

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

96703

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AKARSULARDA ASKI VE SÜRÜNTÜ MADDESİ MİKTARLARININ HESAPLANARAK,  
TOPLAM KATI MADDESİNİN TAYİNİ

İbrahim YÜKSEL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"Doktor"

Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

96703

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28.09.1999

Tezin Savunma Tarihi : 10.03.2000

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hızır ÖNSOY

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Uygur ŞENDİL

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mehmet BERKÜN

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Asım KADIOĞLU

Trabzon 2000

TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

## ÖNSÖZ

Akarsuların taşıdığı katı madde miktarının araştırıldığı bu çalışma K.T.Ü. M.M.F. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Anabilim Dalı Hidrolik Laboratuvarında yapılmıştır.

Örnek bir arkadaşlık havası içerisinde sürdürülen bilimsel çalışma ve araştırmalar programında, araştırma konusunun seçiminde ve yürütülmesinde bana her zaman yol gösteren, hiçbir zaman yardımlarını, bilgilerini ve desteğini esirgemeyen danışmanım ve değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hızır ÖNSOY'a teşekkürlerimi sunmayı bir görev bilirim.

Çalışmalarım süresince, yardımlarını ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ömer YÜKSEK'e teşekkürlerimi sunarım.

Hazırlamış olduğum bu tezi, baştan sona büyük bir titizlik ve özveriyle inceleyerek, eksik yönlerin giderilmesine katkı sağlayan ve tezin bu hale gelmesinde büyük emeği olan O.D.T.Ü. İnşaat Fakültesi Su Kaynakları Kürsüsü öğretim üyesi değerli hocam Sayın Prof. Dr. Uygur ŞENDİL'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Yine bu tezin incelenmesinde ve düzenlenerek bu hale getirilmesinde büyük emek ve gayretleri olan, bunun yanı sıra olumlu ve yapıcı eleştirileriyle tezin daha da seviyeli bir hale gelmesini sağlayan K.T.Ü. M.M.F. İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı ve değerli hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet BERKÜN'e şükranlarımı sunarım.

Bilimsel çalışmalarım süresince bana her türlü destek ve imkanı sağlayan, K. T. Ü. Rektörlüğüne ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne şükranlarımı sunarım.

Araştırma ve çalışmalarım süresince benden hiçbir bilgi ve kaynağı esirgemeyen tüm kurum ve kuruluşlar ile uzun ve yorucu çalışmalarına sabrederek maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen eşim ve çocuklarıma da teşekkür ederim.

Ibrahim YÜKSEL

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	II
İÇİNDEKİLER .....	III
ÖZET .....	V
SUMMARY .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VII
TABLOLAR DİZİNİ .....	IX
SEMBOLLER DİZİNİ .....	X
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı .....	1
1.3. Literatur Taraması .....	4
1.3.1. Katı Madde Özellikleri .....	5
1.3.2. Katı Madde Hareketinin Başlaması .....	7
1.3.3. Katı Madde Hareket Şekilleri .....	10
1.3.4. Katı Madde Hareketine Etki Eden Değişkenler .....	11
1.3.5. Askı Maddesi Miktarının Hesabı .....	12
1.3.6. Sürtünmeli Maddesi Miktarının Hesabı .....	15
1.3.7. Toplam Katı Madde Miktarının Hesabı .....	19
1.3.8. Katı Madde Ölçümleri .....	20
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	23
2.1. Deneyle İçin Akarsu Modeli Oluşturmak .....	23
2.2. Model Teorisi ve Benzeşim .....	23
2.2.1. Geometrik Benzeşim .....	24
2.2.2. Kinematik Benzeşim .....	24
2.2.3. Dinamik Benzeşim .....	25
2.3. Benzerlik Koşulları .....	25
2.4. Boyut Analizi .....	26
2.5. Boyut Analizinin Uygulanması .....	28
2.6. Model Teorisinde Ençok Kullanılan Boyutsuz Sayılar .....	31
2.7. Model Ölçeğinin Belirlenmesi .....	32
2.8. Deney Koşulları .....	35
2.9. Deney Düzeni .....	36
2.10. Deney Programı .....	40

2.11.	Deneyleerde Kullanılan Malzemeler .....	41
2.12.	Askıdaki Katı Madde Miktarının Ölçülmesi .....	41
2.13.	Sürüntü Maddesinin Ölçülmesi .....	45
2.14.	Toplam Katı Madde Miktarının Hesabı .....	46
3.	BULGULAR .....	47
3.1.	Deneysel Çalışmaların Değerlendirilmesi .....	47
3.2.	Deneyleerden Elde Edilen Sonuçlar .....	47
3.3.	Deneyleer Sonunda Yapılan Hesap ve İşlemler .....	52
3.4.	Askı Maddesi İçin Regresyon Denklemleri ve Korelasyon Katsayıları .....	53
3.5.	Sürüntü Maddesi İçin Regresyon Denklemleri ve Korelasyon Katsayıları.....	53
3.6.	Askı ve Sürüntü Maddesi Miktarlarının Grafiklerle İfade Edilmesi .....	54
3.7.	Deneyle Sonuçlarına Göre En Uygun Regresyon Denklemlerinin Tespiti .....	61
3.8.	Deneyle Sonuçlarına Göre En Uygun Grafiğin Tespiti .....	65
4.	İRDELEME .....	66
4.1.	Bu Tezde Elde Edilen Bağntıların Pratiğr ve Teoriye Uygulanması .....	66
4.2.	Bu Tezde Elde Edilen Bağntıların Pratikte Ölçülen Değerlere Uygulanması .....	66
4.3.	Güven Düzeyi ve Güven Aralıklarının Tespiti .....	72
4.4.	Bu Tezde Elde Edilen Bağntıların Bazı Formüllerle Karşılaştırılması .....	75
4.5.	Karşılaştırma İçin Seçilen Katı Madde Taşınım Formülleri .....	76
4.6.	Karşılaştırma İçin Seçilen Akarsular ve Karşılaştırma İçin Yapılan İşlemler .....	80
4.7.	Katı Madde Taşınımında En Etkin Parametre .....	83
4.8.	Akarsu Derinliğine Bağlı Olarak Konsantrasyon Değişimi .....	83
5.	SONUÇLAR .....	86
6.	ÖNERİLER .....	87
7.	KAYNAKLAR .....	88
8.	EKLER .....	90
9.	ÖZGEÇMİŞ .....	112

## ÖZET

Türkiye akarsu bakımından; Dünya'nın zengin ülkelerinden, Doğu Karadeniz Bölgesi ise Türkiye'nin en zengin bölgelerinden biridir. Durum böyle olunca su ve suyun getirdikleri de götürdükleri de önem kazanmaktadır.

Dünyada akarsulardaki katı madde taşınım miktarının hesabı ile ilgili olarak günümüze kadar çok sayıda çalışma yapılmış ve bu çalışmalar sonucunda akarsuların taşıdığı katı madde miktarını veren ve birbirinden farklı çok sayıda bağıntı ortaya çıkmıştır. Ancak olayda etken parametrelerin çok fazla oluşu nedeniyle bu bağıntılar birbirinden neredeyse 100 katına varan farklı sonuçlar vermektedir. Bu sebeple katı madde taşınımıyla ilgili tam olarak genelleştirilmiş bir bağıntının çıkarılması mümkün olamamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Doğu Karadeniz Bölgesindeki akarsulara ait eğim, debi ve dane çapı gibi bazı verileri de kullanarak, bir çok akarsu için katı madde debisini verebilecek bir bağıntı geliştirmektir. Bu çalışma altı ana bölüm, kaynaklar ve bir de ek bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, tezin amacı hakkında genel bilgiler verilerek literatür taraması yapılmıştır. İkinci bölümde, deneysel çalışmaya ait deney düzeni, deney koşulları ve yapılan deneysel çalışmalar sunulmaktadır. Üçüncü bölümde, deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular ve bu bulgulara göre elde edilen bağıntılar sunulmaktadır. Dördüncü bölümde, elde edilen bağıntıların pratikte ölçülen değerler üzerine uygulanması ile katı madde taşınımında kullanılan bazı formüllerle karşılaştırılması sunulmaktadır. Beşinci bölümde sonuçlar, altıncı bölümde öneriler ek bölümünde ise deneysel çalışma sonuçlarına yönelik yapılan istatistiksel ve matematiksel işlemler ile çalışmalara ait bazı fotoğraflar sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Katı Madde Taşınım Miktarı, Deneysel Çalışma, Askı Maddesi Miktarı, Konsantrasyon, Sürüntü Maddesi Miktarı.

## **SUMMARY**

### **Estimation of Total Sediment Load In Rivers by Determining, Suspended and Bed Loads**

From the viewpoint of rivers, Turkey is one of the abundant countries in the world. Therefore, water is very important in the country. Especially in the Eastern Black Sea Region, one of the richest region with respect to surface water resources, water has vital importance.

Various researches related to sediment transport discharges have been carried out worldwide. However, since the parameters which affect the sediment transport mechanism are too much, the results of each study are found to be different from the others; so that, some of these results become 100 times of another. Because of the various parameters to affect the phenomenon, a general formula have not be obtained yet.

The purpose of this experimental study is, by using the bed slope, flow discharge and size of sediment particles data of Eastern Black Sea Region Rivers, to determine a general formula to be able to calculate the sediment transport discharge. The study includes seven chapters and three appendices.

In the first chapter, general knowledge about the purpose of the thesis and a literature review are given. In the second chapter, the experimental studies are presented. The third chapter contains the results and formulas obtained from these experimental studies. In the fourth chapter, the formulas determined from this study are compared with both field data and some formulas given in the literature.

The conclusions of this study are presented in the fifth chapter. The suggestions are given in the sixth chapter. References are listed in the seventh chapter. Regression equations and correlation coefficient for suspended and bed load are given in the appendices 1 and 2, respectively. Appendix 3 contains some photographs related to experimental studies.

**Key Words :** Sediment Transport Discharge, Experimental Study, Suspended Load, Concentration, Bed Load

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Su içerisindeki bir parçacığa etki eden kuvvetler.....	9
Şekil 2. Kritik kayma gerilmesinin bulunmasını sağlayan Shields eğrisi.....	10
Şekil 3. Katı madde danelerinin tabandaki hareket biçimleri.....	10
Şekil 4. Katı madde danesinin askı hareketi.....	11
Şekil 5. Konsantrasyon ve hız dağılımı.....	14
Şekil 6. $\phi$ ve $\tau_k$ 'in çeşitli çaptaki daneler için alacağı değerler.....	16
Şekil 7. Deneysel çalışmaların yapıldığı akarsu modelinin planı .....	37
Şekil 8. Deneysel çalışmaların yapıldığı akarsu modeline ait boykesit.....	39
Şekil 9. Deneylerde kullanılan malzemelere ait granülometri eğrii.....	41
Şekil 10. Konsantrasyon nümunesinin alındığı 1/4, 1/2, 3/4 kesitleri.....	42
Şekil 11. Nüme alme aletinin şematik görünüşü .....	43
Şekil 12. Konsantrasyon ölçüm aletinin şematik olarak görünüşü .....	44
Şekil 13. Bir deney için ortalama konsantrasyon.....	45
Şekil 14. $D = 1.1$ mm ve seçilen debiler için ( $Q_c - J$ ) değerleri.....	55
Şekil 15. $D = 0.9$ mm ve seçilen debiler için ( $Q_c - J$ ) değerleri.....	55
Şekil 16. $D = 0.8$ mm ve seçilen debiler için ( $Q_c - J$ ) değerleri.....	55
Şekil 17. $D = 1.1$ mm ve seçilen eğimler için ( $Q_c - Q_w$ ) değerleri.....	56
Şekil 18. $D = 0.9$ mm ve seçilen eğimler için ( $Q_c - Q_w$ ) değerleri.....	56
Şekil 19. $D = 0.8$ mm ve seçilen eğimler için ( $Q_c - Q_w$ ) değerleri.....	56
Şekil 20. $J = 0.008$ ve seçilen debiler için ( $Q_c - D$ ) değerleri.....	57
Şekil 21. $J = 0.012$ ve seçilen debiler için ( $Q_c - D$ ) değerleri.....	57
Şekil 22. $J = 0.013$ ve seçilen debiler için ( $Q_c - D$ ) değerleri.....	57
Şekil 23. $J = 0.015$ ve seçilen debiler için ( $Q_c - D$ ) değerleri.....	58
Şekil 24. $D = 11$ mm ve seçilen debiler için ( $Q_b - J$ ) değerleri.....	58
Şekil 25. $D = 0.9$ mm ve seçilen debiler için ( $Q_b - J$ ) değerleri.....	58
Şekil 26. $D = 0.8$ mm ve seçilen debiler için ( $Q_b - J$ ) değerleri.....	59
Şekil 27. $D = 1.1$ mm ve seçilen eğimler için ( $Q_b - Q_w$ ) değerleri.....	59
Şekil 28. $D = 0.9$ mm ve seçilen eğimler için ( $Q_b - Q_w$ ) değerleri.....	59
Şekil 29. $D = 0.8$ mm ve seçilen eğimler için ( $Q_b - Q_w$ ) değerleri.....	60
Şekil 30. $J = 0.008$ ve seçilen debiler için ( $Q_b - D$ ) değerleri.....	60

Şekil 31. $J = 0.012$ ve seçilen debiler için ( $Q_b - D$ ) değerleri.....	60
Şekil 32. $J = 0.013$ ve seçilen debiler için ( $Q_b - D$ ) değerleri.....	61
Şekil 33. $J = 0.015$ ve seçilen debiler için ( $Q_b - D$ ) değerleri.....	61
Şekil 34. Çoruh-Karşıköy için hesaplanan ile ölçülen $Q_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....	67
Şekil 35. Çoruh-Altınsu için hesaplanan ile ölçülen $Q_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....	67
Şekil 36. Çoruh-İspir Köp. için hesaplanan ile ölçülen $Q_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....	68
Şekil 37. İyidere-Şimşirli için hesaplanan ile ölçülen $Q_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....	68
Şekil 38. Harşit-Kürtün için hesaplanan ile ölçülen $Q_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....	69
Şekil 39. Melet-Arıcalar için hesaplanan ile ölçülen $Q_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....	69
Şekil 40. Oltu-Aşağıkumlu için hesaplanan ile ölçülen $Q_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....	70
Şekil 41. Köprüçay-Başkonak için hesaplanan ile ölçülen $Q_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....	70
Şekil 42. Karamenderes için hesaplanan ile ölçülen $Q_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....	71
Şekil 43. Gönen-Kumköy için hesaplanan ile ölçülen $Q_c$ değerlerinin karşılaştırılması.....	71
Şekil 44. Güven aralığı ve güven düzeyinin şekilsel olarak ifadesi.....	74
Şekil 45. Konsantrasyonun düşey dağılımı.....	84
Ek Şekil 3.1 Modeldeki akarsu menbasından bir görünüş .....	109
Ek Şekil 3.2 Eğim düzeltme ve taban malzemesi için nivelman yapılması .....	109
Ek Şekil 3.3 Kum toplama ve çökeltim havuzlarından bir görünüş .....	110
Ek Şekil 3.4 Modeldeki akarsu yatağından bir görünüş .....	110
Ek Şekil 3.5 Kum toplama havuzunda biriken sürüntü maddesinin görünüşü .....	111
Ek Şekil 3.6 Konsantrasyon ölçümü için askı maddesinden nümune alınması .....	111



## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. $\pi$ teoreminin uygulanışını gösteren tablo .....	29
Tablo 2. DeneYlerde kullanılan bazı parametrelerin Froude sayısına göre hesabı .....	32
Tablo 3. Deneysel çalışmada elde edilen değerler .....	48
Tablo 4. Regresyon denklemleri ve korelasyon katsayıları için gerekli hesaplamalar.....	50
Tablo 5. Askı maddesi için regresyon denklemleri .....	53
Tablo 6. Sürüntü maddesi için regresyon denklemleri .....	54
Tablo 7. Bu çalışmada elde edilen bağıntının pratikte ölçümleri yapılmış bazı akarsular üzerine uygulanması sonucu elde edilen değerler .....	73
Tablo 8. Seçilen akarsulara ait bazı bilgilerle bulunan güven düzei ve güven aralıkları.....	74
Tablo 9. Seçilen formüllerin malzeme sınıfına göre verdikleri değerlerin niteliği .....	79
Tablo 10. Hemşin Deresi için yapılan karşılaştırma ( $D_{50} = 1$ mm : İri çaplı malzeme) .....	80
Tablo 11. Fırtına Deresi için yapılan karşılaştırma ( $D_{50} = 1$ mm : İri çaplı malzeme) .....	81
Tablo 12. İyidere için yapılan karşılaştırma ( $D_{50} = 1$ mm : İri çaplı malzeme) .....	81
Tablo 13. Değirmendere için yapılan karşılaştırma ( $D_{50} = 1$ mm : İri çaplı malzeme) .....	82
Tablo 14. Solaklı Deresi için yapılan karşılaştırma ( $D_{50} = 1$ mm : İri çaplı malzeme) .....	82

## SEMBOLLER DİZİNİ

- $A_r$  : Alan ölçeği  
 $B$  : Akarsu su yüzü genişliği  
 $c$  : Dane biçim faktörü  
 $C$  : Tabandan itibaren herhangi bir  $z$ , kotundaki konsantrasyon değeri  
 $C_a$  :  $z = a$ , kotundaki askı maddesi konsantrasyonu  
 $C_o$  : Düşey ekseninde askı maddesi ortalama konsantrasyonu  
 $C'_o$  : Toplam kesit için ortalama konsantrasyon  
 $D$  : Dane çapı  
 $D_{50}$  : Katı maddenin ortalama dane çapı  
 $F$  : Suyun sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin bileşkesi  
 $F_r$  : Froude sayısı  
 $G$  : Suya batmış haldeki parçacığın ağırlığının oluşturduğu kuvvet  
 $g$  : Yerçekimi ivmesi  
 $h$  : Su derinliği  
 $J$  : Hidrolik eğim veya akarsu eğimi  
 $K$  : Kuvvet  
 $k$  : Von Karman katsayısı  
 $L$  : Uzunluk  
 $L_r$  : Uzunluk ölçeği  
 $M$  : Kütle  
 $n$  : Manning pürüzlülük katsayısı  
 $n'$  : Danelerin pürüzlülük katsayısı  
ORTL : Ortalama  
 $Q_b$  : Tüm kesitten geçen sürüntü maddesi debisi  
 $q_b$  : Birim genişlikten geçen sürüntü maddesi debisi  
 $Q_t$  : Debi ölçeği  
 $Q_s$  : Tüm kesitten geçen askı maddesi debisi  
 $q_s$  : Birim genişlikten geçen askı maddesi debisi  
 $Q_t$  : Tüm kesitten geçen toplam katı madde debisi  
 $q_t$  : Birim genişlikten geçen toplam katı madde debisi

- $Q_w$  : Tüm kesitten geçen akımın debisi  
 $q_w$  : Birim genişlikten geçen akımın ortalama debisi  
 $R$  : Hidrolik yarı çap  
 $R_e$  : Reynolds sayısı  
 $S_g$  : Dane özgül yoğunluğu  
STSAP : Standart sapma  
 $T$  : Zaman  
TOPKA: Toplamkare  
TOPL : Toplam  
 $T_r$  : Zaman ölçeği  
 $u_*$  : Kayma gerilmesi hızı  
VAR : Varyans  
 $v$  : Akımın ortalama hızı  
 $v_*$  : Kritik akım hızı  
 $v_r$  : Hız ölçeği  
 $w$  : Katı maddenin dane çökme hızı  
 $z$  : Hareket başladığında askıdaki bir katı madde danesinin tabana olan düşey uzaklığı  
 $\tau$  : Kayma gerilmesi  
 $\tau_0$  : Tabandaki kayma gerilmesi  
 $\tau_{kr}$  : Kritik kayma gerilmesi  
 $\gamma_s$  : Dane özgül ağırlığı  
 $\gamma_w$  : Suyun özgül ağırlığı  
 $\nu$  : Suyun kinematik viskozitesi  
 $\rho$  : Suyun özgül kütlesi  
 $\epsilon$  : Su hareketinin karışım katsayısı  
 $\epsilon_s$  : Askı maddesi karışım katsayısı  
 $\delta$  : Katı maddenin karışım katsayısı  
 $\rho_s$  : Katı maddenin özgül kütlesi  
 $\phi$  : Boyutsuz bir katsayı  
 $\varphi$  : Ortalama dane çapına bağlı bir parametre  
 $\sigma$  : Satıh (yüzey) gerilmesi  
 $\Delta$  : Düzeltme katsayısı  
 $x$  : Viskoziye etkisi gösteren düzeltme faktörü

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Bir akarsu yatağında hareket eden su, beraberinde katı madde taşır. Bu katı maddeler aşağıda belirtilen çeşitli aşınmalar sonucunda oluşarak akarsu yatağına girer ve taşınır:

- a) Akarsu havzasında çeşitli nedenlerden kaynaklanan yüzeysel akışların oluşturduğu erozyon sebebiyle oluşan katı maddeler,
- b) Akarsuyun kendi yatağındaki erozyon (aşınmalar) sebebiyle oluşan katı maddeler,
- c) Akarsu şevlerinde meydana gelen kopma veya sökülmelerden oluşan katı maddeler,
- d) Yatağı iyice sağlamlaşmamış küçük kanallardaki erozyon sebebiyle oluşan katı maddeler,

Yukarıda belirtilen, akarsu yatağında meydana gelen bu aşınmalar, aşınmanın olduğu bu bölge civarında bir takım oyulmaların oluşmasına neden olur. Diğer taraftan katı madde taşınımını hem miktar hem de mesafe olarak akarsuyun sürüklenme kuvvetiyle doğru orantılı olduğundan, suyun sürüklenme kuvvetinin azaldığı yerlerde taşınmakta olan katı maddenin bir bölümü akarsu yatağının tabanına veya kıyısına çöker ve bu bölgelerde ise bir takım yığılmalar meydana gelir.

