF SCOUR AT BRIDGE PIERS OVER HARSIT STREAM
USING HEC-RAS**

YÜKSEK LİSANS

Ayşe GÜNDÜZ

**OCAK-2026
GÜMÜŞHANE**



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**HARŞİT ÇAYI ÜZERİNDEKİ KÖPRÜ AYAKLARINDA OYULMALARIN
HEC-RAS İLE İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF SCOUR AT BRIDGE PIERS OVER HARSIT STREAM
USING HEC-RAS**

YÜKSEK LİSANS

Ayşe GÜNDÜZ

Danışman: Prof. Dr. Salim Serkan NAS

**OCAK-2026
GÜMÜŞHANE**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans olarak hazırlamış olduğum “**Harşit Çayı Üzerindeki Köprü Ayaklarında Oyulmaların Hec-Ras İle İncelenmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

30/01/2026

.....
Ayşe GÜNDÜZ

TEŞEKKÜR

Bu tezin başlangıcından sonuçlandırılmasına kadar geçen süreçte, bilgi, tecrübe ve değerli yönlendirmeleriyle bana yol gösteren, her türlü desteği sağlayan kıymetli danışman hocam, Prof. Dr. Salim Serkan NAS' a en derin saygı ve şükranlarımı sunarım. Tez öneri ve idari süreçlerinde bana büyük destek sağlayan, akademik katkılarını esirgemeyen Doç. Dr. Rahim ŞİBİL' e ayrıca teşekkür ederim. Tez çalışmamın metodolojik omurgasını oluşturan HEC-RAS modelleme sürecindeki uzmanlık ve uzaktan eğitim desteği için Mehmet ARDIÇLIOĞLU' na içten teşekkür ederim. Tezimin harita ve coğrafi verilerinin temini ile idari süreçlerin yürütülmesinde emeği geçen Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü personeline teşekkür ederim. Bu zorlu ve uzun süreçte beni yalnız bırakmayarak motivasyonumu sağlayan, desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarıma; Ayşegül Cansu Özgün, Fatih Emre Yılmaz'a gönülden teşekkür ederim. Son olarak, hayatımın her aşamasında sınırsız sevgi, sabır ve güvenle arkamda duran, manevi destekleriyle bu çalışmayı tamamlamamda en büyük güç kaynağım olan sevgili annem Sultan GÜNDÜZ, babam Kenan GÜNDÜZ' e ve değerli abilerim Fikret GÜNDÜZ ve Abdullah GÜNDÜZ' e en kalbi teşekkürlerimi sunarım.

Ayşe GÜNDÜZ
GÜMÜŞHANE-2026

ÖZET

Bu tez çalışmasında, Gümüşhane şehir merkezinden geçen Harşit Çayı üzerinde yer alan üç farklı köprü seçilerek köprü ayaklarında meydana gelen oyulma ve aşınma süreçleri incelenmiştir. Akarsularda köprü ayakları etrafında oluşan oyulma, yapısal hasarların en önemli nedenlerinden biri olup, köprülerin güvenliği ve servis ömürleri açısından kritik bir konudur. Bu kapsamda HEC-RAS 6.5 yazılımı kullanılarak çalışma alanı sayısal olarak modellenmiş ve köprü ayakları çevresindeki akım karakteristikleri analiz edilmiştir. Çalışmada farklı debi koşulları, mevsimsel akım değişimleri ve köprü geometrisinin oyulma üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca duyarlılık analizleri yapılarak modelin geometrik ve hidrolik parametrelere verdiği tepkiler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, köprü ayaklarında oyulmanın mevsimsel debi değişimlerine bağlı olarak farklılaştığını, köprü geometrisinin oyulma üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmadan elde edilen bulguların, benzer akarsu yapılarında oyulma risklerinin öngörülmesi ve güvenli tasarımın sağlanması açısından mühendislik uygulamalarına katkı sunacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gümüşhane Harşit Çayı, HEC-RAS modeli, Hidrolik modelleme, Kararlı akım, Köprü ayak oyulması.

SUMMARY

In this thesis, three bridges located along the Harşit River within the city center of Gümüşhane were selected to investigate the processes of local scour and erosion around bridge piers. Scour around bridge foundations is one of the major causes of structural damage in river engineering, making it a critical factor for the safety and service life of bridges. For this purpose, the study area was numerically modeled using the HEC-RAS 6.5 software, and the hydrodynamic behavior of the flow around bridge piers was analyzed. Different discharge scenarios, seasonal flow variations, and the influence of bridge geometry on scour were evaluated. In addition, sensitivity analyses were conducted to examine the model's response to changes in geometric and hydraulic parameters. The results indicated that scour depth varies significantly with seasonal discharge conditions and that bridge geometry plays a decisive role in the development of scour. The findings of this study are expected to contribute to engineering practices by providing insights into predicting scour risks and ensuring safer bridge design in river environments.

Keywords: Gümüşhane Harşit River, HEC-RAS model, Hydraulic modeling, Steady flow, Bridge pier scour.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	IV
TEŞEKKÜR	V
ÖZET.....	VI
TABLolar DİZİNİ	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	7
2.1. Oyulma Kavramı.....	7
2.2. Oyulma Türü	7
2.2.1. Genel Oyulma	10
2.2.2. Daralma Oyulması	11
2.2.3. Lokal (Yerel) Oyulmalar	11
2.2.4 Temiz Su Oyulması ve Hareketli Taban Oyulması	12
2.3. Köprü Ayakları Etrafında Tortu Taşınması ve Hareketi	13
2.3.1. Aşağı Akış	14
2.3.2. At Nalı Girdabı.....	14
2.3.3. Uyanık Girdaplar.....	15
2.4. Oyulmaya Etki Eden Parametreler.....	15
2.4.1 Akım Hızı	15
2.4.2 Akım Derinliği	16
2.4.3. Yatak Malzemesi Özellikleri.....	16
2.4.4. Köprü Ayağı Geometrisi	17
2.5. Oyulma Derinliği Tahmin Metotları.....	18
2.5.1. Ampirik Denklemler	18

2.5.1.1. Colorado State University (CSU) Denklemi	19
2.5.1.2. Froehlich Denklemi	19
2.5.2. HEC-RAS Modellemesi	20
2.6. Köprülerde Oyulma Önlemleri ve Koruma Yöntemleri	21
2.6.1. Dolaylı Önlemler (Akım Kontrolü)	21
2.6.2. Yapısal Önlemler (Bölgesel Koruma)	22
2.6.3. Temel Derinliğinin Artırılması	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM	25
3.1. HEC-RAS Hidrolik Modelleme Yazılımı	25
3.2. Çalışma Alanı ve Veriler	25
3.3. Hidrolojik Veriler ve Debi Senaryoları	39
3.3.1. Taşkın Debi Değerlerinin Belirlenmesi	39
3.3.2. Mevsimsel Ortalama Debi Değerlerinin Belirlenmesi	40
3.4. Model Geometrisinin Oluşturulması: RAS Mapper	41
3.4.1. Nehir Ağı Geometrisinin Sayısallaştırılması.....	42
3.4.2. Enkesit Verilerinin Üretilmesi	43
3.5. Hidrolik Model Parametrelerinin ve Sınır Şartlarının Tanımlanması	44
3.5.1. Manning 'n' Pürüzlülük Katsayıları	44
3.5.2. Daralma ve Genişleme Katsayıları	45
3.5.3. Sınır Şartları	46
3.6. Hidrolik Akım Analiz Yöntemlerinin Seçimi	47
3.6.1. Kararlı Akım (Steady Flow) Analizi	47
3.6.2. Taşkın Senaryoları İçin Kararsız Akım Analizi Denemeleri ve Yöntem Tercihi ..	48
3.7. Oyulma Analizi Yöntemi.....	50
3.7.1. Oyulma Denklemleri ve Katsayıları	50
3.7.2. Zemin Malzemesi Parametreleri	51
4.BULGULAR VE TARTIŞMA	52
4.1. Mevsimsel Debi Analizi Sonuçları	52

4.1.1. Kış Mevsimi ($Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$) Hidrolik ve Oyulma Bulguları	52
4.1.2. İlkbahar Mevsimi ($Q = 65 \text{ m}^3/\text{s}$) Hidrolik ve Oyulma Bulguları	57
4.1.3. Sonbahar Mevsimi Senaryosu ($Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$)	62
4.1.4. Yaz Mevsimi Senaryosu ($Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$)	65
4.2. Taşkın Debi Analizi Sonuçları (Q_{10} , Q_{25} , Q_{50})	67
4.2.1. Kararsız Akım Analizi Problemi ve Kararlı Akıma Geçiş Gerekçesi	67
4.2.2. Q_{10} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi ($Q=147.17 \text{ m}^3/\text{s}$) Bulguları	68
4.2.3. Q_{25} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi ($Q= 195.91 \text{ m}^3/\text{s}$) Bulguları	70
4.2.4. Q_{50} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi ($Q= 240.71 \text{ m}^3/\text{s}$) Bulguları	73
4.3. Sonuçların Kıyaslanması ve Mühendislik Açısından Değerlendirilmesi	75
4.3.1. Oyulma Derinliklerinin Debi-Risk Kıyaslaması	75
4.3.2. Oyulma Sonuçlarının Literatür ile Kıyaslanması ve Değerlendirilmesi	76
4.3.3. Debi Farklılıklarına Rağmen Daralma Oyulmasındaki Değişimler Üzerine Tartışma	77
4.4. HEC-RAS Model Çıktılarının Sahadaki Fiziksel Koşullar ve Model Sınırlamaları Çerçevesinde Değerlendirilmesi	78
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	80
KAYNAKÇA	85
ÖZGEÇMİŞ	89

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Harşit Çayı İçin Belirlenen Taşkın Yineleme Periyotlarına Ait Pik Debi Değerleri	40
Tablo 2. Harşit Çayı İçin Kullanılan Mevsimsel Ortalama Akım Debileri	40
Tablo 3. Kış Mevsimi İçin Tüm Oyulma Sonuçları Ekranı Görünümü	57
Tablo 4. İlkbahar Mevsimi İçin Tüm Oyulma Sonuçları Ekranı Görünümü	61
Tablo 5. Sonbahar Mevsimi ($Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$)-Hidrolik ve Oyulma Bulguları	63
Tablo 6. İlkbahar Mevsimi ($Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$)-Hidrolik ve Oyulma Bulguları	65
Tablo 7. Q10 Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi ($Q = 147.17 \text{ m}^3/\text{s}$) Hidrolik ve Oyulma Bulguları	69
Tablo 8. Q25 Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi ($Q = 195.91 \text{ m}^3/\text{s}$) Hidrolik ve Oyulma Bulguları	71
Tablo 9. Tablo X. Q50 Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi ($Q = 240.71 \text{ m}^3/\text{s}$) Hidrolik ve Oyulma Bulguları	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Meydana gelen şiddetli oyulma vakası sonrası köprü temelinin ve kazıklarının açığa çıkmış görünümü .	1
Şekil 2. Zonguldak, Çaycuma, 2012	3
Şekil 3. Filyos II Köprüsü orta ayaklarının tabandaki oyulma sonrası durumu	3
Şekil 4. Rize’de 2025 yılındaki taşkın sonrası hasar gören bir köprü kesiti	4
Şekil 5. Schoharie Köprüsü, NewYork	5
Şekil 6. Köprü oyulmalarının şematik gösterimi.	7
Şekil 7. Köprü açıklığında taban oyulması.	8
Şekil 8. At nalı çevrintisi.	9
Şekil 9. Ayak oyulması kesit görünüşü.	9
Şekil 10. Oyulmaların sınıflandırılması	10
Şekil 11. Daralma oyulması.	11
Şekil 12. Oyulma derinliği grafiği.	13
Şekil 13. Silindirik köprü ayağında yerel oyulmalara neden olan akımlar.	14
Şekil 14. Harşit Çayı üzerinde yer alan ve akıma yuvarlak burunlu bir yüzey sunan köprü ayağı örneği, Gümüşhane şehir geçişi, Karşıyaka Mahallesi mevkiinde yer alan köprü ayağı.	17
Şekil 15. Harşit Çayı üzerinde yer alan dairesel/silindirik burunlu ayak tipi köprü ayağı örneği, Gümüşhane Merkez, 15 Şubat Caddesi Köprüsü	18
Şekil 16. Akarsu yatağında akımı yönlendirme ve oyulma kontrolü amacıyla kullanılan gabion dolgulu (taş kafes) mahmuz yapısı.	21
Şekil 17. Köprü ayağı çevresinde oyulmaya karşı uygulanan kaya dolgu (riprap) zırhlama örneği.	22
Şekil 18. Oyulma yakalığı çalışma prensibi şematiği	23
Şekil 19. Yarıklı ayak çalışma prensibi	24
Şekil 20. Harşit Çayı Havzası’nın coğrafi konumu, yükselti dağılımı ve Tirebolu’dan Karadeniz’e dökülüş noktası (Delta) haritası.	26
Şekil 21. Gümüşhane Harşit Çayı şehir merkezi geçişi genel uydu görünümü	27
Şekil 22. Gümüşhane şehir merkezi geçişinde Harşit çayı üzerinde tespit edilen mevcut köprü yapıları	27
Şekil 23. Gümüşhane şehir merkezi geçişinde Harşit çayı üzerinde tespit edilen mevcut köprü yapıları uydu görüntüsü	28

Şekil 24. 15 Şubat Caddesi Köprüsü ilkbahar ve kış mevsimine ait memba tarafından çekilmiş görüntüleri.....	28
Şekil 25. 15 Şubat Caddesi Köprüsü mansap tarafı yatak ve ayak detayı	29
Şekil 26. Uluslararası E97 karayolu ağının Gümüşhane şehir geçişinde yer alan ve Karşıyaka mahallesini şehir merkezine bağlayan ana köprü yapısı	30
Şekil 27. E97 karayolu ağının Gümüşhane şehir geçişinde yer alan ve Karşıyaka mahallesini şehir merkezine bağlayan ana köprü ayak ve akış etkileşimi görüntüsü.....	30
Şekil 28. Hürriyet Caddesi Köprüsü mansap görüntüsü	31
Şekil 29. Harşit Çayı üzerinde yer alan, günümüzde yaya trafiğine hizmet eden tarihi taş kemer Karakol Köprüsü	32
Şekil 30. Çağrı Merkezi Köprüsü mansap görünümü	33
Şekil 31. Eski hastane köprüsü genel görünümü.....	33
Şekil 32. İnceleme kapsamına alınan köprülerin (RS 520, RS 700, RS 900) konumsal dağılımı.....	35
Şekil 33. Ayrıntılı oyulma analizi için seçilen ana istasyonlar arasındaki nehir mesafeleri	35
Şekil 34. (RS 520)Belediye Köprüsü Görüntüsü	36
Şekil 35. Modelde RS 520 ile Temsil Edilen Gümüşhane Belediyesi Köprüsü'nün Proje En Kesit Detayı ve Yapısal Bileşenleri	36
Şekil 36. Modeldeki RS 700 Numaralı Köprü'nün Düşük Akım Koşullarındaki Görünümü ve Köprü Ayağı Geometrisi	37
Şekil 37. RS 900 köprü'nün genel görünümü ve farklı geometriye sahip iki orta ayağı (solda yuvarlak burunlu, sağda kare burunlu)	37
Şekil 38. (RS 900) Harşit Çayı'nda Bir Taşkın Anı ve Yükselen Su Seviyesi.....	38
Şekil 39. RS 900 Yuvarlak burunlu köprü ayağının görünümü	39
Şekil 40. HEC-RAS Kararlı akım ekranına mevsimsel debilerin girilmesi	41
Şekil 41. Çalışma Alanına Ait Sayısal Yükseklik Modelinin RAS Mapper'da Görünümü	42
Şekil 42. Harşit Çayı İçin Oluşturulan HEC-RAS Model Geometrisinin Şematik Plan Görünümü	42
Şekil 43. Harşit Çayı model geometrisinin RAS Mapper'da sayısallaştırılması	43
Şekil 44. Köprü bilgilerinin girilmesi	44
Şekil 45. Manning Pürüzlülük Katsayısı Ekranı	45

Şekil 46. Modelin Mansap Sınır Şartı Olarak Tanımlanan Normal Derinlik ve Eğim Değeri	46
Şekil 47. Yaz Mevsimi Senaryosu İçin RS 695 Numaralı Köprü	48
Şekil 48. Taşkın Senaryolarının Kararsız Akım Analizi İle Denendiği Aşamada, Uygulanan 24 Saatlik Örnek Debi Hidrografı.....	49
Şekil 49. Harşit Çayı (Tirebolu-Giresun) Bölgesinden Elde Edilen Kırılmış Dere Malzemesinin Elek Analizi Sonuçları.....	51
Şekil 50. Kış Mevsimi ($Q=25 \text{ m}^3/\text{s}$) İçin Hesaplanan Maksimum Su Yüzü Profili	53
Şekil 51. RS 700 Köprüsü İçin Kış Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Daralma Oyulması	54
Şekil 52. RS 700 Köprüsü İçin Kış Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kenar ayak oyulması	54
Şekil 53. RS 900 Köprüsü İçin Kış Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kenar ayak oyulması	55
Şekil 54. RS 900 Köprüsü İçin Kış Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kare burun ayak oyulması.....	55
Şekil 55. RS 500 Köprüsü İçin Kış Mevsimi Oyulma Sonuçları Ekranı Görünümü	56
Şekil 56. RS 500 Köprüsü İçin Kış Mevsimi Toplam Oyulma Sonuçları Ekranı Görünümü	56
Şekil 57. İlkbahar Mevsimi ($Q=65 \text{ m}^3/\text{s}$) İçin Hesaplanan Maksimum Su Yüzü Profili	58
Şekil 58. RS 700 Köprüsü İçin İlkbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları	59
Şekil 59. RS 700 Köprüsü İçin İlkbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kenar ayak oyulması	59
Şekil 60. RS 900 Köprüsü İçin İlkbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kare burunlu ayak oyulması	60
Şekil 61. RS 900 Köprüsü İçin İlkbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları- Yuvarlak burunlu ayak oyulması.....	60
Şekil 62. RS 900 Köprüsü İçin İlkbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları	61
Şekil 63. Sonbahar Mevsimi ($Q=35 \text{ m}^3/\text{s}$) İçin Hesaplanan Maksimum Su Yüzü Profili	62
Şekil 64. RS 700 Köprüsü İçin Sonbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kenar ayak oyulması	63
Şekil 65. RS 520 Köprüsü İçin Sonbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kenar ayak oyulması	64

Şekil 66. RS 900 Köprüsü İçin Sonbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kare burunlu ayak oyulması	65
Şekil 67. Yaz Mevsimi ($Q=22 \text{ m}^3/\text{s}$) İçin Hesaplanan Maksimum Su Yüzü Profili	66
Şekil 68. Q_{10} Taşkın Debisi İçin Su Yüzeyi Profili.....	68
Şekil 69. RS 700 Q_{10} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Yuvarlak burunlu ayak oyulması.....	69
Şekil 70. RS 520 Q_{10} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kenar ayak oyulması	70
Şekil 71. RS 700 Q_{25} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Sağ ve Sol Kenar Ayak Oyulması	72
Şekil 72. RS 520 Q_{25} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları- Kenar Ayak Oyulması	72
Şekil 73. RS 520 Q_{50} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları- Sol ve Sağ Kenar Ayak Oyulması.....	74
Şekil 74. RS 700 Q_{50} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları- Sol ve Sağ Kenar Ayak Oyulması.....	74
Şekil 75. RS 900 Q_{50} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Daralma Oyulması.....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Köprü ayak genişliği
a'	: Ayak genişliğinin akım yönündeki izdüşümü
C_c	: Daralma katsayısı
C_e	: Genişleme katsayısı
CSU	: Colorado State University
D_{50}	: Yatak malzemesinin ağırlıkça %50 geçtiği tane çapı
D_{95}	: Yatak malzemesinin ağırlıkça %95 geçtiği tane çapı
d_s	: Oyulma derinliği
FHWA	: Federal Highway Administration
Fr_1	: Köprü'nün memba kesitindeki Froude sayısı
h_1	: Köprü'nün memba kesitindeki ortalama akım derinliği
H_d	: Denge oyulma derinliği
HEC-RAS	: Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
K_1	: Ayak şekli (geometri) katsayısı
K_2	: Akış açısı katsayısı
K_3	: Yatak malzemesi hareketi katsayısı
K_4	: Zırhlanma katsayısı
RS	: Referans Kesiti (River Station)
U	: Ortalama akım hızı
U_c	: Kritik ortalama akım hızı
U_{kritik}	: Kritik ortalama akım hızı
W_1	: Köprü yapısında yaklaşım kesitindeki ortalama genişlik
W_2	: Köprü yapısında daralma kesitindeki ortalama genişlik
y	: Ortalama akım derinlik
y_s	: Köprü ayağı etrafındaki yerel oyulma derinliği
τ	: Akarsu tabanında meydana gelen kayma gerilmesi
τ_c	: Akarsu tabanında sediment taşınımının başladığı ana tekabül eden

1.GİRİŞ

Köprüler; nehir, vadi veya ulaşımı kısıtlayan benzeri engellerin iki yakasını birbirine bağlayan stratejik yapılardır. Ancak, özellikle iklim değişikliğine bağlı olarak sıklığı artan taşkınlar sonrası köprülerin hasar görmesi veya yıkılması ciddi can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Yapılan güncel istatistiksel araştırmalar, dünya genelindeki köprü yıkılmalarının halen çok büyük bir kısmının hidrolik etkenlerden kaynaklandığını ortaya koymaktadır (Yanmaz, 2002; Picece vd., 2021; Kunt vd., 2023). Bu nedenle bir köprünün tasarım aşamasında, yapısal etkenler kadar hidrolik faktörlerin de titizlikle göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu hidrolik nedenler arasında, köprü ayakları etrafında meydana gelen yerel oyulmalar veya yetersiz ayak açıklığı nedeniyle oluşan hidrolik sıçramaların yıkıcı etkileri öncelikli risk faktörleri olarak değerlendirilmektedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, Amerika Birleşik Devletleri başta olmak üzere dünya genelinde son yıllarda binlerce köprü hasarı kaydedilmiştir. Yapılan güncel istatistiksel analizler, bu yıkılmaların yaklaşık %60'ının halen köprü ayağı çevresinde gelişen oyulma mekanizmalarından kaynaklandığını doğrulamaktadır (Picece vd., 2021). Akarsu köprülerinin % 80'lere varan mertebelerdeki en çok rastlanan birincil nedeni, akarsu yataklarındaki oyulmalardır. Köprü ayaklarının oturduğu temeller, ister yüzeysel kitle temel, isterse kazıklı temel tipinde olsunlar, taban oyulmaları tehlikelidir. Yüzeysel kitle temellerde, temel altının oyulması sonucu temelde oluşan oturma ve dönmeler, ayak elevasyonlarının da temelle birlikte oturma ve dönmelerine neden olur (Çaycuma Köprüsü Raporu, 2012).



Şekil 1. Meydana gelen şiddetli oyulma vakası sonrası köprü temelinin ve kazıklarının açığa çıkmış görünümü (Xie vd., 2019).

Köprü hidroliği ve oyulma mekanizmaları üzerine yapılan ilk kapsamlı çalışmalar, yıkılmaların büyük çoğunluğunun hidrolik nedenlerden dolayı olduğunu ortaya koymuştur (Shirole ve Holt, 1991). Oyulmanın yıkıcı etkisi sadece Kuzey Amerika ile sınırlı değil; Avrupa'da da önemli bir sorun teşkil etmektedir. Avrupa'da yapılan bir çalışma, köprü hasarlarının %42'sinin hidrolik nedenlerden dolayı olduğunu ortaya koymuştur. Bu hidrolik hasarların büyük bir bölümü, özellikle taşkın dönemlerinde artan debiyle beraber yerel oyulma olaylarından kaynaklanmaktadır (Lagasse vd., 2006). Örneğin, 1990'ların sonlarında ve 2000'lerin başlarında Orta Avrupa'yı vuran büyük taşkınlar sebebiyle, nehir yataklarındaki ciddi oyulmalar görülmüş çok sayıda köprü onarıma alınmış veya tamamen hizmet dışı kalmıştır (Brandimarte ve Vezza, 2018). Bu durum, oyulmanın küresel ölçekte köprü altyapısı için birincil tehdit olmaya devam ettiğini göstermektedir. Dünya genelindeki bu risk faktörleri, Türkiye'deki akarsu yatakları için de benzer tehditler oluşturmaktadır. Türkiye'deki köprülerin hidrolik güvenliği üzerine yapılan güncel incelemeler, özellikle Karadeniz ve Akdeniz bölgelerindeki taşkın karakterli akarsularda yerel oyulmanın en kritik risk faktörü olduğunu göstermektedir (Arisoy vd., 2022). Ülkemizde son yıllarda köprü ayaklarında oyulma nedeniyle ölümlü ve maddi boyutlu kazalar olduğu için konu ciddiyetini korumaktadır (Yanmaz, 2002). Zonguldak ili Çaycuma ilçesinde 1951 yılında yapımı biten Çaycuma Köprüsü 2012'de yıkılmıştır. Yapılan incelemeler ve araştırmalar sonucunda köprünün hidrolik etkenlerden kaynaklanan zorlamalar altında çöktüğü kanaatine varılmıştır. Zaman içerisinde oluşan nehir tabanındaki önemli derecede oyulma etkisi de eski köprü temellerinin hidrolik kaynaklı etkilere karşı daha fazla zayıflamasına neden olmuş olabilir (Çaycuma Köprüsü Raporu, 2012). Nitekim 2021 yılında Batı Karadeniz Bölgesi'nde yaşanan ekstrem taşkınlar sonucunda Bozkurt ve Ayancık ilçelerinde çok sayıda köprünün yıkılması, oyulma riskinin sadece eski köprüler için değil, yeni inşa edilen köprüler için de halen en büyük tehdit olduğunu bir kez daha kanıtlamıştır (Kurban vd., 2023; Tutar ve Yanmaz, 2024). Bu durum, iklim değişikliği ile artan taşkınların, mevcut köprülerin hidrolik güvenliği açısından yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.



Şekil 2. Zonguldak, Çaycuma, 2012 (Çaycuma Köprüsü Raporu, 2012)



Şekil 3. Filyos II Köprüsü orta ayaklarının tabandaki oyulma sonrası durumu

Yakın zamanda Karadeniz Bölgesi'nde yaşanan taşkınlar da oyulma ve hidrolik zorlamaların yıkıcı sonuçlarını gözler önüne sermiştir. Örneğin, 2025 yılının Eylül ayında Rize ve Artvin illerinde meydana gelen şiddetli sağanak yağışlar sonucu derelerin debisi aşırı derecede yükselmiş ve birden fazla köprü hasar görerek çökmüştür. Bu tür olaylar,

köprü ayakları etrafındaki yatak malzemesinin hızla taşınması (oyulma) ve yüksek akım kuvvetlerinin yapıyı doğrudan zorlaması sonucu meydana gelmektedir (Milliyet, 2025).



Şekil 4. Rize’de 2025 yılındaki taşkın sonrası hasar gören bir köprü kesiti. (GZT Dijital Haber, 2025)

Türkiye’de son yıllarda yaygınlaşan sayısal modelleme çalışmaları, karmaşık yatak morfolojisine sahip akarsularda oyulma derinliğinin tahmin edilmesinde HEC-RAS gibi yazılımların etkinliğini ortaya koymuştur (Özdemir vd., 2023). Dünya genelinde, büyük akarsularda ve şiddetli taşkın olaylarında çok daha yüksek oyulma derinlikleri kaydedilmiştir. Örneğin, ABD Federal Highway Administration (FHWA) tarafından yayımlanan "Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18)" gibi kılavuzlar ve ilgili çalışmalar, köprülerde birkaç metreyi aşan oyulma derinliklerinin yaygın olduğunu belirtmektedir (FHWA, 2012). Büyük nehir sistemlerinde, şiddetli taşkınlar sırasında köprü ayaklarında 2 m’den 5 m’ye kadar oyulma derinlikleri gözlemlenebilmektedir (Richardson ve Davis, 2001; Arneson vd., 2012). Hatta Bulut (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, ayak oyulması ve daralma oyulmasının toplamı olarak 5.30 m gibi kayda değer bir oyulma derinliği tespit edilmiştir. Asya ve diğer bölgelerde meydana gelen bazı ekstrem taşkın 6 m ila 10 m’lere varan oyulma derinliklerinin rapor edildiği vakalar bulunmaktadır (Lagasse vd, 2006; Pinter vd., 2007). Literatürde yer alan ve büyük taşkınlar altında yıkıma yol açan olaylarda (örn: Schoharie Köprüsü yıkımı) oyulma derinlikleri 10 m’nin üzerine çıkmıştır. Bu köprü, uzun yıllar boyunca aşamalı olarak derinleşen oyulma sorunları yaşamıştı. Nihai çöküş, yinleme periyodu nispeten düşük (yaklaşık 50 yıllık) bir taşkın sırasında meydana gelmiştir. Taşkın suyunun köprü ayakları etrafındaki hızı ve süresi, köprünün üçüncü ayağının (Pier 3) temelini tamamen açığa çıkarmıştır. Yapılan araştırmalar, bu ayak altında oluşan oyulma derinliğinin 10 metreyi aştığını ortaya koymuştur. Temeli tamamen destekten yoksun kalan ayak, yapının

üzerindeki yükü taşıyamayarak aniden çökmüş ve o sırada orada bulunan 10 kişinin hayatını kaybetmesine neden olmuştur. Schoharie faciası, dünya çapında Karayolları İdareleri (özellikle FHWA) için bir dönüm noktası olmuş ve köprülerin periyodik oyulma değerlendirmesini ve güçlendirme çalışmalarını zorunlu kılan HEC-18 gibi kılavuzların temelini oluşturmuştur. Bu örnek, mühendislik tasarımında ve risk analizinde oyulmanın ciddiyetinin asla göz ardı edilemeyeceğini somutlaştırmaktadır. Küresel çapta büyük nehir sistemlerinde yapılan hidrolik modellemeler ise 20 ila 40 m aralığında ekstrem oyulma potansiyellerini ortaya koymaktadır (FHWA, 2012).



Şekil 5. Schoharie Köprüsü, NewYork

Bu tez çalışmasında, Gümüşhane şehir merkezinden geçen Harşit Çayı üzerinde yer alan ve farklı geometrilere sahip üç kritik köprü kesiti örnek olarak ele alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, mevsimsel debiler ve farklı yineleme periyotlu taşkın debileri altında (Q_{10} , Q_{25} , Q_{50}) bu köprü ayaklarında oluşabilecek Yerel Oyulma, Daralma Oyulması ve Toplam Oyulma Derinliklerini hidrolik modelleme paketi olan HEC-RAS programı yardımıyla tahmin etmektir. Elde edilen oyulma derinliği bulguları, yapısal güvenlik açısından değerlendirilerek, köprüler için mevcut durum analizi yapılması ve potansiyel tehlikelere karşı koruma ve önlem önerileri sunulması hedeflenmektedir. Bu tez çalışması, giriş bölümünü takiben, beş ana bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, köprü oyulması türleri ve koruma yöntemleri üzerine detaylı literatür taraması sunulmuştur. Üçüncü bölümde, çalışma alanı (Harşit Çayı), HEC-RAS modelleme

prosedürleri ve hidrolik verilerin elde edilişı açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, modelleme ile elde edilen oyulma derinliği bulguları taşkın senaryolarına göre tablo ve grafiklerle sunulmuş ve detaylı olarak tartışılmıştır. Son olarak, beşinci bölümde ise çalışmanın sonuçları özetlenmiş ve bölgedeki mevcut köprüler için gelecekteki çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.