Meydana gelen her iki durum da (hem oyulma hem de yığılma) akarsu morfolojisini değiştireceğinden çevreyi de olumsuz yönde etkileyecektir. Değişen akarsu morfolojisi, akarsu üzerindeki çeşitli yapıların zarar görmesine ve suyun kalite ve verimliliğinin düşmesine sebep olur. İşte bu olumsuz etkileri en aza indirebilmek için taşınmakta olan katı maddenin akarsu havzası boyunca dengeli bir şekilde dağılımını sağlamak gerekir. Bunun sağlanabilmesi için de akarsuyun taşıdığı katı madde miktarının bilinmesi gerekir.

### 1.2. Tezın Amacı ve Kapsamı

Akarsularda katı madde taşınım miktarının hesabı ile ilgili olarak günümüze kadar çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların bazıları sadece teorik, bazıları sadece deneysel olarak gerçekleştirilmişken bazıları da deneysel çalışmaların teoriye

uygulanmasıyla hem deneysel hem de teorik olarak gerçekleştirilmiştir. İşte bütün bu çalışmaların birleştirilmesi sonucunda akarsuların taşıdığı katı madde miktarını veren ve birbirinden farklı çok sayıda formül ve bağıntılar ortaya çıkmaktadır. Bu bağıntı ve formüllerin çok fazla olmasının temel nedeni katı madde taşınımını etkileyen çok sayıda parametrenin olmasıdır. Bu nedenle teorik ağırlıklı formüller olayın pratiğine çözüm getirmekten uzak kalırken, ampirik formüller de tam olarak genel bir matematiksel ifadeye dönüştürülememektedir. Konuyla ilgili bilim adamları çalışmalarında birbirlerinden farklı parametreler kullandıklarından ve yaptıkları değişik kabullerden dolayı katı madde taşınımına ilişkin bağıntılar da birbirinden çok farklı sonuçlar vermektedir. Öyleki bu bağıntılar birbirinden neredeyse 100 katına kadar varan farklı sonuçlar vermektedirler. Örneğin; bir bağıntıya göre herhangi bir akarsuya ait toplam katı madde miktarı 10 ton/gün olarak hesaplanırken, diğer bir bağıntıya göre aynı akarsuya ait toplam katı madde miktarı 1000 ton/gün olarak hesaplanabilmektedir. Bu durum ise hesaplanan katı madde miktarının güven düzeyini azaltmaktadır.

Bu farklılıkların temel sebeplerinden birisi; akarsularda katı madde taşınımına etki eden parametrelerin çok olması ve herbir bağıntıda farklı parametrelerin kullanılmasıdır. Diğerisi ise; gerek askı, gerekse sürüntü maddesi ölçümlerinin tam olarak % 100 doğru bir şekilde yapılamamasıdır.

Toplam katı madde debisinin yaklaşık %80 ile %90'ını oluşturan askı maddesi debisinin [3] hesabında en etkin rolü oynayan konsantrasyon değeri çeşitli ampirik formül ve bağıntılarla hesaplanmaktadır. Ancak ne varki, bu formül ve bağıntılarda kullanılan değişkenler, katsayılar ve kabuller her akarsu için en ideal bir şekilde seçilemezler. Bunun sonucunda da konsantrasyon değeri, buna bağlı olarak askı maddesi debisi ve dolayısıyla toplam katı madde debisi gerçekte olduğu değerlerinden farklı olarak hesaplanırlar. Bu durum ise katı madde debisi sonuçlarının güvenilirliğini kaybettirir. Benzer bir durum sürüntü maddesi için de söylenebilir. Geçmişteki deneyimlere göre sürüntü maddesi debisinin ölçülmesinin askı maddesi debisinin ölçülmesinden daha zor olduğu bilinmektedir.

Bu tezde, bütün bu mahsurları mümkün mertebe enaza indirecek ve katı madde debisinin mümkün mertebe çok sayıda akarsu için gerçek değerlere daha yakın çıkmasını temin edebilecek bir çalışma sunulmakta olup ve bu çalışmada, beş farklı debiyle, dört farklı

eğimle ve ortalama dane çapları birbirinden farklı üç değişik malzemeyle deney yapma imkanı sağlayan bir akarsu modeli üzerinde deneysel çalışmalar yapılarak, bu deneylerden elde edilen değerlere göre tüm kesitten geçen toplam katı madde debisi;  $Q_t$ , askı maddesi,  $Q_s$  ve sürüntü maddesi,  $Q_b$ 'nin toplamını ifade eder [26] ve

$$Q_t = Q_s + Q_b \quad (1)$$

formülünden ton/gün birimiyle hesaplanmaktadır.

Formül (1)'de askı maddesi debisi ( $Q_s$ ) nin hesabında kullanılan konsantrasyon (C), bu çalışmada: Laboratuvar şartları için üretilmiş ve kalibrasyonu yapılmış alet ve bu alete ait yöntemler kullanılarak yapılan deneyler sonucunda ölçülmekte olup ve ölçüm sonuçlarında ortaya çıkan konsantrasyon değerleri doğrudan askı maddesi debisinin hesabında kullanılmaktadır.

Yine Formül (1)'de sürüntü maddesi debisi ( $Q_b$ ), akarsu modelinin mansap kısmında dizayn edilen kum toplama ve çökeltim havuzlarından ölçülmektedir. Bu havuzlara gelen sürüntü maddesi, büyük bir titizlikle toplanarak elektronik terazide tartılmak suretiyle sürüntü maddesi debisi doğrudan bulunmaktadır. Halbuki, bugüne kadar yapılan çalışmalarda sürüntü maddesi, bir takım kabullere dayalı ve çok sayıda katsayılar içeren çeşitli ampirik formüllerle hesaplanmıştır.

Dolayısıyla bu tezde, toplam katı madde miktarının; bu olay için geliştirilen çok sayıda formül kullanılarak bulunması yerine; askı ve sürüntü maddesi debileri ayrı ayrı belirlenerek, bu ikisinin toplanması suretiyle gerçeğe daha yakın bir şekilde belirlenmesi amacı güdülmektedir.

Bunun için deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılarak, deneyler için seçilen herbir bağımsız değişkene göre, ayrı ayrı olmak üzere katı madde debisini veren *Regresyon Denklemleri* elde edilmektedir. Daha sonra katı madde debisini veren bu regresyon denklemlerinden çok sayıda akarsu için uygun olabileceği düşünüleni seçilerek kullanılması önerilmektedir. Önerilen bu denklemlerin pratikte ölçülen değerlere uygunluğunu tespit etmek için de bu denklemler, ölçümleri önceden yapılarak akım debileri ve katı madde miktarları belirlenmiş olan çok sayıda akarsu havzası üzerinde test edilmekte ve son olarak

da önceden yapılan bir çalışmada Doğu Karadeniz Bölgesi akarsularının taşıdığı katı madde miktarının bazı formüllere göre hesaplanmasıyla elde edilen sonuçlar, aynı akarsular için bu çalışmada elde edilen bağıntıya göre de hesaplanmak suretiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Böylece, bu tezde elde edilen bağıntının, katı madde taşınım miktarının hesaplanmasında kullanılan diğer bazı formüllerle karşılaştırılması sağlanmıştır.

Elde edilen regresyon denklemlerinden hangisinin en uygun olduğuna ise, *Korelasyon Katsayısı* 'na bakılarak karar verilir. Korelasyon katsayısı, deneylerde seçilen her bir *Bağımsız Değişken* veya birkaç bağımsız değişken ya da bütün bağımsız değişkenler ile deneylerde elde edilen ve bu bağımsız değişken veya değişkenlere karşılık gelen *Bağımlı Değişken* arasındaki anlamlılık ilişkisini ortaya koyan bir sayıdır ve - 1 ile + 1 arasında değişir. Mutlak değer olarak; 1'e eşit veya 1'e enyakın olan korelasyon katsayısına sahip olan regresyon denklemi en uygun ya da en anlamlı denklemdir [4], [5].

Bu tezde elde edilen regresyon denklemleri; istenilen herhangi bir katı madde debisinin, diğerlerinden bağımsız olarak hesaplanabilmesi için:

a) Askı maddesi debisi,

b) Sürüntü maddesi debisi

olmak üzere iki ayrı katı madde debisi için ayrı ayrı elde edilmektedir. Toplam katı madde debisi ise bu iki katı madde debisi için geliştirilen denklemlerden elde edilen değerlerin toplanması ile belirlenir.

### 1.3. Literatür Taraması

Akarsularda katı madde taşınım debisini hesaplayabilmek için, sırasıyla katı madde özelliklerinin, katı madde hareketinin başlaması, katı madde hareket şekilleri, katı madde hareketine etki eden değişkenler, boyut analizi gibi katı madde taşınım miktarının hesabında önemli olan bazı konuların incelenmesi gerekir. Bu gibi konuların incelenmesi ile ortaya çıkacak olan kriter ve değerlendirmelerden sonra katı madde taşınım debisi hesabına geçilebilir. İşte bu konularla ilgili kapsamlı bir literatür çalışması yapılarak elde edilen kriter ve değerlendirmeler aşağıda sunulmaktadır.

### 1.3.1. Katı Madde Özellikleri

Akarsuların taşıdığı katı madde miktarının hesabında, taşınmakta olan katı maddenin özellikleri önemli derecede etkin bir parametredir. Bir katı maddeye ait özellikler kimyasal ve fiziksel özellikler olmak üzere iki grupta toplanır. Burada kohezyonlu daneler arasında hem kimyasal hem de fiziksel özellikler etkin bir rol oynarken buna karşılık, kohezyonsuz daneler arasında etkin sayılabilecek kimyasal ve fiziksel bir etkileşim yoktur [16].

Bu çalışmada katı madde, genel anlamda kuars minarellerin oluşturduğu kum danecikleri ve çakıl daneleri olarak tanımlandığından ve bu daneler ise kohezyonsuz daneler olup, çoğu zaman birbirinden bağımsız olarak fiziksel bir hareket gösterdiklerinden dolayı, taşınmakta olan katı maddenin fiziksel özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu fiziksel özellikler kısaca özetlenirse:

a) Dane Çapı: Akarsularda katı madde taşınımında önemli bir etken olan dane çapı, taşınan katı madde miktarını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada üç değişik çapta malzeme seçilerek, herbir çaptaki taşınım miktarları ve taşınım oranları incelenmektedir. Katı madde taşınımında en önemli dane sınıfı kum ile çakılın 2-20 mm aralığıdır [27].

b) Dane Özgül Ağırlığı ve Dane Özgül Yoğunluğu: Akarsuların taşıdığı katı maddenin özgül ağırlığı, koparılarak taşınan minerallere göre değişir. Bu çalışmada, kuars minarellerin oluşturduğu kum ve çakıl danelerinin genel anlamda katı maddeyi oluşturduğu ve tabiatta bu katı maddenin özgül ağırlığının da yapılan deneyler neticesinde ortalama olarak  $2650 \text{ kg/m}^3$  olduğu kabul edilmektedir [3]. Katı danenin birim hacminin ağırlığına dane özgül ağırlığı denilir ve bu özgül ağırlığın suyun özgül ağırlığına oranına ise su içerisindeki danenin özgül yoğunluğu denilir ve bu yoğunluk:

$$S_g = \gamma_s / \gamma_w \quad (2)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada:

$S_g$ : Dane özgül yoğunluğu

$\gamma_s$ : Dane özgül ağırlığı ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )

$\gamma_w$ : Suyun özgül ağırlığı ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ).



c) Dane Biçimi: Katı madde taşınım hesaplarında dane biçimi genellikle “Küresellik” veya “Yuvarlaklık” ile ifade edilir. Dane biçimi faktörü:

$$c / \sqrt{a b} \quad (3)$$

formülü ile hesaplanır. Burada:

a, b, ve c sırasıyla daneciğin birbirine dik eksenler üzerindeki en uzun, orta ve en kısa boyutlarını gösterirler [3].

d) Granülometri Eğrisi: Katı madde taşınım miktarlarının hesabında herbir danenin büyüklüğünün belirlenmesi imkansızdır. Bu sebeple bir katı maddeyi oluşturan malzemenin dane büyüklüklerinin dağılımının belirlenmesi için elek analizi (mekanik analiz) yapılarak, ilgili katı maddeye ait numune elek çaplarına göre bölümlere ayrılır. Sonuçta elde edilen değerler granülometri eğrileri halinde gösterilir.

Granülometri eğrisinin oluşturulmasındaki asıl amaç; katı madde taşınımında önemli bir etken olan ve  $D_{50}$  olarak isimlendirilen ortalama (medyan) çapı belirlemektir. Katı madde taşınım hesaplarında  $D_{50}$ 'nin yanısıra daha hassas yaklaşımlar için  $D_{35}$ ,  $D_{65}$ ,  $D_{85}$  ve  $D_{90}$  gibi bazı karakteristik çaplar da kullanılmaktadır [16]. Taşınım hesaplarında kullanılan ve  $D_{50}$  olarak bilinen ortalama dane çapı:

$$D_{50} = \sum P_i D_i / 100 \quad (4)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada:

$P_i$ : Herhangi bir  $D_i$  çapındaki malzemenin yüzdesi

$D_i$ : Herhangi bir malzemenin çapı (mm)

$D_{50}$ : İlgili malzemenin medyan çapıdır.

Bu çalışmada, dane çapı faktörünün katı madde taşınım hesaplarında daha anlamlı bir hale getirilmesi için  $D_{50}$  yerine  $D_{ort}$  adı verilen ortalama çap kullanılmaktadır ve bu çap:

$$D_{ort} = (D_{35} + D_{50} + D_{65}) / 3 \quad (5)$$

şeklinde bir bağıntı ile hesaplanmaktadır. Burada:

$D_{ort}$ 'nın hesaplanmasında kullanılan  $D_{35}$ ,  $D_{50}$  ve  $D_{65}$  değerleri seçilen her bir malzeme için yapılan elek analizi sonucunda düzenlenen granülometri eğrilerinden elde edilmektedir.

e) Danenin Çökelme Hızı: Akarsularda katı madde taşınım şekillerinden olan, askı maddesi hareketinin incelenmesinde ve aynı zamanda akarsularda katı madde yığılımı problemlerinde danenin çökelme hızı etkin bir parametredir. Su içerisine bırakılan bir danenin hızı gittikçe artar ve sonunda bu hız sabit bir değere ulaşırdı, işte sabit değere ulaşan bu hız danenin çökelme hızı denilir. Danenin çökelme hızı Stokes Kanunu adı verilen bir bağıntı ile hesaplanır [20]. Bu bağıntı:

$$w = (\gamma_s - \gamma_w / \gamma_w) (gD^2 / 18 \nu) \quad (6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada:

- w : Danenin çökelme hızı (m/s)
- $\gamma_s$  : Danenin özgül ağırlığı ( $kg/m^3$ )
- $\gamma_w$  : Suyun özgül ağırlığı ( $kg/m^3$ )
- $\nu$  : Suyun kinematik viskozitesi ( $m^2/s$ )
- D : Danenin ortalama çapı (mm)
- g : Yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ )

### 1.3.2. Katı Madde Hareketinin Başlaması

Akarsularda katı maddenin harekete başlamasını sağlayan kayma gerilmesidir ve bu gerilme

$$\tau = \gamma R J \quad (7)$$

bağıntısı ile hesaplanır [16]. Burada:

- $\tau$  : Kayma gerilmesi ( $kg/m^2$ )

$\gamma$  : Suyun özgül ağırlığı ( $\text{kg/m}^3$ )

R : Hidrolik yarı çap (m)

J : Hidrolik eğim (m/m).

Bir akarsuda; B akarsu genişliği, h su derinliği olmak üzere:

$$B / h > 30 \quad (8)$$

şeklinde bir bağıntı varsa hidrolik yarı çap R, yerine doğrudan doğruya su derinliği h, alınabilir. Su içerisindeki bir parçacığın harekete geçmesini sağlayan kayma gerilmesinin oluşabilmesi için bu parçacığa:

- a) Parçacığın kendi ağırlığı,
- b) Suyun sürüklenme kuvveti,
- c) Suyun kaldırma kuvvetinin etki etmesi gerekir.

Suyun sürüklenme kuvveti ile kaldırma kuvvetini parçacık etrafındaki akım meydana getirir. Bu iki kuvvet ise parçacık etrafında basınç farklılıklarını bu farklılıklarla birlikte kayma gerilmesini oluşturur.

Su içerisindeki bir parçacığa etki eden kuvvetlerin büyüklükleri, o parçacığın büyüklüğüne, biçimine, yatağın pürüzlülüğüne, etrafındaki suyun ortalama hızına ve bu hızdaki dalgalanmalara bağlıdır [16]. Parçacığın harekete başladığı sırada , parçacığa etki eden devirici ve koruyucu kuvvetler Şekil 1’de de görüldüğü gibi birbirine eşit olur.

$$F_b = G_a \quad (9)$$

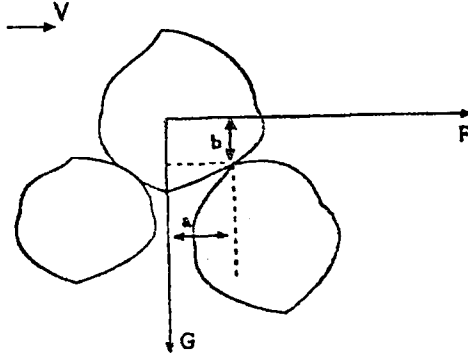
şeklinde bir bağıntı ile ifade edilebilir. Burada:

F : Suyun sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin bileşkesi (kg),

G : Suya batmış haldeki parçacığın ağırlığının oluşturduğu kuvvet (kg),

a : G, kuvvetine ait moment kolu (m),

b : F, kuvvetine ait moment kolu (m).

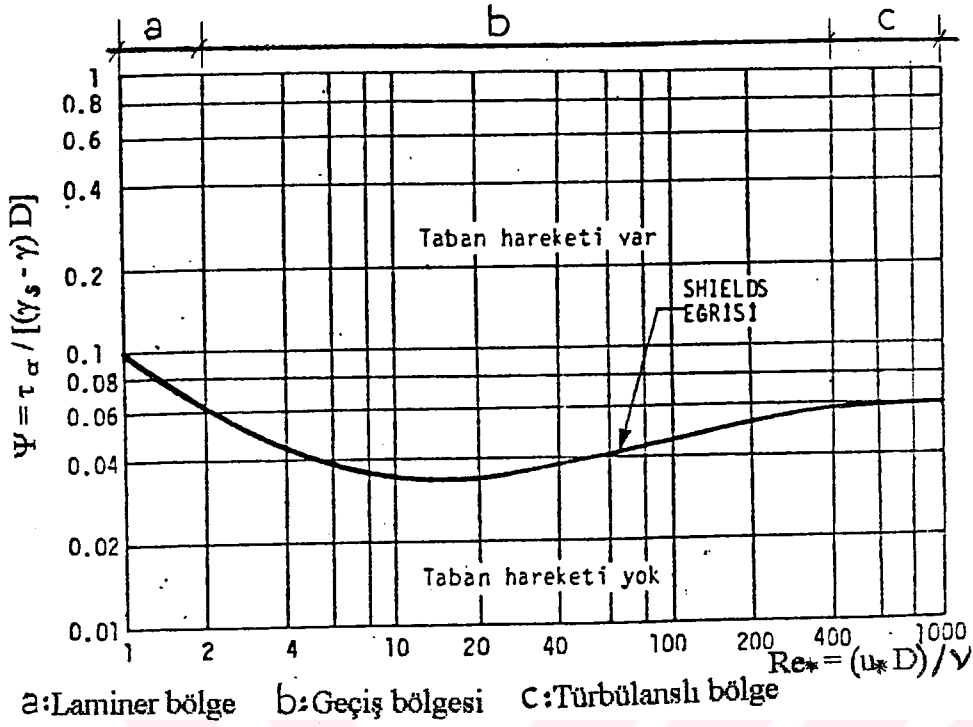


Şekil 1. Su içerisindeki bir parçacığa etki eden kuvvetler

Shields [21] tabanda hareketin başlaması ile ilgili olarak yaptığı deneysel bir çalışmada; kritik Reynolds sayısı ( $Re_*$ ) ile kritik Froude sayısı ( $Fr_*$ ) değerleri arasında bir bağıntı kurarak bu bağıntıyı da bir grafik şekline dönüştürmüş ve bu grafiğin adına da Shields eğrisi (Şekil 2) adını vermiştir.

Shields eğrisi kritik durumu (hareketin başlangıcını) göstermekte olup, eğrinin altındaki bölgede taban hareketsiz, üstündeki bölgede hareketlidir. Bu eğride: Laminer bölge, geçiş bölgesi ve türbülanslı bölge olmak üzere üç bölge vardır. Shields eğrisinde sol tarafın laminer bölge ( $Fr_*^2 \propto 1/Re_*$ ) olduğu görülmüyor. Buna göre bu bölgede kritik kayma gerilmesi hızı ( $u_{*k}$ ) dane çapından ( $D$ ) bağımsızdır. Bu eğride sağ tarafın ise türbülanslı bölge olduğu görülmektedir. Bu bölgede ise kritik durum için  $Fr_*^2$  değerinin yaklaşık olarak 0.06 sabit değerinde kaldığı görülmektedir. Shields eğrisinde bu iki bölge arasında kalan bölge ise geçiş bölgesi olarak adlandırılırken eğrinin üstünde kalan bölgede taban hareketi varken, altında kalan bölgede taban hareketi olmadığı görülmektedir (Şeki 2), [27].

Shields eğrisinden faydalanarak belli akım şartları altında harekete geçmeyecek taban malzemesinin çapı da belirlenebilir. Bu sebeple Shields eğrisi sulama ve kurutma kanallarında malzeme çapı seçimi aşamasında oldukça önemlidir. Bu eğrinin en önemli özelliklerinden biri de, türbülanslı akımlarda hızların ve dolayısıyla kayma gerilmelerinin ortalama değerlerinin çok üstüne çıkabilmeleridir.

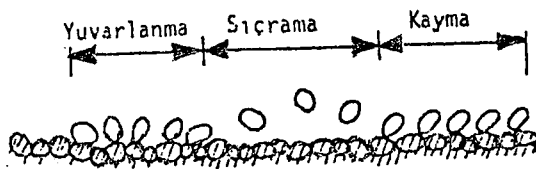


Şekil 2. Kritik kayma gerilmesinin bulunmasını sağlayan Shields eğrisi

### 1.3.3. Katı Madde Hareket Şekilleri

Akarsularda katı madde hareketi taban ve askı hareketi olmak üzere iki şekilde olur.

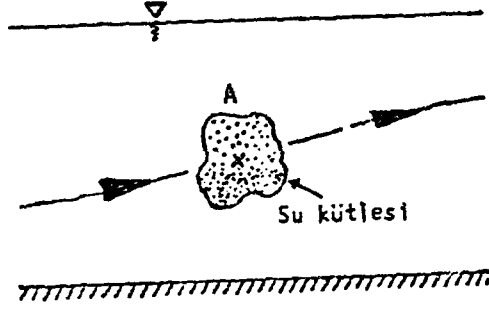
a) Taban Hareketi : Daha çok iri kum ve çakıl malzemesi bu hareketi yapar. Taban hareketi yapan daneler teker teker gözlemlendiğinde, bu danelerin taban üzerinde bazan yuvarlanarak, bazan kayarak bazan da sıçrayarak hareket ettikleri görülebilir (Şekil 3), [27].



Şekil 3. Katı madde danelerinin tabandaki hareket biçimleri

b) Askı hareketi : Askı hareketini ise daha çok, ince kum daneleri ve silt gibi daha hafif malzemeler yapar. Bu hareketin gerçekleştiği akımlar türbülanslı akımlar olduğundan akım içerisinde herhangi bir noktada hızın düşey bileşeni sıfıra yakındır. Yukarı doğru hız

bileşeninin ise sıfırdan farklı bir değere sahip olması, yukarı doğru bir su kütlesinin bulunduğunu ifade eder (Şekil 4). Bu su kütlesi beraberinde ince katı madde daneciğini de yukarı doğru taşır. Bu olay ince daneli katı maddenin akım içerisinde hareketine sebep olur ki, bu harekete katı maddenin askı hareketi denilir [27].



Şekil 4. Katı madde danesinin askı hareketi

#### 1.3.4. Katı Madde Hareketine Etki Eden Değişkenler

Katı madde taşınım debisini hesaplarırken, taşınımına etki eden değişkenlerin (parametrelerin) neler olduğu iyi tespit edilmelidir. Akarsularda katı madde taşınımına etki eden çok sayıda değişken vardır. Katı madde debisini ( $Q_t$ ) hesaplarırken etkisi olduğu bilinen değişkenler:

$$Q_t = f(Q_w, h, \tau, v, \rho, \epsilon, \rho_s, D, w, g) \quad (10)$$

şeklinde bir fonksiyonel bağıntı ile gösterilebilir. Bu tip fonksiyonel bağıntıların genelde sol tarafındaki değer bağımlı değişken, sağ tarafındaki değerler ise bağımsız değişkenlerdir. Ancak bu değişkenlerden hangisinin bağımlı, hangisinin bağımsız olduğuna akarsu sisteminin şekline göre karar verilir. Bu çalışmada su derinliği belirlenmiş sirkülasyonlu laboratuvar kanal sistemi kullanılmıştır. Su derinliği belirlenmiş sirkülasyonlu laboratuvar kanal sisteminde, Denklem (10)'daki fonksiyonel ifadenin sol tarafındaki değer bağımlı değişken, sağ tarafındaki değerler ise bağımsız değişkenlerdir [30]. Burada:

$Q_t$  : Toplam katı madde debisi (ton/gün),

$Q_w$  : Akımın debisi ( $m^3/s$ ),

$h$  : Su derinliği (m),

- $\tau$  : Kayma gerilmesi ( $\text{kg/m}^2$ ),  
 $\nu$  : Suyun kinematik viskozitesi ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  
 $\rho$  : Suyun özgül kütlesi ( $\text{kg s}^2/\text{m}^4$ ),  
 $\epsilon$  : Katı maddenin karışım katsayısı,  
 $\rho_s$  : Katı maddenin özgül kütlesi ( $\text{kg s}^2/\text{m}^4$ ),  
 $D$  : Katı maddenin ortalama dane çapı (mm),  
 $w$  : Katı maddenin dane çökme hızı (m/s)  
 $g$  : Yerçekimi ivmesi ( $\text{m/s}^2$ ).

Denklem (10)'da verilen fonksiyonel ifadeden de anlaşılacağı gibi bu olaya etki eden değişkenler aşağıda belirtildiği gibi dört ana grupta toplanabilir [16].

- Akımın özellikleri ( $Q_w, h, \tau$ ),
- Akışkanın özellikleri ( $\nu, \rho, \epsilon$ ),
- Katı madde özellikleri ( $D, \rho_s, w$ ),
- Yerçekimi ivmesi ( $g$ ).

### 1.3.5 Askı Maddesi Miktarının Hesabı

Akarsu içerisinde askıda bulunan katı madde daneleri, bir yandan çökme hızının etkisiyle aşağıya inerken, diğer yandan türbülans etkisiyle yukarıya çıkarlar. Böylece bu daneler su içerisinde askıda ve bir bakıma dengede kalırlar [16]. Bu denge hali tek boyutlu bir akımda:

$$w C + \epsilon_s \left( \frac{\partial C}{\partial z} \right) = 0 \quad (11)$$

şeklinde bir eşitlik ile ifade edilir. Burada:

- $C$  : Tabandan itibaren herhangi bir  $z$ , kotundaki konsantrasyon değeridir (ppm).  
 $\epsilon_s$  : Askı maddesi karışım katsayısı.

Eşitlik (11)'deki birinci terim çökme ile aşağıya inen, ikinci terim ise türbülans etkisiyle yukarıya çıkan askı maddesi miktarını temsil etmektedir.

Konsantrasyonun düşük olduğu zamanlarda;  $w$  çökelme hızı,  $C$  konsantrasyonundan bağımsız alınabilir. Ancak burada  $\epsilon_s$  sabit değildir. Burada su hareketinin karışım katsayısı  $\epsilon$  ile askı maddesi hareketinin karışım katsayısı  $\epsilon_s$  arasında:

$$\epsilon_s = \beta \epsilon \quad (12)$$

şeklinde bir bağıntı yazılabilir. Burada:

$\beta$  : Bir katsayı olup, küçük parçacıklar için  $\beta = 1$ , büyük parçacıklar için  $\beta > 1$  olarak alınabilir [16]. Burada daha önce verilen Eşitlik (11):

$$\int_a^h w dz = c_a \int^C (dC / C) \epsilon_s \quad (13)$$

şeklinde bir ifadeye dönüştür. Buradan lineer kayma gerilmesi ve türbülans teorisine göre:

$$\tau = \tau_0 [1 - (z/h)] = \rho \epsilon (dV / dZ) \quad (14)$$

bağıntısı yazılabilir. Bu bağıntıdan da:

$$\epsilon = [(\tau_0 / \rho) (1 - (z/h))] [1 / (dV / dZ)] \quad (15)$$

bağıntısı bulunur. Burada;  $V_* = (\tau / \rho)^{0.5}$  ve  $dV / dZ = V / V_* = \ln 30,2 (z / \Delta)$  olduğu bilindiğine göre ve öte yandan  $\Delta = k / x$ ,  $x$  için düzeltme katsayısı  $x = k / \delta$  göz önüne alındığında:

$$\epsilon_s / k h u_* = z/h [1 - (z/h)] \quad (16)$$

bağıntısı elde edilir. Burada:

$k$  : Von Karman katsayısı olup, temiz sular için 0.4, yoğun konsantrasyonlu sular için 0.21 alınabilir.



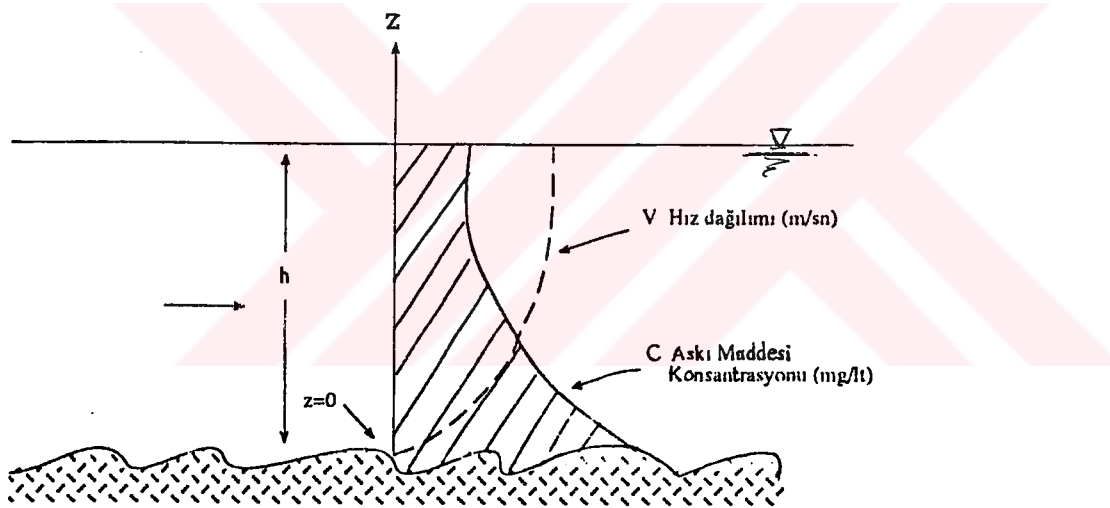
Yukarıdaki (16) bağıntısı (13) bağıntısında yerine yazılırsa akarsularda askı maddesi konsantrasyonunu veren:

$$C / C_a = [((h - z) / z) (a / (h - a))]^\alpha \quad (17)$$

bağıntısı elde edilirse, bu bağıntı askı maddesi konsantrasyonunu hesaplar. Burada:

- $C_a$  :  $z = a$  kotundaki askı maddesi konsantrasyonu (Şekil.5),
- $C$  : Tabandan itibaren  $z$ , kotundaki konsantrasyondur,
- $\alpha$  : Bir katsayı olup;  $\alpha = w / (k u_*') = w / (k \sqrt{g h J})$  şeklindedir.

Einstein'ın bazı deneysel çalışmalarında  $C_a$  konsantrasyonunu,  $a = 2D$  olarak ortalama konsantrasyon şeklinde kullandığı belirtilmektedir [3].



Şekil.5 Konsantrasyon ve hız dağılımı

Akım alanı içinde istenen noktalarda  $C$ , konsantrasyonları bulunduktan sonra artık akarsuyun birim genişliğinden geçen askı maddesi debisi hesaplanabilir. Bu debi:

$$q_x = a \int_0^h (VC) dz = C_o q_w \quad (18)$$

formülü ile hesaplanır. Burada:

$q_x$  : Birim genişlikten geçen askı maddesi debisi ( $m^3/s/m$  veya  $kg/s/m$ ),

$V$  : Tabandan  $z$ , kadar yukarıdaki noktada akımın hızı ( $m/s$ ),

$C$  : Tabandan itibaren  $z$ , kotundaki konsantrasyon (ppm),

$C_o$  : Düşey ekseninde ortalama askı maddesi konsantrasyonudur (ppm).

$q_w$  : Birim genişlikten geçen akımın debisi ( $m^3/s$ )

Tüm kesitten geçen askı maddesi debisinin hesabı ise:

$$Q_s = \int_0^b q_x dx = \int_0^b \int_a^b C V dz dx = C'_o Q_w \quad (19)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada:

$Q_s$  : Toplam kesitten geçen askı maddesi debisi ( $m^3/s$  veya  $kg/s$ ),

$C'_o$  : Toplam kesit için ortalama konsantrasyon değeridir (ppm),

$Q_w$  : Toplam kesitten geçen akımın debisi ( $m^3/s$ ).

### 1.3.6. Sürüntü Maddesi Miktarının Hesabı

Sürüntü maddesi miktarının hesaplanması ile ilgili çok sayıda teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda ortaya çıkan çok sayıda ampirik formül yardımıyla sürüntü maddesi miktarı yaklaşık olarak hesaplanır. Fakat bu çalışmada, bu konuyla ilgili yapılmış olan çalışmalardan, kullanımları mümkün mertebe tüm akarsular için daha uygun ve geçerli sonuçlar verebilen bir kaçı üzerinde durulmaktadır. Bunlar:

a) DuBoys Formülü : Sürüntü maddesi hareketi ve dolayısıyla sürüntü maddesi miktarının hesaplanması ile ilgili olarak, ilk defa 1879 yılında DuBoys [17] yaptığı bir çalışmada birim genişlikten geçen sürüntü maddesi debisini veren bağıntıyı elde etmiştir.

Hernekadar bu teoride danelerin hareketi için kabul edilen modelin bugün gerçeğe uymadığı bilinmekte ise de DuBoys'un ileri sürdüğü denklemlerin ölçüm sonuçlarına uygunluğu bilinmekle birlikte hiç olmazsa bu denklemlerle olayın genel gidişi ve ilgili parametrelerin olaya etkileri iyi bir şekilde belirtilmiştir. DuBoys teorisinde, kalınlıkları dane çapı  $D$ , kadar olan üstüste tabakaların birbiri üzerinden kayması ile danelerin harekete

gececeğini kabul etmiştir. Bu tabakaların hızları yüzeyden itibaren doğrusal olarak azalmakta ve n'inci tabakada sifıra düştüğü kabul edilmektedir.