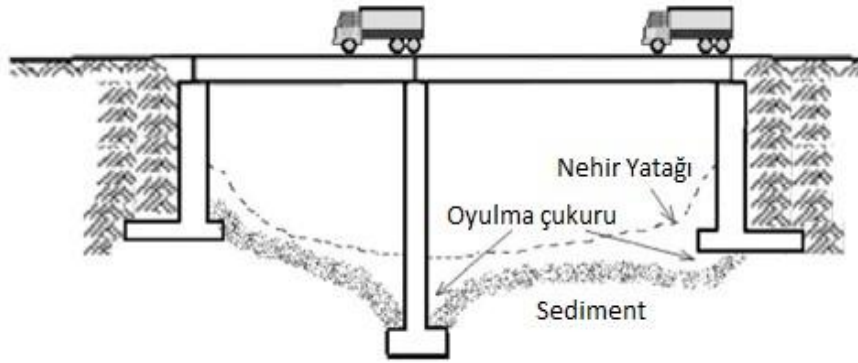
2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Oyulma Kavramı

Oyulma kavramı, genel olarak taban malzemesinin, tabandan veya tabana inşa edilmiş bir yapının etrafından ayrılması ve sürüklenmesi olarak tanımlanır (Keskin vd., 2018). Oyulma, belirli bir akım hızı olan suyun, aşındırıcı etkisi sebebiyle nehir yatağında veya köprü kenar ve orta ayaklarında bulunan yatak malzemesini taşıması ile meydana gelen problemdir (Bayram, 2017). Oyulma, kanal yatağındaki yatak tanelerinin çeşitli hidrolik nedenlerle kanal yatağından uzaklaştırılması işlemidir.

2.2. Oyulma Türü

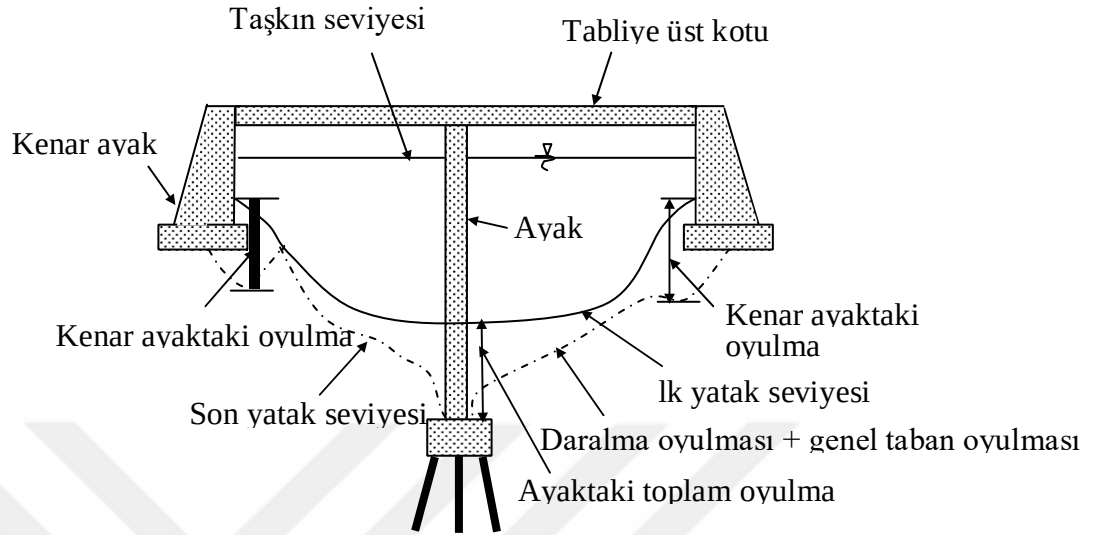
Akarsu yataklarındaki oyulma mekanizmaları, genel olarak üç ana grupta sınıflandırılmaktadır: Akarsu yatağının doğal morfolojisi gereği meydana gelen genel oyulma, köprü kesitindeki daralmaların (akış sıkışmasının) neden olduğu daralma oyulması ve köprü ayakları ile akım etkileşimi sonucu ayak çevresinde gelişen yerel oyulmalar (Berk, 2020; Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025).



Şekil 6. Köprü oyulmalarının şematik gösterimi (Deng ve Cai, 2009' dan uyarlanmıştır).

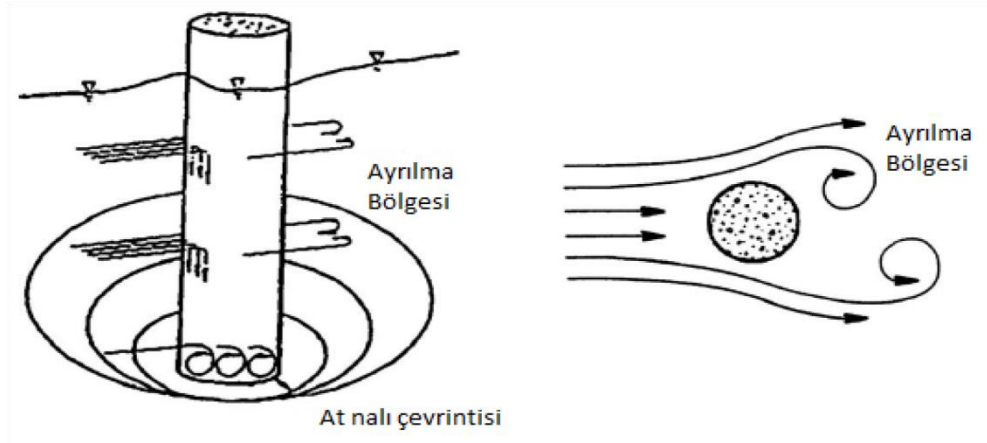
Akarsu yatağının hareketli malzemeden oluştuğu kesitlerde, debi artışına bağlı olarak artan kayma gerilmesi ve akış hızı, daralma oyulmasını tetiklemektedir. Köprü ayaklarının akışa karşı oluşturduğu engel sebebiyle memba yönünde oluşan durgunluk düzlemi, akımı dikey yönde yönlendirerek akarsu taban yatağında türbülanslı çevrıntiler meydana getirmektedir. Bu karmaşık akış yapısının ayak çevresinde oluşturduğu boşluklar 'yerel oyulma' olarak tanımlanmaktadır (Berk, 2020; Gümgüm vd., 2019). Söz konusu yapısal etkilere ek olarak, akarsu morfolojisinin doğal süreci içerisinde gerçekleşen uzun süreli taban değişimleri ise genel oyulma başlığı altında

incelenmektedir (Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025). Köprü mühendisliği uygulamalarında, yapı güvenliğini belirleyen toplam oyulma derinliği; bu üç temel bileşenin süperpozisyonu ile hesaplanmaktadır (Yanmaz, 2002; Balta, 2024).

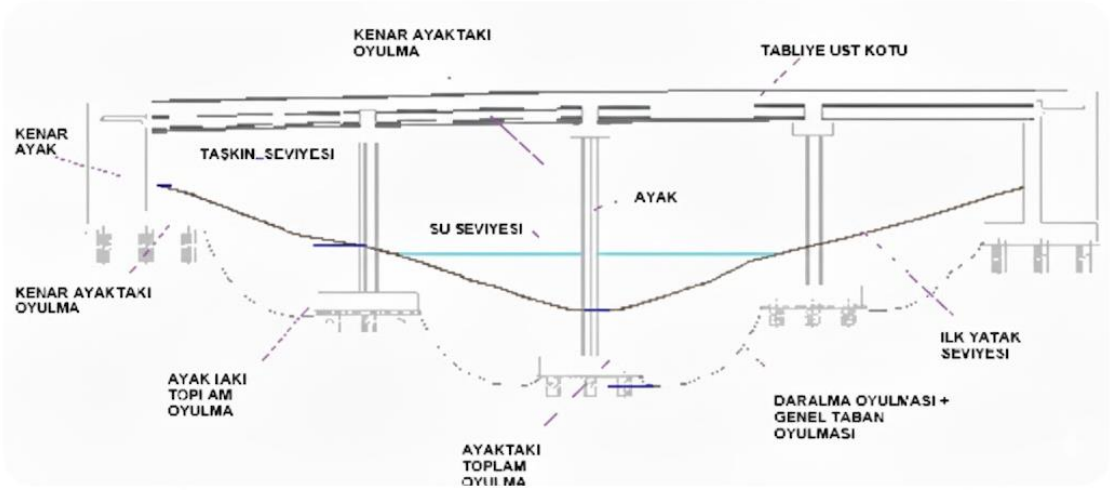


Şekil 7. Köprü açıklığında taban oyulması (Yanmaz, 2022).

Akım köprü ayağına ulaştığında ayağın memba kenarında kabarır ve bu noktada yüksek basınç oluşturur. Yüzeydeki yüksek basınçtan dolayı tabana doğru dikey bir akım oluşur Chiew (1984) ve Raudkivi (1986), bu dikey akımı yerel oyulmanın başlıca nedeni olarak tanımlamıştır. Akım köprü ayağına çarptığında, memba yüzeyinde oluşan basınç artışı su seviyesinde bir yükselmeye ve tabana doğru yönelen dikey bir akışa neden olmaktadır. Literatürde yerel oyulmanın temel tetikleyicisi olarak kabul edilen bu dikey akış, yaklaşan akım ile etkileşime girerek at nalı çevrintilerini (horseshoe vortices) meydana getirir (Berk, 2020; Gümgüm vd., 2019). Kısacası, oyulmayı ilk olarak yüzeyden tabana doğru hareket eden dikey akım başlatır ve meydana getirdiği küçük çukurun içinde gelişen at nalı çevrintileri ile birlikte oyulma çukuru önemli ölçüde genişler (Gümgüm, Aksoy ve Güney, 2019). İlk aşamada dikey akımın etkisiyle oluşan mikro ölçekli oyulma çukuru, at nalı çevrintilerinin sisteme dahil olmasıyla hızla genişleyerek nihai formuna ulaşmaktadır (Mohammad Khail, 2020). Geleneksel teorilerde vurgulanan bu mekanizmalar (Melville, 1975; Raudkivi, 1986), güncel araştırmalarda türbülans yoğunluğu ve akım-yapı etkileşimi çerçevesinde daha detaylı analiz edilmektedir (Balta, 2024).

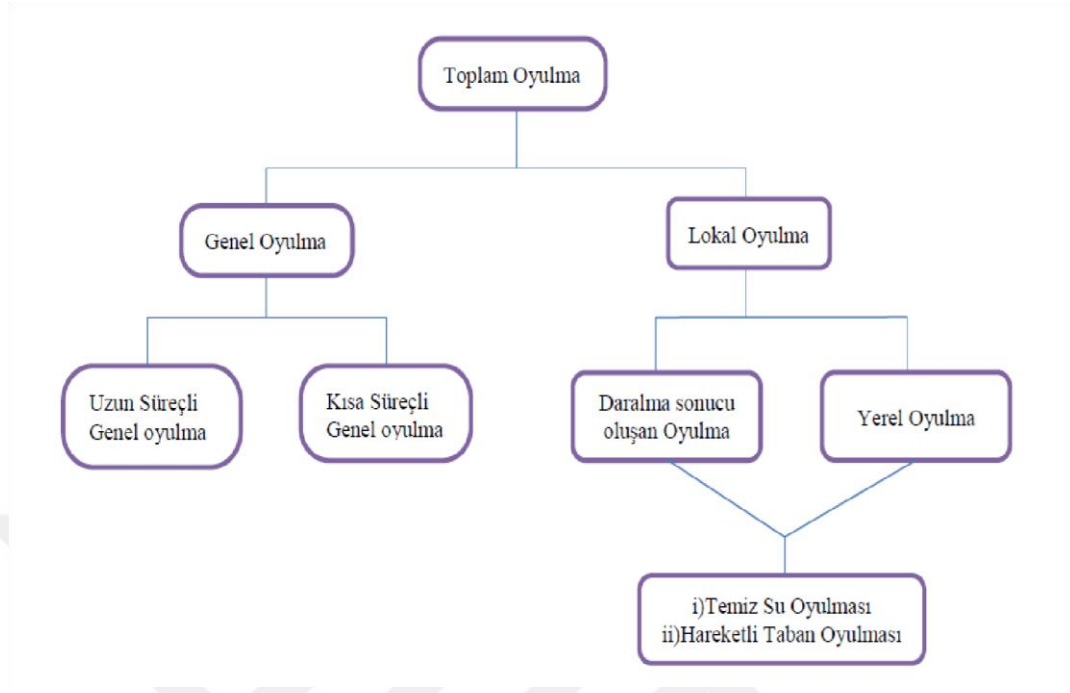


Şekil 8. At nalı çevrirtisi (Yeleğen, 2014).



Şekil 9. Ayak oyulması kesit görünüşü (Bulut, 2017).

Oyulmalar genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılır:



Şekil 10. Oyulmaların sınıflandırılması (Melville ve Coleman,2000).

2.2.1 Genel Oyulma

Genel oyulma (Long-Term Scour), uzun yıllar boyunca akarsu yatağının doğal akım ve sediman taşıma süreçleri sonucunda meydana gelen yatak seviyesindeki genel düşüşü ifade eder. Genel oyulma köprü olsun veya olmasın doğal süreçler nedeniyle oluşur. Bu doğal süreçler; akarsu yatağının bozulması, akarsu kenar şevlerinin stabilitesini yitirerek göçmesi, akarsuyun yön değiştirmesi (bükülmesi) erozyon ile oluşan katı madde taşınması sonucu oluşan oyulmaları ifade eder (İnce vd., 2019).

2.2.2. Daralma Oyulması

Köprü kenar ve orta ayaklarının akış kesitini daraltması sonucunda meydana gelen hidrolik kısıtlamalar, daralma oyulmasının temel sebebidir (İnce vd., 2019). Akış alanının daralmasıyla birlikte ortalama akış hızı ve taban kayma gerilmesi değerleri yükselerek, yatak malzemesinin taşınma kapasitesini artırmaktadır. Bu süreçte nehir yatağında genel bir alçalma ve sediment sürüklenmesi gözlemlenmektedir (Berk, 2020). Daralma oyulması mekanizması, hem temiz su hem de hareketli taban (canlı yatak) koşullarında gelişebilmekte; modelleme sonuçlarında kritik derinliklere ulaşıldığında ise köprü açıklığının artırılması bir mühendislik çözümü olarak öne çıkmaktadır (Balta, 2024). Sayısal modellerde daralma oranının doğru tanımlanması, toplam oyulma derinliğinin hassas tahmini açısından hayati önem taşımaktadır (Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025).



Şekil 11. Daralma oyulması (Yanmaz, 2002).

Şekil 11.'deki gibi W_1 ve W_2 sembolleri sırasıyla yaklaşım ve daralma kesitlerindeki ortalama genişlikleri, y_1 ve y_2 sırasıyla yaklaşım ve daralma kesitlerindeki ortalama derinlikleri göstermektedir. H_d ise daralma oyulması miktarını göstermektedir. Oyulmanın derinliği $\beta = W_1 / W_2$ şeklinde tanımlanan bir daralma katsayısına bağlıdır (Yanmaz, 2002).

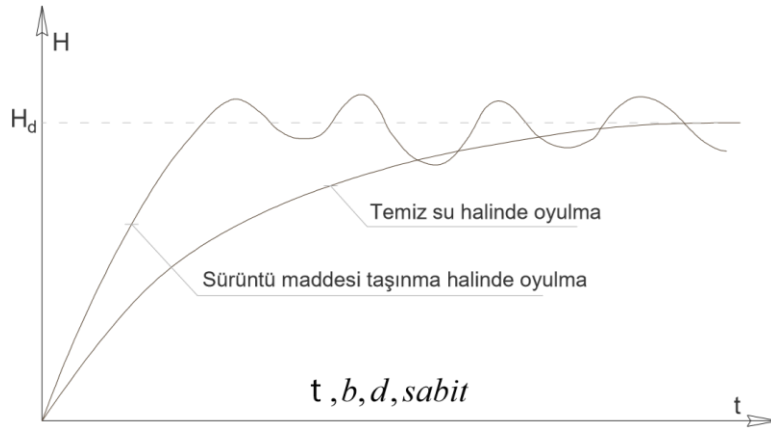
2.2.3. Lokal (Yerel) Oyulmalar

Yerel oyulma, köprü ayakları (orta ayaklar) ve kenar ayakları (tabanları) gibi doğrudan akım alanına yerleştirilmiş yapısal elemanlar etrafında oluşur. Bu, akımın yapıya çarpması sonucu ortaya çıkan şiddetli at nalı girdapları (horseshoe vortices) ve aşağı doğru yönlenen akımlar nedeniyle yatak malzemesinin lokal olarak hızla aşındırılmasıdır. Lokal(yerel) oyulma, yapıların yerel akım koşullarını (hız ve türbülans) ve karmaşıklığını arttırması sebebi ile bu engellerin yakın çevresinde meydana gelir (İnce vd., 2019). Yapısal engellerin akışın türbülans yoğunluğunu artırması, sediment taşınım mekanizmasını karmaşıktırarak yerel düzeyde hızlı bir malzeme kaybına yol açar (İnce vd., 2019). Günümüzde bu karmaşık etkileşimlerin çözülmesi amacıyla gelişmiş fiziksel model deneyleri ve sayısal analizler yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Balta,

2024). Temiz su ve hareketli taban koşulları için geliştirilen çok sayıda ampirik formül, tasarım aşamasında nihai oyulma derinliğinin öngörülmesine olanak tanır (Gümgüm vd., 2019). Literatürde kabul gören yaklaşımlara göre, memba yönünden sediment taşınımı olup olmamasına bağlı olarak bu süreç iki ana kategori altında değerlendirilmektedir (Yanmaz, 2002; Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025). Bu nedenle, temiz su ve canlı yatak oyulması için denge oyulma derinliğini tahmin etmek ve tasarım aşamasında oyulma derinliğini karakterize etmek için çok sayıda formül mevcuttur (İnce vd., 2019). Köprü ayakları etrafında meydana gelen oyulmalar membada sürüntü maddesi taşınıp taşınmaması durumuna göre temiz su oyulması ve hareketli taban oyulması olarak iki grupta incelenmektedir (Yanmaz, 2002).

2.2.4 Temiz Su Oyulması ve Hareketli Taban Oyulması

Köprü ayakları çevresindeki oyulma mekanizması, memba akışının sediment taşıma kapasitesine bağlı olarak iki temel fazda gerçekleşir. Ortalama akım hızının (U), taban malzemesinin hareketini başlatan kritik eşik hızından (U_{kritik}) düşük olduğu ve nehir genelinde malzeme taşınımının gerçekleşmediği durumlarda temiz su oyulması meydana gelmektedir (Richardson ve Davis, 2001; Berk, 2020). Alüvyonlu akarsularda akımın sürüklenme gerilmesinin taban malzemesinin kritik sürüklenme gerilmesinden büyük olması, $\tau > \tau_c$, durumunda tabanda sürüntü maddesi taşınımı başlamaktadır. Bu şekilde meydana gelen oyulmalara hareketli taban oyulması denilmektedir. Ancak akarsu içerisinde bir engel olması durumunda akım sürüklenme gerilmesi, taban malzemesinin kritik sürüklenme gerilmesinden küçük olsa bile engel etrafındaki çevrintilerden dolayı oyulma oluşmaktadır. Bu oyulmaya temiz su halinde oyulma denilir (Yanmaz, 2002). Bu türde, oyulma sadece köprü ayağı veya kenar ayağı gibi yerel bir engele çarpan suyun neden olduğu lokal hızlanma ve türbülans nedeniyle gerçekleşir. Şekil 7’de gösterildiği üzere, temiz su oyulması zamanla artış göstererek nihai bir denge değerine ulaşır. Bu seviye denge oyulma derinliği (H_d) olarak tanımlanmaktadır (Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025). Hareketli taban koşullarında ise bu denge derinliğine çok daha kısa bir sürede ulaşıldığı bilinmektedir (Yanmaz, 2002; Mohammad Khail, 2020).



Şekil 12. Oyulma derinliği grafiği (Başak, Başlamışlı ve Ergün, 1977).

2.3. Köprü Ayakları Etrafında Tortu Taşınması ve Hareketi

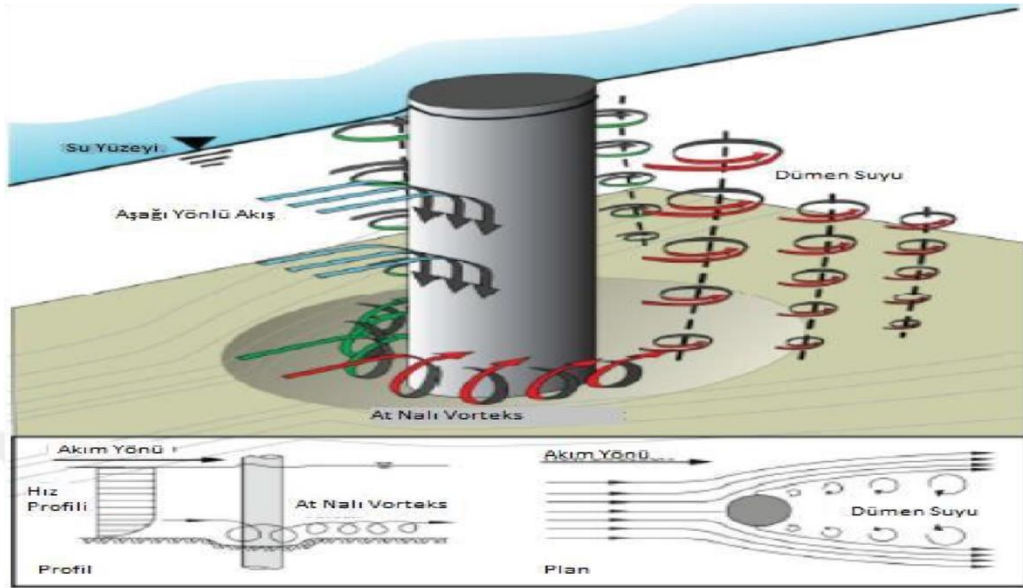
Köprü ayakları gibi akış kesitine doğrudan müdahale eden yapısal unsurlar etrafındaki tortu taşınımı, oldukça karmaşık bir hidrodinamik sürecin ürünüdür. Bu süreç, akışın yapı yüzeyine çarpmasıyla tetiklenen yüksek enerjili dikey akımlar ve tabanda oluşan çevrintilerin birleşik etkisiyle şekillenmektedir (Berk, 2020). Şekil 041cdb'de detaylıca görüldüğü üzere; bu mekanizma temel olarak "at nalı girdabı" ve "uyanık girdap" (art izi çevrintisi) adı verilen iki temel yapı tarafından domine edilmektedir (Sheppard ve Renna, 2010). Yerel oyulmanın zamana bağlı gelişimi, literatürde klasikleşen Zanke (1978) yaklaşımı ile güncel araştırmaların sentezi sonucunda dört karakteristik evrede incelenmektedir (Balta, 2024; Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025). Bu gelişim aşamaları şu şekilde özetlenebilir:

Başlangıç ve İlk Aşama: Oyulma işlemi, ayakların yan taraflarında yaklaşık 40° ila 55° 'lik bir dar açı altında gelişen yanal erozyon ile tetiklenir. Bu evrede at nalı ve uyanık girdaplar yatak malzemesini hareketlendirerek ilk çukurları oluşturur (Berk, 2020).

Hızlı Gelişim Safhası: Ayakların memba tarafındaki (önündeki) ilk oyukların birleşmesiyle karakterize edilir. Maksimum oyulma derinliği bu aşamada ayağın önünde yoğunlaşırken, aşınan malzeme mansap bölgesinde kumullar oluşturmaya başlar ve derinlik gelişimi çok hızlı seyreder (Mohammad Khail, 2020). **Gelişme aşaması:** Ayakların önündeki maksimum derinliğe ulaşıldıktan sonra, oyulma gelişimi yavaşlar.

Yavaşlama (Gelişme) Safhası: Oyulma çukuru genişleyip maksimum derinliğe yaklaştıkça, tabandaki çevrintilerin kazma gücü nispeten zayıflar ve oyulma hızı belirgin şekilde yavaşlar.

Denge Aşaması: Erozyon kapasitesinin dengeye ulaştığı, oyulma çukurunun nihai genişlik ve derinliğine ulaştığı aşamadır. Bu noktadan sonra meydana gelen değişimler mühendislik açısından ihmal edilebilir düzeydedir (İnce vd., 2019).



Şekil 13. Silindirik köprü ayağında yerel oyulmalara neden olan akımlar (Sheppard ve Renna, 2010).

2.3.1. Aşağı Akış

Akış alanı köprü ayağı cephesine çarptığında, su akışının derinliğinin yüksekliği artacak ve köprü ayağının ön yüzeyinde bir durgunluk noktası oluşacaktır. Bu nedenle memba ve durgun taraflar arasında basınç farkı başlar. Ayrıca akışın derinliği akışkanın şekline ve hızına bağlıdır. Ayak önünde akış hızı azaldığında yaklaşma hızına bağlı olduğundan basınç da azalır (Abdelhameed, 2017). Yüksek basınçlı memba akımı, ayağın önünden tabana doğru dik bir şekilde aşağı yönelerek Aşağı Akışı (Downflow) oluşturur.

2.3.2. At Nalı Girdabı

At nalı girdabı sistemi, oyulma deliğinin oluşmasından sonra doğal olarak oluşur (Özalp, 2013). Aşağı akış, gelen akışla birleştiğinde at nalı girdap sistemi oluşturulacaktır. Girdap akışı, bu amaçla Şekil 9 'da gösterildiği gibi iskele kenarları boyunca aşağı yönde hareket eder. At nalı girdabının yoğunluğu, iskelenin şekline veya geometrisine ve türbülanslı akışa bağlıdır (Abdelhameed, 2017). Bu girdap, ayağın çevresinde at nalı şeklinde bir yol izleyerek yatak malzemesini oyarak kaldırır ve yerel oyulmaya sebep olur.

2.3.3 Uyanık Girdaplar

Şekil 13' de açıklandığı gibi, akış bir iskelenin kenarlarından geçtiğinde akış bölünmesi meydana geldiğinde oluşan iz girdaplarına denir. Bu iz girdapları aynı zamanda köprü ayağı etrafındaki malzeme erozyonundan da sorumludur. Dalga girdapları aşağı yönde hareket eder ve çökeltilerin aşağı yönde ve at nalı girdapları tarafından taşınmasına yol açar (Melville ve Coleman, 2000; Abdelhameed, 2017).

2.4. Oyulmaya Etki Eden Parametreler

Köprü ayağı çevresinde gözlemlenen oyulma olgusu, akışın türbülanslı yapısı ile yatak malzemesinin direnç özellikleri arasındaki dinamik etkileşimin bir ürünüdür. Bu sürecin yüksek derecede karmaşıklık barındırması, hidrolik, morfolojik ve geometrik çok sayıda değişkenin sürece aynı anda müdahil olmasından kaynaklanmaktadır. Mühendislik tasarımlarında oyulma mekanizması aşağıdaki başlıklar altında sınıflandırılmaktadır.

2.4.1 Akım Hızı

Yerel oyulma derinliğinin gelişimi, akış hızı U ile yatak malzemesinin kritik hareket hızı U_c arasındaki oransal ilişkiye doğrudan bağlıdır. Temiz su oyulması koşullarında ($U < U_c$), akışın sahip olduğu kinetik enerjinin tamamı doğrudan taban malzemesinin oyulma çukurundan uzaklaştırılması için kullanılır. Bu evrede, hızın U_c sınırına yaklaşmasıyla birlikte oyulma derinliği doğrusal bir artış sergileyerek maksimum seviyesine ulaşır (Richardson ve Davis, 2001; Berk, 2020). Akış hızının kritik eşiği aştığı (U_c) hareketli taban koşullarında ise enerji dengesi değişmektedir; zira akım gücünün bir kısmı memba yönünden gelen sedimentin taşınması için kullanılır. Bu enerji paylaşımı ve oyulma çukuruna sürekli sediment girişi nedeniyle, $U=U_c$ noktasında ulaşılan 'pik' oyulma derinliği, hareketli taban aşamasının ilk evrelerinde bir miktar azalma eğilimi gösterir (Balta, 2024; Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025). Literatürde bu durum, temiz su oyulması kapasitesinin hareketli taban dengesine kıyasla daha ekstrem derinlikler üretebileceğini ortaya koymaktadır (Mohammad Khail, 2020).

$U/U_c = 1.0$ olması durumunda, oyulma derinliği maksimum olmaktadır.

$U/U_c = 1.5 \sim 2$ olması durumunda, oyulma derinliği azalmaktadır.

$2.0 < U/U_c < 3.0 \sim 5.0$ olması durumunda, oyulma derinliği tekrar artmakta,

$U/U_c \approx 5.0$ olması halinde 2. maksimum oyulma derinliğine ulaştıktan sonra tekrar azalmaktadır (Üç, 1988; Yanmaz, 2002).

2.4.2 Akım Derinliği

Akım derinliği (y), köprü ayağı etrafındaki oyulma derinliğini etkileyen temel hidrolik parametrelerden biridir. Genellikle, oyulma derinliği akım derinliği ile doğru orantılıdır, ancak bu ilişki tamamen doğrusal değildir.

Melville ve Coleman (2000), oyulma derinliği (d_s) ile akım derinliği (y), arasındaki ilişkiyi incelerken, bu oranın (d_s / y) sabit olmadığını ve oyulmanın akım derinliğinin yaklaşık 0.8-2.5 katına kadar ulaşabileceğini belirtmişlerdir. Özellikle derin akışlarda, oyulma derinliğinin akım derinliğine oranı azalma eğilimi gösterebilir. Ancak, çoğu ampirik oyulma denklemi (CSU, HEC-18'deki Froehlich denklemleri), oyulma derinliğini hesaplarken yaklaşım kesitindeki ortalama akım derinliğini doğrudan bir değişken olarak kullanır.

2.4.3. Yatak Malzemesi Özellikleri

Akarsu yatağını oluşturan malzemenin özellikleri, oyulma direncini ve nihai oyulma derinliğini belirleyen en kritik fiziksel faktörlerdir.

Tane Boyutu (D_{50}): Yatak malzemesinin ortalama tane çapı D_{50} , oyulmaya karşı koyduğu direnci doğrudan etkiler. D_{50} değerinin artmasıyla, malzemeyi yerinden oynatmak için gereken kritik kayma gerilmesi de artar ve dolayısıyla oyulma derinliği azalır.

Tane Boyutu Dağılımı ve Zırhlanma: Tabanda üniform olmayan (farklı boyutlarda) bir karışım bulunması durumunda, akış etkisiyle ince taneler mansaba taşınırken, iri taneler tabanda birikerek koruyucu bir tabaka meydana getirir. Literatürde "zırhlanma" olarak tanımlanan bu doğal süreç, oyulma çukurunun gelişimini durduran veya model tahminlerinin altında kalmasını sağlayan kritik bir faktördür (Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025; Mohammad Khail, 2020).

Birleşik Zemin: Akarsu yatağının sadece kum ve çakıl gibi taneli malzemelerden değil; kil ve silt gibi ince taneli unsurlardan oluşması, erozyon sürecini tamamen farklı bir boyuta taşır. Bu tür zeminlerde, taneler arasındaki çekim kuvvetleri (kohezyon) baskın hale gelerek zemine bir bütünlük kazandırır. Dolayısıyla kohezyonlu zeminlerdeki aşınma, granüler zeminlerde görülen tekil tane hareketi yerine, zeminin büyük parçalar veya bloklar halinde kopmasıyla gerçekleşir. Bu yapısal farklılık, geleneksel oyulma formüllerinin hata payını artırdığu için, kohezyon etkisindeki bölgelerde çok daha kapsamlı ve gelişmiş analiz yöntemlerinin kullanılması bir zorunluluk haline gelmektedir (Yıldız vd., 2021).