DuBoys'un elde ettiği formül özellikle üniform akıma, yüksek hız, dik eğime ve iri daneli malzemeye sahip akarsular için daha iyi sonuçlar verir. Bu formül :

$$q_b = \varphi \tau (\tau - \tau_k) \quad (20)$$

şeklinde ifade edilir. Burada:

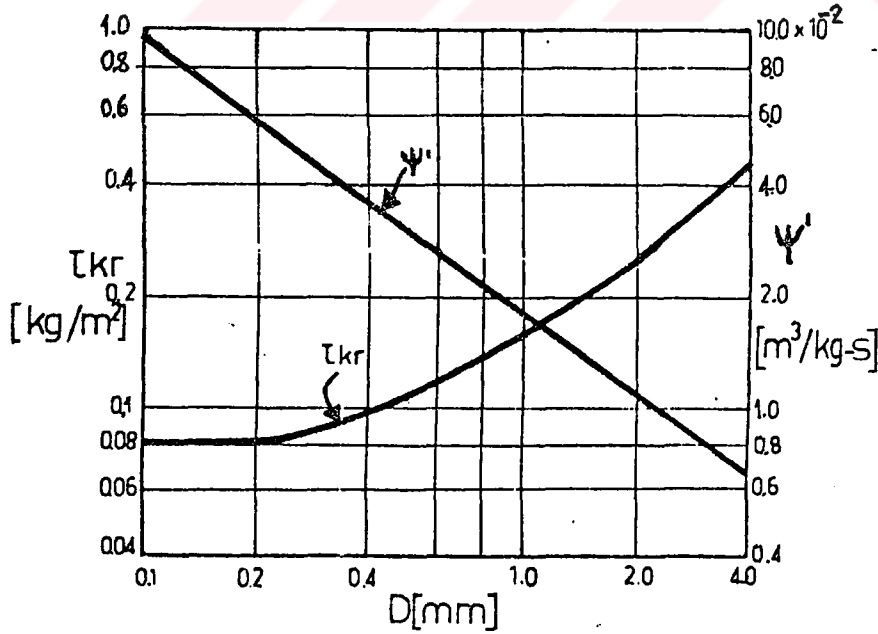
$\tau$  : Akımın oluşturduğu kayma gerilmesi ( $\text{kg/m}^2$ ),

$\tau_k$  : Kritik kayma gerilmesi ( $\text{kg/m}^2$ ).

$q_b$  : Sürüntü maddesi debisi ( $\text{kg/s/m}$ ),

$\varphi$  : Ortalama dane çapına bağlı bir parametre [ $\text{m}^3 / (\text{kg} - \text{s})$ ]. Bu parametreyi bulmaya yarayan düzenlenmiş bir de grafik (Şekil 6), [3] mevcuttur. Burada örnek olarak; ortalama dane çapına göre yaklaşık  $\varphi$  değerleri:

Ortalama dane çapı 4 mm için  $\varphi = 0.6$ , 2 mm için  $\varphi = 1$ , 0.25 mm için  $\varphi = 5$  ve 0.1 mm için  $\varphi = 10$  [ $\text{m}^3 / (\text{kg} - \text{s})$ ] olarak [33] alınabilir.



Şekil 6.  $\varphi$  ve  $\tau_{kr}$ 'in çeşitli çaptaki daneler için alacağı değerler [33].

b) Schoklitsch Formülü : Schoklitsch yaptığı bir çalışmada, DuBoys formülüne eşdeğer sayılabilecek olan ve birim genişlikten geçen sürüntü maddesi debisini hesaplayan bir bağıntı elde etmiştir [16], [17]. Schoklitsch bu formülü, Gilbert'in yaptığı deneylerden elde edilen değerleri esas alarak çıkarmıştır.

Gilbert'in gerçekleştirdiği ve sonuçlarını Schoklitsch'in esas aldığı bu deneylerde dane çapı 0.305 ile 7.0 mm arasında eğimler ise 0.0033 ile 0.028 arasında değişmektedir. Schoklitsch'in geliştirdiği bağıntı daha çok ova akarsuları için iyi sonuç vermektedir [16]. Bu formül :

$$q_b = (7000 / D^{0.5}) J^{1.5} (q_w - q_{wk}) \quad (21)$$

şeklinde ifade edilir. Burada:

$q_b$  : Birim genişlikten geçen sürüntü maddesi debisi (kg/s/m),

$q_w$  : Birim genişlikten geçen akımın ortalama debisi ( $m^3/s/m$ ),

$D$  : Ortalama dane çapı (mm),

$J$  : Akarsu eğimi (m/m).

$q_{wk}$ : Birim genişlikten geçen akımın kritik debisi ( $m^3/s/m$ ) yani maddenin harekete başladığı debi olup,

$$q_{wk} = 1.94 (10)^{-5} (D / J^{4/3}) \quad (22)$$

bağıntısı ile bulunur.

c) Meyer - Peter, Müller Formülü : Bu bilim adamları yaklaşık 15 yıl süren çok değişik akım şartlarında ve değişik dane çaplarında bir çok sayıda deneysel çalışmalar gerçekleştirmişler ve sonuçta bir bağıntı elde etmişlerdir. Bu bağıntıda karakteristik dane çapı olarak taban malzemesinin ortalama dane çapı kullanılmıştır.

Meyer-Peter, Müller'in yaptıkları deneylerde dane çapı 0.4 ile 30 mm, eğimler 0.0004 ile 0.02, su derinliği 0.01 ile 1.2 m ve dane özgül ağırlığı ise 1.25 ile 4.22  $t/m^3$  arasında değişmektedir. Deneyler içerisinde hiç askı maddesi bulunmayan akımlarda yapılmıştır. Uzun süren bu çalışmalar neticesinde, 1948 yılında taban malzemesi iri olan akarsularda ve özellikle de taşkın zamanlarında iyi sonuçlar veren ve birim genişlikten geçen

sürüntü maddesi debisini hesaplayan Meyer - Peter, Müller formülünü [22], [29] bulmuşlardır. Bu formül :

$$q_b = \left[ \frac{(Q_{tw}/Q_w) (n'/n)^{3/2} (\gamma_w R J) - 0.047(\gamma_s - \gamma_w) D}{0.25 (\rho_w)^{1/3} (\gamma_s - \gamma_w)^{2/3}} \right]^{3/2} \quad (23)$$

şeklinde ifade edilir. Burada:

$q_b$  : Birim genişlikten geçen sürüntü maddesi debisi ( $m^3/s/m$ ),

$Q_w$  : Akımın debisi ( $m^3/s$ ),

$Q_{tw}$  : Akımın taban genişliğine karşılık gelen debi ( $m^3/s$ ), genelde  $Q_{tw}/Q_w = 1$  olarak alınır.

$\rho_w$  : Suyun özgül kütlesi ( $kg/m^3$ )

$n'$  : Danelerin pürüzlülük katsayısı,

$n$  : Manning pürüzlülük katsayısı olup, bu sayı Manning pürüzlülük formülünden hesaplanır.  $n'$  ise:

$$n' = (D_{90})^{1/6} / 26 \quad (24)$$

şeklinde bir bağıntı ile hesaplanır.

Denklem (23)'de verilen  $n'/n$  oranının 0.5 ile 1 arasında değerler aldığı da bilinmektedir [16]. Bu oran eğer akarsu tabanı düz ise 1, eşik ve ters eşikler varsa 0.5 alınır.

**d) Einstein-Brown Formülü:** Einstein'ın yapmış olduğu deneysel çalışmalar sonucunda geliştirmiş olduğu formül [13] Meyer - Peter, Müller formülü ile birlikte günümüzde en çok kullanılan sürüntü hareketi formülüdür.

Einstein'a göre bir daneciği etkileyen kaldırma kuvveti akımın hızının bir fonksiyonu olduğuna göre, eğer hiç türbülans mevcut olmasaydı, akımın hızı belli bir değere ulaşınca tabandaki bütün danelerin harekete geçmesi gerekcekti. Ancak türbülansın varlığı yüzünden bir danenin hareketi, danenin bulunduğu yer ve zamanda kaldırma kuvvetinin danenin ağırlığını yenme ihtimaline bağlı olmaktadır.

Dolayısıyla burada kayma gerilmesini ihmal ederek onun yerine danelerin harekete geçme ihtimalini kullanan Einstein, yaptığı deneylerde hareketli bir tabanın bazı danelerini boyamış ve bunları gözleyerek danelerin sürekli hareket etmedikleri, hareketli taban ile hareket eden daneler arasında sürekli bir alışveriş olduğu sonucuna varmış ve bu sonuca göre bir bağıntı geliştirmiştir. Daha sonra Brown [13], [31] Einstein'ın bu bağıntısını daha da geliştirerek, birim genişlikten geçen sürüntü maddesi debisini veren ve özellikle iri ve orta daneli malzeme taşıyan, yavaş akımlı akarsular için iyi sonuç veren Einstein - Brown formülünü elde etmiştir. Bu formül:

$$q_b = \phi K [\{g (\gamma_s / \gamma_w) - 1\} D^3]^{0.5} \quad (25)$$

şeklinde ifade edilir. Burada:

$q_b$  : Birim genişlikten geçen sürüntü maddesi debisi ( $m^3/s/m$ ),

$\phi$  : Boyutsuz bir katsayı olup, bu sayı:

$$\phi = 40 [\tau / \{(\gamma_s - \gamma_w) D\}]^{1/3} \quad (26)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

$K$  : Bir katsayı olup, bu sayı:

$$K = [2/3 + (36 v^2) / \{gD^3 (\gamma_s / \gamma_w - 1)\}]^{0.5} - [(36 v^2) / \{gD^3 (\gamma_s / \gamma_w - 1)\}]^{0.5} \quad (27)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Yukarıda incelenen sürüntü maddesi debisi bağıntılarından; Einstein - Brown gerçek değerlerden daha çok, diğerleri ise daha az değerler vermektedirler [16].

### 1.3.7. Toplam Katı Madde Miktarının Hesabı

Toplam katı madde miktarının hesabı için de çok sayıda çalışmalar yapılmış olup, bu çalışmalar sonunda da yine çok sayıda ampirik formül veya bağıntılar geliştirilmiştir. Ancak bu bağıntı ve formüller çok uzun ve karmaşık olduklarından, bu çalışmada toplam katı

madde debisi;  $Q_t$ , askı maddesi,  $Q_a$  ve sürüntü maddesi,  $Q_b$ 'nin toplanması ile ( $Q_t = Q_a + Q_b$ ) ton/gün birimiyle [26] hesaplanacaktır.

Bölüm 1.3.6'da anlatılan hesap ve hesap yöntemleriyle bunlara ait formüller kullanılarak, askı maddesi ve sürüntü maddesi miktarları hesaplanır ve bu ikisi toplanmak suretiyle toplam katı madde miktarı bulunur.

### 1.3.8. Katı Madde Ölçümleri

Toplam katı madde miktarı, askı maddesi miktarı ve sürüntü maddesi miktarından oluştuğuna göre; katı madde ölçümleri de aynı şekilde aşağıda anlatıldığı gibi askı maddesi ölçümü ve sürüntü maddesi ölçümü olmak üzere iki kısma ayrılır. Burada askı maddesinin ölçümü, su içerisindeki katı madde konsantrasyon dağılımının belirlenmesiyle mümkündür.

#### 1) Askı Maddesi Ölçümü ve Konsantrasyon Dağılımı

Akarsularda yüksek akımlarda katı madde taşınım miktarının büyük bir bölümünü askı maddesi teşkil eder. Sürüntü maddesi miktarı, askı maddesi miktarının yanında çok küçük kalır. Toplam katı madde debisinin % 80 - % 90'ını askı maddesi debisi oluşturur [3]. Hatta bazı akarsularda, kanalın daralan bir kesitinde hız ve türbülansın artmasıyla bütün katı madde daneleri askı haline geçer. Böylece toplam katı madde debisinin tamamını askı maddesi debisi oluşturur. Dolayısıyla askı maddesi debisi bilinirse, toplam katı madde debisi yaklaşık olarak bulunabilir. Bu sebeple askı maddesi ölçümleri oldukça önemlidir.

Askı maddesi debisinin hesaplanması konsantrasyonun bilinmesiyle mümkün olduğundan, askı maddesi ölçümleri de doğrudan doğruya su içerisindeki askı maddesi konsantrasyonunun ölçümü ile mümkündür. Akarsularda askı halindeki katı madde, akımın ortalama hızı yardımıyla iletim (konveksiyon) ve konsantrasyonun seyrek olduğu yönde iletim (difüzyon) olmak üzere iki şekilde hareket eder ve konsantrasyon dağılımı da bu esaslara göre hesaplanır ve boyutsal bakımdan konsantrasyon:

- a)  $1 \text{ m}^3$  sudaki askı maddesinin ağırlığı ( $\text{gr}/\text{m}^3$ ),
- b)  $1 \text{ m}^3$  sudaki askı maddesinin hacmi ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ),
- c) Milyonda kısım (ppm).

olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada, konsantrasyonun birimi; milyonda kısım olarak kullanılmaktadır. Konsantrasyon dağılımı için, konsantrasyon profili adı verilen [11] profilin çıkarılması gerekir. Üniform bir akıma sahip iki boyutlu, türbülanslı bir akarsuda konsantrasyon profilini veren bağıntı daha önce Denklem (17)'de  $C/C_a = [(h-z)/z] (a/(h-a))^{\alpha}$  olarak verilmiştir.

Konsantrasyon dağılımı ile ilgili olarak bu bağıntının bütün akarsularda ve tüm şartlarda güvenilir bir sonuç verdiği tam olarak söylenemez. Dolayısıyla konsantrasyon dağılımı için en güvenilir yol; konsantrasyonun bir ölçüm ile bulunmasıdır.

Bu çalışmada, konsantrasyon laboratuvarında kurulan bir düzenek ve bu düzeneğe bağlı olarak geliştirilen bir yöntemle konsantrasyon ölçümü yapılmaktadır. Konsantrasyon ölçümü için akarsudan askı maddesi numunesi almak gerekir. Bu askı maddesi numunesi alımı için kuvvetli karışım olan akım kesitlerini yani nisbeten türbülanslı kesitleri seçmek daha yararlı olur. Ters akımların bulunmadığı kesitlerde askı maddesi yanal dağılımı genellikle üniform olacağından dolayı, akarsu kesiti boyunca 1/4, 1/2, 3/4 noktalarından veya 1/6, 1/2, 5/6 noktalarından geçen düşeyler üzerinde ölçüm yapmak yeterlidir. Bu noktalardan düşey boyunca, su yüksekliğine bağlı olarak 10 ile 20 arasında numune alınması uygundur. Su yüksekliği az olan akarsularda ve sakin zamanlarda bu sayı 10'un altına düşebilir. Bu sebeple, mümkünse numunenin sel zamanlarında alınması daha uygun olur. Bir akarsu kesitinden düşey boyunca numune alımı üç yöntemle yapılır.

- a) Yeterli sayıda noktadan numune alarak konsantrasyon profilini belirlemek,
- b) Belli bir derinlikteki tek bir noktadan numune alıp, askı maddesi miktarını belli bir katsayı ile çarparak belirlemek,
- c) Düşey boyunca entegre edilmiş numune almak.

Bu metodlardan ilk ikisinde noktasal alıcılar, diğerinde ise derinlik boyunca entegre eden alıcılar kullanılmalıdır [3].

Askı maddesi ölçümlerini gerçekleştirmek için genelde derinlik boyunca entegre edilmiş alıcılar kullanılır. Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından US DH - 48 ve US DH - 49 tiplerindeki alıcılar kullanılmaktadır [14].



## 1) Sürüntü Maddesi Ölçümü

Sürüntü maddesi miktarı akarsu yatağında sürekli olarak değiştiğinden, sürüntü maddesinin ölçümü askı maddesi ölçümü kadar kolay değildir. Bu konuyla ilgili olarak bugüne kadar aranan tüm şartları sağlayan bir ölçüm aleti ve metodu henüz tam olarak gerçekleştirilememiştir. Dolayısıyla mevcut olan sürüntü maddesi ölçüm aletleri güvenilir sonuçlar vermezler. Bu aletlerle yapılan sürüntü maddesi ölçüm sonuçları katı madde miktarı hakkında yaklaşık bir fikir verirler [3], [16].

Sürüntü maddesi ölçümleri için geliştirilen aletler genel olarak:

- a) Sepet (kutu) tipi,
- b) Tava (tepsi) tipi,
- c) Delikli (sabit) tip

olmak üzere üç grupta toplanırlar.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Deneyler İçin Akarsu Modeli Oluşturmak

Akarsuların taşıdığı katı madde miktarını veren bağıntılardaki bir takım değerler, ya arazide yapılan ölçümlerle veya laboratuvarında yapılan deneysel çalışmalarla belirlenebilirler. Arazi şartlarının ölçüm için her zaman elverişli olmaması, ekipman eksikliği ve ölçümlerin uzun zaman alması sebebiyle bu değerlerin arazide ölçümleri çoğu zaman imkansız hale gelir. Bu nedenle bu değerlerin laboratuvarında çeşitli deneysel çalışmalarla ölçülmesi yoluna gidilir. Laboratuvarında yapılacak deneyler için de, herhangi bir akarsu modelinin laboratuvarında kurulması gerekir.

Ancak bir model geliştirilirken model kurmanın teknik ve şartlarının bilinmesi gerekir. Akarsu hidroliğinde çok sayıda model tipi vardır. Bu model tiplerinde kullanılan model teknikleri de birbirinden farklıdır. Bu farklılıklar akımın hidrolik ve hidrolojik özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

### 2.2. Model Teorisi ve Benzeşim

Tabiattaki herhangi bir fiziksel olayın (örneğin herhangi bir akarsuya ait akımın) laboratuvarında bir benzerinin yapılmasına, *fiziksel model* veya kısaca *model* adı verilir. Bir modelin temsil ettiği tabiattaki olaya ise *prototip* denilir. Modeller distorsiyonlu ve distorsiyonsuz olmak üzere iki şekilde oluşturulurlar.

Bir nehir, halıç veya akarsuyun uzunluk, derinlik ve genişlik oranları büyük değilse bu durumda her üç büyüklük içinde tek bir model ölçeği kullanılabilir ki, bu tip modellere *distorsiyonsuz modeller* denilir. Ancak; bir nehir, halıç veya akarsuyun uzunluk, derinlik ve genişlik oranları çok büyük ise bu durumda uzunluk, derinlik ve genişlik için birbirinden farklı model ölçekleri alınabilir ki, bu tip modellere de *distorsiyonlu modeller* denilir [7].

Bir model oluşturulurken, model ile prototip arasında:

a) Geometrik,

- b) Kinematik,
- c) Dinamik

olmak üzere üç ayrı benzeşimin sağlanması gerekir [8].

### 2.2.1. Geometrik Benzeşim

Bir modelde herhangi bir uzunluğun prototipteki karşılığı olan uzunluğa oranı, model ile prototipin tüm karşılıklı uzunluklarının oranı ile aynı (sabit) değere sahip ise bu iki sistem birbirine geometrik olarak benzerdir denilir ve bu benzeşim:

$$L_m / L_p = L_r \quad (28)$$

şeklinde bir bağıntı ile ifade edilir. Burada:

- $L_m$  : Modeldeki herhangi bir uzunluk (m),
- $L_p$  : Modeldeki uzunluğa karşılık gelen prototipteki uzunluk (m),
- $L_r$  : Uzunluk ölçeği olup, 1/10, 1/20, 1/30, 1/50 gibi değerler alır.

### 2.2.2. Kinematik Benzeşim

Akışkanlar mekaniğinde sebebi ne olursa olsun hareketin analizi kinematik olarak adlandırılır. Dolayısıyla kinematik benzer hareketleri ilgilendirir. Bir modeldeki hızın prototipteki hıza oranı bütün benzer noktalarda aynı değere sahipse bu iki sistem kinematik olarak benzerdir denilir ve bu benzeşim:

$$V_m / V_p = V_r \quad \text{veya} \quad L_r / T_r = V_r \quad (29)$$

şeklinde bağıntılarla ifade edilir. Burada:

- $V_m$  : Modeldeki herhangi bir noktaya ait hız (m/s),
- $V_p$  : Modeldeki bu noktaya karşılık gelen, prototipteki noktaya ait hız (m/s),
- $V_r$  : Hız ölçeği,
- $L_r$  : Uzunluk ölçeği,
- $T_r$  : Zaman ölçeği.

### 2.2.3. Dinamik Benzeşim

Eğer bir model prototiple geometrik ve kinematik yönden benzer ise bu iki sistem dinamik yönden de benzerdir. Dinamik benzerlik kuvvetlerle ilgilidir. Geometrik ve kinematik olarak benzer olan iki sistem içerisinde birbirine karşılık gelen noktalara etki eden muhtelif kuvvetler (atalet kuvveti dahil) arasındaki oran daima sabit bir değere sahip ise bu iki sistem dinamik yönden benzerdir denilir ve bu benzeşim:

$$F_m / F_p = F_r \quad (30)$$

şeklinde bir bağıntı ile ifade edilir. Burada:

$F_m$  : Modelde herhangi bir noktaya etki eden herhangi bir kuvvet (kg),

$F_p$  : Modeldeki kuvvete karşılık gelen, prototipteki kuvvet (kg),

$F_r$  : Kuvvet ölçeği.

Ancak, bu benzeşimlerin sağlanabilmesi için benzerlik koşullarının bilinmesi gerekir.

### 2.3. Benzerlik Koşulları

Bir modelde ölçülen değerlerin prototipe, benzer şekilde bir prototipte ölçülen değerlerin de modele aktarılabilmesi gerekir. Bu şekilde modelden prototipe, prototipten modele geçiş için benzerlik koşullarına ihtiyaç vardır [18]. Benzerlik koşulları ise;

- a) Dinamik yöntem,
- b) Diferansiyel denklem yöntemi veya
- c) Boyut analizi

yöntemlerinden herhangi biri ile sağlanır. Akarsu hidroliğinde daha elverişli olduğu için bu yöntemlerden genellikle boyut analizi yöntemi kullanılır.

## 2.4. Boyut Analizi

Matematiksel bir ifade olan boyut analizi, olaya etki eden parametrelerden meydana gelmiş olan boyutsuz sayılar arasında bir ilişki kurulması olarak tanımlanır. Bir olaya etki eden çok sayıda değişken arasında tek tek bir bağıntı aranacağına, boyut analizi ile daha az sayıda boyutsuz sayıyı kapsayan bir denklem kurulur.

Boyut analizi ile elde edilen denklem sadece bu denklemde bulunacak boyutsuz sayılar arasındaki bağıntının genel şeklini verir. Denklem tam tespiti ise deneysel olarak yapılır. Bir hidrolik olaya etki eden çeşitli fiziksel büyüklüklerin herbiri ayrı ayrı göz önüne alınarak, etkileri deneysel yoldan incelenecek olursa bu hem çok uzun hem de yorucu bir çalışma olur. Halbuki boyut analizi olaya etki eden faktörlerin nasıl bir fonksiyonla ilişkili olduklarını ortaya koyarak, aradaki ilişki katsayısının bulunması için sistematik bir çalışma ve en az sayıda deney yapma imkanı sağlar.

Katı madde debisinin tespitinde, yapılacak hesapları kolaylaştırmak için boyut analizinin yapılması gerekir. Mekanikte bütün olaylar Newton hareket kanununa göre incelendiğinden; akışkanlar mekaniğindeki herhangi bir büyüklük de Newton hareket kanunundaki “temel büyüklüklere” bağlı olarak ifade edilebilir [27]. Bu temel büyüklükler:

- a) Kuvvet (K), Uzunluk (L) ve Zaman (T),
- b) Kütle (M), Uzunluk (L) ve Zaman (T) şeklindedir.

Akışkanlar mekaniğinde boyut analizi yapılırken genelde K,L,T temel büyüklükleri kullanılır. Seçilen bu temel büyüklüklerin boyutlarına da “temel boyutlar” denilir. Örnek olarak herhangi bir {A}, büyüklüğü temel boyutlar cinsinden:

$$\{A\} = K^a L^b T^c \quad (31)$$

şeklinde bir bağıntı ile ifade edilebilir. Burada:

- a, b ve c değerleri  $+\infty$  ile  $-\infty$  arasında tam sayılar veya sıfır olabilir.

Böylece herhangi bir büyüklüğün boyutu bu büyüklüğün tanımından elde edilebilir.

Örnek olarak; özgül ağırlığın ( $\gamma$ ) boyutu:

$$\{\gamma\} = \{\text{ağırlık} / \text{hacim}\} = \text{kg} / \text{m}^3 = \text{K} / \text{L}^3 = \text{K} \text{ L}^{-3} \quad (32)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bir büyüklüğün boyutunu veren Eşitlik (31)'de;  $a = b = c = 0$  ise böyle bir büyüklüğe boyutsuz büyüklük denilir. Boyutsuz büyüklüklerin sahip olduğu sayısal değerler kullanılan birim sisteminden bağımsızdır. İşte bu kolaylık sebebiyle, içerisinde çok karmaşık ifadelerin bulunduğu akışkanlar mekaniğinde boyut analizi yapılarak; büyüklükler kullanılan birim sisteminden bağımsız olarak aynı cinsten ifade edilirler. Boyut analizi yapılırken, kullanılan terimlerin boyutlarının aynı olması şartı sağlanmalıdır. Bu duruma "boyut homojenliği" denilir. Ancak hidrolikte kullanılan bütün ampirik formüller boyut analizi şartını sağlamazlar. Böyle bir durumda ise farklı bir yol izlenir. Hidrolik olaylarda boyut analizinin uygulanmasına ilişkin iki metod vardır [28]. Bunlar:

- a) Pi teoremi (Buckingham),
- b) Rayleigh metodu.

Ancak hidrolikte özellikle model çalışması yapılırken uygulanması daha kolay olduğu için çoğunlukla, "Pi teoremi" yada "Buckingham" adı verilen metod tercih edilir. Pi teoremi,  $n$  adet boyutlu  $A_i$  büyüklüğüne ait  $f(A_1, A_2, \dots, A_n) = 0$  şeklinde bir fonksiyonu ifade eder ve bu fonksiyonda daima  $m = n - r$  ( $r$ :  $A_i$  büyüklüklerinde bulunan temel boyutların sayısıdır ve  $r \leq 3$  şeklindedir.) adet boyutsuz  $\pi_i$  değerleri Pi teoremine göre:

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0 \quad (33)$$

şeklinde bir bağıntı haline dönüştürülebilir ve buradan  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m$  büyüklükleri:

$$\pi_1 = A_1^{x_1} A_2^{y_1} A_3^{z_1} \quad (34)$$

$$\pi_2 = A_1^{x_2} A_2^{y_2} A_3^{z_2} \quad (35)$$

$$\pi_3 = A_1^{x_3} A_2^{y_3} A_3^{z_3} \quad (36)$$

$$\pi_m = A_1^{x_m} A_2^{y_m} A_3^{z_m} \quad (37)$$

şeklindeki denklemlerle hesaplanır. Bu denklemlerdeki;  $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, \dots, z_m$  öyle bir şekilde belirlenirki,  $\pi_i$  büyüklükleri gerçekten boyutsuz olsunlar. Böylece elde edilen  $\pi_i$  boyutsuz büyüklükleri Denklem (33)'de yerine konularak kolayca kullanılabilir hale gelirler.

## 2.5. Boyut Analizinin Uygulanması

Hidrolik modellerde karmaşık ifadelerin daha kolay ve anlaşılır bir şekle dönüştürülebilmesi için olaya etki eden çok sayıdaki boyutlu değişkenin boyutsuz olarak ifade edilebilmesi amacıyla yapılan boyut analizinde, daha kolay olması sebebiyle  $\pi$  teoreminin daha çok tercih edildiği Bölüm 2.4'de belirtilmişti. Dolayısıyla burada,  $\pi$  teoremini kullanarak katı madde taşınımı ile ilgili boyutsuz katsayılar bulunacaktır.

Katı madde taşınım miktarının büyük bir kısmını askı maddesinin oluşturduğu, askı maddesinin de katı madde konsantrasyonuna bağlı olduğu literatür taramasından bilinmektedir. Konsantrasyonun da dane çökme hızına bağlı olduğu bilindiğine ve bu tezde akımın debisi ( $Q_w$ ), akarsu yatak eğimi ( $J$ ) ve dane çapı ( $D$ ) bağımsız değişkenler olarak seçildiğine göre: Burada  $Q_t = f(Q_w)$  ve  $Q_t = f(w)$  şeklinde ifadeler elde edilir ve buradan da

$$w = f(v, g, D, h, \nu) \quad (38)$$

şeklinde bir fonksiyonel bağıntı elde edilir. Burada:

- $w$  : Katı maddenin dane çökme hızı (m/s),
- $v$  : Akımın hızı (m/s),
- $g$  : Yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ ),
- $D$  : Katı maddenin ortalama dane çapı (mm),
- $h$  : Su derinliği (m),
- $\nu$  : Suyun kinematik viskozitesi ( $m^2/s$ ).

Boyut analizinde kullanılan ve üç temel büyüklük olarak kabul edilen; kuvvet (K), uzunluk (L) ve zaman (T) dikkate alındığında  $\pi$  teoremi ile katı madde taşınımıyla ilgili boyutsuz katsayıların bulunması aşağıdaki gibi olur (Tablo 1).

Tablo 1.  $\pi$  teoreminin uygulanışını gösteren tablo

	v	g	D	h	w	v
K	0	0	0	0	0	0
L	1	1	1	1	1	2
T	-1	-2	0	0	-1	-1
	a	b	c	1	1	1

Denklem (38)'de verilen fonksiyonel bağıntıdaki değişkenlerden v, g, D bilinen büyüklükler, h, w, v ise hesaplanacak büyüklükler olarak kabul edilirse; K, L, T temel büyüklükleri aranır ve bu temel büyüklüklerin bu değişkenler içerisinde var olan değeri o değişkenin altına yazılır. Burada üç tane büyüklük hesaplanacağına göre h için  $\pi_1$ , w için  $\pi_2$  ve v için  $\pi_3$  olmak üzere üç ayrı denklem olmalıdır. Buna göre  $\pi$  teoreminden h için  $\pi_1 = h v^a g^b D^c$  şeklinde ifade edilir ve

$$L, \text{ satırı için : } a + b + c + 1 = 0 \quad (39)$$

$$T, \text{ satırı için : } -a - 2b + 0 + 0 = 0 \quad (40)$$

şeklinde iki ayrı denklem yazılır ve bu denklemler çözüldüğünde  $a = -4$ ,  $b = 2$ ,  $c = 1$  olarak bulunur ve buradan

$$\pi_1 = (h g^2 D) / v^4 \quad (41)$$

şeklinde boyutsuz bir ifadeye dönüşür. Aynı şekilde:

$$\pi_2 = (w g D) / v^3 \quad (42)$$

$$\pi_3 = (v g^2 D) / v^5 \quad (43)$$

şeklinde boyutsuz ifadeler olarak bulunurlar.  $\pi$  teoremine göre  $F = (\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0$  olduğu Denklem (33)'de belirtilmişti. Buna göre dane çökme hızını veren ifade  $\pi_2 = f_1(\pi_1, \pi_3)$  şekline dönüşür ve  $\pi_1$ ,  $\pi_2$ ,  $\pi_3$ 'e ait değerler Denklem (41) - Denklem (43)'de yerine yazılarak düzenlendiğinde dane çökme hızı:



$$w = f_1 (h g / v, v g / v^2) \quad (44)$$

şeklinde fonksiyonel bir bağıntıya dönüştür.

Katı madde taşınımında en etkin parametrenin akımın debisi ( $Q_w$ ) olduğu literatür taramasından bilindiğine göre; yukarıda verilen  $\pi$  teoremi uygulaması benzer şekilde akımın debisi olarak ifade edilen  $Q_w$  da uygulandığında, katı madde taşınımında en etkin parametre olan  $Q_w$ 'in formülü aşağıdaki gibi elde edilir.

Tüm kesitten geçen akımın debisi ( $Q_w$ ), birim genişlikten geçen akımın debisi ( $q_w$ )'a ve akarsu su yüzü genişliğine bağlı olarak;  $Q_w = q_w B$  şeklinde ifade edildiği ve birim genişlikten geçen akımın debisi  $q_w$ 'in da su derinliği ( $h$ ) ve yerçekimi ivmesi ( $g$ )'ye bağlı olarak değiştiği bilindiğine göre, Tablo 1'de verilen  $\pi$  teoremi uygulamasında olduğu gibi:

	h	g	$q_w$
L	1	1	2
T	0	-2	-1
	a	b	1

Şeklinde yazılır ve burada; su derinliği ( $h$ ) ölçülebileceğinden, yerçekimi ivmesi ( $g$ ) ise bilindiğinden dolayı bunlar bilinen temel büyüklükler olarak alınır. Dolayısıyla birim genişlikten geçen akımın debisi ( $q_w$ )  $\pi$  teoremine göre:

$$\pi = q_w h^a g^b \quad (45)$$

L ve T satırlarındaki a, b Denklem (39) ve Denklem (40)'de olduğu gibi çözüldüğünde,  $a = -1.5$  ve  $b = -0.5$  olarak bulunur. Bulunan bu değerler ve  $q_w = Q_w / B$  Denklem (45)'de yerine yazıldığında:

$$\pi = (Q_w / B) (h^{-1.5} g^{-0.5}) = Q_w / (B h^{1.5} g^{0.5}) = Q_w / (B h \sqrt{h g}) \quad (46)$$

şeklinde boyutsuz bir ifade elde edilir ve bu denklemden akımın debisi  $Q_w$  çözüldüğünde:

$$Q_w = \pi B h \sqrt{h g} \quad (47)$$

şeklinde bir bağıntıya dönüştür ve bu bağıntı akımın debisini ifade eder. Böylece akarsularda katı madde taşınımı ile ilgili bütün parametreler, yukarıda bir uygulaması verilen  $\pi$  teoremi yöntemi ile boyut analizine tabii tutularak, boyutsuz sayılar halinde ifade edilebilirler.

## 2.6. Model Teorisinde Ençok Kullanılan Boyutsuz Sayılar

Hidrolik modellerde, prototipteki değerleri mümkün olduğunca en iyi şekilde temsil edecek olan fiziksel bir modelin laboratuvarında oluşturulmasında, olaya etkisi olduğu bilinen parametrelerin dikkate alındığı model teorisinde ençok kullanılan [23] boyutsuz katsayılar:

- a) Froude katsayısı (Fr),
- b) Reynolds katsayısı (Re),
- c) Weber sayısı (W),
- d) Euler sayısı (Eu),
- e) Mach ya da Cauchy sayısı (C)

olmak üzere beş grupta toplanırlar.

Bu boyutsuz katsayılardan; Froude sayısı serbest yüzeyli akımlar için, Reynolds sayısı ise basınçlı akımlar için geçerlidir.  $Fr > 1$  ise akım sel rejmi,  $Fr < 1$  ise akım nehir rejmi olarak adlandırılır. Bu çalışmada; söz konusu olan akım serbest yüzeyli olduğundan Froude sayısı kullanılmaktadır. Froude sayısı, atalet kuvvetlerinin ağırlık kuvvetlerine oranını ifade eder ve bu sayı:

$$Fr = v / \sqrt{g L} \quad (48)$$

şeklinde bir formül ile ifade edilir. Burada:

Fr: Froude katsayısı,

v : Akımın hızı (m/s),

g : Yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ ),

L : Uzunluk boyutu (m) olup, bu çalışmada; uzunluk boyutu olarak akımın su yüksekliği (h) kullanılmaktadır. Dolayısıyla, Froude sayısını ifade eden Denklem (48):

$$Fr = v / \sqrt{g h} \quad (49)$$

şekline dönüşür. Burada:

h : Akımın su derinliğini ifade eder.

Froude sayısı kullanılarak bu çalışmadaki deneylerde kullanılan bazı parametreler aşağıda hesaplanmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Deneylerde kullanılan bazı parametrelerin Froude sayısına göre hesabı

Debi (m <sup>3</sup> /s)	Hız (m/s)	Su derinliği (m)	$Fr = v / \sqrt{g h}$
0.00133	0.0016	0.04	0.025
0.002	0.0017	0.06	0.022
0.00336	0.022	0.075	0.025
0.00506	0.025	0.10	0.025
0.00759	0.030	0.125	0.027

## 2.7. Model Ölçeğinin Belirlenmesi

Bu çalışmada kullanılan akarsu modelinin ölçeği; laboratuvar fiziki şartlarına ve yapılacak olan model ölçülerinin deneylerde kullanılacak olan parametrelerin elde edilebilmesi şartlarına bağlı olarak seçilmiştir.

Bunun için deneylerde kullanılmak üzere seçilen; malzemelerin ortalama dane çapının, akarsu taban eğimlerinin ve debilerin kolaylıkla elde edebilmesi için Doğu Karadeniz Bölgesi'ndeki bazı akarsuların hidrolik ve hidrolojik özellikleri gözden geçirilerek bu akarsuların menba ve mansapları arasında, katı madde taşınımındaki doğal dengenin bozulmadığı kısımlar yaklaşık olarak tespit edilmiş ve model ölçeğinin bu kısımlardaki; akarsu yatak genişliği (B), akımın en küçük, enbüyük ve ortalama debisi ( $Q_w$ ), su derinliği (h), akarsu taban eğimi (J) ve ortalama dane çapı ( $D_{50}$ ) gibi katı madde taşınımında önemli bazı parametreleri modelde kolaylıkla elde edebilecek özellikte olmasına özen gösterilmiştir.

Bu sebeple model ölçeği akarsu modelindeki akımın serbest yüzeyli akım olduğu ve dolayısıyla Froude sayısının kullanıldığı da dikkate alınarak; akarsu yatağına suyu ileten ve "Tip 280" olarak bilinen 60 m uzunluğundaki ayaklı kanalın akarsu yatağına sağlayabileceği en küçük ve enbüyük debiler tespit edilerek; bu debilere cevap verebilecek, katı madde taşınımı ile ilgili parametreleri elde edebilecek ve aynı zamanda prototiple benzerlik

sağlayacak bir büyüklükte olması koşuluyla Denklem (28)'de verilen ve model ölçeği olarak tanımlanan  $L_r$  :

$L_r = L_m / L_p = 1 / 30$  olarak seçilmiş ve deneylerde kullanılan diğer büyüklükler de bu ölçek nisbetinde, Froude sayısına göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

a) Hız ölçeği ( $v_r$ ) :

$$v_r = (L_r)^{x+2y+z/2} \quad (50)$$

şeklinde ifade edilir ve hızın boyutu üç temel büyüklüğe (K L T) göre:

$$\{v\} = m / s = L / T \quad (51)$$

şeklinde ifade edileceğinden:

$$v_r = L^1 M^0 T^{-1} \quad (52)$$

şeklinde ifade edilir ve Denklem (50)'de bulunan  $x, y, z$  değerleri  $x = 1, y = 0$  ve  $z = -1$  olarak bulunur. Dolayısıyla denklem 50'den hız ölçeği,  $v_r$  :

$$v_r = (L_r)^{1/2} = (1/30)^{1/2} = 0.182 \quad (53)$$

şeklinde hesaplanır.

b) Zaman ölçeği ( $T_r$ ) :

$$T_r = (L_r)^{x+2y+z/2} \quad (54)$$

şeklinde ifade edilir ve zamanın boyutu üç temel büyüklüğe (K L T) göre:

$$\{T\} = s = T \quad (55)$$

şeklinde ifade edileceğinden:

$$T_r = L^0 M^0 T^{-1} \quad (56)$$

şeklinde ifade edilir ve Denklem (54)'de bulunan  $x, y, z$  değerleri  $x = 0, y = 0$  ve  $z = +1$  olarak bulunur. Dolayısıyla Denklem (54)'den zaman ölçeği,  $T_r$  :

$$T_r = (L_r)^{1/2} = (1/30)^{1/2} = 0.182 \quad (57)$$

şeklinde hesaplanır.

c) Alan ölçeği ( $A_r$ ) :

$$A_r = (L_r)^{x+2y+z/2} \quad (58)$$

şeklinde ifade edilir ve alanın boyutu üç temel büyüklüğe (K L T) göre:

$$\{A\} = m^2 = L^2 \quad (59)$$

şeklinde ifade edileceğinden:

$$A_r = L^2 M^0 T^0 \quad (60)$$

şeklinde ifade edilir ve Denklem (58)'de bulunan  $x, y, z$  değerleri  $x = 2, y = 0$  ve  $z = 0$  olarak bulunur. Dolayısıyla Denklem (58)'den alan ölçeği,  $A_r$  :

$$A_r = (L_r)^2 = (1/30)^2 = 0.00111 \quad (61)$$

şeklinde hesaplanır.

d) Debi ölçeği ( $Q_r$ ) :

$$Q_r = (L_r)^{x+2y+z/2} \quad (62)$$

şeklinde ifade edilir ve debinin boyutu üç temel büyüklüğe (K L T) göre:

$$\{Q\} = m^3 / s = L^3 / T \quad (63)$$

şeklinde ifade edileceğinden:

$$Q_r = L^3 M^0 T^{-1} \quad (64)$$

şeklinde ifade edilir ve Denklem (62)'de bulunan x, y, z değerleri  $x = 3$ ,  $y = 0$  ve  $z = -1$  olarak bulunur. Dolayısıyla Denklem (62)'den debi ölçüğü,  $Q_r$  :

$$Q_r = (L_r)^{5/2} = (1/30)^{5/2} = 0.000203 \quad (65)$$

şeklinde hesaplanır.