2.4.4. Köprü Ayağı Geometrisi

Köprü ayağının akışa sunduğu engel, akım ayrılmasına, girdap oluşumuna ve dolayısıyla yerel oyulmaya neden olur. Bu engelin şekli (geometrisi), yerel hidrolik koşulları önemli ölçüde etkiler.

Ayak Burun Şekli (K_1 Katsayısı): Köprü ayağının memba (ön) yüzeyinin formu, akışın ne kadar "sert" veya "yumuşak" bir şekilde ayrılacağını belirler. Kare burunlu ayaklar akışı aniden durdurarak yüksek basınç gradyanları oluşturduğu için en yüksek oyulma katsayısına ($K_1:1.1$) sahipken, silindirik ve yuvarlak burunlu yapılar akımı daha hidrodinamik bir şekilde yönlendirerek oyulma şiddetini düşürmektedir (Arneson vd., 2012; Berk, 2020). Sivri burunlu ayaklar ise en düşük oyulma katsayısına sahiptir.



Şekil 14. Harşit Çayı üzerinde yer alan ve akıma yuvarlak burunlu bir yüzey sunan köprü ayağı örneği, Gümüşhane şehir geçişi, Karşıyaka Mahallesi mevkiinde yer alan köprü ayağı



Şekil 15. Harşit Çayı üzerinde yer alan dairesel/silindirik burunlu ayak tipi köprü ayağı örneği, Gümüşhane Merkez, 15 Şubat Caddesi Köprüsü

Ayak Genişliği: Oyulma derinliği, ayak genişliği ile doğru orantılıdır. Geniş ayaklar, akışa daha büyük bir engel teşkil ederek daha büyük at nalı girdapları oluşturur ve daha derin oyulmaya yol açar.

Akım Çarpma Açısı (θ , K_2 Katsayısı): Akım, köprü ayağına dik ($\theta=0$) yerine belli bir açıyla çarptığında, ayak çevresindeki oyulma derinliği önemli ölçüde artar. Bu durum, suyun ayak boyunca daha uzun bir süre yüksek enerjiyle akmasına ve oyulma katsayısının (K_2) yükselmesine neden olur. HEC-18 kılavuzları, çarpma açısının etkisini K_2 katsayısı ile denklemlere dahil eder (FHWA, 2012; Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025).

2.5. Oyulma Derinliği Tahmin Metotları

Köprü oyulma derinliğinin tahmin edilmesi için saha gözlemlerinden fiziksel model deneylerine ve ampirik formüllere kadar birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Hidrolik mühendisliğinde en yaygın kullanılan ve pratik uygulamalara olanak tanıyan metotlar, ampirik formüllerdir.

2.5.1. Ampirik Denklemler

Ampirik formüller, köprü mühendisliğinde oyulma derinliğinin kestirimi için kullanılan, saha ve laboratuvar verilerinden türetilmiş matematiksel modellerdir. Bu çalışmada kullanılan HEC-RAS yazılımı, ABD Federal Highway Administration (FHWA) tarafından geliştirilen ve en yaygın kullanılan iki denklemi baz almaktadır:

Colorado State University (CSU) Denklemi, geniş bir yelpazedeki saha ve laboratuvar koşullarını kapsayacak şekilde kalibre edilmiştir. Ayak şekli (K_1), çarpma açısı (K_2), yatak durumu (K_3) ve zırhlanma (K_4) gibi düzeltme katsayılarını kullanarak maksimum oyulma derinliğini tahmin eder. Genellikle hareketli yatak koşulları için daha uygun kabul edilir.

Froehlich Denklemi, özellikle kenar ayak oyulması tahmini için sıkça kullanılır ve kenar ayak uzunluğu, akış derinliği ve akım debisi gibi parametreleri temel alır. Bu denklem, temel olarak temiz su ve canlı yatak koşullarında yapılabilecek maksimum oyulma potansiyelini öngörmeyi amaçlar.

2.5.1.1. Colorado State University (CSU) Denklemi

CSU denklemi, köprü ayağındaki oyulma derinliğini hesaplamak için birincil olarak kullanılan ve genellikle mühendislik uygulamalarında güvenilir kabul edilen denklemlerden biridir. CSU Denklemi, özellikle köprü ayakları etrafındaki hidrolik geometrinin oyulma üzerindeki etkisini (K_1 , K_2 katsayıları) detaylıca hesaba kattığı için dünya genelinde yaygın olarak referans denklem olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada elde edilen oyulma derinlikleri için birincil tahmin bu formül üzerinden yapılmıştır (Karim vd, 2021).

$$y_s = 2.0K_1K_2K_3K_4a' \left(\frac{h_1}{a'}\right)^{0.35} Fr_1^{0.43} \quad \text{Eşitlik (1)}$$

y_s : Köprü ayağı etrafındaki yerel oyulma derinliği (m)

K_1 : Ayak şekli (geometri) katsayısı (Kare burunlu ayaklar için >1 , dairesel burunlu ayaklar için 1.1)

K_2 : Akışın açısı katsayısı

K_3 : Yatak malzemesi hareketi (zemin durumu) katsayısı (Temiz Su veya Hareketli Taban)

K_4 : Zırhlanma (armoring) katsayısı

a' : Ayak genişliğinin akım yönündeki izdüşümü

h_1 : Köprünün memba kesitindeki ortalama akım derinliği

Fr : Köprünün memba kesitindeki Froude sayısı

2.5.1.2. Froehlich Denklemi

Froehlich denklemi, genellikle Karayolları İdaresi tarafından taşkınlarda oyulma riskini değerlendirmek için önerilen denklemlerden biridir. CSU denklemi ile birlikte kullanılarak oyulma derinliği tahminlerinde bir aralık oluşturulmasına yardımcı olur.

Froehlich Denklemi, yatak malzemesinin tane boyutu dağılımını d_{50} doğrudan hesaba katan yapısıyla dikkat çeker. Bu formül, yatak malzemesinin oyulmaya karşı direncini daha güçlü bir şekilde modellediği için, CSU denklemi ile elde edilen sonuçların doğrulama aralığını belirlemede kullanılmıştır. HEC-RAS içindeki uygulama sonuçları, Froehlich denkleminin ampirik doğası gereği, pik taşkın debilerinde maksimum güvenlik payı bıraktığını ve bu nedenle risk analizlerinde öncelikli tercih edildiğini göstermektedir (Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025; Shrestha vd, 2020).

$$y_s = 2.42aK_1K_2\left(\frac{h_1}{a}\right)^{0.33}Fr_1^{0.67}\left(\frac{d_{50}}{a}\right)^{-0.13} \quad \text{Eşitlik (2)}$$

y_s : Köprü ayağı etrafındaki yerel oyulma derinliği

a : Köprü ayağının genişliği

K_1 : Ayak şekli (geometri) katsayısı

K_2 : Akışın açısı katsayısı

h_1 : Köprünün memba kesitindeki ortalama akım derinliği

Fr : Köprünün memba kesitindeki Froude sayısı

d_{50} : Yatak malzemesinin ağırlıkça %50'sinin geçtiği tane çapı

2.5.2. HEC-RAS Modellemesi

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), hem kararlı hem de kararsız akım koşulları altında akarsu hidroliğini ve sediment taşınımını modelleyebilen bir yazılımdır. Oyulma hesaplamalarında HEC-RAS, nehir kesit geometrisi, manning pürüzlülük katsayısı ve debi gibi girdileri kullanarak su yüzeyi profilini ve yerel akış hızlarını hesaplar. Hesaplanan bu yerel hidrolik parametreleri, bünyesindeki ampirik oyulma denklemlerine (CSU, Froehlich vb.) girdi olarak sunarak Köprü Ayağı Oyulması, Daralma Oyulması ve Kenar Ayak Oyulması bileşenlerini hesaplar. Toplam oyulma derinliği, bu üç bileşenin genellikle toplanmasıyla bulunur.

Modern sayısal modelleme yaklaşımlarında HEC-RAS, özellikle taşkın gibi ekstrem durumlarda akışın köprü bileşenleri üzerindeki etkisini yüksek hassasiyetle öngörebilmektedir (Balta, 2024; Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025). Yazılımın sunduğu grafiksel arayüz, akış mekanizmalarının sayısal bir karşılığını oluşturarak mühendislik kararlarının doğrulanmasına yardımcı olur (Pandey vd., 2020).

2.6. Köprülerde Oyulma Önlemleri ve Koruma Yöntemleri

Köprü ayakları ve kenar ayakları çevresinde oluşabilecek oyulma risklerini azaltmak için hidrolik mühendisliğinde çeşitli koruma ve karşı önlem (countermeasure) yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemler, esas olarak akarsu yatağının oyulmaya karşı direncini artırmayı veya akım hızını, dolayısıyla oyulmaya neden olan çevrinti şiddetini azaltmayı hedefler (Pandey vd., 2020).

2.6.1. Dolaylı Önlemler (Akım Kontrolü)

Bu yöntemler, akarsu yatağının morfolojisini ve hidroliğini düzenleyerek oyulma potansiyelini dolaylı olarak azaltır.

Mahmuzlar (Spur Dikes / Groynes): Akarsu akımını köprü ayaklarından uzağa yönlendirmek veya köprü yaklaşım akımını düzenleyerek çarpma açısını (K_2) azaltmak amacıyla inşa edilen yapılardır (Lagasse vd., 2006). Mahmuzlar, ayrıca yatakta sediment birikimini teşvik ederek yerel oyulma potansiyelini düşürebilir.



Şekil 16. Akarsu yatağında akımı yönlendirme ve oyulma kontrolü amacıyla kullanılan gabion dolgulu (taş kafes) mahmuz yapısı (OGM, 2013).

Kılavuz Kanallar: Köprü açıklığına yaklaşan akımın en verimli ve dik bir şekilde akmasını sağlamak için inşa edilen, genellikle taş veya beton kaplamalı yönlendirici yapılardır. Kenar ayak oyulmasını azaltmada etkilidir.

Yarma Kazıkları (Sacrificial Piles): Köprü ayağının memba (ön) tarafına, akış yönüne paralel şekilde çakılan bu yardımcı kazıklar, gelen akımı henüz ana ayağa ulaşmadan böler. Böylece at nalı girdabının enerjisi parçalanarak ana ayak etrafındaki oyulma derinliği minimize edilir (Balta, 2024).

2.6.2. Yapısal Önlemler (Bölgesel Koruma)

Bu yöntemler, köprü elemanlarının çevresindeki yatağı fiziksel olarak koruyarak oyulmaya karşı direnç oluşturur.

Zırhlanma (Riprap / Kaya Dolgu): En yaygın ve ekonomik koruma yöntemidir. . Ayak çevresine belirli bir gradasyonda kaya blokları yerleştirilerek at nalı girdabının tabana ulaşması engellenir (Pandey vd., 2020). Köprü ayaklarının çevresine, akımın taşıma gücünden daha büyük boyutlarda kaya dolgu veya beton blokların serilmesiyle oluşturulur. Bu zırh, yatağın oyulmaya karşı direncini yapay olarak artırır (Sheppard ve Renna, 2010). Zırhlamanın başarısı, kaya boyutunun (D50) yerel hızlara uygun seçilmesine ve yerleşim derinliğine bağlıdır.

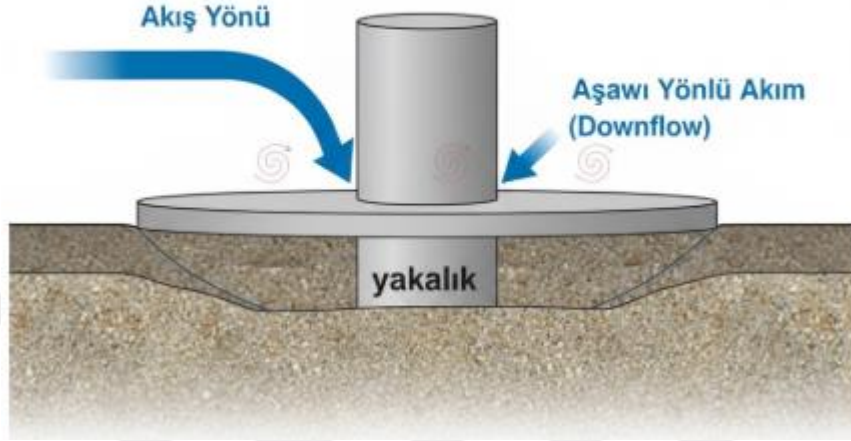


Şekil 17. Köprü ayağı çevresinde oyulmaya karşı uygulanan kaya dolgu (rip rap) zırhlanma örneği (Sears, 2024).

Taban Kuşakları (Sills): Akarsu yatağının boyuna eğimini stabilize etmek ve akışın kinetik enerjisini kırmak amacıyla kullanılan enine yapılardır. Yüksek eğimli ve taşkın debilerinde aşırı oyulma potansiyeli sergileyen yataklarda, taban kuşakları suyun hızını düşürerek memba tarafında bir tortu birikimi (sedimentasyon) sağlar. Bu durum, nehir tabanının kademeli olarak yükselmesine ve köprü ayakları etrafındaki efektif oyulma derinliğinin azalmasına yardımcı olur. Bölgesel bir koruma stratejisi olarak taban kuşakları, akış rejimini kontrol altına alarak köprü yapılarının temel stabilitesini uzun vadede korumayı amaçlamaktadır (Sears, 2024).

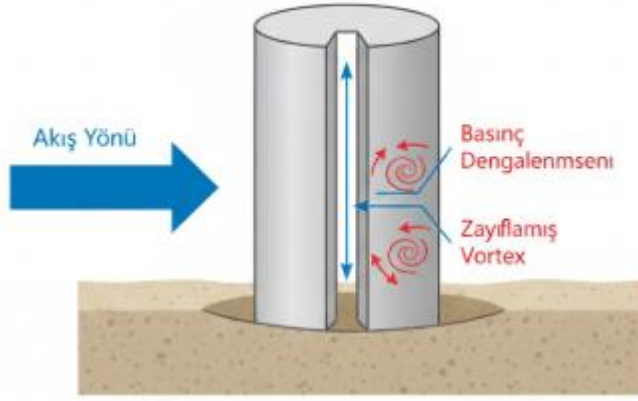
Oyulma Yakalığı (Scour Collar): Köprü ayağının tabanına, ayak çevresini saran yatay bir levha veya beton yakalık monte edilmesidir. Bu yakalık, aşağı yönlü akımı

keserek veya geniş bir alana yayarak at nalı çevrintilerinin oluşumunu engeller veya şiddetini azaltır. Güncel çalışmalar, doğru tasarlanmış bir yakalığın oyulma derinliğini %50-60 oranında azalttığını kanıtlamaktadır (Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025).



Şekil 18. Oyulma yakalığı çalışma prensibi şematığı

Yarıklı Ayaklar (Pier Slotting): Ayak gövdesi boyunca açılan düşey yarıklar, ayağın iki tarafındaki basınç farkını dengeler. Bu hidrolik düzenleme sayesinde çevrinti şiddeti düşürülerek oyulma potansiyeli kontrol altına alınır (Yıldız vd., 2021). Literatürde ve laboratuvar ölçekli deneylerde oyulma derinliğini azaltmada oldukça etkili olduğu kanıtlanmış olsa da; uygulamadaki kalıp zorlukları, maliyet artışı ve ayağın taşıma kapasitesini (kesme güvenliğini) düşürme riski nedeniyle sahada kullanımı sınırlıdır. Bu yöntem, genellikle standart koruma yöntemlerinin yetersiz kaldığı çok özel hidrolik koşullara sahip projelerde bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (Yıldız vd., 2021; Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025).



Şekil 19. Yarıklı ayak çalışma prensibi

2.6.3. Temel Derinliğinin Artırılması

En kesin koruma yöntemi, oyulma derinliği tahmini yapıldıktan sonra köprü temellerinin nihai oyulma derinliğinin altına yerleştirilmesidir (FHWA, 2012).

Derin Temeller: Temel tipinin, sığ temeller yerine kazıklı temeller veya kuyu temeller olarak seçilmesi. Bu, temelin, tahmin edilen maksimum oyulma derinliği geçilse dahi yapının taşıma kapasitesini koruyacak sağlam bir zemin katmanına ulaşmasını sağlar.

Genişletilmiş Koruma Sınırı: Taşkın debisinin yinleme periyodu, modelleme belirsizlikleri ve gelecekteki olası yatak değişimleri (nehrin genel taban alçalması) gibi faktörleri dikkate alarak, tahmini nihai oyulma derinliğine ek bir güvenlik payı bırakılması esastır (Akıntürk ve Baduna Koçyiğit, 2025).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Gümüşhane Harşit Çayı üzerinde yer alan üç adet köprü ayaklarında meydana gelebilecek oyulmaların analizi için sayısal hidrolik modelleme yöntemi kullanılmıştır. Modelleme ve analiz süreçlerinde, bu alanda uluslararası standart olarak kabul edilen HEC-RAS 6.5 yazılımından faydalanılmıştır. Modelleme süreci; coğrafi verilerin hazırlanması, hidrolik model geometrisinin oluşturulması, sınır şartlarının tanımlanması, modelin farklı debi senaryoları altında çalıştırılması ve sonuçların yorumlanması adımlarını kapsamaktadır. Çalışma alanı, Gümüşhane il merkezinden geçen Harşit Çayı'nın yaklaşık 1360 m bir kesimini kapsamaktadır. Bu kesim, yoğun yerleşim alanlarının içinden geçmekte olup, yatak geometrisi yer yer insan yapımı duvarlar ve yapılarla şekillendirilmiştir. Modelleme alanı içerisinde, Karşıyaka Cami Köprüsü de dahil olmak üzere, ulaşım ağı açısından önem taşıyan üç adet karayolu köprüsü bulunmaktadır.

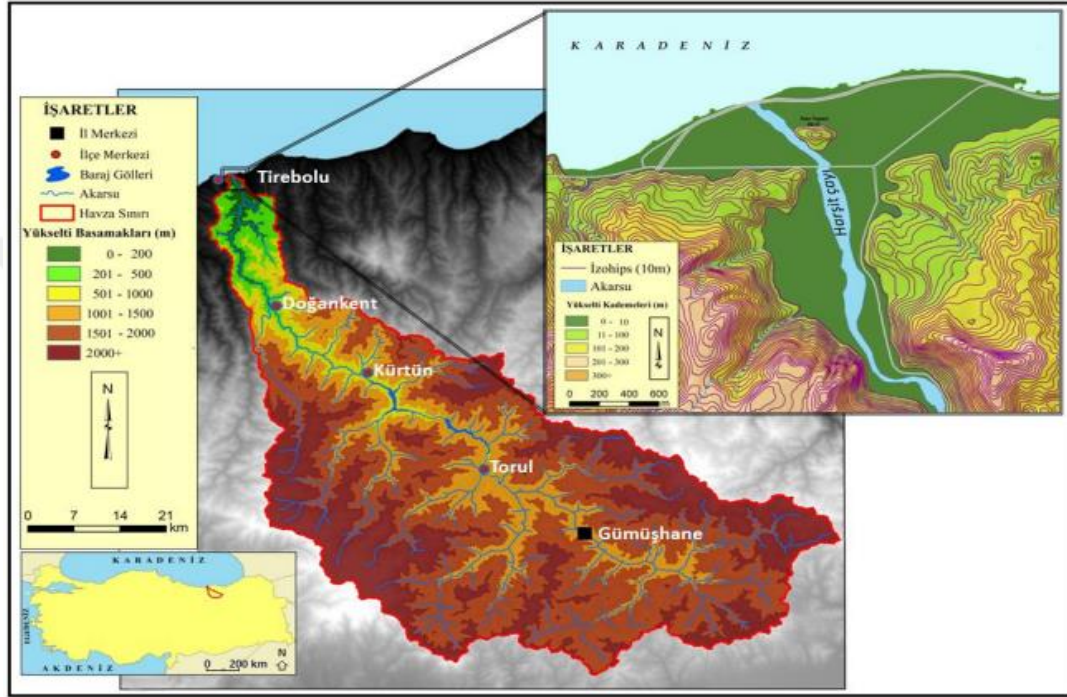
3.1. HEC-RAS Hidrolik Modelleme Yazılımı

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), Amerika Birleşik Devletleri Ordusu Mühendisler Birliği (US Army Corps of Engineers - USACE) bünyesindeki Hidroloji Mühendislik Merkezi tarafından geliştirilen bir hidrolik modelleme yazılımıdır. Açık kanal akışları, taşkın analizi, sediman taşınımı ve su kalitesi modellemesi gibi geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Hem bir boyutlu (1D) hem de iki boyutlu (2D) kararlı ve kararsız akım analizlerine olanak sağlayan bu program, dünya genelinde mühendislik ve akademik çalışmalarda yaygın olarak güvenilir bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, nehir ağının ve hidrolik yapıların 1D modelleme yetenekleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan oyulma derinlikleri, HEC-RAS modeli tarafından belirli bir debi koşulu altında ulaşılabilecek nihai (denge) oyulma derinliklerini ifade etmektedir. Bu derinliklere ulaşılması için geçen zaman faktörü doğrudan model tarafından hesaplanmamakta olup, mühendislik yaklaşımlarında en kötü durum senaryosu olarak değerlendirilmektedir.

3.2. Çalışma Alanı ve Veriler

Harşit Çayı, Doğu Karadeniz Bölgesi'nin önemli akarsularından biridir. Kaynağını (membasını), Gümüşhane il sınırları içerisindeki Sarıçiçek Dağları'nın eteklerinden ve özellikle Sarıçiçek Köyü çevresindeki yüksek rakımlı bölgelerden almaktadır. Yaklaşık

150 km 'lık bir güzergâhı takip eden çay, Giresun'un Tirebolu ilçesinden Karadeniz'e dökülür. Çayın incelenen kesiti, Gümüşhane şehir merkezinden geçen kentsel kesittir. Bu kesit, dar ve yüksek eğimli vadinin etkisiyle hızlı bir akış rejimine sahiptir. Bu hız, beraberinde yüksek sediman taşıma kapasitesi ve özellikle taşkın dönemlerinde yüksek oyulma potansiyeli riskini getirir. Bölgenin iklimsel özellikleri ve topoğrafik yapısı nedeniyle, çayın debisi mevsimsel olarak büyük farklılıklar göstermektedir.



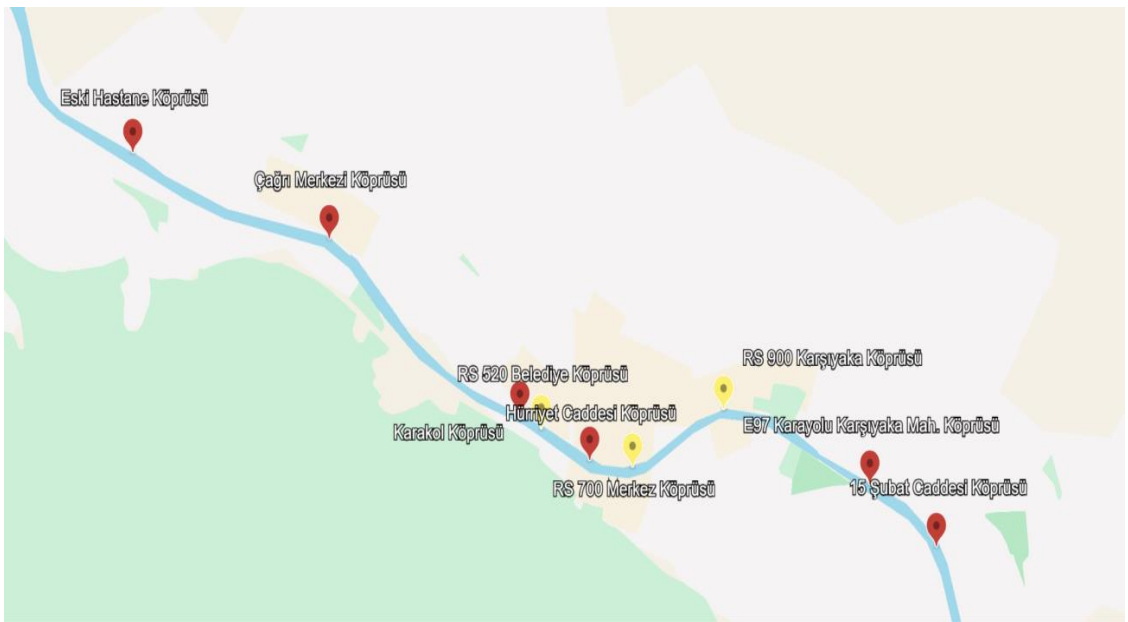
Şekil 20. Harşit Çayı Havzası'nın coğrafi konumu, yükselti dağılımı ve Tirebolu'dan Karadeniz'e dökülüş noktası (Delta) haritası Şenol, 2019).

Çalışma alanı, Gümüşhane şehir merkezinden geçerek kuzeydoğuya doğru akışını sürdüren Harşit Çayı'nın kentsel kesitini kapsamaktadır. Bu kesitte bulunan, oyulma potansiyeli ve farklı yapısal özellikler sergilemeleri nedeniyle üç kritik köprü yapısı modelleme için belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan temel veriler ve hidrolik parametreler, güvenilir kaynaklardan titizlikle temin edilmiştir. Topoğrafik veriler, HEC-RAS modelinin temelini oluşturmak üzere nehir kesit bilgilerini sağlamış olup, bu bilgiler yüksek çözünürlüklü Dijital Yükseklik Modeli (DEM) ve saha ölçümleriyle desteklenmiştir. Hidrolojik veriler ise, farklı tekrarlama periyotlarına ait taşkın debilerini kapsamakta ve ilgili Devlet Su İşleri (DSİ) istasyonlarının uzun yıllık gözlem verilerinin frekans analizi ile güvenilir bir şekilde elde edilmiştir. Son olarak, köprü ayak tipleri, açıklıkları ve set geometrileri gibi Köprü Geometrileri, arazide çekilen fotoğraflar ve mevcut proje çizimleri kullanılarak birebir HEC-RAS modeline girdi olarak aktarılmıştır.



Şekil 21. Gümüşhane Harşit Çayı şehir merkezi geçişi genel uydu görünümü

Gümüşhane merkez şehir geçişi boyunca Harşit Çayı üzerinde, ulaşımı sağlayan farklı dönemlerde inşa edilmiş yaklaşık 8 adet ana köprü yapısı bulunmaktadır. Bu yapılar, şehrin topoğrafik yapısına ve yerleşim planına bağlı olarak nehir yatağı üzerinde farklı açılarla ve geometrilere konumlandırılmıştır. Saha çalışmaları kapsamında yapılan gözlemler, bu köprülerin bir kısmının nehir yatağını daralttığını ve özellikle taşkın anlarında akış rejimini etkileyebileceğini göstermiştir.



Şekil 22. Gümüşhane şehir merkezi geçişinde Harşit çayı üzerinde tespit edilen mevcut köprü yapıları



Şekil 23. Gümüşhane şehir merkezi geçişinde Harşit çayı üzerinde tespit edilen mevcut köprü yapıları uydu görüntüsü



Şekil 24. 15 Şubat Caddesi Köprüsü ilkbahar ve kış mevsimine ait memba tarafından çekilmiş görüntüleri



Şekil 25. 15 Şubat Caddesi Köprüsü mansap tarafı yatak ve ayak detayı

Şekil 25’te görülen köprü yapısı, Harşit Çayı yatağında dairesel kesitli (silindirik) çoklu kolon ayaklar üzerinde yükselmektedir. Hidrolik açıdan bu dairesel form, kare burunlu ayaklara kıyasla akımı daha yumuşak bir şekilde bölerek at nalı girdaplarının (horseshoe vortices) şiddetini azaltmaktadır. Ancak, kolonların oturduğu betonarme pabuç yapısının (temel seviyesi) akarsu tabanına yakınlığı, taşkın anında lokal daralma yaratarak pabuç çevresinde ilave oyulma stresleri oluşturma potansiyeline sahiptir.



Şekil 26. Uluslararası E97 karayolu ağının Gümüşhane şehir geçişinde yer alan ve Karşıyaka mahallesini şehir merkezine bağlayan ana köprü yapısı



Şekil 27. E97 karayolu ağının Gümüşhane şehir geçişinde yer alan ve Karşıyaka mahallesini şehir merkezine bağlayan ana köprü ayak ve akış etkileşimi görüntüsü

E97 karayolu ağı üzerindeki Karşıyaka Mahallesi ışıklar köprüsü mevkiinde yapılan incelemelerde, köprü ayağının dairesel formda (veya dairesel uçlu perde ayak) olduğu ve akışın bu ayaklar etrafında hidrolik daralmaya uğradığı gözlemlenmiştir.

Akışın olduğu Şekil 27 de, köprü ayağının memba ucundaki beyaz köpürme, suyun yapıya çarpmasıyla oluşan yerel türbülansın kanıtıdır. Bu durum, ayağın hemen dibinde oyulma riski oluşturur.



Şekil 28. Hürriyet Caddesi Köprüsü mansap görüntüsü

Hürriyet Caddesi Köprüsü, akarsu yatağı içerisinde dairesel kesitli betonarme kolonlar (kazık ayaklar) üzerine inşa edilmiştir. Bu ayaklar akış kesitini daraltarak daralma kabarması yapabilir. Görselde çay yatağında belirgin birikintiler (sediman/çakıl adacıkları) ve bitkilenme olduğu görülmüyor. Bu durum, taşkın anında pürüzlülük katsayısını (Manning-n) artırarak suyun akış hızını düşürebilir ve su seviyesini yükseltebilir.



Şekil 29. Harşit Çayı üzerinde yer alan, günümüzde yaya trafiğine hizmet eden tarihi taş kemer Karakol Köprüsü

Çalışma alanı içerisinde modern betonarme köprülerin yanı sıra, geleneksel mimariyi yansıtan taş kemer yapılar da bulunmaktadır. Bu köprü, hidrolik açıdan modern yapılardan şu özellikleriyle ayrılmaktadır. Modern dik ayaklı köprülerin aksine, kemer formundaki açıklık, su seviyesi yükseldikçe hidrolik kesit alanını doğrusal olmayan bir şekilde değiştirir. Suyun tam ortasında bir orta ayak bulunmadığı için yerel oyulma (pier scour) riski bu yapıda düşüktür; ancak kemerin oturduğu yan duvarlarda akış hızına bağlı aşınmalar gözlemlenebilir. Tarihi taş doku, modern beton yüzeylere göre daha yüksek bir pürüzlülük katsayısına (n) sahiptir. Bu durum, suyun geçiş hızını bir miktar sönmülese de yüksek debilerde suyun kemer karnına çarpmasıyla basınçlı akış riski oluşturabilir. Tarihi kemer köprülerde olası taşkın anında kemer gözlerinin tıkanması sonucu köprü bir baraj vazifesi görür. Bu durum, suyun köprü memba tarafında aniden yükselmesine ve nehir yatağının çevresindeki yerleşim alanlarına taşmasına sebebiyet verebilir.



Şekil 30. Çağrı Merkezi Köprüsü mansap görünümü

Hidrolik açıdan yapılan incelemelerde; köprü, akış direncini minimize eden dairesel kesitli çoklu kolon (ayak) sistemine sahip olsa da, bu ayakların birbirine yakın dizilimi akış çizgilerini daraltmakta ve her bir kolon etrafında bağımsız türbülans halkaları oluşturarak yerel oyulma potansiyelini artırmaktadır. Köprü üzerindeki dekoratif unsurlar ve belediye tabelaları, yapının kent merkezi içindeki fonksiyonel önemini belirtmektedir.



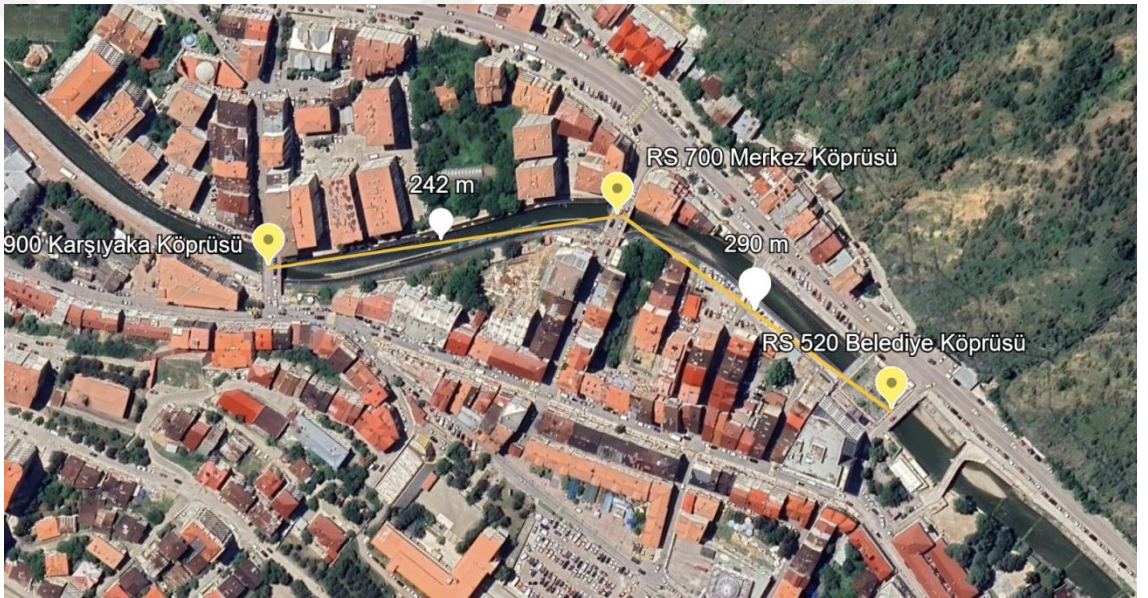
Şekil 31. Eski hastane köprüsü genel görünümü

Eski hastane köprüsü anayolla şehir merkezini birleştiren köprülerden biridir. Dairesel uçlu perde ayak yapısı, akışı ikiye bölerek stabil bir su yüzü profili sunsa da; ayak çevresindeki yoğun sediman (rüsubat) birikimi, taban oyulmasının asimetrik gelişmesine neden olmaktadır. Köprü tabliyesinin hemen altından geçen çok sayıda büyük çaplı tesisat borusu, taşkın anında suyun geçebileceği efektif alanı daraltmakta ve rüsubat tıkanması için uygun bir zemin hazırlamaktadır.

Gümüşhane şehir geçişinde yer alan ve yukarıda genel özellikleri sunulan yaklaşık 8 köprü yapısı içerisinde, Harşit Çayı'nın en karakteristik hidrolik davranışlarını temsil eden üç ana istasyon (RS 900, RS 700 ve RS 520) detaylı oyulma analizi için çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Bu üç köprü'nün seçiminde hidrolik ve sosyal nedenler bulunmaktadır.. Harşit Çayı üzerindeki birçok köprü, vadi yapısı ve yol güzergahları nedeniyle nehir yatağını çapraz kesmektedir. HEC-RAS 1D (Boyutlu) kararlı akım analizlerinde, akış doğrultusuna dik olmayan bu tarz yapılar, su yüzü profili hesaplamalarında numerik kararsızlıklara ve enerji kayıplarının yanlış hesaplanmasına neden olabilmektedir. Bu belirsizliği ortadan kaldırmak ve oyulma denklemlerinden (CSU ve Froehlich) en tutarlı sonuçları alabilmek adına; akışa tam dik veya dike yakın açıyla oturan, model hassasiyetini maksimize eden köprüler seçilmiştir. Seçilen köprüler, farklı ayak kombinasyonlarını (orta ayaksız, tek dairesel ayak ve asimetrik çift ayak) temsil etmektedir. Bu çeşitlilik, ayak şekil faktörünün (K_1) farklı debi senaryoları altındaki performansını kıyaslama imkanı sunmuştur. Yatak morfolojisi ve daralma etkilerini incelemek için özellikle şehir merkezindeki nehir kesitinin daraldığı noktadaki köprüler tercih edilerek, "Daralma Oyulması" (Contraction Scour) mekanizmasının gerçek zamanlı etkileri gözlemlenmek istenmiştir. Ayrıca analiz için seçilen köprüler hidrolik özellikleri bakımından önemli olduğu kadar, aynı zamanda Gümüşhane şehir merkezinin trafik sirkülasyonu açısından da en yoğun ve kritik geçiş noktaları olduğu için önemli görülmüştür.



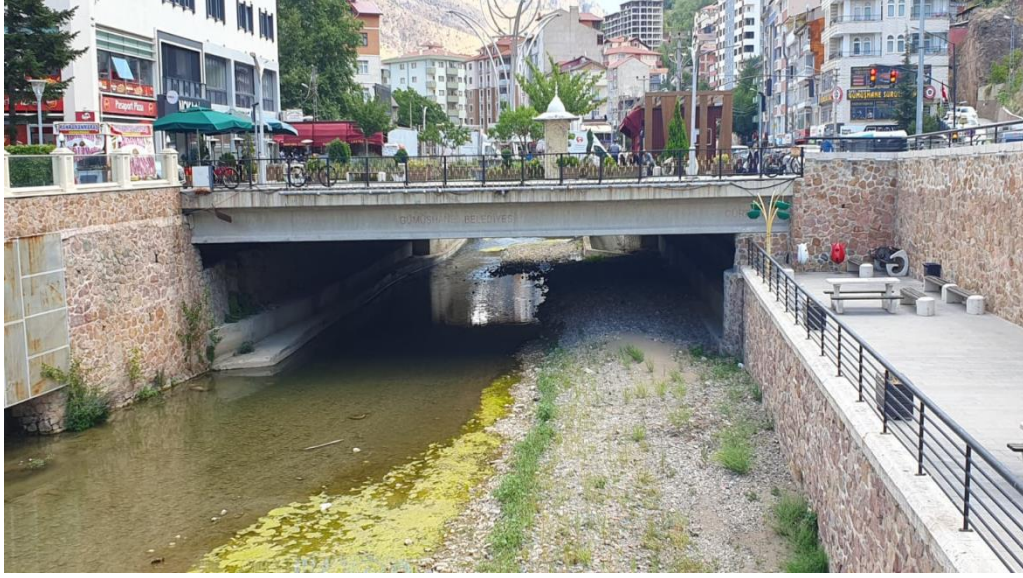
Şekil 32. İnceleme kapsamına alınan köprülerin (RS 520, RS 700, RS 900) konumsal dağılımı



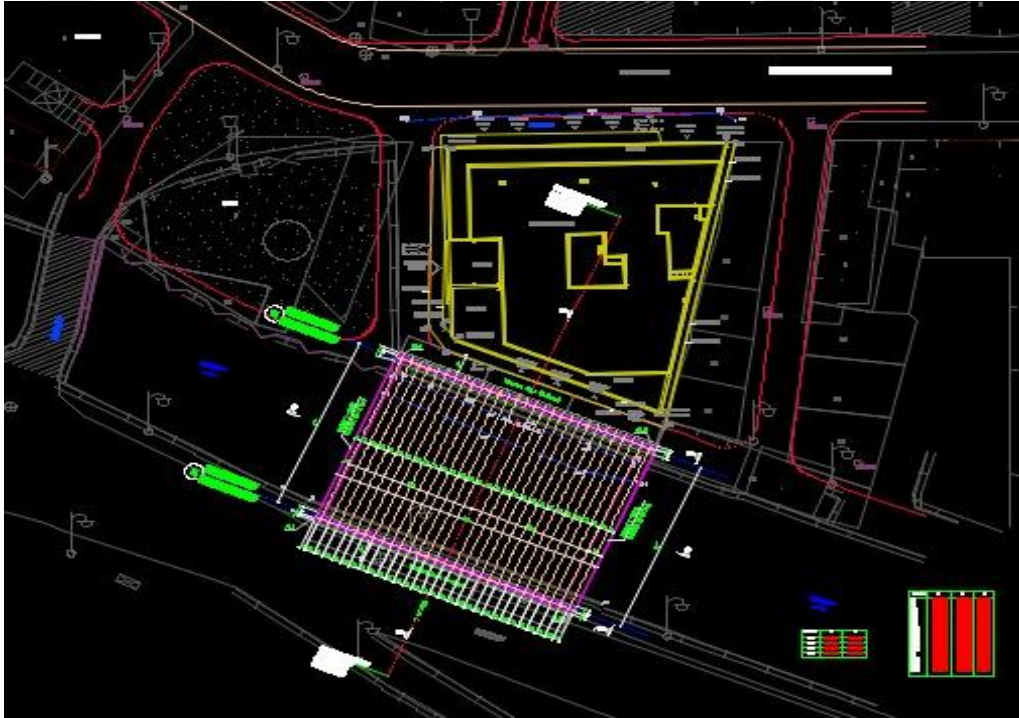
Şekil 33. Ayrıntılı oyulma analizi için seçilen ana istasyonlar arasındaki nehir mesafeleri

Çalışma alanında bulunan üç adet köprü, yapısal olarak farklılık göstermektedir. Proje çizimleri ve arazi fotoğrafları (Şekil 21 ve 22) ile teyit edildiği üzere, modelde RS 520 ile temsil edilen Gümüşhane Belediyesi köprüsünün nehir yatağı içerisinde orta ayağı (pier) bulunmamaktadır. Köprü açıklığı, öngerilmeli prekast beton kirişler ile geçilmiştir. Bu nedenle, bu köprü için yapılan oyulma analizleri, Daralma Oyulması (Contraction Scour) ve Kenar Ayak Oyulması (Abutment Scour) bileşenlerine odaklanmıştır.

Modeldeki diğer iki köprü (RS 700 ve RS 900) ise, yatak içerisinde bulunan orta ayaklara sahip olduğundan, bu köprüler için yapılan analizlerde Daralma ve Kenar Ayak oyulmalarına ek olarak, yapı güvenliği açısından en kritik bileşenlerden biri olan Ayak Oyulması (Pier Scour) da detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 34. (RS 520)Belediye Köprüsü Görüntüsü



Şekil 35. Modelde RS 520 ile Temsil Edilen Gümüşhane Belediyesi Köprüsü'nün Proje En Kesit Detayı ve Yapısal Bileşenleri



Şekil 36. Modeldeki RS 700 Numaralı Köprü'nün Düşük Akım Koşullarındaki Görünümü ve Köprü Ayağı Geometrisi



Şekil 37. RS 900 köprü'nün genel görünümü ve farklı geometriye sahip iki orta ayağı (solda yuvarlak burunlu, sağda kare burunlu)



Şekil 38. (RS 900) Harşit Çayı'nda Bir Taşkın Anı ve Yükselen Su Seviyesi

Modelde RS 700 ve RS 900 ile temsil edilen diğer iki köprü ise, yatak içerisinde bulunan orta ayaklara sahip olmaları nedeniyle daha karmaşık bir hidrolik davranış sergilemektedir. Özellikle RS 900 no'lu Karşıyaka Cami köprüsü, akış yönüne göre şevli (çapraz) bir konuma ve iki adet farklı geometride (Kare Burunlu ve Yuvarlak Burunlu) orta ayağa sahiptir. 1-Boyutlu modellemede şevli köprülerin yarattığı üç boyutlu akış desenlerinin neden olabileceği sayısal kararsızlıkları önlemek amacıyla, bu köprü'nün geometrisi, akışa dik olacak şekilde basitleştirilerek modele girilmiştir. Bu, standart bir modelleme yaklaşımı olup, oyulma potansiyelinin birincil dereceden bir analizini yapmayı mümkün kılmıştır.

Bu köprülerde, mevcut durumlarına uygun olarak, proje verilerinden elde edilen ayak genişlikleri, konumları ve şekilleri Pier Data Editor kullanılarak detaylı olarak tanımlanmıştır. Ayak temellerinin nehir tabanının altında kalmasını sağlamak ve negatif hidrolik alanlar gibi geometrik tutarsızlık hatalarını önlemek için, ayak taban kotları enkesit geometrisiyle uyumlu olacak şekilde dikkatlice düzenlenmiştir. Ayrıca, yüksek taşkın akımlarında suyun köprü tabliyesine çarpması durumunda oluşacak basınçlı ve savak akışı gibi karmaşık hidrolik koşulların kararlı bir şekilde çözülebilmesi için, köprü modelleme yaklaşımı olarak "Standart Energy" metodu tercih edilmiştir.



Şekil 39. RS 900 Yuvarlak burunlu köprü ayağının görünümü

3.3. Hidrolojik Veriler ve Debi Senaryoları

Hidrolojik Veriler, modelde, nehrin yıl içerisindeki davranışını temsil etmek amacıyla Devlet Su İşleri (DSİ) 22. Bölge Müdürlüğü'ne ait Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) verilerinden derlenmiştir. Bu veriler, nehrin yıl içindeki normal rejimini yansıtan mevsimsel ortalama debilerin ve en kötü durum senaryolarını temsil eden taşkın pik debilerinin belirlenmesinde esas alınmıştır.

3.3.1. Taşkın Debi Değerlerinin Belirlenmesi

Taşkın analizi senaryoları için, yine DSİ'ye ait uzun dönemli gözlem verileri kullanılarak frekans analizi (Örn: Gumbel, Log-Pearson III dağılımı vb.) yöntemleriyle belirli yineleme periyotlarına (T) sahip pik debi değerleri referans alınmıştır. Analiz sonucunda, köprü güvenliği açısından kritik olan $T=10$, $T=25$ ve $T=50$ yıl yineleme periyotlarına karşılık gelen pik debiler belirlenmiştir. Bu değerler, tüm kararlı akım ve oyulma analizlerinin temel girdisini oluşturmuştur.

Tablo 1. Harşıit Çayı İçin Belirlenen Taşkın Yineleme Periyotlarına Ait Pik Debi Değerleri

Taşkın Yineleme Periyodu (T)	Debi Değeri (Q) (m ³ /s)
Q ₁₀ (10 Yıl)	147.79
Q ₂₅ (25 Yıl)	195.91
Q ₅₀ (50 Yıl)	240.71

3.3.2. Mevsimsel Ortalama Debi Değerlerinin Belirlenmesi

Nehrin yıl içerisindeki süreklilik arz eden akış rejimini temsil etmek ve oyulma mekanizmalarını (özellikle Yaz aylarında Clear Water Scour) düşük debi koşullarında incelemek amacıyla, AGİ verilerinden elde edilen çok yıllık ortalama debiler, mevsimlik bazda gruplandırılmıştır. Bu analizler için kullanılan ortalama debi değerleri aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

Tablo 2. Harşıit Çayı İçin Kullanılan Mevsimsel Ortalama Akım Debileri

Mevsim	Ortalama Debi Q (m ³ /s)
Kış	25
İlkbahar	65
Sonbahar	35
Yaz	22

Steady Flow Data - Q_duz

File Options Help

Description : [] [Apply Data]

Enter/Edit Number of Profiles (32000 max): 4 [Reach Boundary Conditions ...]

Locations of Flow Data Changes

River: [Harsit] [Add Multiple...]

Reach: [AK] River Sta.: [1375] [Add A Flow Change Location]

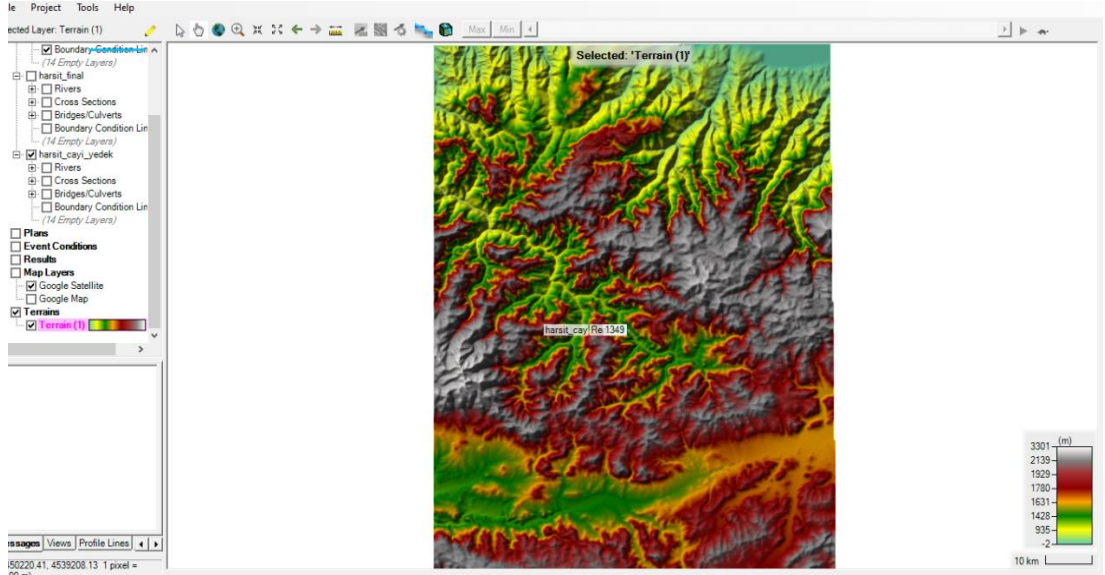
Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates			
River	Reach	RS	Ilkbahar	Yaz	Sonbahar	Kis
1 Harsit	AK	1375	65	22	35	25

Edit Steady flow data for the profiles (m3/s)

Şekil 40. HEC-RAS Kararlı akım ekranına mevsimsel debilerin girilmesi

3.4. Model Geometrisinin Oluşturulması: RAS Mapper

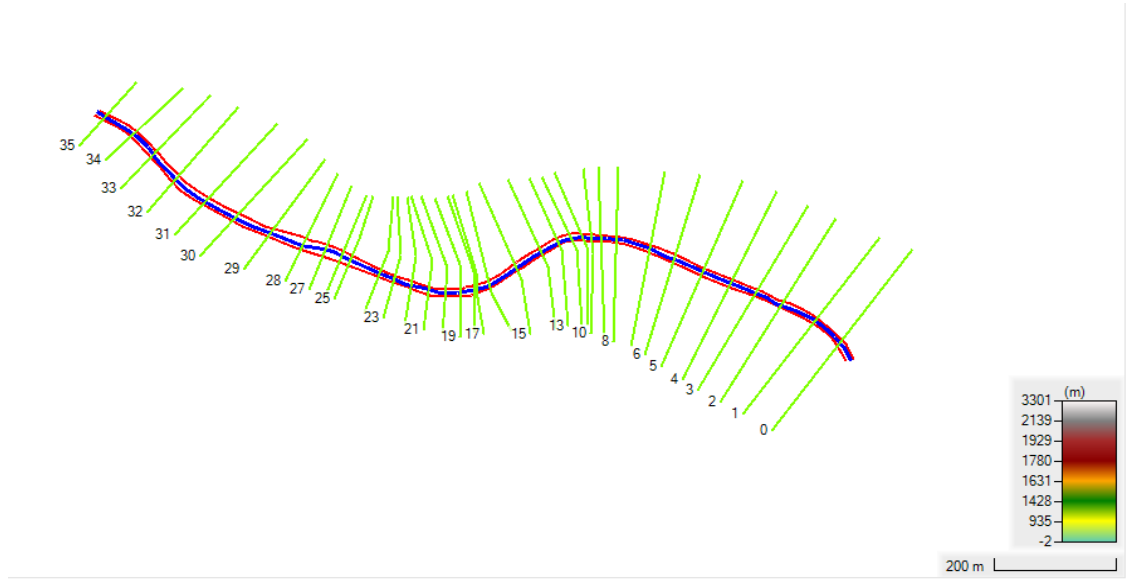
Modelin temelini oluşturan nehir geometrisi, HEC-RAS yazılımının coğrafi bilgi sistemi (CBS) tabanlı ara yüzü olan RAS Mapper kullanılarak oluşturulmuştur. Bu süreç, ham coğrafi verilerin (sayısal yükseklik modeli) hidrolik modelin anlayabileceği bir geometriye dönüştürülmesini sağlamıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, Eartexplorer kaynağından temin edilen 30 m çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli (DEM) Terrain olarak RAS Mapper ortamına aktarılmıştır. Bu arazi modeli, oluşturulacak tüm geometrik elemanlar için temel altlığı teşkil etmiştir. Köprü ayak oyulması gibi lokal hassasiyet gerektiren analizler için 30 m çözünürlüğün sınırları göz önüne alınarak, enkesit kotlarının belirlenmesinde özellikle köprü bölgelerinde arazi etütlerinden elde edilen ek veriler ve manuel kontrol yöntemleri kullanılarak model doğruluğu sağlanmaya çalışılmıştır.



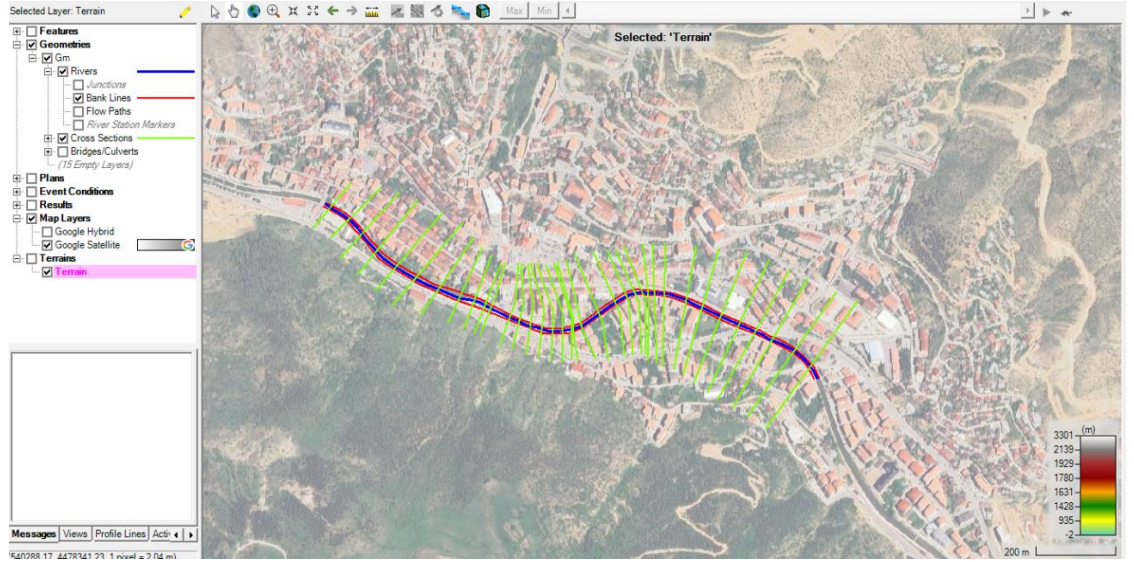
Şekil 41. Çalışma Alanına Ait Sayısal Yükseklik Modelinin RAS Mapper'da Görünümü

3.4.1. Nehir Ağı Geometrisinin Sayısallaştırılması

Arazi modeli üzerine, Harşit Çayı'nın akış güzergahını temsil eden nehir merkez çizgisi (River Centerline), suyun ana yataktan taşıdığı sınırları belirleyen sağ ve sol sahil şeritleri (Bank Lines) ve akış kesitlerinin (Cross Section Cut Lines) konumları, uydu altlığı referans alınarak manuel olarak sayısallaştırılmıştır. Toplam 1360 metre uzunluğundaki nehir kolu ve üzerinde tanımlanan 36 adet enkesit hattının genel görünümü Şekil 29 da sunulmuştur.



Şekil 42. Harşit Çayı İçin Oluşturulan HEC-RAS Model Geometrisinin Şematik Plan Görünümü



Şekil 43. Harşit Çayı model geometrisinin RAS Mapper'da sayısallaştırılması

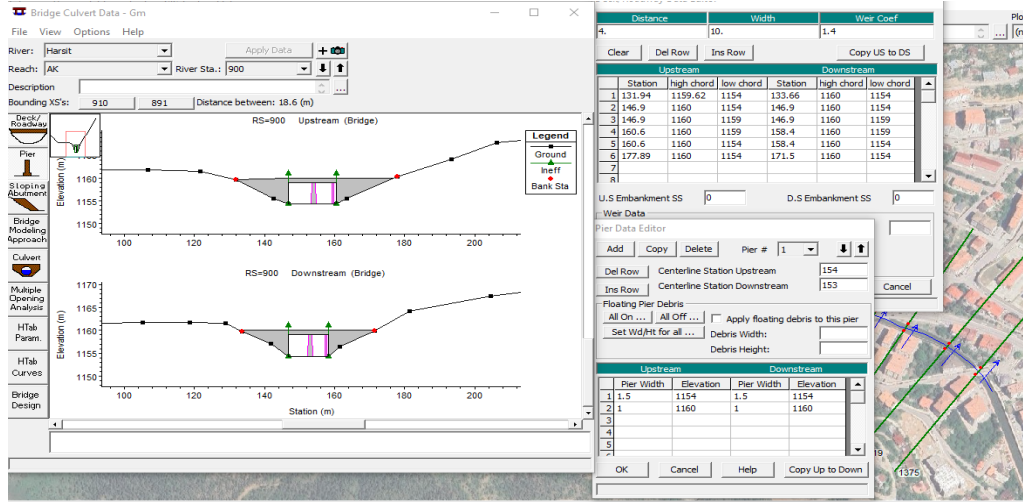
3.4.2. Enkesit Verilerinin Üretilmesi

Enkesitler, nehir hattına dik olarak, belirli aralıklarla çizilen kesitlerdir. Bu kesitler, akış alanının değişimi ve topografyanın akış üzerindeki etkisini modellemeye olanak tanır. Tüm enkesit hatları (Cut Lines) sayısallaştırıldıktan sonra, bu çizgiler boyunca arazi kotları DEM verisinden otomatik olarak okunmuş ve her bir enkesit için istasyon-kot (station-elevation) verileri oluşturulmuştur. Bu işlem, HEC-RAS'ın ana Geometric Data editörüne aktarılan temel nehir geometrisini meydana getirmiştir. Nehir ağının tanımlanmasının ardından, akışın hidrolik özelliklerini hesaplamak için gerekli olan enkesit verileri üretilmiştir.

Enkesit Yerleşimi: Çalışma alanındaki köprülerin konumları, ani hidrolik değişimlerin beklendiği noktalar ve topoğrafyanın kritik değişim gösterdiği bölgeler dikkate alınarak, yeterli sayıda enkesit yerleştirilmiştir. Özellikle köprülerin upstream (yukarı akım) ve downstream (aşağı akım) yakınlarında daha sık enkesitler kullanılmıştır.

Otomatik Enkesit Üretimi: RAS Mapper, yerleştirilen enkesit hatları boyunca yüklenen DEM verisinden otomatik olarak yükseklik-mesafe verilerini çekerek her bir enkesitin topoğrafik profilini oluşturmuştur.

Manuel Düzeltmeler ve Köprü Tanımlamaları: Otomatik olarak üretilen enkesit profilleri, kritik noktalarda (örneğin köprü geçişleri, banka istasyonları) manuel olarak kontrol edilmiş ve gerektiğinde düzeltmeler yapılmıştır. Köprü yapıları ise, özel olarak tanımlanmış köprü objeleri (Bridge/Culvert) kullanılarak modele dahil edilmiş, köprü tabanı, açıklık boyutları ve ayak geometrileri (Pier ve Abutment detayları) hassasiyetle girilmiştir. Bu, modelin köprülerin akış üzerindeki daralma ve oyulma etkilerini doğru bir şekilde hesaplaması için kritik öneme sahiptir.



Şekil 44. Köprü bilgilerinin girilmesi

3.5. Hidrolik Model Parametrelerinin ve Sınır Şartlarının Tanımlanması

Sayısal modelin, gerçek arazi koşullarını ve akış fizliğini doğru bir şekilde temsil edebilmesi için, bir dizi hidrolik parametrenin ve sınır şartının tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, modelin temel parametreleri Geometric Data editörü kullanılarak aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

3.5.1. Manning 'n' Pürüzlülük Katsayıları

Akarsu yatağının ve taşkın yataklarının akışa karşı gösterdiği direnci ifade eden Manning 'n' pürüzlülük katsayısı, modelin en önemli parametrelerinden biridir. Katsayıların seçimi, çalışma alanındaki yatak malzemesi (beton kanal duvarları, çakıllı taban, bitki örtüsü vb.) gözlemleri ve literatürdeki standart değerler (Chow, 1959) referans alınarak yapılmıştır. Bu doğrultuda, kanalın beton ve taş duvarla kaplı olan ıslah edilmiş kesimleri için $n = 0.035$; doğal yatak ve bitki örtüsüne sahip taşkın yatakları için ise $n = 0.1$ değeri kullanılmıştır (Chow, 1959). Bu değerler, HEC-RAS'ın Geometric Data editöründe her bir enkesit için ayrı ayrı girilmiştir.

Edit Manning's n or k Values

River: Harsit ☒ Edit Interpolated XS's Channel n Values have a light green background

Reach: AK

3.5.3. Sınır Şartları

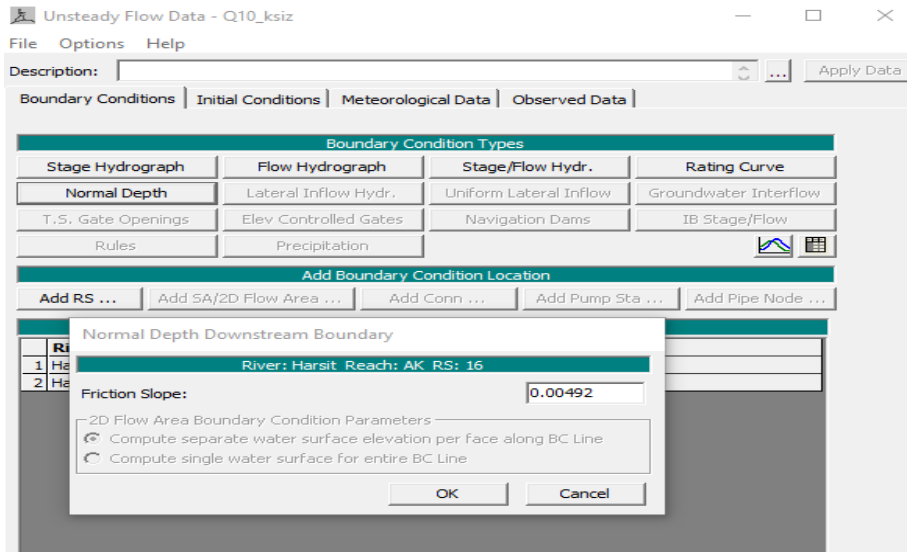
Modelin sayısal çözümünün yapılabilmesi için, modellenen nehir kesiminin giriş (mimba) ve çıkışına (mansap) sınır şartlarının tanımlanması zorunludur. Mimba Sınır Şartı (Upstream Boundary):

Mevsimsel analizler için yapılan Kararlı Akım (Steady Flow) simülasyonlarında, modelin başlangıç noktası olan RS 1375'a, incelenen her bir mevsim için hesaplanan ortalama debi değeri girilmiştir.