## 2.8. Deney Koşulları

Akarsuların taşıdığı katı madde miktarının hesaplanmasına ilişkin çok sayıda bağıntı bulunmakta ve bu bağıntılar olayda kullanılan parametrelerin çok fazla olması sebebiyle aynı akarsu için bile, çok farklı sonuçlar vermektedir. Bu durum ise gerçekteki katı madde miktarının belirlenmesinde bazı zorluklar oluşturmaktadır. Bu sebeple, katı madde taşınım miktarının hesabında gerçeğe daha yakın sonuçlara ulaşabilme düşüncesinin mümkünse daha geniş bir alana yayılarak gerçekleştirilmesi için deneysel çalışmaların yapılması zorunlu olmaktadır. Dolayısıyla bu amaca uygun bir deney düzeninin kurulması gerekir. Olaya etki eden parametrelerle birlikte katı madde miktarı konusu irdelenirken, yapılacak değerlendirmeleri kolaylaştırmak için deneylerle ilgili olarak aşağıda belirtilen kabuller yapılmaktadır.

a) Deneyler süresince akışkanın sıcaklığının sabit kaldığı ve viskozitesinin değişmediği kabul edilmektedir.

b) Deneylerde kullanılan karışımdaki danelerin hepsinin kum ve çakıldan meydana geldiği kabul edilerek, bu karışımlar üzerinde yapılan indeks özellikler etüdüleri sonucunda; danelerin ortalama birim hacim ağırlığının  $2.65 \text{ gr/cm}^3$  olduğu tespit edilerek, bu değer de deneylerde kullanılan bütün karışımlar için değişmediği kabul edilmektedir.

c) Aynı cins malzeme kullanıldığından dane şeklinin olaya etki etmediği kabul edilmektedir.

d) Modeli kurulan akarsuyun, kesitinin ve havza ile ilgili parametrelerinin herbir deney süresince değişmediği kabul edilmektedir.

Bu kabullerle birlikte yapılan deneylerin daha güvenli sonuçlar vermesi için aşağıdaki koşulların da mutlaka sağlanması gerekmektedir.

i) Deneyler süresince akarsu tabanı, mümkün olduğunca doğal bir görünüme yakın ve akarsu kesiti kabul edilen kesite yakın bir konumda tutulmalıdır.

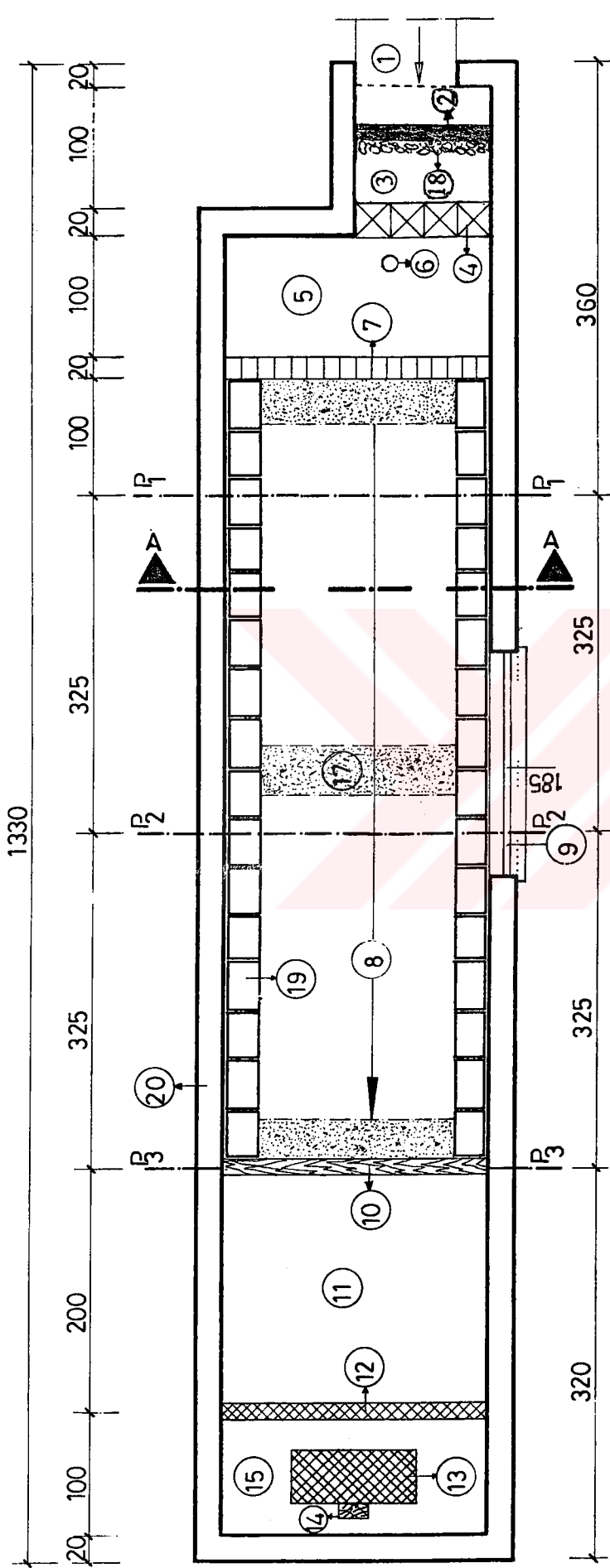
ii) Her deneyin kendi süresi içerisinde akım şartları sabit kalmalıdır.

iii) Deneyler süresince akarsu yatağında devamlı olarak bir malzeme sirkülasyonu olmalı ve her deney sonunda taşınan katı madde miktarı kadar aynı granülometredeki malzeme ile yatak beslenmelidir.

## 2.9. Deney Düzeni

Bu tez çalışmalarının amacına ulaşabilmek için yukarıda Bölüm 2.8'de açıklanan şartlara uygun olarak K.T.Ü. MM F. İnşaat Bölümü Hidrolik Anabilim Dalı, Hidrolik laboratuvarında bir akarsu modeli inşa edilmiştir (Şekil 7), (Şekil 8).

Deneyler, 12.10 m uzunluğunda, 2.40 m genişliğinde ve 75 cm yüksekliğinde sabit tabanlı bir kanalda yapılmıştır. İnşa edilen akarsu modelinde, malzemenin bulunduğu ve üzerinden akım geçen yatağın uzunluğu 7.5 m, genişliği 2 m, yataktaki malzeme yüksekliğini kolaylıkla ayarlamak için model çevresini oluşturan duvarın yüksekliği 75 cm olup, bu duvarın boylamasına olan ön kısmına akarsu yatağının tabanından itibaren; akım yüksekliğini, akım şeklini, malzeme yüksekliğini, malzeme hareketini izlemek ve deneylerin kontrollü bir biçimde yürütülmesini sağlamak için 185 cm uzunluğunda ve 50 cm yüksekliğinde bir pleksiglas levha konulmuştur. Akarsu modeline ait duvarlar 20 cm kalınlığında çimento harçlı kagir malzeme ile yapılarak, duvarların bütün yüzeyleri sızdırmaz bir şekilde sika karışımı takviyeli harçla sıvandıktan sonra hem pleksiglas levhanın etrafına hem de duvarların zeminle birleşen tüm çevresine silikon çekilmiştir. Laboratuvar şartlarında deney yapılması için inşa edilen bu akarsu modeline suyun verilmesi (temini) ve verilen suyun model üzerindeki sirkülasyonu ise şöyledir :



- 1 "Tip 280"luk Kanal
- 2 Sönümlenme Eşiği
- 3 Sönümlenme Havuzu
- 4 İnce Tel Perde
- 5 Menba Dolu Savağı
- 6 Menba Dip Savağı
- 7 Denge Eşiği
- 8 Akarsu Yatağı
- 9 Pleksiglas
- 10 Mansap Eşiği

- 11 Kum Toplama Havuzu
- 12 İri Gözenekli Tel Süzgeç
- 13 15 cm Yükseklikteki Tel Süzgeç
- 14 5x5 cm'lik Çökeltim Havuzu Tahliye Süzgeci
- 15 Çökeltim Havuzu
- 16 P<sub>1</sub>-P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>-P<sub>3</sub> Numune Alınan Kesitler
- 17 Yatak Malzemesi ( Kum)
- 18 Moloz Taş
- 19 Akarsu Yatağında Sedde Görevi Yapan 30cm'lik Biriketler
- 20 20 cm'lik Sızdırmaz Olarak Sıvalı Duvar

Ölçek: 1/50

Şekil 7. Deneysel çalışmanın yapıldığı akarsu modelinin planı

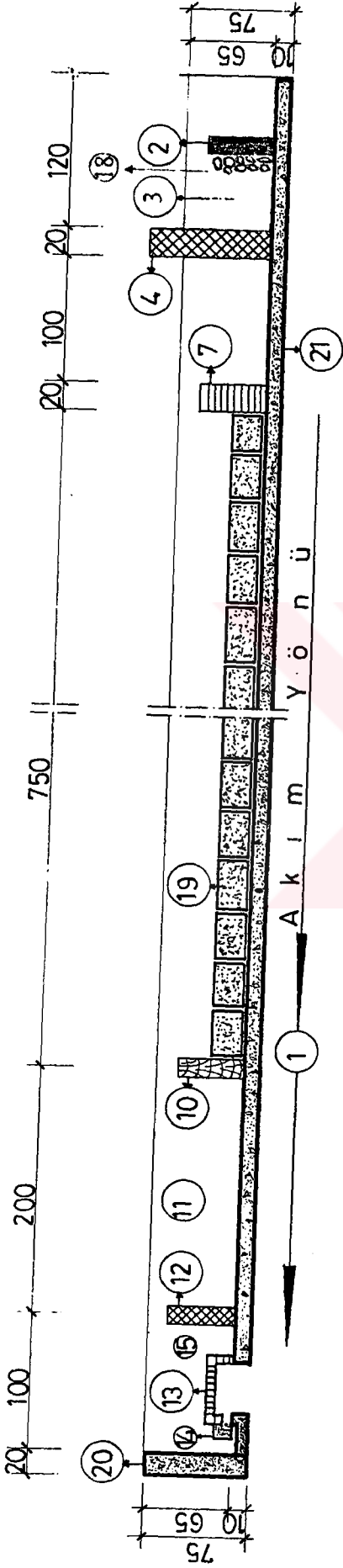


Suyu şehir şebekesinden temin edilen ve laboratuvar dışında inşa edilmiş olan 2000 tonluk betonarme gömme depodan, laboratuvar pompa dairesine yerleştirilmiş olan dört adet pompadan bir veya birkaçının çalıştırılmasıyla alınan su, laboratuvar çatı katında bulunan ve galvanizli saçtan yapılmış olan 200 tonluk tali depoya gönderilmekte ve buradan da cazibe ile borulara gelen su bir ana tevkif vanası yardımı ile anahtar eğrisi ( $Q = f\{h\}$ ) belirlenmiş ve ayaklı olarak inşa edilmiş olan 60 m uzunluğundaki “ Tip 280 ” olarak adlandırılan betonarme kanalın menba kısmına gelir ve buradan da bir vana yardımıyla kontrollü bir şekilde kanala verilmektedir.

Kanalın mansap tarafındaki uç kısmına belli su yüksekliklerine karşılık gelen debiler kalibre edilerek yerleri çıkmaz boya ile işaretlenmiştir. Suyun anahtar eğrisine göre istenilen debiye ayarlanması ise, kanalın menba kısmında bulunan ve kanala su veren vananın belli sayıda tur attırılması ile yapılmaktadır. Her deney sonunda gerekli ölçümleri almak ve yatak eğimini istenilen eğime ayarlamak için kanaldan suyun kesilmesi gerekmektedir. Bu işlem ise; yine kanalın menba tarafına konulmuş ve bağlantısı dışardaki 2000 tonluk ana depoya giden kanallara yapılmış olan bir tahliye vanası yardımı ile gerçekleştirilir.

Betonarme ayaklı kanaldan gelen su ilk olarak akarsuyun menba tarafında bulunan sönmüleme havuzuna dökülür. Burada sönmülenerek enerjisi kırılan su, ana depodan gelebilecek yabancı maddeleri süzmek amacı ile ince bir tel süzgeçten geçirilerek akarsu modelinin menba dolu savağına gelir. Dolu savaktan geçerek denge eşiğine ulaşan su denge eşiğinden aşarak akarsu yatağına gelir ve burada deney süresince akım devam eder.

Akarsu yatağındaki su, sürüklediği veya askı halinde taşıdığı katı maddelerle birlikte ilk olarak akarsuyun mansap kısmında bulunan kum toplama havuzuna ulaşır ve burada türbülansın etkisini de kaybettikten sonra sürükleyerek taşıdığı iri daneli malzemeleri havuzda bırakmak amacıyla iri gözenekli bir tel süzgeçten geçirilerek çökeltim havuzuna ulaşır. Konsantrasyon ve askı halinde taşıdığı danelerin haricindeki ince daneleri bu havuzda bırakan su, çökeltim havuzunun tabanından itibaren 15 cm yükseklikte, dört kat olarak yapılan ve göz açıklığı 1 mm olan 50 x 100 cm ebadındaki ince bir tel süzgeçten geçerek ana depoya giden kanala akar. Çökeltim havuzundaki ince süzgecin üst seviyesinden aşağıda kalan su ise bu süzgecin taban kısmına düşey olarak yerleştirilen ve yine göz açıklığı 1 mm olan dört kat olarak yapılan 5 x 5 cm ebadındaki mini bir süzgeçten geçerek aynı kanala gider (Şekil 8).



- 1 Akım Yönü
- 2 Sönümlenme Eşiği, 3-Sönümlenme Havuzu
- 4 İnce Tel Perde
- 7 Denge Eşiği
- 10 Mansap Eşiği
- 11 Kum Toplama Havuzu
- 12 İri Gözenekli Tel Süzgeç
- 13 15 cm Yükseklikteki Tel Süzgeç
- 14 5x5 cm'lik Çökeltim Havuzu Tahliye Süzgeci
- 15 Çökeltim Havuzu
- 18 Moloz Taş
- 19 Akarsu Yatağında Sedde Görevi Yapan 30cm'lik Birikmeler
- 20 20 cm'lik Sızdırmaz Sıvalı Duvar
- 21 10 cm'lik Grobeton

Şekil 8. Deneysel çalışmanın yapıldığı akarsu modeline ait boykesit

Akarsu yatağından su kesilmek istendiğinde ise, doğrudan doğruya ya kanala su veren vana kapatılır ya da akarsuyun menba kısmındaki dolu savağın tabanında bulunan dip savağın tıpası açılarak su ana depoya bağlı kanallara verilir. Tüm deney serilerinde bu sirkülasyon ve özellikler değişmeden devam eder.

## 2.10. Deney Programı

Deney programı hazırlanırken akarsularda katı madde taşınımına etkisi olduğu kabul edilen bütün parametrelerin, bu etkilerinin göz önünde tutulmasına özen gösterilmiştir. Katı madde taşınımı ile ilgili parametrelerin modelde kolaylıkla elde edilebilmesi ve aynı zamanda prototiple benzerlik gösterebilmesi için kurulan modelin fiziksel özellikleri de dikkate alınarak, deneylerde ortalama dane çapı 1.1 mm, 0.9 mm ve 0.8 mm olan üç ayrı malzeme 0.008 ile 0.015 arasında değişen dört ayrı eğim, prototipte  $6.56 \text{ m}^3/\text{s}$  ile  $37.41 \text{ m}^3/\text{s}$ 'ye karşılık gelen ve 1.33 lt/s ile 7.59 lt/s arasında değişen beş ayrı debi kullanılmıştır. Bir malzeme için herbir eğimde beş ayrı debi için ayrı ayrı deneyler yapılmış olup, katı madde taşınım miktarlarının aynı aralıklarda hesaplanmasını sağlamak için de bir deney süresi tüm deney serilerinde sabit tutulmuş ve prototipte 11 saate karşılık gelen yaklaşık 120 dakika olarak tespit edilmiştir. Bu sürenin tespitine şu şekilde karar verilmiştir:

Çeşitli zaman aralıkları (30, 60, 90 ve 120 dakika) için ön hazırlık deneyleri yapılmış ve bu deneyler sonunda yaklaşık olarak 120 dakika sonra akarsu yatağında katı madde hareketinin sona erdiği ve yatakta herhangi bir değişikliğin olmadığı gözlenmiş buna göre yapılacak olan diğer deney serileri için deney süresi yaklaşık 120 dakika olarak belirlendi.

Bir malzemede seçilen bir eğime ait tüm debiler için deneyler yapıldıktan sonra o malzemede o eğim için deney serisi tamamlanmış olup, o malzemede ikinci seri deney için akarsu taban eğimi, seçilen bir diğer eğime nivelman yapılarak ayarlanmıştır. Deney serileri bu şekilde devam ederek, seçilen bütün malzemeler için aynı deney serileri tekrarlanmıştır. Bu çalışmada, değerlendirilmeye tabii tutulmak üzere 60 adet deney yapılmıştır.

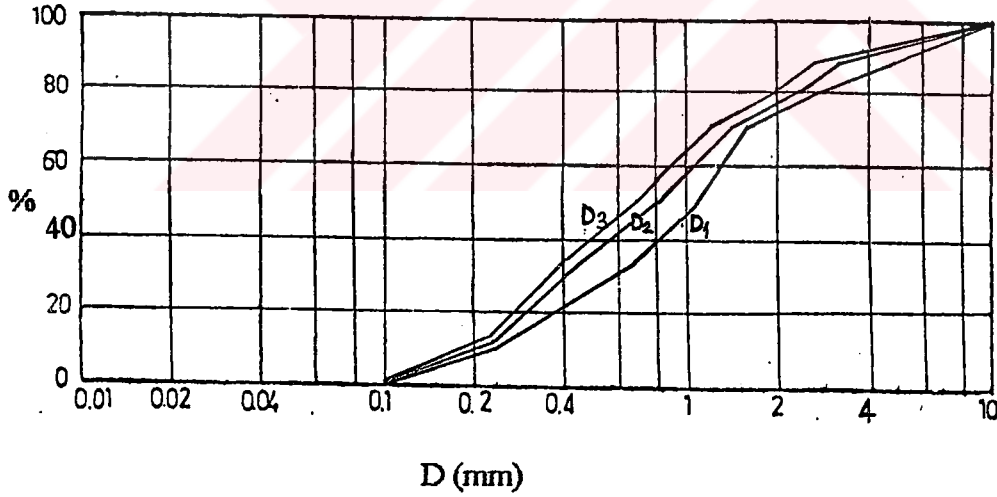
## 2.11. Deneyleerde Kullanılan Malzemeler

Deneyleerde ortalama dane çapları birbirinden farklı olan üç değişik malzeme kullanılmıştır. Bu malzemelerin ortalama dane çapları, gerçeğe yakın olması amacıyla Bölüm 1.3.1’de verilen Denklem (5)’e göre hesaplanmıştır.

$$D_{ort} = (D_{35} + D_{50} + D_{65}) / 3 \quad (5)$$

Deneyleerde kullanılan malzemelere ait granölometri eğrileri aşağıda görölmektedir (Şekil 9). Bu eğrilere göre: 1 nolu malzeme için  $D_{ort} = (0.7 + 1.1 + 1.6) / 3 = 1.1$  mm, 2 nolu malzeme için  $D_{ort} = (0.45 + 0.80 + 1.45) / 3 = 0.9$  mm ve 3 nolu malzeme için ise  $D_{ort} = (0.40 + 0.70 + 1.20) / 3 = 0.8$  mm bulunmuştur.

Deneyleerde kullanılan kum ve akıldan oluşan malzemelerin herbiri için ayrı ayrı yapılan deneyleer neticesinde; danenin ortalama birim hacim ağırlığı  $2.65 \text{ gr} / \text{cm}^3$  olarak bulunmuştur.



Şekil 9. Deneyleerde kullanılan malzemelere ait granölometri eğrileri

## 2.12. Askıdaki Katı Madde Miktarının Ölçülmesi

Akarsuların taşıdığı toplam katı madde miktarının büyük bir bölümünü (%80-%90’ını) askı maddesi oluşturur [3]. Dolayısıyla askı maddesi miktarı bilinirse yaklaşık

yollardan toplam katı madde miktarı bulunabilir. Bu sebeple askı maddesi miktarının hesaplanması veya ölçülmesi oldukça önemlidir. Askı maddesi teorik olarak [16], [27] :

$$Q_s = C'_0 Q_w \quad (66)$$

şeklinde bir bağıntı ile hesaplanır. Burada:

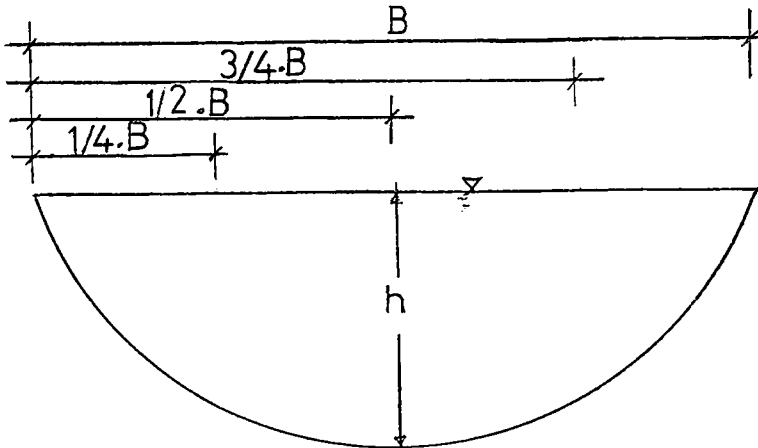
$Q_s$  : Toplam kesitten geçen askı maddesi debisi ( $m^3/s$ ,  $kg/s$  veya  $ton / gün$ ),

$C'_0$  : Toplam kesit için ortalama konsantrasyon değeridir (ppm),

$Q_w$  : Toplam kesitten geçen akımın debisi ( $m^3/s$ ).

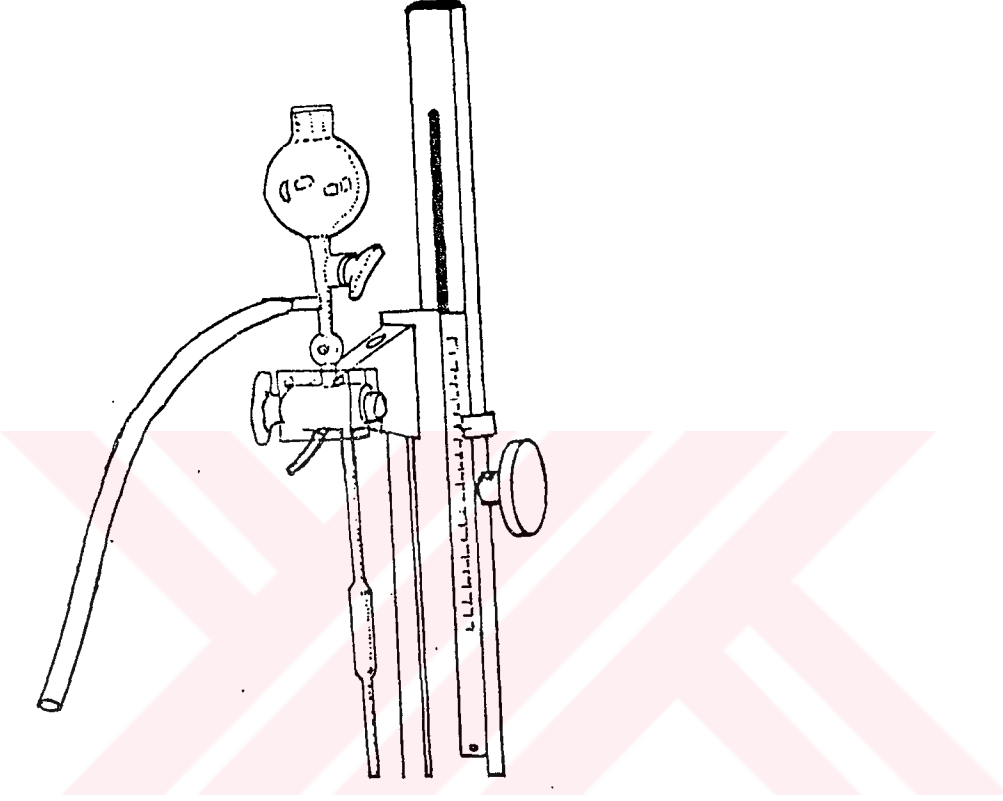
Bu çalışmada,  $Q_w$  bağımsız bir değişken olarak seçildiğine göre geriye  $C'_0$ 'ın hesaplanması veya ölçülmesi kalmaktadır. Bu parametrenin hesabı ile ilgili çok sayıda ampirik formül mevcuttur. Ancak bu formüllerin hepsi yaklaşık değerler ve farklı farklı sonuçlar vermektedir. Bu sebeple  $C'_0$ 'ın bulunmasında en güvenilir yol ölçüm metodudur.

Bu çalışmanın önemli özelliklerinden birisi de  $C'_0$ 'ın laboratuvar deneyleri ile ölçülmesidir. Bu ölçüm aşağıdaki gibi gerçekleştirilmektedir. Her deney için ayrı ayrı olmak üzere Şekil (7)'de görüldüğü gibi model üzerinde akarsuyun enkesiti üzerinde alınan  $[(P_1 - P_1), (P_2 - P_2)]$  ve  $(P_3 - P_3)]$  ölçüm noktalarının her üçünden de ayrı ayrı enkesit boyunca bir uçtan itibaren  $1/4$ ,  $1/2$  ve  $3/4$  mesafesindeki noktaların herbirinden (Şekil 10), üretimi yurtdışında özel bir firma tarafından yapılan konsantrasyon numunesi alma aleti ile (Şekil 11) derinlik boyunca 4 - 10 adet arasında değişen konsantrasyon numunesi alınır.



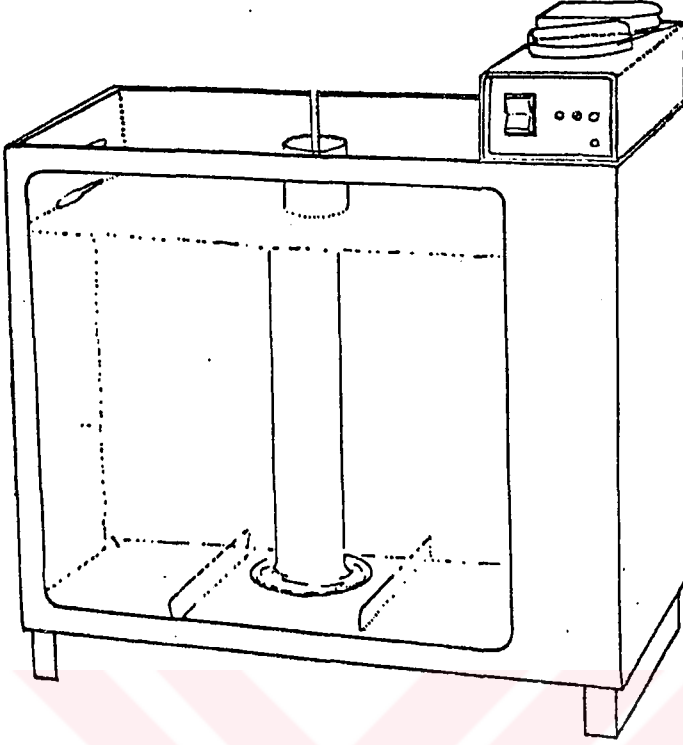
Şekil 10. Konsantrasyon numunesinin alındığı  $1/4$ ,  $1/2$ ,  $3/4$  kesitleri

Herbir nümune konsantrasyon için ayrılmış özel nümune kaplarına konularak ağızları sıkıca kapatılır ve üzerlerine gerekli bilgilerin yazıldığı (deney tarihi, deney no, konsantrasyonun alındığı ölçüm noktası, kesitin hangi mesafesinden alındığı, hangi derinlikten alındığı, alındığı noktadaki ortalama su yüksekliği vs.) bir etiket yapıştırılarak konsantrasyonu ölçecek aletin bulunduğu laboratuvara iletilir.



Şekil 11. Nümune alma aletinin şematik görünüşü

Laboratuvara getirilen bir nümune Şekil 11’de görülen aletle uyumlu çalışan ve yine aynı firma tarafından üretilen, konsantrasyonu yani askıdaki maddeyi ölçmeye yönelik konsantrasyon ölçüm cihazına (Şekil 12), talimatlara göre yerleştirilir. Daha sonra konsantrasyon ölçüm deneyinin prosedürüne uygun olarak deney gerçekleştirilir ve sonuçta o deneye ait konsantrasyon mg/ lt veya ppm olarak bulunur (Tablo 3). Bir deney için gerekli olan süre ise 24 saattir. Bu tezde, yapılan 60 adet deneyde ölçülen konsantrasyon miktarları diğer bilgilerle birlikte Tablo 3’de verilmiştir.



Şekil 12. Konsantrasyon ölçüm aletinin şematik olarak görünüşü

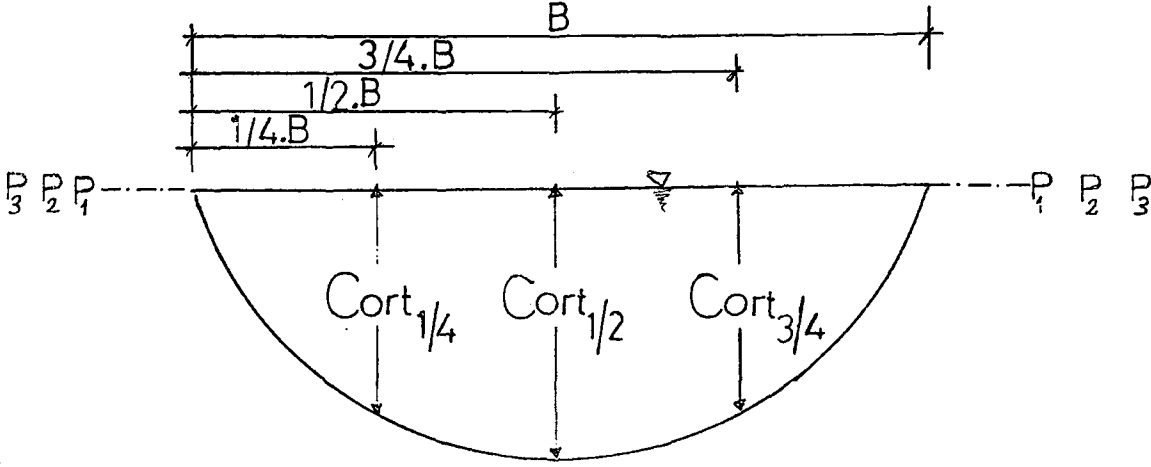
Bir deney için geçerli olan konsantrasyon ise; herbir ölçüm noktasındaki  $(P_1 - P_1)$ ,  $(P_2 - P_2)$ ,  $(P_3 - P_3)$  enkesit boyunca, herbir mesafeden alınan tüm derinliklerdeki toplam konsantrasyonların ortalamasıdır (Şekil 13), bu ortalamalar aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$C_{P1} = (C_{ort1/4} + C_{ort1/2} + C_{ort3/4}) / 3 \quad (67)$$

Aynı şekilde  $C_{P2}$  ve  $C_{P3}$  de hesaplanır ve sonuçta o deneyde elde edilen ortalama konsantrasyon miktarı aşağıdaki ilişki ile bulunmuştur.

$$C'_0 = (C_{P1} + C_{P2} + C_{P3}) / 3 \quad (68)$$

Bulunan bu konsantrasyon Denklem (66)'da yerine yazılarak o deneye ait askı maddesinin miktarı ( $Q_e$ ) bulunur.



Şekil 13. Bir deney için ortalama konsantrasyon

### 2.13. Sürüntü Maddesinin Ölçülmesi

Akarsularda sürüntü maddesi miktarının hesabına ilişkin çok sayıda formül olduğu daha önce Bölüm 1.3.6'da ve bu formüllerde yapılan kabullerin birbirinden farklı olması ve olaya etki eden parametrelerin çok olması sebebiyle, aynı akarsu için bile bu formüllerin birbirinden çok farklı sonuçlar verdiği ise Bölüm 1.2'de belirtilmişti.

İşte bu farklılığın daha aza indirilmesi amacıyla bu çalışmada sürüntü maddesi miktarı, içerisinde çok sayıda parametrenin bulunduğu formüllerin kullanılarak hesaplanması yerine doğrudan doğruya ölçülerek tespit edilmiştir. Bu ölçüm işlemi aşağıdaki gibi yapılmıştır.

Herbir deney sonunda akarsu modelinin mansap kısmındaki kum toplama ve çökeltim havuzlarında biriken sürüntü maddesi büyük bir titizlikle toplanıp elektronik terazide tartılarak kurutulmak üzere etüve konulmuştur. Etüvde 105 derecede 2 saat kurutulduktan sonra bir desikatörde soğutulmuş ve tekrar tartılarak deneyler için gerekli olan diğer işlemler yapılmıştır (elek analizi vs). Yapılan bu ölçüm işlemleri sonucunda, sürüntü maddesi miktarı o deney için doğrudan doğruya bulunmuştur. Bulunan bu değerler Tablo 3'de verilmiştir.



#### 2.14. Toplam Katı Madde Miktarının Hesabı

Her deney sonunda bulunan askı maddesi miktarı ile sürüntü maddesi miktarı toplanarak, o deney için geçerli olan toplam katı madde miktarı, Bölüm 1.3.7’de verilen ilişki ( $Q_t = Q_s + Q_b$ ) kullanılarak bulunmuştur.

Deneysel bir çalışma ile katı madde taşınımı ölçülürken dikkat edilmesi gereken en önemli husus giden malzeme miktarı kadar aynı granülometredeki malzeme ile akarsu yatağının beslenmesidir. Bu çalışmada akarsu yatağı, her deney sonunda giden malzeme miktarı kadar aynı granülometredeki malzeme ile uygun bir yöntemle beslenmiştir.

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Deneysel Çalışmaların Değerlendirilmesi

Akarsuların taşıdığı katı madde taşınım miktarına ilişkin çok sayıda bağıntı olduğu ve bu bağıntılarda yapılan bazı kabullerin birbirinden farklı ve olayda rol oynayan parametrelerin de çok fazla olması sebebiyle, bulunan sonuçların da birbirinden neredeyse 100 katına varan farklılıklar içerisinde oldukları literatür taramasından bilinmektedir. Bu farklılıkları dikkate alarak akarsuların taşıdığı katı madde miktarının mümkün olduğunca gerçeğe daha yakın bir şekilde belirlenebilmesi için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen değerlerin, katı madde miktarını veren genel bir bağıntı haline dönüştürülmesi düşünülmüştür. Bu amaçla daha önce Bölüm 2.9'da belirtilen tarzda kurulan deney düzeni üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar bu bölümde değerlendirilmektedir.

#### 3.2. Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

Bütün deney serilerinde, ortalama dane çapı, akımın debisi ve akarsu taban eğimi bağımsız değişkenler olarak kabul edilerek; akıdaki madde, sürüntü maddesi ve dolayısıyla toplam katı madde hesaplanmıştır ( Tablo 3). Akarsuların taşıdığı toplam katı madde miktarına ilişkin bağıntıları bulmak amacıyla, istatistiksel işlemler uygulanmış ve bu işlemler Tablo 4'de kısmen verilmiştir.

Deneylerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve bu değerlendirmelere göre akarsuların taşıdığı katı madde miktarının hesaplanması için kurulacak olan bağıntılarda kullanılacak bazı değerlerin bulunabilmesi için çok sayıda istatistiksel ve matematiksel işlemler yapılmıştır ( Tablo 4).

Tablo 3 deney serilerinde elde edilen ölçümleri ve deneyler sonrası yapılan hesaplamaları, Tablo 4 ise regresyon denklemleri ve korelasyon katsayılarının hesabı için gerekli olan istatistiksel ve matematiksel hesaplamaları göstermektedir. Tablo 4'de yapılan işlemlerin tamamı 60 sayfa olup burada, örnek teşkil etmesi için bu işlemler kısmen verilmiştir.