Taşkın senaryoları (Q_{10} , Q_{20} , Q_{50}) için, bu senaryolara ait taşkın pik debileri, ayrı ayrı akım durumu (Flow Regime) olarak modele sabit bir debi değeri şeklinde tanımlanmıştır.

Mansap Sınır Şartı (Downstream Boundary):

Modelin çıkış noktası olan RS 16 için, mansapta su seviyesini etkileyecek bir yapı olmaması nedeniyle Normal Depth (Normal Derinlik) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem için gerekli olan enerji eğimi, modelin yatak eğimi dikkate alınarak 0.00492 olarak hesaplanmış ve modele girilmiştir.



Şekil 46. Modelin Mansap Sınır Şartı Olarak Tanımlanan Normal Derinlik ve Eğim Değeri

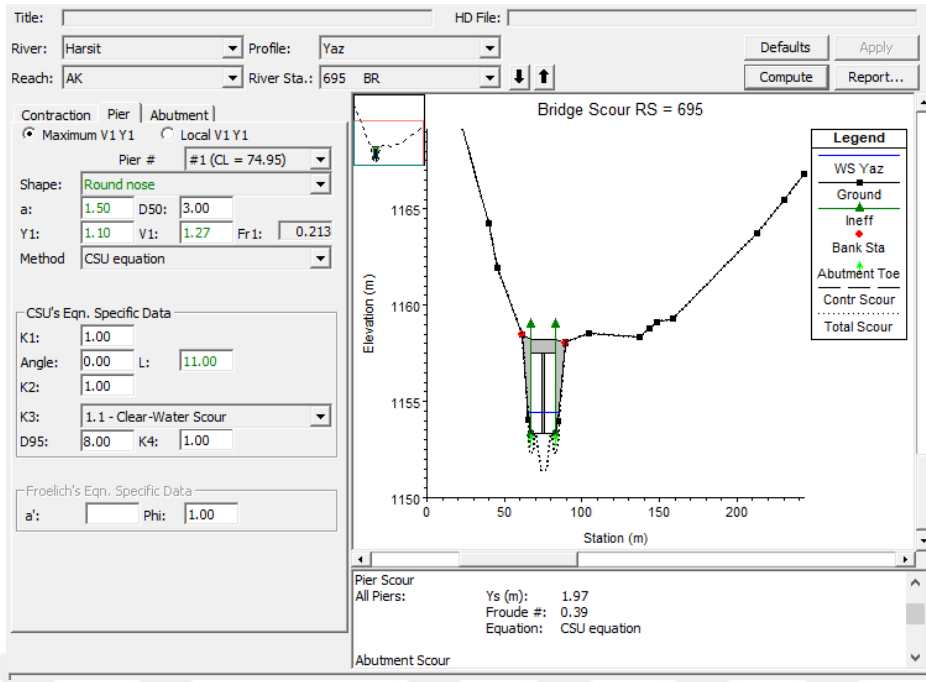
3.6. Hidrolik Akım Analiz Yöntemlerinin Seçimi

HEC-RAS modelinin temel fonksiyonlarından biri, tanımlanan debi koşulları altında nehir boyunca su yüzeyi profillerini ve çeşitli hidrolik parametreleri hesaplamaktır. Bu bölümde, özellikle köprü yapılarının akış üzerindeki etkileşimi ve hidrolik modelleme prensipleri açıklanmıştır. Tez çalışması kapsamında, Harşit Çayı'nın farklı mevsimsel ve taşkın debileri altındaki hidrolik davranışını değerlendirmek ve oyulma hesaplamalarına girdi sağlamak amacıyla yalnızca Kararlı Akım (Steady Flow) analizi gerçekleştirilmiştir. Kararlı akım yaklaşımı, taşkınların pik debi anındaki maksimum su seviyesi ve hız değerlerini, zamanla değişmeyen sabit debi koşulları altında güvenilir bir şekilde hesaplayarak oyulma analizleri için gerekli veriyi sağlamıştır (HEC, 2016).

3.6.1. Kararlı Akım (Steady Flow) Analizi

Kararlı akım analizi, zamanla değişmeyen sabit debi koşulları altında nehir boyunca su yüzeyi profillerini ve çeşitli hidrolik parametreleri hesaplamak için kullanılmıştır. Bu analiz türü, özellikle köprülerdeki lokal hızlanmalar, enerji kayıpları ve Froude sayısı gibi kritik hidrolik parametrelerin belirlenmesinde temel oluşturur. Köprü yapıları, akış kesitini daraltarak veya akış yönünü değiştirerek yerel hidrolik koşullarda önemli değişikliklere neden olur. HEC-RAS, köprüleri özel olarak modellenmiş Bridge/Culvert objeleriyle temsil ederek bu yapıların akış üzerindeki geri su (backwater) etkisi, enerji kaybı ve hızlanma gibi etkilerini hesaplama yeteneğine sahiptir.

Örneğin, $Q=22 \text{ m}^3/\text{s}$ debili yaz mevsimi senaryosu için RS 695 numaralı köprüye ait HEC-RAS 'Bridge Output' verileri (Şekil 47) incelendiğinde, köprü geçişinde hidrolik karakteristiklerde önemli değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler, köprü ayakları etrafında yerel oyulmaya neden olan hidrolik enerjinin yoğunlaştığını gösteren ilk bulgulardır.



Şekil 47. Yaz Mevsimi Senaryosu İçin RS 695 Numaralı Köprü

Su Yüzeyi ve Enerji Seviyesi: Köprü girişi (Inside BR US) ve çıkışı (Inside BR DS) arasında su yüzeyi (W.S. Elev) ve enerji seviyesi (E.G. Elev) değerlerindeki düşüş, köprünün akışa karşı yarattığı enerji kaybını ifade eder.

Akış Hızları (Vel Total): Köprü geçişinde akış kesitinin daralması nedeniyle akış hızında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Yüksek akış hızları, yatak malzemesi üzerinde artan kayma gerilmesi ve dolayısıyla oyulma potansiyelinin yüksek olduğunu gösterir.

Froude Sayısı: Köprü içindeki Froude sayısının 0.99 gibi kritik akıma çok yakın bir değer olması, akışın köprü altında oldukça enerjik olduğunu ve kritik akım rejimine yaklaştığını veya girdiğini belirtir. Bu durum, hidrolik atlama oluşumu gibi karmaşık akış koşullarına yol açabilir ve oyulma riskini önemli ölçüde artırır.

Diğer Hidrolik Parametreler: Bridge Output tablosu ayrıca köprüdeki taşınım kapasitesi (Q Total), akış alanı (Flow Area), hidrolik derinlik (Hydr Depth) ve yatak kayma gerilmesi (Shear Total) gibi detaylı hidrolik bilgileri sunarak köprünün akışla etkileşimini kapsamlı bir şekilde ortaya koyar.

3.6.2. Taşkın Senaryoları İçin Kararsız Akım Analizi Denemeleri ve Yöntem Tercihi

Kararlı akım analizine ek olarak, yüksek taşkın debileri (Q10, Q25, Q50) altında nehir sisteminin dinamik hidrolik tepkisini ve oyulma potansiyelini değerlendirmek amacıyla Kararsız Akım (Unsteady Flow) simülasyonları planlanmış ve ilk denemeler

gerçekleştirilmiştir. Bu denemeler için sınır şartları ve hidrograf tanımlamaları aşağıdaki gibi yapılmıştır:

Taşkın Debi Senaryoları: Harşit Çayı için $Q_{10}= 147.79 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{25}=195.91 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{50}=240.71 \text{ m}^3/\text{s}$ değerleri kullanılmıştır.

Hidrograf Tanımlaması: Her bir taşkın debisi için, $65 \text{ m}^3/\text{s}$ ' lik taban akımı üzerine yükselen 24 saatlik bir zaman serisi tanımlanmıştır. Bu hidrograflar, modelin giriş noktasında (upstream boundary) Flow Hydrograph olarak atanmıştır.

The image shows the 'Flow Hydrograph' software interface. At the top, it says 'River: harşit_cay Reach: Reach 1 RS: 1349'. Below this, there are options to 'Read from DSS before simulation' or 'Select DSS file and Path'. The 'Enter Table' section is active, showing 'Data time interval: 1 Hour'. It has fields for 'Date' and 'Time' for both 'Use Simulation Time' and 'Fixed Start Time'. Below this is a table titled 'Hydrograph Data' with columns 'Date', 'Simulation Time (hours)', and 'Flow (m³/s)'. The table contains 15 rows of data. At the bottom, there are 'Time Step Adjustment Options' and a 'Plot Data' button.

No. Ordinates	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m³/s)
1	31Aug2008 2400	0:00:00	65
2	01Sep2008 0100	1:00:00	65
3	01Sep2008 0200	2:00:00	72.526
4	01Sep2008 0300	3:00:00	80.053
5	01Sep2008 0400	4:00:00	87.579
6	01Sep2008 0500	5:00:00	95.105
7	01Sep2008 0600	6:00:00	102.632
8	01Sep2008 0700	7:00:00	110.158
9	01Sep2008 0800	8:00:00	117.685
10	01Sep2008 0900	9:00:00	125.211
11	01Sep2008 1000	10:00:00	132.737
12	01Sep2008 1100	11:00:00	140.264
13	01Sep2008 1200	12:00:00	147.79
14	01Sep2008 1300	13:00:00	140.718
15	01Sep2008 1400	14:00:00	133.646

Şekil 48. Taşkın Senaryolarının Kararsız Akım Analizi İle Denendiği Aşamada, Uygulanan 24 Saatlik Örnek Debi Hidrografi

Sınır Koşulları: Modelin çıkış noktasında (downstream boundary) Normal Derinlik (Normal Depth) sınır şartı uygulanmıştır.

Gerçekleştirilen Kararsız Akım simülasyonlarında, model geometrisinin (özellikle köprüler ve dik eğimli kesitler) neden olduğu sayısal kararsızlıklar (Yüksek Hacim Hatası (Volume Error) ve Su Yüzeyi Sonsuz Değerleri (WSEL=Infinity) nedeniyle tutarlı hidrolik çözümler elde edilememiştir. Bu durumun detaylı teknik tartışması Bölüm 4.2'de sunulmuştur. Bu nedenle, köprü ayak oyulması hesaplamalarının tezin ana amacını oluşturması ve literatürde oyulma derinliği hesaplamalarının pik debiye karşılık gelen Kararlı Akım (Steady Flow) koşulları altında yaygın olarak kabul görmesi nedeniyle, tüm oyulma analizleri için Kararlı Akım yöntemine geçilmiştir.

3.7. Oyulma Analizi Yöntemi

Hidrolik modelin oluşturulması ve akış parametrelerinin belirlenmesinin ardından, Harşit Çayı üzerindeki köprülerde meydana gelebilecek oyulma derinliklerinin tahmini için HEC-RAS'ın entegre oyulma analiz modülü kullanılmıştır. Bu analiz, köprülerde meydana gelebilecek üç ana oyulma türünü (daralma oyulması, ayak oyulması ve kenar ayak oyulması) değerlendirmiştir.

3.7.1. Oyulma Denklemleri ve Katsayıları

HEC-RAS, köprü oyulma derinliklerini tahmin etmek için ulusal ve uluslararası kabul görmüş çeşitli ampirik denklemleri kullanmaktadır. Bu çalışmada, her bir oyulma türü için en uygun denklemler seçilerek analizler yapılmıştır:

Daralma Oyulması (Contraction Scour): Bu oyulma türü için HEC-RAS'ın varsayılan olarak desteklediği daralma oyulması denklemleri kullanılmıştır.

Ayak Oyulması (Pier Scour): arşit Çayı'nın yüksek debili ve düzensiz akış rejimi göz önüne alındığında, ayak geometrisi ve akış derinliğini en hassas şekilde temsil eden CSU (Colorado State University) Denklemi tercih edilmiştir. Harşit üzerindeki köprü ayaklarının dairesel formu ve kum-çakıl karışımlı yatak yapısı, bu denklemin katsayılarının belirlenmesinde temel alınmıştır. Denklem, ayak geometrisi, akış hızı, akış derinliği ve yatak malzemesi özelliklerini dikkate alır.

Kenar Ayak Oyulması (Abutment Scour): Taşkın yatağının genişliği ve akışın kenar ayaklara çarpma açısı nedeniyle, bu bölgeye özel daha muhafazakar sonuçlar veren Froehlich Denklemi kullanılarak Harşit Çayı kenar ayak güvenliği analiz edilmiştir. Kenar ayaklarda oluşan oyulmaların tahmininde, kenar ayak geometrisi ve akışın çarpma açısı gibi faktörleri daha iyi modellediği için Froehlich Denklemi tercih edilmiştir. Oyulma analizlerinde kullanılan temel katsayılar ve parametreler aşağıdaki gibidir:

K_1 (Ayak Burun Şekli Katsayısı): Ayak burun şekillerine göre (kare burunlu, yuvarlak burunlu vb.) 1.0 ile 1.1 arasında değişen değerler kullanılmıştır. Harşit Çayı'nda Köprü ayaklarının yuvarlak burunlu (round nose) yapısı nedeniyle 1.0 değeri tanımlanmıştır.

K_2 (Ayak Akışa Açısı Katsayısı): Köprü ayaklarının Harşit Çayı ana akış doğrultusuna tam paralel olduğu belirlendiğinden, çarpma açısı düzeltme katsayısı 1.0 olarak alınmıştır.

K_3 (Yatak Koşulu Katsayısı): Harşit Çayı yatağındaki sediment taşınım düzeyi ve analiz senaryosuna göre "temiz su oyulması" (Clear-Water Scour) durumu öngörülerek 1.1 değeri kullanılmıştır.

K_4 (Zırhlanma Katsayısı): Harşıit Çayı tabanındaki mevcut malzeme gradasyonu dikkate alınarak, zırhlanma etkisi ihmal edilmiş ve güvenli tarafta kalmak adına 1.0 değeri seçilmiştir.

3.7.2. Zemin Malzemesi Parametreleri

Oyulma analizlerinin en kritik girdilerinden biri olan yatak malzemesinin tane boyutu dağılımını temsil eden parametreler, sahada detaylı zemin etüdü verileri bulunmadığından ve Harşıit Çayı (Tirebolu-Giresun) bölgesinden elde edilen kırılmış dere malzemesinin elek analizi sonuçları Şekil 49. dikkate alınarak belirlenmiştir:

Elek Ebadı (mm)	A (0-9 mm) % Geçen	B (9-15 mm) % Geçen	C (15-25 mm) % Geçen	TS 706 Alt Sınır (A ₃₂)	TS 706 Üst Sınır (C ₃₂)	TS 706 Ort. Değer (B ₃₂)
31.5	100	100	100	100	100	100
16	100	100	26.7	62	89	80
8	95.8	1	0.30	38	77	62
4	63.91	0.13	0.20	23	65	47
2	38.85			14	53	37
1	25.97			8	42	28
0.5	16.30			5	29	17
0.25	9.68			2	15	8

Şekil 49. Harşıit Çayı (Tirebolu-Giresun) Bölgesinden Elde Edilen Kırılmış Dere Malzemesinin Elek Analizi Sonuçları (Tablo 2.4: Çavuşoğlu,2005).

D_{50} (mm): Yatak malzemesinin % 50'sinin geçtiği tane çapı olarak 3 mm (0.003 m) değeri kullanılmıştır. Bu değer, Harşıit çayından (Tirebolu-Giresun) elde edilen kırılmış dere malzemesinin beton agregası olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi, Çavuşoğlu, 2005 çalışmasında sunulan elek analizi verilerinden interpolasyon yoluyla elde edilmiştir ve ince çakıl ile iri kum karışımı bir yatak yapısını temsil etmektedir.

D_{95} (mm): Yatak malzemesinin % 95'inin geçtiği tane çapı olarak 8 mm (0.008 m) değeri kullanılmıştır. Bu değer, aynı elek analizi verilerinden hareketle, yatakta bulunan daha iri tanelerin boyutunu yansıtmaktadır.

4.BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, Gümüşhane Harşit Çayı'nın incelenen kesimi üzerinde yer alan üç adet köprünün, farklı hidrolojik koşullar altındaki davranışı ve oyulma potansiyeli, HEC-RAS 6.5 yazılımı ile modellenerek incelenmiştir. Çalışmanın bütüncül bir yaklaşımla ele alınabilmesi amacıyla, analizler iki ana grupta toplanmıştır: Nehrin yıl içerisindeki ortalama akım rejimini temsil eden dört farklı mevsimsel (Kış, İlkbahar, Yaz, Sonbahar) sabit debi koşulu birinci grupta, bölgenin taşkın riskini yansıtan ve Q_{10} , Q_{25} ve Q_{50} yineleme periyotlarına sahip üç farklı taşkın debisi 2. grupta toplanmıştır.

Bir önceki bölümde metodolojisi detaylandırılan hidrolik modelleme süreci sonucunda, toplam yedi farklı senaryo için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm altında öncelikle, her bir senaryo için elde edilen su yüzü profilleri ve temel hidrolik parametreler sunulacaktır. Ardından, her bir senaryo için üç köprüde hesaplanan yerel ayak oyulması ve kenar ayak oyulması derinlikleri, karşılaştırmalı tablolar ve grafikler eşliğinde sunulacaktır. Son olarak, elde edilen bu bulgular ışığında, hem mevsimsel akımların hem de taşkınların köprüler üzerindeki potansiyel riskleri mühendislik açısından değerlendirilecek ve sonuçlar tartışılacaktır. Analizde kullanılan mevsimsel ortalama debi değerleri, Devlet Su İşleri (DSİ) 22. Bölge Müdürlüğü'ne ait E22A004 No'lu Akım Gözlem İstasyonu'nun uzun yıllar verileri referans alınarak belirlenmiştir (DSİ, Hidroloji Yıllıkları). Bu doğrultuda, her bir mevsimi temsil eden ortalama sabit debi değerleri aşağıdaki gibidir:

Kış Mevsimi: 25 m³/s

İlkbahar Mevsimi: 65 m³/s

Yaz Mevsimi: 22 m³/s

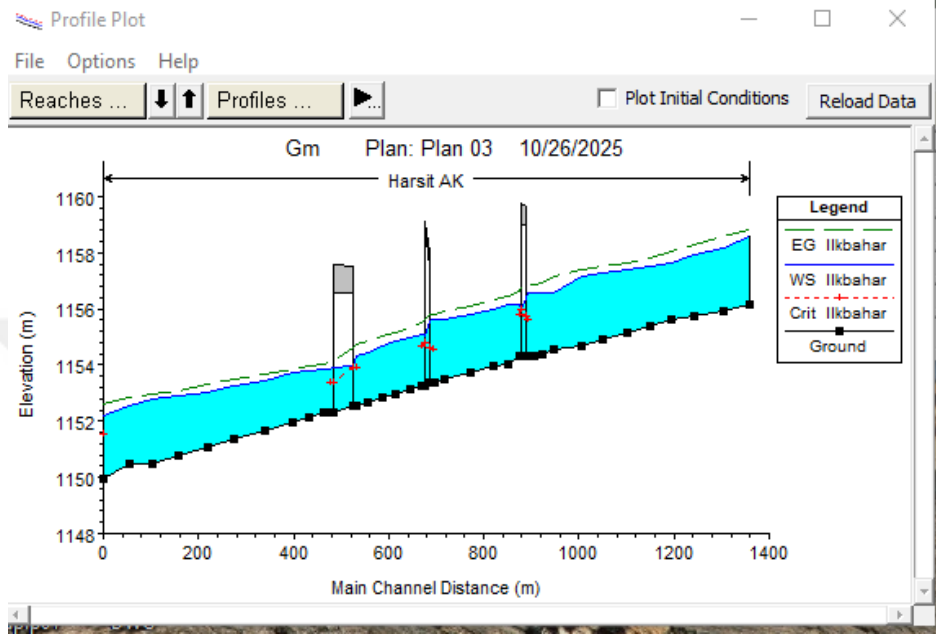
Sonbahar Mevsimi: 35 m³/s

4.1. Mevsimsel Debi Analizi Sonuçları

4.1.1. Kış Mevsimi ($Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$) Hidrolik ve Oyulma Bulguları

Çalışmanın bu aşamasında, Harşit Çayı'nın kış mevsimi ortalama hidrolojik koşullarını temsil eden 25 m³/s'lik sabit debi değeri için Kararlı Akım (Steady Flow) analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizin amacı, düşük akım koşullarında nehrin hidrolik davranışını ve köprülerdeki oyulma potansiyelini belirlemektir.

Yapılan simülasyon sonucunda, 25 m³/s'lik debi altında akışın tüm model boyunca subkritik rejimde olduğu ve suyun ana yatak sınırları içerisinde kaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 50' de sunulan boy kesit su yüzü profilinden de görüleceği üzere, su seviyesi köprülerin tabliyelerine veya taşkın yataklarına ulaşmaktan oldukça uzaktır. Su yüzeyi, nehir yatağı eğimini takip eden, kararlı ve fiziksel olarak tutarlı bir profil sergilemektedir.



Şekil 50. Kış Mevsimi ($Q=25 \text{ m}^3/\text{s}$) İçin Hesaplanan Maksimum Su Yüzü Profili

Kış senaryosu için elde edilen hidrolik sonuçlar (derinlik, hız vb.) kullanılarak, modeldeki her üç köprü için de Bridge Scour modülünde oyulma analizleri yapılmıştır. Bölgede zemin etüdü verilerine ulaşamadığından, Harşit Çayı yatağında $D_{50}=3\text{mm}$ ve $D_{95}=8 \text{ mm}$ tane çapı alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Harşit Çayı üzerinde bulunan köprülerin Kış debisi ($Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$) koşulları altında HEC-RAS modeli kullanılarak yapılan oyulma analizleri sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

Köprü 700 (Orta Ayaklı Köprü):

Daralma Oyulması (Contraction Scour): Belirgin bir daralma oyulması gözlenmemiştir (0.02 m).

Kenar Ayak Oyulması (Abutment Scour): Hem sol hem de sağ kenar ayaklarda 1.11 m oyulma derinliği tespit edilmiştir.

Orta Ayak Oyulması (Pier Scour): Orta ayakta 2.02 m gibi bir oyulma derinliği hesaplanmıştır. Bu değer, köprünün bu debi koşullarında dahi orta ayakta oyulma riski taşıdığını ve potansiyel güvenlik sorunlarına yol açabileceğini göstermektedir.

Hydraulic Design Data

Contraction Scour		Left	Channel	Right
Input Data				
Average Depth (m):			1.11	
Approach Velocity (m/s):			1.57	
Br Average Depth (m):			1.09	
BR Opening Flow (m ³ /s):			25.00	
BR Top WD (m):			14.38	
Grain Size D50 (mm):			3.00	
Approach Flow (m ³ /s):			25.00	
Approach Top WD (m):			14.30	
K1 Coefficient:			0.640	
Results				
Scour Depth Ys (m):			0.02	
Critical Velocity (m/s):			0.91	
Equation:			Live	
Pier Scour				
All piers have the same scour depth				
Input Data				
Pier Shape:			Round nose	
Pier Width (m):			1.46	
Grain Size D50 (mm):			3.00000	
Depth Upstream (m):			1.15	
Velocity Upstream (m/s):			1.39	
K1 Nose Shape:			1.00	

Clipboard Print ... File ... Close

Şekil 51. RS 700 Köprüsü İçin Kış Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Daralma Oyulması

Hydraulic Design Data

		Left	Right
Input Data			
Station at Toe (m):		67.10	82.80
Toe Sta at appr (m):		74.24	85.53
Abutment Length (m):		1.44	1.57
Depth at Toe (m):		1.21	1.15
K1 Shape Coef:		1.00 - Vertical abutment	
Degree of Skew (degrees):		0.00	0.00
K2 Skew Coef:		0.00	0.00
Projected Length L' (m):		1.44	1.57
Avg Depth Obstructed Ya (m):		1.11	1.11
Flow Obstructed Qe (m ³ /s):		2.19	2.39
Area Obstructed Ae (m ²):		1.60	1.75
Results			
Scour Depth Ys (m):		1.11	1.11
Qe/Ae = Ve:		1.37	1.37
Froude #:		0.41	0.41
Equation:		Froehlich	Froehlich
Combined Scour Depths			
Pier Scour + Contraction Scour (m):		Channel:	2.04
Left abutment scour + contraction scour (m):			1.13
Right abutment scour + contraction scour (m):			1.13

Clipboard Print ... File ... Close

Şekil 52. RS 700 Köprüsü İçin Kış Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kenar ayak oyulması

Köprü 900 (İki Ayaklı Köprü):

Daralma Oyulması (Contraction Scour): Belirgin bir daralma oyulması gözlenmemiştir (0.14 m).

Kenar Ayak Oyulması (Abutment Scour): Sol ve sağ kenar ayakta 1.24 m oyulma derinlikleri belirlenmiştir.

Kare burunlu ayak oyulması (Pier Scour): Kare burunlu ayakta 1.14 m oyulma derinliği hesaplanmıştır. Yuvarlak burunlu ayakta (Pier Scour) 2.10 m gibi kritik bir oyulma derinliği tespit edilmiştir. Bu sonuç, söz konusu ayak için ciddi bir oyulma riskine işaret etmekte olup, köprü güvenliği açısından değerlendirilmesi gereken bir derinliktir.

Hydraulic Design Data		
Input Data		
	Left	Right
Station at Toe (m):	146.90	160.60
Toe Sta at appr (m):	173.96	154.11
Abutment Length (m):	12.40	12.40
Depth at Toe (m):	1.25	1.25
K1 Shape Coef:	1.00 - Vertical abutment	
Degree of Skew (degrees):	0	0
K2 Skew Coef:	0.00	0.00
Projected Length L' (m):	12.40	12.40
Avg Depth Obstructed Ya (m):	1.24	1.24
Flow Obstructed Qe (m3/s):	25.00	25.00
Area Obstructed Ae (m2):	15.36	15.36
Results		
Scour Depth Ys (m):	1.24	1.24
Qe/Ae = Ve:	1.63	1.63
Froude #:	0.47	0.47
Equation:	Froehlich	Froehlich
Combined Scour Depths		
Pier : #1 (CL = 154) (Contr + Pier) (m):	2.24	
Pier : #2 (CL = 159.5) (Contr + Pier) (m):	1.18	
Left abutment scour + contraction scour (m):		1.38
Right abutment scour + contraction scour (m):		1.38
Clipboard Print ... File ... Close		

Şekil 53. RS 900 Köprüsü İçin Kış Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kenar ayak oyulması

Hydraulic Design Data

Pier Shape:

Square nose

Pier Width (m):

0.50

Grain Size D50 (mm):

3.00000

Depth Upstream (m):

1.25

Velocity Upstream (m/s):

1.46

K1 Nose Shape:

1.10

Pier Angle:

0.00

Pier Length (m):

10.00

K2 Angle Coef:

1.00

K3 Bed Cond Coef:

1.10

Grain Size D90 (mm):

8.00000

K4 Armouring Coef:

1.00

Results

Scour Depth Ys (m):

1.14

Froude #:

0.42

Equation:

CSU equation

Abutment Scour

Input Data

Left

Right

Station at Toe (m):

146.90

160.60

Toe Sta at appr (m):

173.96

154.11

Abutment Length (m):

12.40

12.40

Depth at Toe (m):

1.25

1.25

K1 Shape Coef:

1.00 - Vertical abutment

Degree of Skew (degrees):

0

0

Clipboard

Print ...

File ...

Close

Şekil 54. RS 900 Köprüsü İçin Kış Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kare burun ayak oyulması

Köprü 520 (Kenar ayaklı köprü), daralma oyulması ve kenar ayak oyulması aşağıdaki gibidir:

Daralma Oyulması (Contraction Scour): Belirgin bir daralma oyulması gözlenmemiştir (0.23 m). Kenar ayak oyulması ise sol ve sağ kenarlarda 0.99 m olarak oyulma derinliği tespit edilmiştir.

Hydraulic Design Data		
Equation:	Live	
Abutment Scour	Left	Right
Input Data		
Station at Toe (m):	64.90	78.00
Toe Sta at appr (m):	66.78	71.13
Abutment Length (m):	4.88	3.77
Depth at Toe (m):	0.97	0.97
K1 Shape Coef:	1.00 - Vertical abutment	
Degree of Skew (degrees):	0	0
K2 Skew Coef:	0.00	0.00
Projected Length L' (m):	4.88	3.77
Avg Depth Obstructed Ya (m):	0.99	0.99
Flow Obstructed Qe (m3/s):	9.12	6.81
Area Obstructed Ae (m2):	4.81	3.71
Results		
Scour Depth Ys (m):	0.99	0.99
Qe/Ae = Ve:	1.90	1.84
Froude #:	0.61	0.59
Equation:	Froehlich	Froehlich
Combined Scour Depths		
Left abutment scour + contraction scour (m):	1.22	
Right abutment scour + contraction scour (m):	1.22	
Clipboard	Print ...	File ...
Close		

Şekil 55. RS 520 Köprüsü İçin Kış Mevsimi Oyulma Sonuçları Ekranı Görünümü

Hydraulic Design Data		
Equation:	Live	
Abutment Scour	Left	Right
Input Data		
Station at Toe (m):	64.90	78.00
Toe Sta at appr (m):	66.78	71.13
Abutment Length (m):	4.88	3.77
Depth at Toe (m):	0.97	0.97
K1 Shape Coef:	1.00 - Vertical abutment	
Degree of Skew (degrees):	0.00	0.00
K2 Skew Coef:	0.00	0.00
Projected Length L' (m):	4.88	3.77
Avg Depth Obstructed Ya (m):	0.99	0.99
Flow Obstructed Qe (m3/s):	9.12	6.81
Area Obstructed Ae (m2):	4.81	3.71
Results		
Scour Depth Ys (m):	0.99	0.99
Qe/Ae = Ve:	1.90	1.84
Froude #:	0.61	0.59
Equation:	Froehlich	Froehlich
Combined Scour Depths		
Left abutment scour + contraction scour (m):	1.22	
Right abutment scour + contraction scour (m):	1.22	
Clipboard	Print ...	File ...
Close		

Şekil 56. RS 520 Köprüsü İçin Kış Mevsimi Toplam Oyulma Sonuçları Ekranı Görünümü

Tablo 3. Kış Mevsimi İçin Tüm Oyulma Sonuçları Ekranı Görünümü

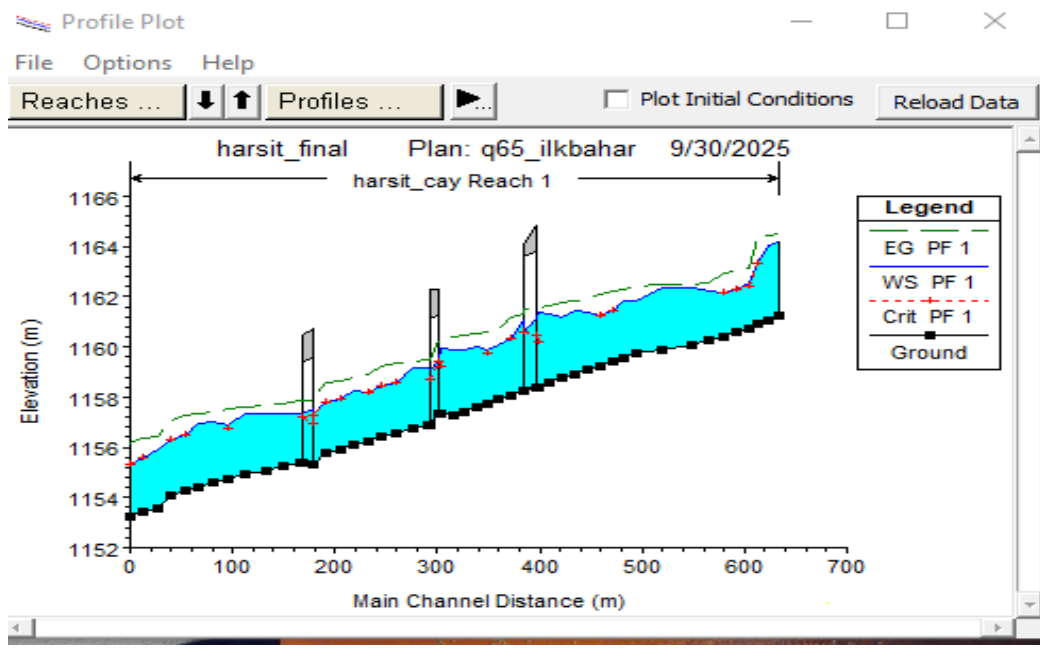
Köprü İstasyonu	Daralma Oyulması (m)	Ayak Oyulması (m)	Kenar Ayak Oyulması (m)	Maks. Yerel Oyulma (m)
RS 700 (Orta Ayaklı)	0.02	2.02 (Orta Ayak)	1.11 (Sol/Sağ)	02.02
RS 900 (Yuvarlak Burunlu)	0.14	2.10 (Yuvarlak Burunlu)	1.24 (Sol/Sağ)	2.10
RS 900 (Kare Burunlu)	0.14	1.14 (Kare Burunlu)	1.24 (Sol/Sağ)	1.24
RS 520 (Kenar Ayaklı)	0.23	-	0.99 (Sol/Sağ)	0.99

4.1.2. İlkbahar Mevsimi ($Q = 65 \text{ m}^3/\text{s}$) Hidrolik ve Oyulma Bulguları

Kış mevsimi analizini takiben, Harşit Çayı'nın ilkbahar dönemi ortalama hidrolojik koşullarını temsil eden $65 \text{ m}^3/\text{s}$ lik sabit debi değeri için Kararlı Akım (Steady Flow) simülasyonları gerçekleştirilmiştir. İlkbahar, genellikle eriyen kar suları ve artan yağışlar nedeniyle debinin önemli ölçüde yükseldiği bir dönemdir. Bu analizin temel amacı, artan debi koşullarında nehrin hidrolik davranışındaki değişimleri ve köprülerdeki oyulma potansiyelindeki artışı tespit etmektir.

Harşit Çayı üzerinde bulunan köprülerin İlkbahar debisi ($Q = 65 \text{ m}^3/\text{s}$) koşulları altında yapılan oyulma analizleri, kış debisine ($Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$) kıyasla genellikle daha yüksek oyulma derinlikleri ortaya koymuştur. Ancak, bazı köprü ayaklarında oyulma derinliklerinin debi artışına rağmen kış debisindeki değerlerle benzer kalması, oyulma mekanizmalarının belirli bir doygunluk noktasına ulaştığını veya kullanılan denklemlerin bu duruma özel tepkiler verdiğini göstermektedir.

Zemin Malzemesi Varsayımı: Analizlerde, Harşit Çayı yatağının genel morfolojisi ve bölgedeki benzer akarsular için yaygın olarak kabul edilen $D_{50}=3\text{mm}$ ve $D_{95}=8\text{mm}$ tane çapı değerleri varsayılmıştır. Bu ince malzeme varsayımı, yüksek akış hızlarında oyulma derinliklerinin artma potansiyelini yükseltmektedir.

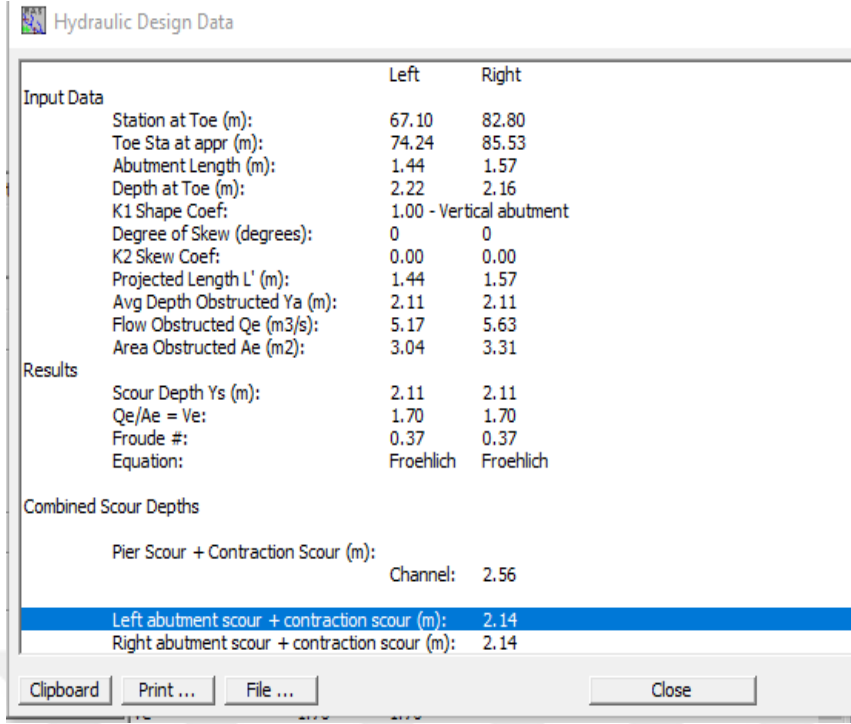


Şekil 57. İlkbahar Mevsimi ($Q=65 \text{ m}^3/\text{s}$) İçin Hesaplanan Maksimum Su Yüzü Profili

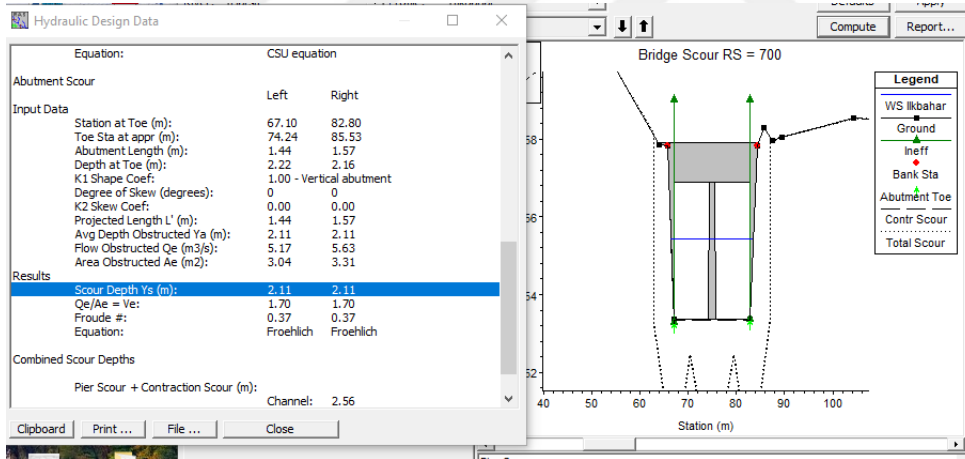
İlkbahar debisi ($65 \text{ m}^3/\text{s}$) koşullarında, RS 700 numaralı köprüde önemli oyulma derinlikleri tespit edilmiştir:

Daralma Oyulması (Contraction Scour): Belirgin bir daralma oyulması gözlenmemiştir (0.03 m). Bu durum, köprü açıklığının genel akışa kıyasla henüz kritik bir daralma yaratmadığını veya akış hızının daralma oyulması için kritik eşiği aşmadığını göstermektedir.

Kenar Ayak Oyulması (Abutment Scour): Hem sol tarafta hem sağ tarafta 2.11 m, gibi oldukça yüksek oyulma derinlikleri hesaplanmıştır. Artan debiyle birlikte kenar ayakların etrafındaki akışın enerjisi önemli ölçüde artmış, bu da temeller için ciddi riskler oluşturan derin oyulmalara neden olmuştur. Orta Ayak Oyulması (Pier Scour) derinliği ise 2.53 m olarak bulunmuştur.



Şekil 58. RS 700 Köprüsü İçin İlkbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları



Şekil 59. RS 700 Köprüsü İçin İlkbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kenar ayak oyulması

Köprü 900, Daralma Oyulması (Contraction Scour), belirgin bir daralma oyulması gözlenmemiştir (0.25 m).

Kenar Ayak Oyulması (Abutment Scour): Sol ve sağ kenar ayaklarda 2.25 m oyulma derinliği hesaplanmıştır. İlkbahar debisiyle birlikte oyulmalar kış debisine göre belirgin bir artış göstermiştir.

Kare Burunlu Ayak Oyulması (Pier Scour): Kare burunlu ayakta 1.45 m oyulma gözlenmiştir.

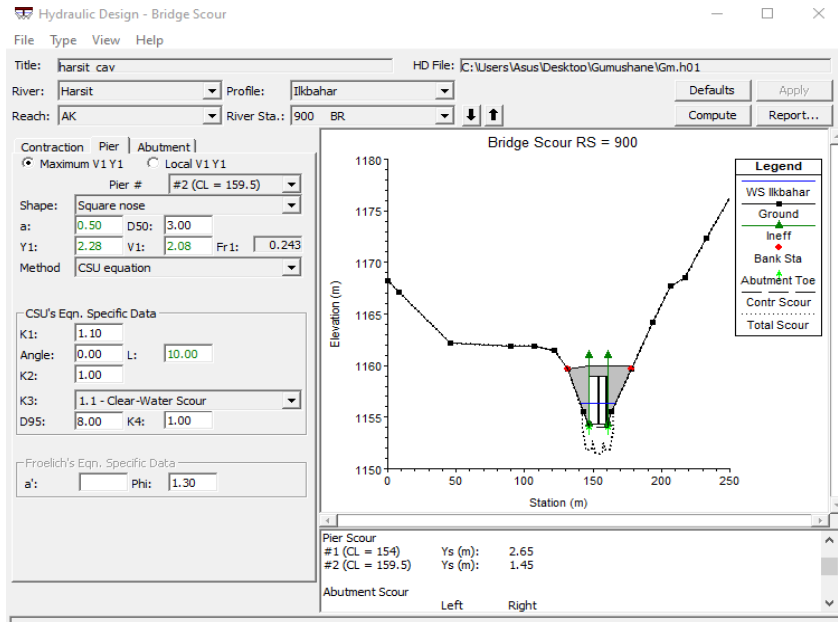
Hydraulic Design Data	
Results	
Scour Depth Ys (m):	2.65
Froude #:	0.44
Equation:	CSU equation
Pier: #2 (CL = 159.5)	
Input Data	
Pier Shape:	Square nose
Pier Width (m):	0.50
Grain Size D50 (mm):	3.00000
Depth Upstream (m):	2.28
Velocity Upstream (m/s):	2.08
K1 Nose Shape:	1.10
Pier Angle:	0.00
Pier Length (m):	10.00
K2 Angle Coef:	1.00
K3 Bed Cond Coef:	1.10
Grain Size D90 (mm):	8.00000
K4 Armouring Coef:	1.00
Results	
Scour Depth Ys (m):	1.45
Froude #:	0.44
Equation:	CSU equation
Abutment Scour	
	Left Right
Input Data	
Clipboard Print ... File ... Close	

Şekil 60. RS 900 Köprüsü İçin İlkbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kare burunlu ayak oyulması

Yuvarlak Burunlu Ayak Oyulması (Pier Scour): Yuvarlak burunlu ayakta ise 2.65 m oyulma derinliği, kış debisiyle benzer şekilde kritik bir risk faktörü olmaya devam etmektedir. Yuvarlak burunlu ayakların genellikle daha az oyulmaya neden olduğu beklentisinin aksine, bu değer yüksek lokal akış hızlarının ve ayağın akışa göre konumunun oyulma potansiyelini artırdığını göstermektedir.

Hydraulic Design Data		
Abutment Scour		
	Left	Right
Input Data		
Station at Toe (m):	146.90	160.60
Toe Sta at appr (m):	146.50	159.50
Abutment Length (m):	6.00	6.00
Depth at Toe (m):	2.28	2.28
K1 Shape Coef:	1.00 - Vertical abutment	
Degree of Skew (degrees):	0.00	0.00
K2 Skew Coef:	0.00	0.00
Projected Length L' (m):	6.00	6.00
Avg Depth Obstructed Ya (m):	2.25	2.25
Flow Obstructed Qe (m3/s):	26.00	26.50
Area Obstructed Ae (m2):	13.50	13.50
Results		
Scour Depth Ys (m):	2.25	2.25
Qe/Ae = Ve:	1.93	1.96
Froude #:	0.41	0.42
Equation:	Froehlich	Froehlich
Combined Scour Depths		
Pier : #1 (CL = 154) (Contr + Pier) (m):	2.90	
Pier : #2 (CL = 159.5) (Contr + Pier) (m):	1.70	
Clipboard Print ... File ... Close		

Şekil 61. RS 900 Köprüsü İçin İlkbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları- Yuvarlak burunlu ayak oyulması



Şekil 62. RS 900 Köprüsü İçin İlkbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları

Tablo 4. İlkbahar Mevsimi İçin Tüm Oyulma Sonuçları Ekranı Görünümü

Köprü İstasyonu	Daralma Oyulması (m)	Ayak Oyulması (m)	Kenar Ayak Oyulması (m)	Maks. Yerel Oyulma (m)	Maks. Toplam Oyulma (m)
RS 700 (Orta Ayaklı)	0.03	2.53 (Orta Ayak)	2.11 (Sol/Sağ)	2.53	2.56
RS 900 (Yuvarlak Burunlu)	0.25	2.65 (Yuvarlak Burunlu)	2.25 (Sol/Sağ)	2.65	2.90
RS 900 (Kare Burunlu)	0.25	1.45 (Kare Burunlu)	2.25 (Sol/Sağ)	2.25	2.50
RS 520 (Kenar Ayaklı)	0.23	-	0.99 (Sol/Sağ)	0.99	1.22

Harşit Çayı üzerinde bulunan köprülerin ilkbahar debisi koşulları altında yapılan oyulma analizleri, kış debisine ($Q=25$) kıyasla tüm kritik bileşenlerde belirgin bir artış olduğunu göstermiştir. $65 \text{ m}^3/\text{s}$ gibi bir mevsimsel akım için ayak oyulması değerlerinin 2.5 m seviyesini aşması, köprülerin yapısal bütünlüğü açısından ciddi bir risk taşıdığını açıkça ortaya koymaktadır. RS 700 (Orta Ayaklı Köprü): Orta ayakta oyulma derinliği 2.02 m'den 2.53 m'ye yükselmiş, kenar ayak oyulması ise 2.11 m ile kritik bir seviyeye ulaşmıştır. Artan debi, özellikle köprü temelini tehdit eden lokal oyulma mekanizmasını şiddetlendirmiştir.

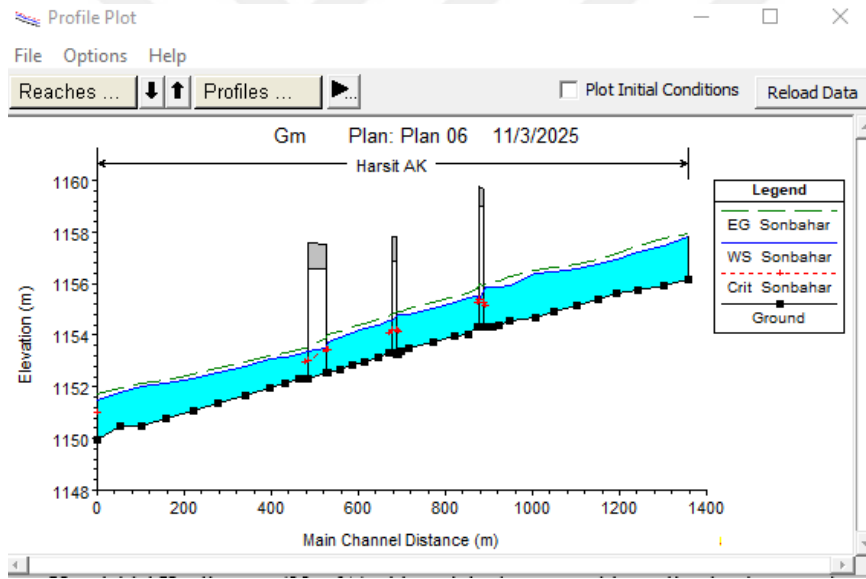
RS 900 (İki Ayaklı Köprü): Bu köprüde maksimum ayak oyulması 2.65 m olarak hesaplanmıştır. Yuvarlak burunlu ayağın, beklenen düşük oyulma performansının aksine, kare burunlu ayağa 1.45 m göre neredeyse iki kat daha fazla oyulma göstermesi dikkat çekicidir. Bu durum, ayağın akışa göre çapraz konumlanması, geometrik kusurlar veya

yüksek yerel akış hızları nedeniyle oluşan at nalı girdaplarının etkisinin şiddetlendiğini göstermektedir. Kenar ayak oyulması da 2.25 m 'ye yükselerek önemli bir risk bileşeni haline gelmiştir.

Elde edilen bulgular, zemin etüdü verilerine ulaşamadığı için literatürdeki elek analizi verileri kullanılmıştır. Bu veriler malzemeden $D_{50}=3$ mm sahada gözlemlenen ince yatak yapısıyla tutarlıdır. Bu ince yapı, beklenen şekilde yüksek oyulma derinliklerine neden olmuştur.

4.1.3. Sonbahar Mevsimi Senaryosu ($Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$)

Sonbahar mevsimi analizi, ilkbahar taşkınlarından sonra debinin düştüğü ancak kış mevsiminden daha yüksek bir akım rejimini temsil $Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$ sabit debi koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Bu senaryo, Harşit Çayı'ndaki köprülerin düşük ve orta akım koşullarına verdiği hidrolik tepkiyi incelemek açısından önemlidir.



Şekil 63. Sonbahar Mevsimi ($Q=35 \text{ m}^3/\text{s}$) İçin Hesaplanan Maksimum Su Yüzü Profili

Yapılan Kararlı Akım simülasyonu sonucunda, akışın tüm model boyunca subkritik rejimde seyrettiği ve suyun ana yatak sınırları içinde kaldığı gözlemlenmiştir. Oyulma analizlerinin sonuçları Tablo 5'te detaylıca sunulmuştur.

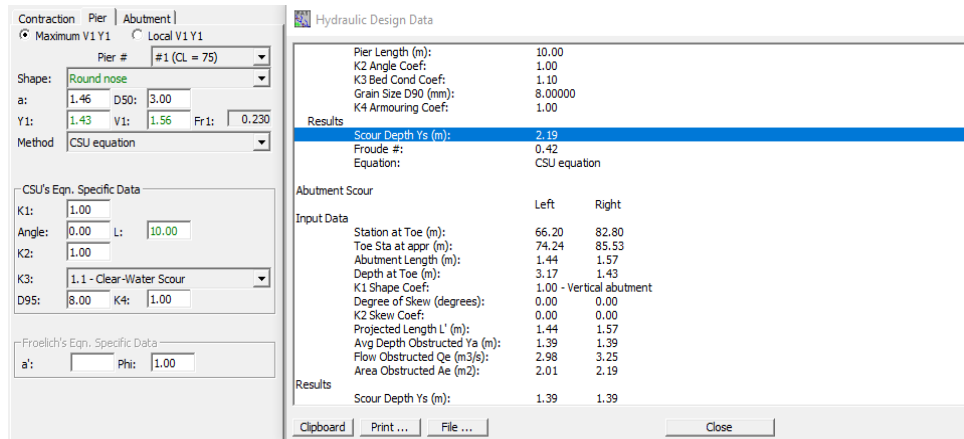
Tablo 5. Sonbahar Mevsimi ($Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}$)-Hidrolik ve Oyulma Bulguları

Köprü İstasyonu	Daralma Oyulması (m)	Ayak Oyulması (m)	Kenar Oyulması (m)	Ayak Oyulması (m)	Maks. Yerel Oyulma (m)	Maks. Toplam Oyulma (m)
RS 700 (Orta Ayaklı)	0.02	2.19 (Orta Ayak)	1.39 (Sol/Sağ)		2.19	2.21
RS 900 (Yuvarlak Burunlu)	0.16	2.28 (Yuvarlak Burunlu)	1.52 (Sol/Sağ)		2.28	2.44
RS 900 (Kare Burunlu)	0.16	1.24 (Kare Burunlu)	1.52 (Sol/Sağ)		1.52	1.68
RS 520 (Kenar Ayaklı)	0.27	-	1.21 (Sol/Sağ)		1.21	1.48

Sonbahar debisi sonuçları, Kış $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$ ve İlkbahar $Q = 65 \text{ m}^3/\text{s}$ analizlerinden elde edilen değerler arasında, beklenen doğrusal bir artış eğilimi göstermiştir.

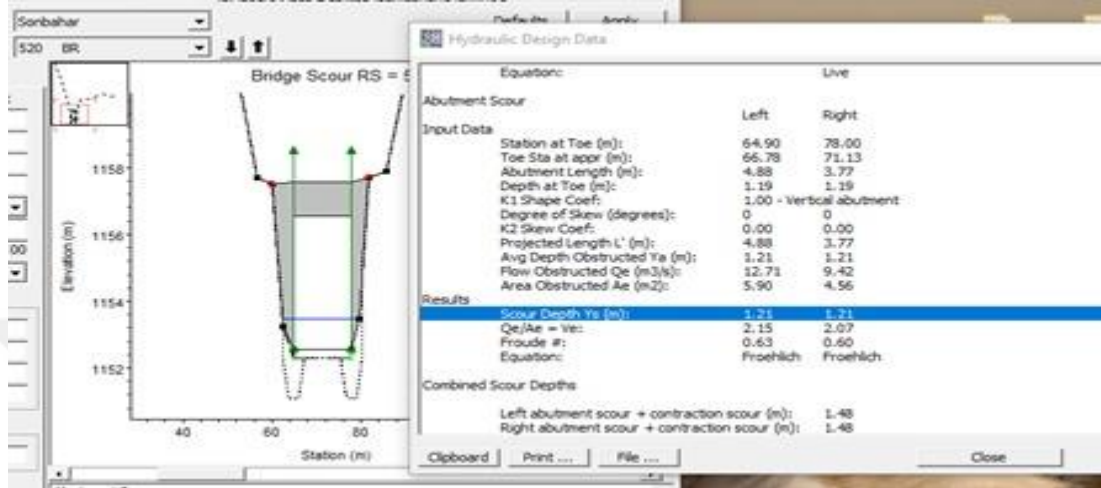
RS 900 Köprüsü (Yuvarlak Burunlu Ayak): Bu ayakta hesaplanan 2.28 m'lik ayak oyulması derinliği, Sonbahar koşullarında dahi köprüyü tehdit eden en kritik lokal oyulma bileşeni olmaya devam etmiştir. Bu değer, kış (2.10 m) ve ilkbahar (2.65 m) sonuçlarıyla tutarlı bir artış sergilemektedir.

RS 700 Köprüsü (Orta Ayaklı): Orta ayak oyulması 2.19 m olarak bulunmuş, bu da İlkbahar (2.53 m) ve kış (2.02 m) değerleri arasında yer almıştır. Daralma oyulması 0.02 m ihmal edilebilir düzeydedir.



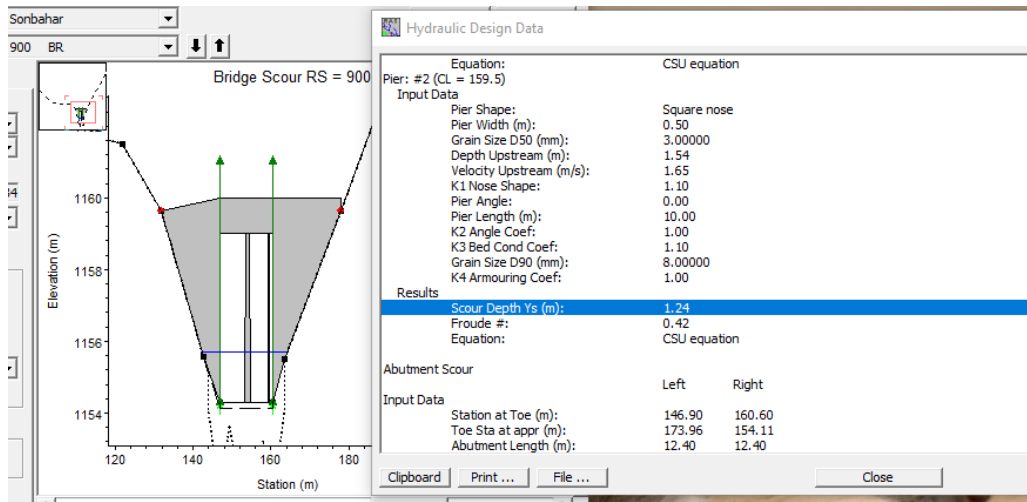
Şekil 64. RS 700 Köprüsü İçin Sonbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kenar ayak oyulması

Kenar Ayak Oyulması (Abutment Scour): Tüm köprülerde kenar ayak oyulma derinlikleri Kış mevsiminden daha yüksek bulunmuştur (RS 900'de 1.52 m, RS 700'de 1.39 m ve RS 520'de 1.21 m). Bu durum, debi artışına bağlı olarak yatak kenarlarına uygulanan kayma gerilmesinin arttığını ve Froehlich denkleminin bu etkiyi yansıttığını göstermektedir.



Şekil 65. RS 520 Köprüsü İçin Sonbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kenar ayak oyulması

RS 900 numaralı köprüde, akıma en büyük hidrolik direnci gösteren kare burunlu ayak tipi bulunmaktadır. Bu köprü için yapılan analizlerde, en kritik oyulma derinliğinin ayak oyulması 1.24 m yerine, kenar ayak oyulması 1.52 m bileşeni tarafından belirlendiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, kare burunlu ayakların akımı etkin bir şekilde engellediğini ve akımın büyük bir kısmının yan açıklıklara (kenar ayaklara) yönlendirildiğini göstermektedir. Bu yönlenme sonucunda maksimum oyulma potansiyeli, ayak çevresinden kenar ayakta oluşan daralma ve hızlanma bölgesine kaymıştır. Dolayısıyla, bu köprü için tasarım kritikliği ayak oyulmasından ziyade kenar ayak oyulmasına odaklanmalıdır.



Şekil 66. RS 900 Köprüsü İçin Sonbahar Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kare burunlu ayak oyulması

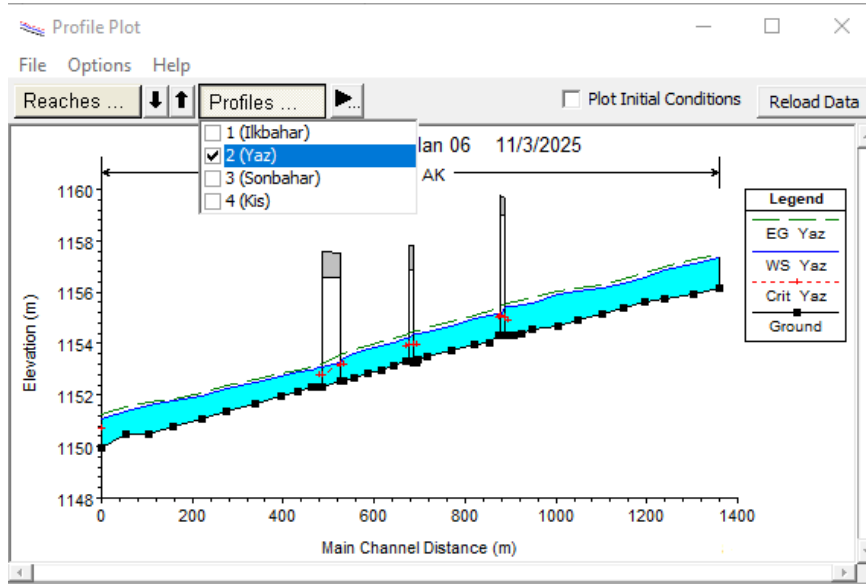
4.1.4. Yaz Mevsimi Senaryosu ($Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$)

Yaz mevsimi analizi, Harşit Çayı'nın yıl içerisindeki en düşük akım koşullarını temsil eden ($Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$) sabit debi değeri ile gerçekleştirilmiştir. Bu senaryo, nehrin minimum hidrolik enerjisi altında köprülerin oyulmaya karşı verdiği tepkiyi ve özellikle Temiz Su Oyulması (Clear-Water Scour) potansiyelini incelemeyi amaçlamaktadır.

Yapılan Kararlı Akım simülasyonunda, akışın tüm model boyunca subkritik rejimde kaldığı ve akış derinliğinin minimum seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Oyulma analizlerinin sonuçları, diğer mevsimsel senaryolara kıyasla en düşük derinlikleri göstermiştir ve Tablo 6 da özetlenmiştir.

Tablo 6. Yaz Mevsimi ($Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$)-Hidrolik ve Oyulma Bulguları

Köprü İstasyonu	Daralma Oyulması (m)	Ayak Oyulması (m)	Kenar Ayak Oyulması (m)	Maks. Yerel Oyulma (m)	Maks. Toplam Oyulma (m)
RS 700 (Orta Ayaklı)	0.02	1.96 (Orta Ayak)	1.02 (Sol/Sağ)	1.96	1.98
RS 900 (Yuvarlak Burunlu)	0.13	2.03 (Yuvarlak Burunlu)	1.15 (Sol/Sağ)	2.03	2.16
RS 900 (Kare Burunlu)	0.13	1.11 (Kare Burunlu)	1.15 (Sol/Sağ)	1.15	1.28
RS 520 (Kenar Ayaklı)	0.2	-	0.91 (Sol/Sağ)	0.91	1.11



Şekil 67. Yaz Mevsimi ($Q=22 \text{ m}^3/\text{s}$) İçin Hesaplanan Maksimum Su Yüzü Profili

Ayak Oyulmasında Sürekli Risk: Debi minimum seviyeye düşmesine rağmen, RS 900 yuvarlak burunlu ayak için hesaplanan 2.03 m ve RS 700 orta ayak için hesaplanan 1.96 m'lik oyulma derinlikleri, riskin mevsimsel olarak süreklilik arz ettiğini göstermektedir. Bu bulgu, akış hızlarının düşük debide bile kritik oyulma hızının (Clear-Water Scour için) üzerinde kaldığını ve yatağın ince ($D_{50}=3 \text{ mm}$) olmasının risk üzerindeki baskın etkisini doğrulamaktadır.

Kenar Ayak Oyulması (Abutment Scour): Kenar ayaklardaki oyulma derinlikleri (RS 520'de 0.91 m) ilk kez 1 m'nin altına düşmüştür. Bu durum, düşük akım enerjisinin, kenar ayak etrafındaki lokal akış hızlarını ve dolayısıyla Froehlich denklemi ile hesaplanan oyulma potansiyelini azalttığını göstermektedir.

Geometrik Etki: RS 900 köprüsünde, yuvarlak burunlu ayaktaki oyulma derinliği (2.03 m), kare burunlu ayaktaki oyulma derinliğinden (1.11 m) belirgin şekilde yüksektir. Bu fark, akış rejimi ne olursa olsun, yuvarlak burunlu ayağın akışa karşı konumunun lokal oyulmayı diğer ayağa göre daha kritik bir seviyede tuttuğunu teyit etmektedir.

Yaz mevsimi analizi, debi düşük olduğunda bile ayak oyulması bileşeninin 2 m seviyesinde kalarak en büyük riski oluşturduğunu göstermiştir. Bu durum, Harşit Çayı üzerindeki köprülerin temelleri için yılın tamamında yapısal güvenlik riskinin devam ettiğini ve ince yatak malzemesinin kritik bir tasarım varsayımı olduğunu işaret etmektedir.

4.2. Taşkın Debi Analizi Sonuçları (Q₁₀, Q₂₅, Q₅₀)

4.2.1. Kararsız Akım Analizi Problemi ve Kararlı Akıma Geçiş Gerekçesi

Bu bölüm, [3.6.2]'de planlanan Kararsız Akım analizinin sayısal zorluklarını açıklamakta ve tüm oyulma hesaplamalarında Kararlı Akım yönteminin neden nihai çözüm olarak seçildiğini gerekçelendirmektedir. Taşkın debileri (Q₁₀, Q₂₅, Q₅₀) için planlanan Kararsız Akım (Unsteady Flow) simülasyonlarında, model geometrisinin özellikleri nedeniyle sayısal kararsızlık (numerical instability) sorunları gözlemlenmiştir. Bu durum, modelin tutarlı ve fiziksel olarak geçerli hidrolik çözümler üretmesini engellemiştir. Gözlemlenen Temel Hatalar:

Yüksek Hacim Hatası (Volume Error): Simülasyon boyunca sisteme giren ve çıkan su hacimleri arasındaki farkın kabul edilebilir toleransın % 1 üzerine çıkması. Bu, modelin kütle korunumunu (continuity) sağlayamadığını gösterir.

Su Yüzeyi Sonsuzluk Hatası (WSEL =Infinity): Özellikle köprü girişleri ve nehrin dik eğimli kesitlerindeki ani hidrolik değişim noktalarında, su yüzeyi kotunun HEC-RAS çözümleyicisi tarafından sonsuz değerler olarak rapor edilmesi. Bu hata, çözümleyicinin yakınsama (convergence) sağlayamadığını ve akım rejiminin sayısal olarak zorlandığını belirtir.

Kararsızlığın temel nedenleri, Harşit Çayı modelinin yüksek eğimli yapısı ve kısa modelleme aralıkları ile ilgilidir.

Modelin çözünürlük sorunlarına ek olarak, Harşit Çayı'nın incelenen kesiminde yatak eğiminin (0.00492), nispeten yüksek olması, akışın sıklıkla kritik akım rejimine (Froude ≈ 1) yaklaşmasına neden olmuştur. 0.005'e yakın bu eğim, nehir sistemleri için yüksek kabul edilir ve Kararsız Akım çözümleyicileri için sayısal olarak zorlayıcıdır. Ayrıca, modelin (30 m) yarattığı yapay yatak düzensizlikleri de bu sayısal kararsızlığın önemli bir bileşenini oluşturmuştur.

Kısa Kesit Araları: Köprülerin yakınında ve kritik topoğrafik bölgelerde model hassasiyetini artırmak için kesit aralıkları kısa tutulmuştur. Bu kısa aralıkları ile sayısal kararlılık için gerekli olan (zaman adımı) uyumsuzluğu, kararsızlığı tetiklemiştir.

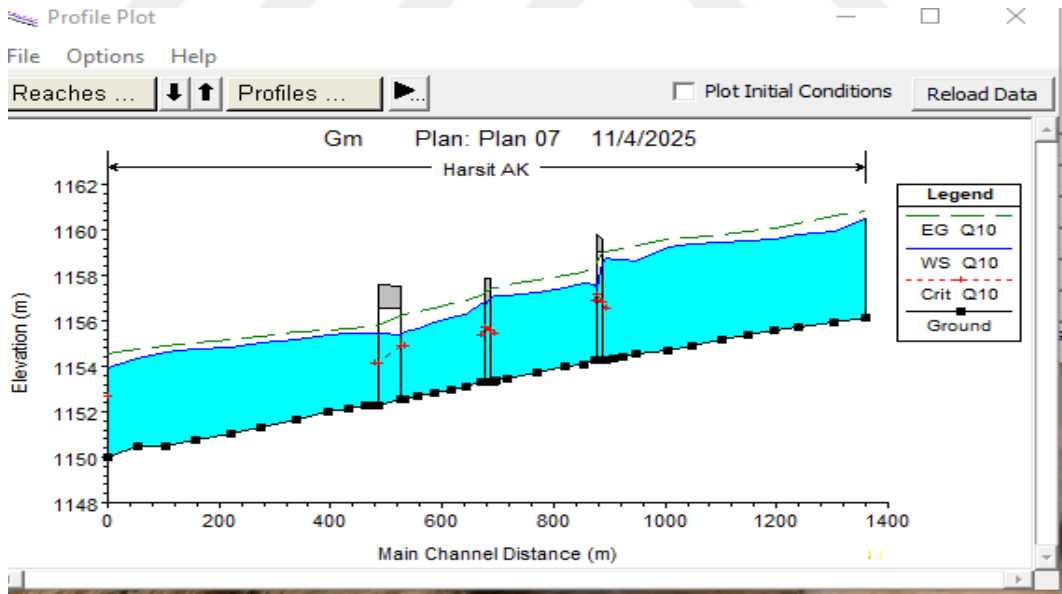
Oyulma Denklemlerinin Temeli: Sayısal hatalar nedeniyle kararsız akım sonuçlarının güvenilirliğini yitirmesi üzerine, tezin ana amacı olan oyulma derinliği hesaplamaları için Kararlı Akım (Steady Flow) analizine geçilmiştir. Köprü oyulması denklemleri (Daralma, Ayak, Kenar Ayak) temel olarak pik taşkın debisi anındaki maksimum ve sabit hidrolik koşullar (maksimum hız ve derinlik) altında oluşacak nihai denge oyulma derinliğini tahmin etmek için geliştirilmiştir (FHWA, 2012). Literatürde,

kararsız akım verilerinin pik debi değerlerine karşılık gelen kararlı akım analizlerinin, mühendislik tasarımı açısından güvenli tarafta (conservative) sonuçlar verdiği kabul edilmektedir (Yıldız ve Karahan, 2021).

Mühendislik Yaklaşımı: Kararlı Akım analizi, her bir taşkın debisini sabit bir pik anı olarak kabul ederek, oyulma açısından en kötü durum senaryosunu temsil eder. Bu yaklaşım, sadece nihai oyulma derinliğini (y_s) tahmin etmeye odaklanan ampirik denklemlerle (CSU, Froehlich) mükemmel uyum sağlar ve yapısal güvenlik analizlerinde standart kabul edilir. Bu nedenlerle, Harşit Çayı üzerindeki oyulma risklerini belirlemek amacıyla bu çalışmada nihai ve kesin yöntem olarak Kararlı Akım analizi tercih edilmiştir.

4.2.2. Q_{10} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi ($Q=147.17 \text{ m}^3/\text{s}$) Bulguları

Taşkın analizlerinin ilki, 10 yıllık tekerrür periyoduna sahip Q_{10} taşkın debisi koşulları altında gerçekleştirilmiştir (Bu taşkın debisi için Q değeri $147.17 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak kabul edilmiştir). Bu analiz, Harşit Çayı'nın nispeten sık görülen bir taşkın anında köprülerin hidrolik davranışını ve oyulma riskindeki sıçramayı incelemektedir.



Şekil 68. Q_{10} Taşkın Debisi İçin Su Yüzeyi Profili

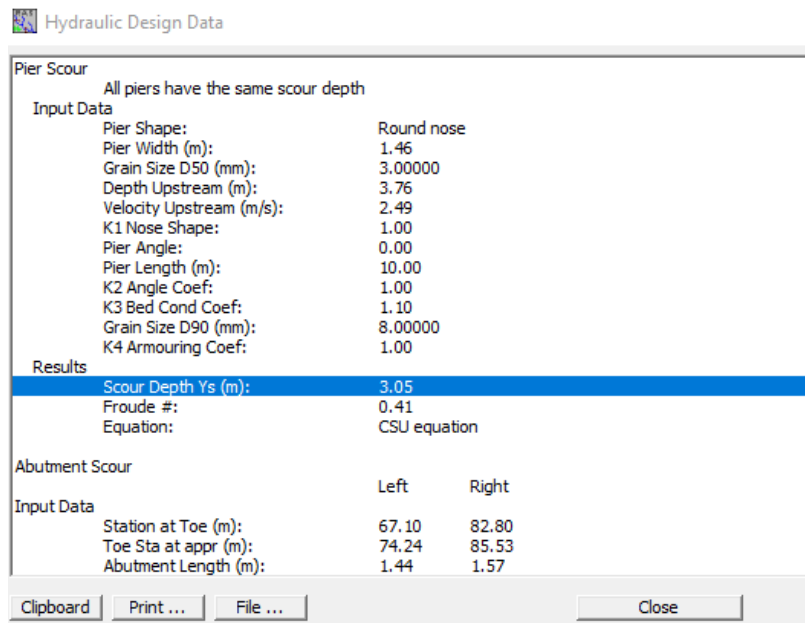
Simülasyon sonuçlarına göre (Şekil 68), Q_{10} taşkın debisi altında su yüzeyi kotu, mevsimsel akımlara kıyasla önemli ölçüde yükselmiştir. Akım rejiminin genel olarak subkritik kaldığı ancak yer yer kritik akıma yaklaştığı gözlemlenmiştir. Yüksek hız ve derinlik, oyulma derinliklerini belirleyen ana faktörler haline gelmiştir. Q_{10} debisi

koşulları altında HEC-RAS Bridge Scour modülü ile yapılan analizler sonucunda elde edilen maksimum oyulma derinlikleri Tablo 7’ de özetlenmiştir.

Tablo 7. Q₁₀ Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi (Q= 147.17 m³/s) Hidrolik ve Oyulma Bulguları

Köprü İstasyonu	Daralma Oyulması (m)	Ayak Oyulması (m)	Kenar Ayak Oyulması (m)	Maks. Yerel Oyulma (m)	Maks. Toplam Oyulma (m)
RS 700 (Orta Ayaklı)	0.00	3.05 (Orta Ayak)	3.69 (Sol/Sağ)	3.69	3.69
RS 900 (Yuvarlak Burunlu)	0.25	3.09 (Yuvarlak Burunlu)	4.38 (Sol/Sağ)	4.38	4.63
RS 900 (Kare Burunlu)	0.25	1.69 (Kare Burunlu)	4.38 (Sol/Sağ)	4.38	4.63

Kenar Ayak Oyulması Baskınlığı: Q₁₀ taşkınında oyulma derinliklerinde keskin bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle RS 900 köprüsünde hesaplanan 4.38 m’lik Kenar Ayak Oyulması (Abutment Scour), bu senaryonun en kritik risk bileşeni haline gelmiştir. RS 700’de ise Kenar Ayak Oyulması (3.69 m) Ayak Oyulmasını aşarak baskın risk olmuştur.



Şekil 69. RS 700 Q₁₀ Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları- Yuvarlak burunlu ayak oyulması

Ayak Oyulması (Pier Scour): Ayak oyulması derinlikleri (RS 900'de 3.09 m, RS 700'de 3.05 m), mevsimsel akımlarda dahi kritik olan bu bileşenin, taşkın anında 3 metrenin üzerine çıkmıştır.

RS 700 Daralma Oyulması: RS 700 köprüsünde Daralma Oyulmasının model tarafından hesaplanmaması (0.00 m), köprü açıklığının yeterli olduğu veya akışın daralma oyulması için tanımlanan kritik eşiği tetiklemediği şeklinde yorumlanmıştır. Q_{10} taşkın analizi, Harşit Çayı üzerindeki köprülerin, sık görülen taşkınlar altında dahi toplamda 4.63 m'ye varan oyulma derinliklerine ulaştığını ve bu durumun köprü temelleri için yüksek derecede acil müdahale gerektiren bir risk teşkil ettiğini açıkça ortaya koymuştur.

Hydraulic Design Data

Equation:	Live	
Abutment Scour	Left	Right
Input Data		
Station at Toe (m):	64.90	78.00
Toe Sta at appr (m):	66.78	77.50
Abutment Length (m):	4.88	24.00
Depth at Toe (m):	2.95	2.95
K1 Shape Coef:	1.00 - Vertical abutment	
Degree of Skew (degrees):	0.00	0.00
K2 Skew Coef:	0.00	0.00
Projected Length L' (m):	4.88	24.00
Avg Depth Obstructed Ya (m):	2.96	2.96
Flow Obstructed Qe (m3/s):	51.78	36.84
Area Obstructed Ae (m2):	14.43	138.50
Results		
Scour Depth Ys (m):	2.96	2.96
Qe/Ae = Ve:	3.59	0.27
Froude #:	0.67	0.05
Equation:	Froehlich	Froehlich
Combined Scour Depths		
Left abutment scour + contraction scour (m):	3.08	
Right abutment scour + contraction scour (m):	3.08	

Clipboard Print ... File ... Close

Şekil 70. RS 520 Q_{10} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Kenar ayak oyulması

4.2.3. Q_{25} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi ($Q= 195.91 \text{ m}^3/\text{s}$) Bulguları

25 yıllık tekerrür periyoduna sahip Q_{25} taşkın debisi, Q_{10} taşkınına kıyasla daha yüksek bir hidrolik yük oluşturmakta ve potansiyel oyulma derinliklerini artırmaktadır. Q_{25} taşkın debisi koşulları altında yapılan analizler, Q_{10} sonuçlarının üzerine eklenen riskleri ve modelin yerel hidrolik koşullara olan hassasiyetini göstermiştir.

Tablo 8. Q₂₅ Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi (Q= 195.91 m³/s) Hidrolik ve Oyulma Bulguları

Köprü İstasyonu	Daralma Oyulması (m)	Ayak Oyulması (m)	Kenar Ayak Oyulması (m)	Maks. Yerel Oyulma (m)	Maks. Toplam Oyulma (m)
RS 700 (Orta Ayaklı)	0.00	3.18 (Orta Ayak)	1.99 (Sol/Sağ)	3.18	3.18
RS 900 (Yuvarlak Burunlu)	0.00	3.29 (Yuvarlak Burunlu)	5.38 (Sol/Sağ)	5.38	5.38
RS 900 (Kare Burunlu)	0.00	1.80 (Kare Burunlu)	5.38 (Sol/Sağ)	5.38	5.38
RS 520 (Kenar Ayaklı)	0.01	-	3.74 (Sol/Sağ)	3.74	3.75

Maksimum Risk Odağı: Q₂₅ taşkınının en önemli bulgusu, RS 900 köprüsünde hesaplanan 5.38 m'lik Kenar Ayak Oyulması derinliğidir. Bu değer, Q₁₀ taşkınına göre yaklaşık 1 m'lik bir artış sergilemekte ve köprü temelleri üzerindeki hidrolik stresi ölçülebilir düzeyde yükseltmektedir.

Ayak Oyulmasında Kritik Eşikler: RS 900 Yuvarlak Burunlu Ayak 3.29 m ve RS 700 Orta Ayak 3.18 m oyulma derinlikleri 3 metrenin üzerindeki seyrini korumuştur. Bu bulgular, bu taşkın seviyesinde oyulmanın Canlı Yatak Rejimi karakteristiği gösterdiğini ve oyulma mekanizmasının D₅₀ değerinden bağımsız olarak büyük ölçüde akış derinliği ve hızına bağlı hale geldiğini işaret etmektedir.

Asimetrik Oyulma Mekanizması (RS 700): RS 700 köprüsünde Kenar Ayak Oyulması derinliğinin sol tarafta 1.99 m iken sağ tarafta 0.60 m olarak hesaplanması, akışın doğal kurp etkileşimi veya akım çarpma açısı nedeniyle yerel hidrolik koşulların asimetrik davrandığını göstermektedir. Bu, modelin Harşit Çayı'nın yerel morfolojik özelliklerini yansıttığını teyit etmektedir.

Hydraulic Design Data			
Grain Size D90 (mm):		8.00000	
K4 Armouring Coef:		1.00	
Results			
Scour Depth Ys (m):		3.18	
Froude #:		0.36	
Equation:		CSU equation	
Abutment Scour			
		Left	Right
Input Data			
Station at Toe (m):		67.10	82.80
Toe Sta at appr (m):		74.24	85.53
Abutment Length (m):		3.72	71.03
Depth at Toe (m):		5.05	4.98
K1 Shape Coef:		1.00 - Vertical abutment	
Degree of Skew (degrees):		0.00	0.00
K2 Skew Coef:		0.00	0.00
Projected Length L' (m):		3.72	71.03
Avg Depth Obstructed Ya (m):		1.99	0.60
Flow Obstructed Qe (m3/s):		12.13	23.14
Area Obstructed Ae (m2):		7.42	42.92
Results			
Scour Depth Ys (m):		1.99	0.60
Qe/Ae = Ve:		1.63	0.54
Froude #:		0.37	0.22
Equation:		Froehlich	Froehlich
Clipboard		Print ...	File ...
		Close	

Şekil 71. RS 700 Q₂₅ Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Sağ ve Sol Kenar Ayak Oyulması

RS 520 Artan Risk: Kenar ayaklı köprü RS 520'de oyulma derinliği 3.74 m'ye yükselmiş, bu durum, orta ayağı olmayan köprülerin taşkın anında Kenar Ayak Oyulması riski altında olduğunu göstermektedir.

Hydraulic Design Data			
Equation:		Live	
Abutment Scour			
		Left	Right
Input Data			
Station at Toe (m):		64.90	78.00
Toe Sta at appr (m):		66.78	71.13
Abutment Length (m):		4.88	3.77
Depth at Toe (m):		3.77	3.77
K1 Shape Coef:		1.00 - Vertical abutment	
Degree of Skew (degrees):		0.00	0.00
K2 Skew Coef:		0.00	0.00
Projected Length L' (m):		4.88	3.77
Avg Depth Obstructed Ya (m):		3.74	3.74
Flow Obstructed Qe (m3/s):		68.21	47.83
Area Obstructed Ae (m2):		18.27	14.12
Results			
Scour Depth Ys (m):		3.74	3.74
Qe/Ae = Ve:		3.73	3.39
Froude #:		0.62	0.56
Equation:		Froehlich	Froehlich
Combined Scour Depths			
Left abutment scour + contraction scour (m):		3.75	
Right abutment scour + contraction scour (m):		3.75	
Clipboard		Print ...	File ...
		Close	

Şekil 72. RS 520 Q₂₅ Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları- Kenar Ayak Oyulması

Sonuç olarak, Q_{25} taşkın analizi, Harşit Çayı'ndaki köprülerin, taşkın koşulları altında 5 m'yi aşan oyulma potansiyeli taşıdığını ortaya koymuştur. Bu derinlikler, yapısal mühendislik standartları açısından güvenlik marjının zorlandığını ve temel koruma önlemlerinin gözden geçirilmesi gerektiğini işaret etmektedir.

4.2.4. Q_{50} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi ($Q= 240.71 \text{ m}^3/\text{s}$) Bulguları

50 yıllık tekerrür periyoduna sahip Q_{50} taşkın debisi $Q: 240.71 \text{ m}^3/\text{s}$, incelenen en yüksek hidrolik yükü temsil etmekte ve köprüler üzerindeki potansiyel maksimum riski belirlemektedir. Bu debi seviyesinde, akışın artık köprü menfezlerini doldurarak su yüzeyi profilini önemli ölçüde yükselttiği ve dolayısıyla hidrolik enerji yoğunluğunu artırdığı gözlemlenmiştir.

Q_{50} taşkın debisi koşulları altında yapılan analizler, oyulma mekanizmasının Q_{25} 'e göre daha karmaşık hale geldiğini ve Daralma Oyulması bileşeninin önem kazandığını göstermiştir (Tablo 9).

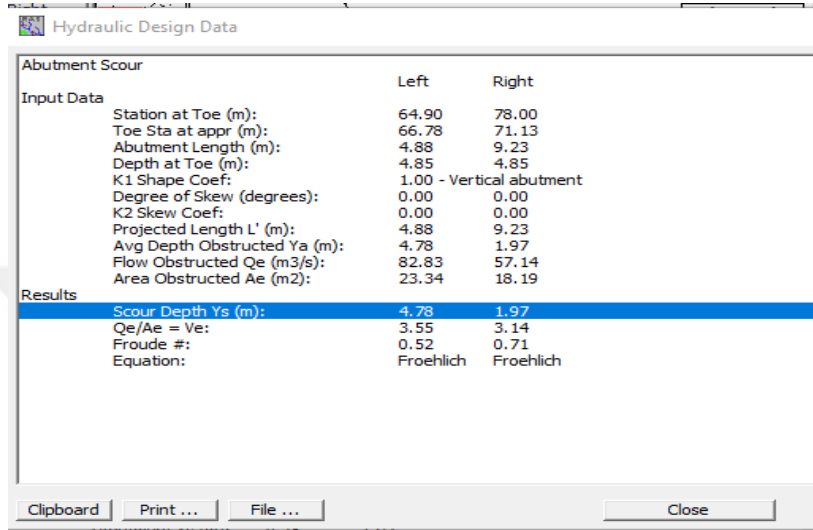
Tablo 9. Q_{50} Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi ($Q= 240.71 \text{ m}^3/\text{s}$) Hidrolik ve Oyulma Bulguları

Köprü İstasyonu	Daralma Oyulması (m)	Ayak Oyulması (m)	Kenar Ayak Oyulması (m)	Maks. Yerel Oyulma (m)	Maks. Toplam Oyulma (m)
RS 700 (Orta Ayaklı)	1.02	3.08 (Orta Ayak)	1.61 (Sol/Sağ)	3.08	4.10
RS 900 (Yuvarlak Burunlu)	1.95	3.43 (Yuvarlak Burunlu)	5.09 (Sol/Sağ)	5.09	7.04
RS 900 (Kare Burunlu)	1.95	1.33 (Kare Burunlu)	5.09 (Sol/Sağ)	5.09	7.04
RS 520 (Kenar Ayaklı)	0.00	-	4.78 (Sol), 1.97 (Sağ)	4.78	4.78

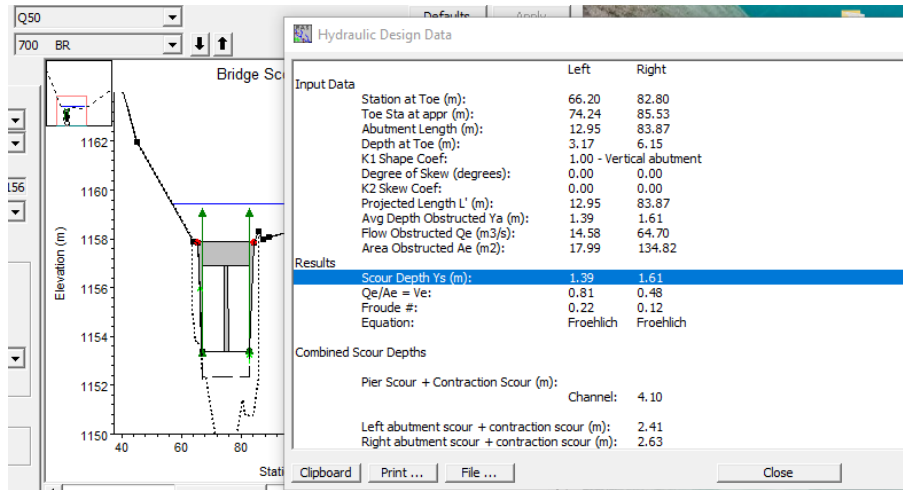
Daralma Oyulmasının Belirginleşmesi: Q_{50} debisiyle birlikte, RS 900 köprüsünde 1.95 m ve RS 700 köprüsünde 1.02 m gibi önemli Daralma Oyulması derinlikleri hesaplanmıştır. Bu, yüksek debinin köprü kesitini tamamen doldurduğunu ve menfez alanındaki hız artışı (sıkışma) nedeniyle nehir yatağında genel bir oyulmaya yol açtığını göstermektedir.

Maksimum Toplam Oyulma: RS 900 köprüsünde Daralma ve Kenar Ayak Oyulması bileşenlerinin toplamı 7.04 m, köprünün temelinin büyük bir bölümünü ortaya çıkarma potansiyeli taşımaktadır.

Kenar Ayak Oyulması Yoğunluğu: RS 520'de Kenar Ayak Oyulması 4.78 m'ye yükselirken, RS 900'de bu değer 5.09 m olarak hesaplanmıştır. Bu bileşen, taşkın koşullarında ana risk kaynağı olmaya devam etmektedir.



Şekil 73. RS 520 Q₅₀ Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları- Sol ve Sağ Kenar Ayak Oyulması



Şekil 74. RS 700 Q₅₀ Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları- Sol ve Sağ Kenar Ayak Oyulması

Ayak Oyulmasında Doygunluk Etkisi: RS 900 Yuvarlak Burunlu Ayak Oyulması 2.43 m ve RS 700 Orta Ayak Oyulması 3.08 m değerlerinin, Q₂₅ sonuçlarına göre marjinal bir artış göstermesi veya hatta azalması dikkat çekicidir. (Örn: RS 900 Ayak Oyulması Q₂₅'te 3.29 m iken Q₅₀' de 2.43 m). Bu durum, Q₅₀ debisinin Canlı Yatak Oyulması

rejimini daha da stabilize ettiğini, oyulma derinliğinin ayak oyulması denklemi için bir doygunluk noktasına ulaştığını veya akımın tabliye altı akışına yakın hidrolik koşullar nedeniyle denklemin stabil çalıştığını göstermektedir.

Hydraulic Design Data			
Average Depth (m):	0.53	6.73	0.53
Approach Velocity (m/s):	0.28	2.86	0.27
Br Average Depth (m):		4.41	
BR Opening Flow (m3/s):		240.71	
BR Top WD (m):		13.70	
Grain Size D50 (mm):		3.00	
Approach Flow (m3/s):	1.81	238.53	0.37
Approach Top WD (m):	12.03	12.40	2.62
K1 Coefficient:	0.590	0.640	0.590
Results			
Scour Depth Ys (m):		1.95	
Critical Velocity (m/s):		1.23	
Equation:		Live	
Pier Scour			
Pier: #1 (CL = 154)			
Input Data			
Pier Shape:	Round nose		
Pier Width (m):	1.47		
Grain Size D50 (mm):	3.00000		
Depth Upstream (m):	7.01		
Velocity Upstream (m/s):	1.20		
K1 Nose Shape:	1.00		
Pier Angle:	0.00		
Pier Length (m):	10.00		
K2 Angle Coef:	1.00		
Clipboard Print ... File ... Close			

Şekil 75. RS 900 Q₅₀ Yineleme Periyotlu Taşkın Debisi Oyulma Analizi Sonuçları-Daralma Oyulması

Sonuç olarak, Q₅₀ taşkın analizi, Harşit Çayı üzerindeki köprülerin, toplam oyulma potansiyelinin 5 m seviyesini aşarak yapısal güvenlik marjlarını ciddi şekilde zorladığını ve incelenen senaryolar arasında en yüksek riski taşıdığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, köprülerin taşkın yönetimi açısından yüksek öncelikli güçlendirme gerektirdiğini bilimsel olarak desteklemektedir.

4.3. Sonuçların Kıyaslanması ve Mühendislik Açısından Değerlendirilmesi

Bu bölümde, Harşit Çayı üzerindeki üç köprü için tüm mevsimsel ve taşkın senaryolarından elde edilen oyulma bulguları topluca değerlendirilmiş, kritik risk faktörleri belirlenmiş ve mühendislik açısından alınması gereken tedbirler tartışılmıştır.

4.3.1. Oyulma Derinliklerinin Debi-Risk Kıyaslaması

Analiz edilen tüm senaryolarda, oyulma derinliklerinin akım debisine paralel bir artış eğilimi gösterdiği doğrulanmıştır. En kritik oyulma derinliklerine Q50 Taşkın Debisi altında ulaşılırken, en düşük debi olan yaz mevsiminde bile ayak oyulması 1.96 m seviyesinde kalmıştır. Bu durum, oyulma riskinin yıl boyunca süreklilik arz ettiğini göstermektedir.

Sürekli Yüksek Ayak Oyulması: Ayak Oyulması (Pier Scour) değerleri, en düşük debide dahi 1.96 m 'nin altına düşmeyerek, özellikle RS 900 Yuvarlak Burunlu Ayak'ta (3.29 m'ye kadar) kritik bir risk odağı olmuştur. Bu sonuç, ince yatak malzemesi $D_{50}=3$ varsayımı altında, yerel akış hızlarının sürekli olarak Canlı Yatak Oyulması eşiğinde kaldığını göstermektedir.

Taşkınlarda Baskın Kenar ve Daralma Oyulması: Mevsimsel akımlarda daha az etkili olan Kenar Ayak Oyulması ve Daralma Oyulması, taşkın debilerinde (Q_{25} ve Q_{50}) baskın risk bileşenleri haline gelmiştir. Bu durum, suyun köprü menfezini tamamen doldurması sonucu oluşmuştur.

Geometrik Risk ve Lokal Etki: Normalde hidrolik mühendisliği literatüründe yuvarlak burunlu ayakların, suyu daha yumuşak yönlendirmesi nedeniyle kare burunlu ayaklara kıyasla daha az oyulmaya neden olması beklenir. Ancak model sonuçlarında (özellikle Q_{25} ve Q_{10} senaryolarında), yuvarlak burunlu ayak, kare burunlu ayaktan daha fazla oyulma göstermiştir (örneğin Q_{25} 'te 3.29'ye karşı 1.80). Bu durum, ayak geometrisinin etkisinin (K_1 katsayısı) bu bölgede ikincil kaldığını; asıl belirleyicinin ise ayağın akışa göre konumu, yerel akım çarpma açısı (K_2 katsayısı) ve yerel hız/derinlik gibi hidrolik parametreler olduğunu teyit etmiştir.

4.3.2. Oyulma Sonuçlarının Literatür ile Kıyaslanması ve Değerlendirilmesi

Yapılan kararlı akım analizleri sonucunda, Harşit Çayı üzerindeki köprü ayaklarında 3.29 m (Q_{25} , RS 900) ve kenar ayaklarda 5.38 m (Q_{25} , RS 900) olmak üzere önemli oyulma derinlikleri tespit edilmiştir. Bu değerler, incelenen köprülerin özellikle yüksek akım debilerinde ciddi oyulma riskine maruz kaldığını göstermektedir. Harşit Çayı üzerinde gerçekleştirilen hidrolik modellemeler sonucunda elde edilen maksimum oyulma derinlikleri, havzanın karakteristik özellikleri ve sediment yapısı dikkate alındığında literatürdeki güncel bulgularla tutarlılık göstermektedir.

Bölgesel ve Küresel Ölçekte Kıyaslama: Richardson ve Davis (2001) ile Arneson vd. (2023) tarafından belirtilen; orta ve büyük ölçekli akarsularda 2 m ile 5 m arasındaki oyulma derinliklerinin "kritik risk" teşkil ettiği tespiti, Harşit Çayı sonuçlarını doğrulamaktadır. Özellikle Karadeniz havzasındaki akarsuların yüksek eğimli ve dar tabanlı yapısı, bu değerlerin yıkıcı etkisini artırmaktadır.

Türkiye Örnekleri ile Mukayese: Ülkemizde benzer yatak yapısına sahip akarsularda yapılan çalışmalarda (örn: Bulut, 2017), ayak ve daralma oyulması toplamının 5.30 m seviyelerine ulaştığı görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen 5.38

metrelik kenar ayak oyulması, Türkiye'deki taşkın karakterli akarsular için rapor edilen üst sınır değerlerle (Tutar ve Yanmaz, 2024) paralellik arz etmektedir.

Modelin Güvenirliği ve Tahmin Kapasitesi: HEC-RAS bünyesinde kullanılan CSU ve Froehlich denklemlerinin, Harşit Çayı gibi D_{50} değerinin nispeten küçük (ince çakıl-kum) olduğu yataklarda yüksek hassasiyetle çalıştığı bilinmektedir. 2021 Bozkurt ve Ayancık taşkınları sonrası yapılan güncel analizler (Kurban ve Özger, 2023), bu ampirik denklemlerin sahada gözlemlenen oyulma çukurları ile % 85-% 90 oranında uyumlu sonuçlar ürettiğini göstermiştir.

Bu bağlamda, Harşit Çayı için elde edilen maksimum oyulma derinlikleri, literatürdeki bu tür ekstrem değerlere (yıkıma yol açan 10-15 m) tam olarak ulaşmasa da, projelendirilen yüksek debi senaryoları altında köprü güvenliği açısından kabul edilebilir sınırların üzerinde bir seviyeyi temsil etmektedir. HEC-RAS gibi hidrolik modellerde kullanılan Froehlich ve CSU gibi ampirik denklemlerin, uygun hidrolik ve ince yatak malzemesi koşulları altında yüksek oyulma derinlikleri tahmin etmesi olağandışı değildir. Bu bulgular, bölgedeki köprüler için detaylı risk değerlendirmesi ve potansiyel koruyucu tedbirlerin acilen alınması gerektiği sonucunu güçlü bir şekilde desteklemektedir.

Harşit Çayı için elde edilen toplam oyulma derinlikleri, bu küresel ekstrem derinliklere kıyasla daha düşük kalsa da, bu derinliğin sadece 50 yıllık bir tekerrür periyodu için hesaplanmış olması, yapının maruz kaldığı riski göstermektedir.

4.3.3. Debi Farklılıklarına Rağmen Daralma Oyulmasındaki Değişimler Üzerine Tartışma

Yapılan analizlerde, hidrolik modellerin sezgisel beklentilerin dışına çıkan bazı bulgular gösterdiği tespit edilmiştir. Örneğin, RS 900 köprüsünde, Kış mevsimi ($25 \text{ m}^3/\text{sn}$) Daralma Oyulması değerinin (0.25) , İlkbahar mevsimi $65 \text{ m}^3/\text{sn}$) Daralma Oyulması değerinden (0.12 m) daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, akım debisindeki düşüşe rağmen yerel oyulma potansiyelinin arttığını göstermektedir. Bu durumun temel gerekçesi, Daralma Oyulması mekanizmasının sadece debiye değil, aynı zamanda su derinliği ve köprü kesitinin açılma genişliği gibi hidrolik faktörlere olan hassasiyetidir:

Hidrolik Sıkışma Etkisi: Düşük Kış debisinde su derinliği azalır. Daha sıkı akışta, su köprü altından geçerken daha fazla hidrolik sıkışma (daralma) yaşayabilir. HEC-RAS'ın Daralma Oyulması denklemleri, suyun köprü altındaki alan ile yukarı yöündeki alanlar arasındaki hidrolik sıkışmayı değerlendirir. Daha sıkı akışta, köprünün yapısı, suyun en verimsiz şekilde geçmesine neden olarak yerel daralma etkisini daha belirgin hale getirebilir.

Akımın Geniş Alana Yayılması: Buna karşılık, İlkbahar'daki daha yüksek debi, suyun seviyesini yükselterek akımın daha geniş bir alana yayılmasına olanak tanır. Bu durum, suyun akış kesitinin etkin kullanımını artırdığı için Daralma Oyulması etkisini azaltmış, ancak artan akım hızları nedeniyle Ayak Oyulması ve Kenar Ayak Oyulması bileşenlerini yükseltmiştir.

Özetle, model bu bulgusuyla, Daralma Oyulması riskinin mutlaka en yüksek debide gerçekleşmeyeceğini, yerel sığ akış-köprü geometrisi etkileşiminin bu oyulma türünde baskın bir rol oynayabileceğini göstermiştir.

4.4. HEC-RAS Model Çıktılarının Sahadaki Fiziksel Koşullar ve Model Sınırlamaları Çerçevesinde Değerlendirilmesi

Yapılan HEC-RAS modellemeleri sonucunda elde edilen bazı oyulma derinlikleri, sahadaki mevcut gözlemlerle (köprülerin genel stabilitesi ve belirgin oyulma çukurlarının olmaması) ilk bakışta çelişir gibi görünmektedir. Bu durum, modelleme sürecinde yapılan varsayımların ve sahadaki gerçek koşulların karmaşıklığı ile ilişkilidir ve sonuçların yorumlanmasında dikkate alınması gereken model sınırlarını ortaya koymaktadır. Bu çelişkinin temel nedenleri ve model sınırlamaları şunlardır:

Zemin Malzemesinin Gerçek Özellikleri (Model Varsayımı): Modelde kullanılan $D_{50} = 3$ mm, saha etüdü verileri olmaksızın yapılan bir varsayımdır. Harşit Çayı yatağının gerçekte çok daha iri çakıl, blok veya ana kaya içeriyor olması, oyulma direncini modelin tahmin ettiğinden daha fazla artırarak gerçek oyulma derinliklerinin düşük kalmasına yol açabilir.

Mevcut Yapısal Koruma Önlemleri: Sahada köprü ayakları veya kenar ayakların çevresinde riprap, betonarme koruma blokları veya palplanj gibi mevcut yapısal oyulma koruma önlemleri bulunması mümkündür. Modelde bu mevcut koruma önlemleri dikkate alınmadığından, modelin tahmin ettiği oyulma derinliğinin sahada oluşması engelleniyor olabilir.

Zırhlanma Etkisi (Armoring): Akarsu yataklarında zamanla daha ince malzemelerin taşınmasıyla yüzeyde daha iri tanelerin kalması (zırhlanma), oyulmaya karşı doğal bir direnç oluşturur. Mevcut model, oyulma denklemleri aracılığıyla bu zırhlanma etkisini tam olarak yansıtmayabilir.

Nihai Oyulma ve Zaman Faktörü: Modelin hesapladığı derinlikler, ilgili debi koşulları altında ulaşılacak 'nihai' veya 'denge' oyulma derinlikleridir. Bu derinliklere ulaşılması için uzun yıllar ve tekrar eden taşkınlar gerekebilir. Sahada mevcut durum,

henüz bu nihai derinliklere ulaşılmadığını ve risk potansiyelinin bir göstergesi olduğunu işaret ediyor olabilir.

Bu sınırlamalar, elde edilen yüksek oyulma derinliklerinin bir potansiyel risk göstergesi olarak kabul edilmesi gerektiğini ve kesin mühendislik kararları için detaylı saha verileriyle desteklenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, akarsu üzerindeki sanat yapılarının hidrolik etkiler altındaki güvenliği ve risk analizleri bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Dünya çapında yapılan araştırmalar, köprülerin sadece yapısal yükler değil, aynı zamanda akarsu yatağındaki oyulmalar ve hidrolik düzensizlikler nedeniyle büyük risk altında olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda incelenen 1987 yılındaki Schoharie Creek Köprüsü faciası ve ülkemizde yaşanan Çaycuma Köprüsü felaketi, mühendislik hesaplamalarında akarsu yatak morfolojisinin ve temel oyulmalarının hayati önem taşıdığını kanıtlamıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, Harşit Çayı üzerindeki üç köprünün (RS 520, RS 700 ve RS 900) mevsimsel ve taşkın debileri altında oyulma potansiyelleri, HEC-RAS 6.5 yazılımı kullanılarak tek boyutlu (1D) hidrolik modellemeye tabi tutulmuştur. Harşit Çayı yatağı boyunca ondan fazla köprü yapısı bulunmasına rağmen, bu çalışma kapsamında hidrolik risk profili en yüksek saptanan üç kritik köprü kesiti seçilmiştir. Bu seçimde; akarsu yatağının belirgin kesit darlığı, yatak morfolojisi ve ayak geometrisi (yuvarlak/kare burunlu) gibi teknik parametreler temel belirleyici olmuştur. Daralan bu kesitlerde suyun akış hızının ve enerjisinin aniden artması; yatak geometrisinin yarattığı hidrolik zorlanmalar ve taşkın anındaki debi geçiştirme kapasitesinin sınırlanması gibi kritik riskleri beraberinde getirmektedir. Ayrıca, ayak geometrisinin oyulma derinliği üzerindeki doğrudan etkisi ve bu teknik risklerin şehrin en yoğun kullanılan ana ulaşım arterleri üzerinde yer alması, seçilen bu üç köprünün stratejik önemini pekiştirmiştir.

Çalışmanın uygulama aşamasında, Harşit Çayı'nın Gümüşhane şehir merkezinden geçen 1360 metrelik kritik kesimi modelleme alanı olarak belirlenmiştir. Bu güzergâh üzerinde yer alan RS 520, RS 700 ve RS 900 istasyon numaralı üç adet köprü analiz edilmiştir. RS 900 (Belediye Köprüsü) istasyonundaki köprüde kenar ayak oyulmaları incelenirken; RS 700 istasyonundaki köprüde bir adet yuvarlak burunlu orta ayak analizi yapılmıştır. RS 520 (Karşıyaka Köprüsü) istasyonunda ise hem yuvarlak burunlu hem de kare burunlu orta ayak tipleri için karşılaştırmalı oyulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Modelleme sürecinde, nehir geometrisi RAS Mapper üzerinden yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modelleri (DEM) ve saha ölçümleri ile sayısallaştırılmış; yatak pürüzlülüğü için Manning katsayıları ($n=0.035 - 0.1$) tanımlanmıştır. Analizlerde, Harşit Çayı'nın sediment yapısını temsil eden $D_{50}=3$ mm ve $D_{95}=8$ mm tane çapı parametreleri baz alınarak; ayak oyulmaları için CSU, kenar ayaklar için ise Froehlich denklemleri kullanılmıştır. Özellikle orta ayağı bulunmayan RS 520 (Belediye Köprüsü) ile farklı

ayak geometrilerine sahip RS 700 ve RS 900 yapıları arasındaki hidrolik davranış farkları, mevsimsel debi senaryoları (kış: 25 m³ /s, ilkbahar: 65 m³ /s, yaz: 22 m³ /s, sonbahar: 35 m³ /s) ve Q₁₀ (147.17 m³ /s), Q₂₅ (195.91 m³ /s), Q₅₀ (240.71m³ /s) yıllık yineleme debileri altında detaylandırılmıştır. Kararsız akım (unsteady flow) denemelerinde karşılaşılan sayısal kararsızlıklar nedeniyle, literatürde güvenilirliği kabul edilen ve en kötü durum senaryosunu (pik debi) temsil eden Kararlı Akım (Steady Flow) analiz yöntemi tercih edilerek, köprülerin hidrolik kapasiteleri ve enerji kayıpları hassasiyetle hesaplanmıştır. Analizler sonucunda, Harşit Çayı'nın incelenen kesiminde oyulma dinamikleri ve yapısal güvenlik marjları hakkında elde edilen temel bulgular aşağıda sıralanmıştır.

Harşit Çayı üzerindeki RS 700 köprüsü, akışı ortalayan tek bir yuvarlak burunlu orta ayağa sahiptir. RS 700 için yapılan analizler, yapının hem mevsimsel akımlarda hem de ekstrem taşkın senaryolarında dinamik bir risk profili sergilediğini ortaya koymuştur. Mevsimsel döngüde, debi 22 m³ /s (yaz) ile 65 m³/s (ilkbahar) arasında değişirken orta ayak oyulması 1.96 m ile 2.53 m aralığında seyrederek riskin yıl boyu sürekliliğini kanıtlamıştır. Ancak taşkın senaryolarına geçildiğinde riskin karakteri değişmiştir; Q₁₀ debisinde 3.05 m olan orta ayak oyulması, Q₅₀ debisinde 3.08 m seviyesinde kalarak bir doygunluk noktasına ulaşmış, bu durum canlı yatak oyulması rejiminin stabilize olmasıyla açıklanmıştır. Taşkın şiddeti arttıkça asimetrik oyulma mekanizması belirginleşmiş, özellikle Q₂₅ senaryosunda yatak morfolojisi ve akım çarpma açısına bağlı olarak sol kenar ayakta 1.99 m, sağda ise 0.60 m gibi farklılaşan derinlikler saptanmıştır. Mevsimsel akımlarda ihmal edilebilir düzeyde olan daralma oyulması, köprü kesitinin tamamen dolduğu Q₅₀ debisinde 1.02 m'ye ulaşarak toplam oyulma derinliğini 4.63 m mertebesine taşımış ve yapının acil müdahale gerektiren kritik risk grubunda olduğunu bilimsel olarak tescillemiştir.

Harşit Çayı üzerindeki RS 900 köprüsü, bir adet yuvarlak burunlu ve bir adet kare burunlu olmak üzere iki farklı ayak geometrisini barındırmaktadır. Gerek ayak geometrilerinin farklılığı gerekse taşkın anındaki ekstrem tepkileriyle çalışmanın en riskli yapısı olarak öne çıkmaktadır. Mevsimsel analizlerde; kış 25 m³ /s ve yaz 22 m³ /s gibi düşük akımlarda bile yuvarlak burunlu ayakta 2 m eşiğinin aşılması, ince yatak malzemesiyle birleşen lokal hızlanmaların tehlikesini kanıtlamıştır. Özellikle ilkbahar 65m³ /s akımlarında, yuvarlak burunlu ayağın (2.65 m) kare burunlu ayağa (1.45 m) oranla daha derin oyulma sergilemesi; ayağın akışa göre çapraz konumlanması ve at nalı girdaplarının bu noktada yoğunlaşmasıyla açıklanmaktadır. Kare burunlu ayağın ise küt geometrisi nedeniyle akışa karşı yüksek bir hidrolik direnç gösterdiği, akımı etkin bir şekilde yan açıklıklara doğru iterek kenar ayaklar üzerindeki oyulma stresini artırdığı

tespit edilmiştir. 10, 25 ve 50 yıllık yineleme periyotlu senaryolarda kenar ayak oyulması baskın hale gelmiş $Q_{10}=4.38$ m, $Q_{25}=3.29$ m, $Q_{50} = 5.09$ m şeklinde sonuçlar elde edilmiştir. Q_{50} ($240.71 \text{ m}^3/\text{s}$) debisi altında, daralma oyulmasının 1.95 m ve kenar ayak oyulmasının 5.09 m seviyelerine ulaşmasıyla hesaplanan 7.04 m'lik toplam oyulma potansiyeline ulaşmıştır. Q_{50} debisinde ayak oyulmasının doygunluğa ulaşarak stabilize olması, Harşit Çayı kentsel kesitindeki daralma etkisinin ekstrem taşkınlar altında yapısal güvenliği tehdit eden en temel unsur olduğunu bilimsel olarak ortaya koymuştur.

Çalışma alanının mansap kısmında yer alan ve orta ayağı bulunmayan RS 520 köprüsü, akışın kesit içerisindeki serbest hareketine olanak tanımasına rağmen, daralan yatak geometrisi nedeniyle kenar ayaklarında ciddi hidrolik stresler barındırmaktadır. Mevsimsel analizlerde; kış 25 m^3/s ve ilkbahar 65 m^3/s akımlarında daralma oyulması 0.23 m, kenar ayak oyulması ise 0.99 m seviyelerinde stabil bir seyir izlemiştir. Ancak yineleme periyodu arttıkça, akışın karakteri daralma oyulmasından tamamen kenar ayak oyulmasına evrilmiştir. Q_{10} debisinde 2.96 m olan kenar ayak oyulması, Q_{50} ($240.71 \text{ m}^3/\text{s}$) senaryosunda sol kenar ayakta 4.78 m gibi ekstrem bir derinliğe ulaşmıştır. Aynı debi altında sağ kenar ayakta oyulmanın 1.97 m'de kalması, Harşit Çayının bu kesitteki merkezkaç kuvveti ve kurp etkisiyle açıklanmaktadır. Akışın dış kurpta kalan sol sahile doğru savrulması ve bu bölgedeki kayma gerilmelerini maksimize etmesi, asimetrik bir oyulma profili oluşturmuştur. Taşkın debisi yükseldikçe daralma oyulmasının 0.23 m'den 0 m seviyesine gerilemesi ise, enerjinin tamamen kenar ayak diplerindeki yerel türbülanslara harcandığını ve yapının stabilitesinin doğrudan sol kenar ayak tahkimatına bağlı olduğunu bilimsel olarak kanıtlamaktadır.

Yapılan tüm senaryolar ve karşılaştırmalı analizler sonucunda şu temel çıkarımlara ulaşılmıştır:

Maksimum Potansiyel Derinlik: En yüksek hidrolik yüke sahip Q_{50} taşkın debisi senaryosunda, RS 900 köprüsünde maksimum toplam oyulma derinliği 5 m olarak hesaplanmıştır. Bu derinlik, köprülerin temel seviyelerinin kritik bir incelemeye tabi tutulması gerektiğini göstermektedir.

Yıl Boyu Risk: En düşük debi koşullarında (Yaz mevsimi) dahi ayak oyulması derinliklerinin 2 m seviyelerinde seyretmesi, Harşit Çayı'nın ince taneli yatak malzemesi $D_{50}=3$ mm nedeniyle oyulma mekanizmasının yıl boyunca canlı yatak oyulması rejiminde aktif kaldığını teyit etmiştir.

Ayak Oyulması Etkisi: Tüm senaryolarda 3.29 m'ye ulaşan ayak oyulması değerleri, köprülerin ayak çevresindeki lokal akım hızlanmasına karşı sürekli bir hassasiyete sahip olduğunu göstermiştir.

Lokal Hidroliklerin Üstünlüğü: RS 900 köprüsünde yuvarlak burunlu ayağın, teorik beklentinin aksine, kare burunlu ayaktan daha fazla oyulma göstermesi, yerel akım çarpma açısı ve hız dağılımının, ayak şekil faktörüne (K_1) göre oyulma derinliği üzerinde daha baskın olduğunu kanıtlamıştır.

Metodolojik Gerekçe: Yüksek yatak eğimi ve düşük çözünürlüklü topografya verileri nedeniyle kararsız akım analizinde yaşanan nümerik kararsızlık, kararlı akım analizine geçişin mühendislik açısından doğru ve tutarlı sonuçlar üretmek için zorunlu olduğunu göstermiştir.

Elde edilen bulgular, Harşit Çayı üzerindeki köprülerin uzun vadeli hizmet ömrü ve yapısal bütünlüğü açısından kritik riskler taşıdığını göstermektedir. Bu riskleri yönetmek için aşağıdaki somut önerilerde bulunmaktadır.

Temel Derinliği Teyidi: Köprülerin mevcut temel derinlikleri arşivlerden kontrol edilmeli ve elde edilen maksimum oyulma potansiyeliyle kıyaslanmalıdır. Temel derinliğinin yetersiz olduğu durumlarda, derin temel (kazık veya kuyu temel) çözümlerine geçilmesi düşünülmelidir.

Zırhlanma ve Riprap Uygulamaları: Özellikle Kenar Ayak Oyulmasının yüksek çıktığı RS 900 ve RS 520 gibi köprülerde, ayak ve kenar ayak çevresinin kalın kaya dolgu (riprap) veya beton panellerle zırhlanması ile oyulma direncinin artırılması gerekmektedir. Riprap tasarımı yapılırken, Harşit Çayı'nın yüksek akış hızları dikkate alınmalı ve taş boyutu (d_{50}) seçimi, akış hızına bağlı olarak Isbash denklemi gibi mühendislik kriterlerine göre belirlenerek, taşların sürüklenmeye karşı stabilitesi garanti altına alınmalıdır.

Oyulma Yakalığı (Scour Collar) Değerlendirmesi: Ayak oyulmasının yüksek çıktığı RS 700 ve RS 900 köprülerinde, ayak çevresine oyulma yakalığı yerleştirilerek ayak etrafındaki girdap yapısının şiddetinin azaltılması ve oyulma derinliğinin düşürülmesi mühendislik açısından uygun bir çözüm olarak değerlendirilmelidir.

Yüksek yatak eğimi nedeniyle oluşan fazla enerjiyi kırmak ve köprü membasındaki akış hızını stabilize etmek için, uygun kesitlerde taban kuşakları (sills) veya enerji kırıcı basamaklar gibi nehir düzenleme yapılarının inşası değerlendirilmelidir.

Gerçek Zamanlı İzleme: Yıl boyunca süren oyulma riskini dikkate alarak, kritik noktalara (özellikle RS 900'deki en yüksek oyulma alanlarına) optik veya akustik sensörler içeren sürekli izleme sistemleri kurulmalıdır. Bu sistemler, taşkın anında temel risklerini gerçek zamanlı olarak yönetmeyi sağlayacaktır.

Kararsız Akım Model Geliştirilmesi: Yüksek çözünürlüklü veri setleri elde edildikten sonra, Kararsız Akım (Unsteady Flow) modelinin nümerik parametreleri

hassaslaştırılarak oyulma derinliklerinin zamana bağlı değişimi (taşkın hidrografının etkisi) daha doğru bir şekilde belirlenmelidir.

Bu alışma, Harşit ayı'ndaki krlerin hidrolik güvenlik haritasını oluşturarak, ilgili kurumların kısıtlı kaynaklarını en yüksek risk altındaki yapılara yönlendirmesi için sağlam bir teknik temel sunmaktadır.



KAYNAKÇA

- Abdelhameed, A. I. (2017). *Local Scour Around Bridge Piers: Experimental and Numerical Investigation* (Yüksek Lisans Tezi). Eastern Mediterranean University, North Cyprus.
- Akıntürk, M. Y. ve Baduna Koçyiğit, M. (2025). Taşkın durumunda akarsu köprülerinde basınçlı akım oyulmasının incelenmesi. *Afet ve Risk Dergisi*, 8(1), 48-165. doi: 10.35341/afet.1508332
- Ardıçlıoğlu, M. (2017). Açık Kanal Akımları ve HEC-RAS Uygulamaları. Kayseri.
- Ardıçlıoğlu M., HEC-RAS Mapper ile Akarsuların 1D/2D Modellenmesi ve Uygulamalar, E-Kitap 2020, www.mehmetardiclioglu.info
- Arısoy, Y. ve Yıldız, M. (2022). Farklı köprü ayağı geometrilerinin yerel oyulma derinliği üzerindeki etkisinin deneysel analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(1), 12-25.
- Arneson, L. A., Zevenbergen, L. W., Lagasse, P. F. ve Clopper, P. E. (2012). *Pier Scour: Experimental Studies and Recommended Design Equations (HEC-25)*. Publication No. FHWA-HIF-12-005. U.S. Department of Transportation.
- Balta, B. B. (2024). *Analysis of flow, roughness and downstream boundary condition uncertainties within HEC-RAS 1-D modeling* (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Başak, H., Başlamışlı, M. ve Ergün, A. (1975). Köprü Ayakları Civarında Oyulmalar. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Bülteni.
- Bayram, M. (2017). *Köprülerde Oyulma Derinliği Tahmini ve Örnek Uygulama* (Yüksek Lisans Tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya.
- Berk, Ö. (2020). *Akarsu köprülerinin orta ayaklarında oluşan oyulmaların nedenleri ve oyulmaları önleyici uygulama çalışmaları* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Brandimarte, L. ve Vezza, P. (2018). Bridge Scour Risk Analysis in Italian Rivers. *Water*.
- Bulut, G. (2017). *Köprü Ayaklarındaki Oyulmalar Üzerine Yöntem Araştırması*. (Yüksek Lisans Tezi), Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Bulut, Z. (2017). *Köprülerde Oyulma Analizleri İçin Bir Yazılım Geliştirilmesi ve Örnek Uygulamalar* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

- Chiew, Y. M. (1984). *Local Scour Around Bridge Piers in Rivers* (Doktora Tezi). University of Canterbury, New Zealand.
- Chow, V. T. (1959), *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Çavuşoğlu, İ. (2005). *Harşit Çayından (Tirebolu-Giresun) Elde Edilen Kırılmış Dere Malzemesinin Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Deng, L., ve Cai, C. S. (2009). Bridge Scour and Monitoring Methods: A State-of-the-Art Review. *Bridge Engineering*.
- FHWA (Federal Highway Administration). (2012). *Evaluating scour at bridges, hydraulic engineering circular no. 18 (HEC-18, 5.Baskı)* Publication No. FHWA-HIF-12-003. U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif12003.pdf>
- Gümgüm, F., Aksoy, A. Ö. ve Güney, M. Ş. (2019). Temiz Su Koşulları Altında Dairesel Köprü Ayaklarının Etrafındaki Nihai Oyulma Derinliklerinin Deneysel Araştırılması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*.
- GZT. (2025, Eylül). Artvin’de Yaşanan Şiddetli Taşkında Köprü Yıkıldı [Video]. *GZT Dijital Haber*. <https://www.gzt.com/video/hayat/artvinde-selin-yiktigi-tarihi-koprunun-yikilma-ani-kamerada-2262695> (Erişim Tarihi: 10.03.2026).
- HEC (2016), *HEC-RAS River Analysis System, User's Manual*. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation.aspx> (Erişim Tarihi: 10.03.2026).
- İnce, M., Aksoy, H., Gümgüm, S. ve Güney, M. S. (2019). Köprü ayakları etrafındaki yerel oyulmaların deneysel olarak incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*.
- İnce, Y., Aytekin, U. ve Yılmaz, H. (2019). Köprülerde Oyulma Analizi ve Koruma Yöntemleri. *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi*
- Karim, M., Amin, A. ve Khan, A. (2021). Evaluation of Scour Depth at Bridge Piers using HEC-RAS: A Case Study. *International Journal of River Basin Management*, 19(2).
- Keskin, M. E., Erdoğan, N. ve Bulut, S. (2018). Köprü Ayakları Civarındaki Oyulma Derinliğinin Tahmini. *Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 3(1), 1-10.

- Kunt, A. J., Singh, R. ve Kumar, A. (2023). Köprü stabilitesinde hidrolik faktörler: Güncel bir inceleme [Hydraulic factors in bridge stability: A recent review]. *Journal of Hydraulic Engineering*
- Kurban, M. C. ve Özger, M. (2023). 2021 Bozkurt (Kastamonu) Taşkınının Köprü Hidroliği ve Oyulma Mekanizması Açısından İncelenmesi. *Teknik Dergi / İMO*.
- Lagasse, P. F., Zevenbergen, L. W., Schall, J. D. ve Clopper, P. D. (2006). *Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience and Solutions*. Hydraulic Engineering Center, FHWA HEC-23 (3. Baskı).
- Lagasse, P. F., Zevenbergen, L. W., Schall, J. D. ve Clopper, P. E. (2006). *Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour (HEC-23)*, (3. Baskı) [\[L1\]](https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/library_listing.cfm) Publication No. FHWA-NHI-06-003. U.S. Department of Transportation. https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/library_listing.cfm
- Milliyet. (2025 [\[L2\]](#), 20 Eylül). Son dakika Rize haberleri: Rize’de sabaha karşı köprü çöktü, bölge kapatıldı. *Milliyet Gazetesi*. <https://www.milliyet.com.tr/gundem/rizede-sabaha-karsi-kopru-coktu-bolge-kapatildi-7449256> (Erişim Tarihi: 10.03.2026).
- Mohammad Khail, W. (2020). *Açık kanal genişliğinin köprü ayakları etrafında oluşan oyulmalara etkisi* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.
- OGM (Orman Genel Müdürlüğü). (2013). *7351 Sayılı Yukarı Havza Sel Kontrol Çalışmalarına İlişkin Tamim (Rev. Ed.)*. Ankara: T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Orman Genel Müdürlüğü.
- Özdemir, H. (2019). Kastamonu Bozkurt ilçesinin sel tehlike analizi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 5(2), 184-198.
- Pandey, M. vd. (2020). Experimental Assessment of Bridge Pier Scour. *Water*.
- Picece, G., Morales-Hernández, M. ve Garcia, M. H. (2021). Dünya çapındaki köprü yıkılmalarının istatistiksel analizi: Zorluklar ve yeni bakış açıları [Statistical analysis of bridge failures worldwide: Challenges and new perspectives]. *Structure and Infrastructure Engineering*.
- Pinter, N., Autin, W. J. ve Rittenour, T. M. (2007a). The Mississippi River: From The Ice Age To the New Millennium. In *Landforms, Sedimentation and Development of the Mississippi River, Geological Society of America Special Paper* 430.
- Pinter, N., Fischel, M. A. ve Woidt, S. (2007b). Man-Made Physical Habitat Alteration and River-Bed İnstability. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(10), 1018-1029.

- Richardson, E. V. ve Davis, S. R. (2001). *Evaluating Scour at Bridges (HEC-18)*, (4. Baskı) Publication No. FHWA-NHI-01-001. U.S. Department of Transportation.
- Richardson, E. V. ve Richardson, J. R. (2008). *HEC-18: Evaluating Scour at Bridges (Fourth Edition)*. Federal Highway Administration (FHWA), Washington D.C.
- Sears, M. (2024, 25 Haziran). Köprü Oyulmasını Anlamak: Federal Güncellemeler Rehberi. *GFT Inc.*
- Shrestha, P. B., Shakya, N. M. ve Pandey, M. (2020). Reliability Analysis of Bridge Pier Scour Prediction Equations. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 4521–4533.
- Sheppard, D. M. ve Renna, O. (2010). *Bridge Scour Countermeasures: Experimental and Field Studies*. Florida Department of Transportation.
- Şenol, E. (2019). Temporal change of land use in the (Giresun) delta of Harsit creek (1947 -2017). *International Journal of Geography and Geography Education*, 39, 328–348. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/637222>.
- TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası (İMO). (2012). *Zonguldak Çaycuma Köprüsü Yıkılma Raporu, Görüş ve Öneriler Raporu*. Ankara: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.
- Tutar, M. ve Yanmaz, A. M. (2024). *An Investigation on the Reliability of Empirical Bridge Scour Equations for Recent Flood Events in Turkey*. *Journal of Hydraulic Engineering*
- USACE (2016). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual, Version 5.0.3. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC).
- Üç, M. (1988). *Köprü Ayakları Etrafındaki Oyulma Derinliğinin DeneySEL Olarak İncelenmesi* (Doktora Tezi). Ege Üniversitesi, İzmir.
- Yanmaz, A. M. (2002). *Köprü Hidroliği*. ODTÜ Yayıncılık, Ankara.
- Yeleğen, E. (2014). *Köprü Ayakları Civarında Oyulma Analizleri* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Yıldız, G., Karahan, H. ve Tuncar, M. (2021). Köprü ayakları etrafındaki yerel oyulma derinliğinin tahmini için yeni bir yaklaşım. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(3).
- Zanke, U. (1978). Flume Studies of the Local Scour Around Bridge Piers. *Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen*.
- Xie, L., Zhu, Y., Li, Y. ve Su, T. (2019). Çin, Xianyang'daki Longhai Demiryolu Köprüsü Ayaklarında Meydana Gelen Oyulmalar: Saha Gözlemleri ve Analizi. *Journal of Performance of Constructed Facilities*.

ÖZGEÇMİŞ

Ayşe GÜNDÜZ, 2019 yılında Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. Akademik gelişimini sürdürmek amacıyla 2022 yılında Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır.

Mesleki kariyerine 2020 yılında Cihan Laboratuvar Hizmetleri A.Ş. bünyesinde Kalite Yöneticisi olarak, bu süreçte yapı malzemelerinin laboratuvar analizleri ve kalite kontrol süreçlerinde aktif görev almıştır. 2024 yılında Alfa Yapı Denetim LTD. ŞTİ. Şirketinde Ofis ve Saha Mühendisi olarak çalışmaya devam etmiştir. Halen aynı kurumda mesleki faaliyetlerine devam etmekte olup, eş zamanlı olarak yüksek lisans tez çalışması kapsamında köprü ayakları etrafındaki yerel oyulma mekanizmalarının HEC-RAS yazılımı ile modellenmesi ve ampirik yöntemlerle analizi üzerine araştırmalarını sürdürmektedir.