Tablo 3. Deneysel çalışmada elde edilen değerler

DENEY NO	EĞİM (J) m/m	ÇAP (D <sub>50</sub> ) mm	Q <sub>w</sub> m <sup>3</sup> /s	C (KONS) ppm	Q <sub>s</sub> t/gün	Q <sub>b</sub> t/gün	Q <sub>t</sub> t/gün
1	0,008	1,1	0,00133	126,42	0,01452	0,00601	0,02053
2	0,008	1,1	0,002	131,71	0,02275	0,00638	0,02913
3	0,008	1,1	0,00336	156,92	0,04555	0,0069	0,05245
4	0,008	1,1	0,00506	178,1	0,07786	0,00816	0,08602
5	0,008	1,1	0,00759	199,33	0,13071	0,0097	0,14041
6	0,012	1,1	0,00133	138,81	0,01595	0,00689	0,02284
7	0,012	1,1	0,002	143,18	0,02472	0,00748	0,0322
8	0,012	1,1	0,00336	161,24	0,0468	0,00889	0,05569
9	0,012	1,1	0,00506	183	0,08	0,01003	0,09003
10	0,012	1,1	0,00759	204,55	0,13413	0,01216	0,14629
11	0,013	1,1	0,00133	144,67	0,01662	0,00721	0,02383
12	0,013	1,1	0,002	168,12	0,02905	0,0082	0,03725
13	0,013	1,1	0,00336	197,3	0,05727	0,00892	0,06619
14	0,013	1,1	0,00506	219,76	0,09607	0,01127	0,10734
15	0,013	1,1	0,00759	247,35	0,1622	0,01429	0,17649
16	0,015	1,1	0,00133	153,51	0,01764	0,00846	0,0261
17	0,015	1,1	0,002	176,92	0,03057	0,01028	0,04085
18	0,015	1,1	0,00336	209,22	0,06073	0,01117	0,0719
19	0,015	1,1	0,00506	232,13	0,10148	0,01417	0,11565
20	0,015	1,1	0,00759	266,66	0,17486	0,02041	0,19527
21	0,008	0,9	0,00133	166,18	0,01944	0,00698	0,02642
22	0,008	0,9	0,002	172,23	0,02976	0,00721	0,03697
23	0,008	0,9	0,00336	220,07	0,06388	0,00772	0,0716
24	0,008	0,9	0,00506	255,63	0,11175	0,00909	0,12084
25	0,008	0,9	0,00759	296,75	0,1946	0,01182	0,20642
26	0,012	0,9	0,00133	193,4	0,02222	0,00742	0,02964
27	0,012	0,9	0,002	205,12	0,03542	0,00856	0,04398
28	0,012	0,9	0,00336	237,5	0,06894	0,0092	0,07814
29	0,012	0,9	0,00506	291,09	0,12157	0,01108	0,13265
30	0,012	0,9	0,00759	360,42	0,23635	0,01379	0,25014
31	0,013	0,9	0,00133	197,19	0,02231	0,00815	0,03046
32	0,013	0,9	0,002	221,3	0,03824	0,00934	0,04758
33	0,013	0,9	0,00336	269,14	0,07813	0,01028	0,08841
34	0,013	0,9	0,00506	320,76	0,14023	0,01304	0,14327
35	0,013	0,9	0,00759	401,07	0,26301	0,01623	0,27924
36	0,015	0,9	0,00133	204,38	0,02348	0,00951	0,03299
37	0,015	0,9	0,002	212,02	0,03663	0,01127	0,04709
38	0,015	0,9	0,00336	288,15	0,08365	0,01306	0,09671
39	0,015	0,9	0,00506	335,17	0,14653	0,01721	0,16374
40	0,015	0,9	0,00759	397,02	0,26035	0,02382	0,28417

Tablo 3'ün devamı

DENEY NO	EĞİM (J)	ÇAP ( $D_{50}$ )	$Q_w$	C (KONS)	$Q_s$	$Q_b$	$Q_t$
	m/m	mm	$m^3/s$	ppm	t/gün	t/gün	t/gün
41	0,008	0,8	0,00133	206,14	0,02368	0,0074	0,03108
42	0,008	0,8	0,002	217,71	0,03762	0,00796	0,04558
43	0,008	0,8	0,00336	270,73	0,07859	0,00812	0,08671
44	0,008	0,8	0,00506	329,98	0,14426	0,01001	0,15427
45	0,008	0,8	0,00759	378,18	0,148	0,01309	0,26109
46	0,012	0,8	0,00133	234,26	0,02691	0,0082	0,03511
47	0,012	0,8	0,002	245,1	0,04235	0,00936	0,05171
48	0,012	0,8	0,00336	312,19	0,09063	0,011	0,10163
49	0,012	0,8	0,00506	384,06	0,1679	0,01278	0,18068
50	0,012	0,8	0,00759	446,81	0,293	0,0147	0,3077
51	0,013	0,8	0,00133	242,39	0,02785	0,00934	0,03719
52	0,013	0,8	0,002	265,02	0,04579	0,01104	0,05683
53	0,013	0,8	0,00336	359,19	0,10427	0,01309	0,11736
54	0,013	0,8	0,00506	421,02	0,18406	0,01676	0,20082
55	0,013	0,8	0,00759	504,24	0,33066	0,01904	0,3497
56	0,015	0,8	0,00133	258,73	0,02973	0,01176	0,04149
57	0,015	0,8	0,002	268,53	0,0464	0,01412	0,06052
58	0,015	0,8	0,00336	381,92	0,11087	0,01602	0,12689
59	0,015	0,8	0,00506	499,76	0,21848	0,0221	0,24058
60	0,015	0,8	0,00759	597,43	0,39178	0,02823	0,42001
TOPL			0,23208	15706,88	5,8788	0,68588	6,65387
ORTL	0,012	0,933333	0,00387	261,7813	0,09798	0,01143	0,1109
STSAP	0,00257	0,125774	0,00228	101,6075	0,08638	0,0045	0,09201
VAR	6,6E-06	0,015819	5,2E-06	10324,09	0,00746	2E-05	0,00847
TOPKA			0,0012	4720889	1,01618	0,00903	1,23742

1.  
Tablo 3'de verilen :  
 $Q_s$  : Askı maddesi miktarını,  
 $Q_w$  : Akımın debisini,  
 $Q_b$  : Sürüntü maddesi miktarını,  
 $Q_t$  : Tolam katı madde miktarını,  
 $D_{50}$ : Ortalama dane çapını,  
J : Akarsu taban eğimini,  
C : Ortalama konsantrasyonu,  
TOPL : Toplamı,  
ORTL : Ortalamayı,  
STSAP : Standart sapmayı,  
VAR : Varyansı,  
TOPKA : Toplam kareyi ifade eder.

Tablo 4. Regresyon denklemleri ve korelasyon katsayılı için gerekli olan hesaplamalar

DENEY NO	ORANLAR (%)			$Q_s=f(Q_w)$	$Q_s=f(Q_w)$	$Q_s=f(Q_w)$	$Q_s=f(D)$	$Q_s=f(D)$
	$Q_s/Q_t$	$Q_b/Q_t$	$Q_b/Q_s$	$x-\bar{x}$	$y-\bar{y}$	$x y$	$x-\bar{x}$	$x y$
1	71	29	41	-0,00254	-0,08346	1,93E-05	0,1667	0,01597
2	78	22	28	-0,00187	-0,07523	4,55E-05	0,1667	0,02503
3	87	13	15	-0,00051	-0,05243	0,000153	0,1667	0,05011
4	91	9	10	0,00119	-0,02012	0,000394	0,1667	0,08565
5	93	7	7	0,00372	0,03273	0,000992	0,1667	0,14378
6	69	31	43	-0,00254	-0,08203	2,12E-05	0,1667	0,01755
7	77	23	30	-0,00187	-0,07326	4,94E-05	0,1667	0,02719
8	84	16	19	-0,00051	-0,05118	0,000157	0,1667	0,05148
9	89	11	13	0,00119	-0,01798	0,000405	0,1667	0,088
10	92	8	9	0,00372	0,03615	0,001018	0,1667	0,14754
11	70	30	43	-0,00254	-0,08136	2,21E-05	0,1667	0,01828
12	78	22	28	-0,00187	-0,06893	5,81E-05	0,1667	0,03196
13	87	13	16	-0,00051	-0,04071	0,000192	0,1667	0,063
14	90	10	12	0,00119	-0,00191	0,000486	0,1667	0,10568
15	92	8	9	0,00372	0,06422	0,001231	0,1667	0,17842
16	68	32	48	-0,00254	-0,08034	2,35E-05	0,1667	0,0194
17	75	25	34	-0,00187	-0,06741	6,11E-05	0,1667	0,03363
18	84	16	18	-0,00051	-0,03725	0,000204	0,1667	0,0668
19	88	12	14	0,00119	0,0035	0,000513	0,1667	0,11163
20	90	10	12	0,00372	0,07688	0,001327	0,1667	0,19235
21	74	26	36	-0,00254	-0,07854	2,59E-05	-0,0333	0,0175
22	80	20	24	-0,00187	-0,06822	5,95E-05	-0,0333	0,02678
23	89	11	12	-0,00051	-0,0341	0,000215	-0,0333	0,05749
24	92	8	8	0,00119	0,01377	0,000565	-0,0333	0,10058
25	94	6	6	0,00372	0,09662	0,001477	-0,0333	0,17514
26	75	25	3	-0,00254	-0,07576	2,96E-05	-0,0333	0,02
27	80	20	24	-0,00187	-0,06256	7,08E-05	-0,0333	0,03188
28	88	12	13	-0,00051	-0,02904	0,000232	-0,0333	0,06205
29	92	8	9	0,00119	0,02359	0,000615	-0,0333	0,10941
30	94	6	6	0,00372	0,13837	0,001794	-0,0333	0,21272
31	73	27	36	-0,00254	-0,07567	2,97E-05	-0,0333	0,02008
32	80	20	24	-0,00187	-0,05974	7,65E-05	-0,0333	0,03442
33	88	12	13	-0,00051	-0,01985	0,000263	-0,0333	0,07032
34	91	9	9	0,00119	0,04225	0,00071	-0,0333	0,12621
35	94	6	6	0,00372	0,16503	0,001996	-0,0333	0,23671
36	71	29	40	-0,00254	-0,0745	3,12E-05	-0,0333	0,02113
60	Bu Tablo Bu Şekilde 60'ıncı Deneye Kadar Devam Etmektedir							
TOPL				-0,00012	2,78E-16	0,032861	0,002	5,30453
ORTL							3,3E-05	0,08841
TOPKA				0,000306	0,440179	4,67E-05	0,93333	

Tablo 4'ün devamı

DENEY	Lineer Olmayan Fonksiyon İçin e, (y=Q <sub>b</sub> )			y = Q <sub>b</sub>	y= Q <sub>b</sub> , x=Q <sub>w</sub>	y=Q <sub>b</sub> ,x=D
NO	yg-yh (x=Q <sub>w</sub> )	yg-yh(x=D)	yg-yh (x=J)	Log y	x Logy	x Logy
1	-0,00204108	-0,003838	-0,00472637	-2,221126	-0,0029541	-2,443238
2	-0,00255751	-0,003468	-0,00435637	-2,195179	-0,00439036	-2,414697
3	-0,00383697	-0,002948	-0,00383637	-2,161151	-0,00726147	-2,377266
4	-0,00482657	-0,001688	-0,00257637	-2,08831	-0,01056685	-2,297141
5	-0,00663508	-0,000148	-0,00103637	-2,013228	-0,0152804	-2,214551
6	-0,00116108	-0,002958	-0,00477001	-2,161781	-0,00287517	-2,377959
7	-0,00145751	-0,002368	-0,00418001	-2,126098	-0,0042522	-2,338708
8	-0,00184697	-0,000958	-0,00277001	-2,051098	-0,00689169	-2,256208
9	-0,00295657	0,0001823	-0,00163001	-1,998699	-0,01011342	-2,198569
10	-0,00417508	0,0023123	0,000499986	-1,915066	-0,01453535	-2,106573
11	-0,00084108	-0,002638	-0,004505	-2,142065	-0,00284895	-2,356271
12	-0,00073751	-0,001648	-0,003515	-2,086186	-0,00417237	-2,294805
13	-0,00181697	-0,000928	-0,002795	-2,049635	-0,00688677	-2,254599
14	-0,00171657	0,0014223	-0,000445	-1,948076	-0,00985726	-2,142884
15	-0,00204508	0,0044423	0,002575	-1,844968	-0,01400331	-2,029465
16	0,000408917	-0,001388	-0,00315386	-2,07263	-0,0027566	-2,279893
17	0,00134249	0,0004323	-0,00133386	-1,988007	-0,00397601	-2,186808
18	0,000433028	0,0013223	-0,00044386	-1,951947	-0,00655854	-2,147142
19	0,001183426	0,0043223	0,002556141	-1,84863	-0,00935407	-2,033493
20	0,004074919	0,0105623	0,008796141	-1,690157	-0,01282829	-1,859173
21	-0,00107108	-0,004259	-0,00375637	-2,156145	-0,00286767	-1,94053
22	-0,00172751	-0,004029	-0,00352637	-2,142065	-0,00428413	-1,927858
23	-0,00301697	-0,003519	-0,00301637	-2,112383	-0,00709761	-1,901144
60	Bu Tablo Bu Şekilde 60'mcı Deneye Kadar Yaklaşık 60 Sayfa Devam Etmektedir					
TOPL	0,001313359	4,88E-05	1,3754E-06	-118,1532	-0,44298344	-110,6339
ORTL				-1,96922		
TOPKA	0,000663536	0,0010784	0,001124017			

2.

Tablo 4'de verilen :

Q<sub>s</sub> : Askı maddesi miktarını,Q<sub>w</sub> : Akımın debisini,Q<sub>b</sub> : Sürüntü maddesi miktarını,Q<sub>t</sub> : Tolam katı madde miktarını,

D : Ortalama dane çapını,

J : Akarsu taban eğimini,

Bunların dışında kalanlar ise; ortalama,

toplam, standart sapma, logaritma gibi

istatistiksel işlemleri ifade eder.

### 3.3. Deneyler Sonunda Yapılan Hesap ve İşlemler

Laboratuvarda kurulan akarsu modeli üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, katı madde taşınımına ilişkin bazı bağıntılar geliştirmek amacıyla bağımlı değişken olarak alınan ve hesaplanmak istenen; askıdaki katı madde, sürüntü maddesi ve dolayısıyla toplam katı madde miktarları ile bağımsız değişken olarak seçilen ortalama dane çapı, akımın debisi ve akarsu taban eğimi birlikte karma yapılarak bunların tüm kombinasyonları için ayrı ayrı regresyon denklemleri kurulmaktadır. Daha sonra bu regresyon denklemlerinden, çok sayıda akarsu için daha uygun olabileceği düşünülenleri seçilerek önerilmektedir. Önerilen bu bağıntıların pratikte ölçülen değerlere yakın sonuçlar verip vermediğini belirlemek için de, daha önceden ölçümleri yapılarak akım debileri ile katı madde taşınım miktarları belirlenmiş bazı akarsu havzaları üzerinde uygulamalar yapılmış ve daha sonra da yine bu bağıntılar katı madde taşınım miktarının hesabında kullanılan bazı formüllerle karşılaştırılarak, bu formüllerden hangilerine daha yakın çıktığı tespit edilmiştir.

Bu regresyon denklemlerinden hangisinin daha uygun olduğuna ise, korelasyon katsayısına bakılarak karar vermek uygun olacaktır. Korelasyon katsayısı, deneylerde seçilen herbir bağımsız değişken veya birkaç bağımsız değişken ya da bütün bağımsız değişkenler ile deneylerde elde edilen ve bu bağımsız değişken veya değişkenlere karşılık gelen bağımlı değişken arasındaki anlamlılık ilişkisini ortaya koyan bir sayıdır ve - 1 ile + 1 arasında değişir. Mutlak değer olarak; 1'e eşit veya 1'e enyakın olan korelasyon katsayısına sahip olan regresyon denklemi daha uygun ya da daha anlamlı denklemdir [5], [6].

Bu regresyon denklemleri, bağımlı değişken olan askı ve sürüntü maddesi ile toplam katı madde miktarları için ayrı ayrı elde edilmektedir. Herbir bağımsız değişken için uygulanacak olan regresyon denklemleri [25] aşağıda verilen:

- 1) Basit linner regresyon,
- 2) Çoklu lineer regresyon,
- 3) Lineer olmayan regresyon bu da kendi içinde dört grupta toplanır. Bunlar:
  - a) Parabolik fonksiyon,
  - b) Hiperbolik fonksiyon,
  - c) Üstel fonksiyon,
  - d) Geometrik fonksiyon

için tek tek kurularak yine herbiri için ayrı ayrı korelasyon katsayısı hesaplanmaktadır.

### 3.4. Askı Maddesi İçin Regresyon Denklemleri ve Korelasyon Katsayıları

Tablo 3 ve Tablo 4'de verilen deney değerleri kullanılarak askı maddesi için regresyon denklemleri ve korelasyon katsayıları [10], [12] hesaplanmıştır. Bulunan denklemler aşağıda Tablo 5'de özetlenmiştir. Yapılan hesapların ayrıntıları ise Ek 1'de verilmiştir.

Tablo 5. Askı maddesi için regresyon denklemleri

1) Basit Lineer Regresyon (Veri Sayısı, n = 60)	
Denklem	Korelasyon Katsayısı
$Q_s = 0.065 + 8.555 Q_w$	$r = 0.858$ (69)
$Q_s = 0.101 - 0.003 D$	$r = - 0.280$ (70)
$Q_s = 0.095 + 0.250 J$	$r = 0.167$ (71)
2) Çoklu Lineer Regresyon (Veri Sayısı, n = 60)	
$Q_s = -0.049 + 24.11 Q_w + 0.005 D + 4.109 J$	$r = 0.842$ (72)
3) Lineer Olmayan Regresyon (Veri Sayısı, n = 60)	
i) Parabolik Fonksiyon	
$Q_s = 0.031 + 33.472 Q_w + 0.653 Q_w^2$	$r = 0.868$ (73)
$Q_s = - 4.438 + 9.826 D - 5.226 D^2$	$r = - 0.592$ (74)
$Q_s = 0.060 - 0.005 J + 248.888 J^2$	$r = 0.449$ (75)
ii) Hiperbolik Fonksiyon	
$Q_s = 148.59 Q_w^{1.341}$	$r = 0.827$ (76)
$Q_s = 0.077 D^{1.81}$	$r = - 0.264$ (77)
$Q_s = 0.264 J^{0.5}$	$r = 0.130$ (78)
iii) Üstel Fonksiyon	
$\log Q_s = - 1.786 + 158.91 Q_w$	$r = 0.796$ (79)
$Q_s = 0.398 (0.149^D)$	$r = - 0.263$ (80)
$\log Q_s = - 1.412 + 20.085 J$	$r = 0.131$ (81)
iv) Geometrik Fonksiyon	
$Q_s = 1 / (56.984 - 8489 Q_w)$	$r = - 0.799$ (82)
$Q_s = 1 / (- 13.83 + 37.60 D)$	$r = 0.267$ (83)
$Q_s = 1 / (30.68 - 784.97 J)$	$r = - 0.114$ (84)

### 3.5. Sürüntü Maddesi İçin Regresyon Denklemleri ve Korelasyon Katsayıları

Tablo 3 ve Tablo 4'de verilen deney değerleri kullanılarak sürüntü maddesi için regresyon denklemleri ve korelasyon katsayıları [10], [12] hesaplanmıştır. Bulunan denklemler Tablo 6'da özetlenmiştir. Yapılan hesapların ayrıntıları ise Ek 2'de verilmiştir.



Tablo 6. Sürüntü maddesi için regresyon denklemleri

1) Basit Lineer Regresyon (Veri Sayısı, n = 60)	
Denklem	Korelasyon Katsayısı
$Q_b = -0.306 + 0.34 Q_w$	$r = 0.655$ (85)
$Q_b = 0.011 - 0.0003 D$	$r = -0.291$ (86)
$Q_b = 0.011 + 0.041 J$	$r = 0.526$ (87)
2) Çoklu Lineer Regresyon (Veri Sayısı, n = 60)	
$Q_b = 0.011 - 0.0078 Q_w + 0.00004 D + 0.00565 J$	$r = 0.9990$ (88)
3) Lineer Olmayan Regresyon (Veri Sayısı, n = 60)	
i) Parabolik Fonksiyon	
$Q_b = 0.0063 + 1.323 Q_w + 0.053 Q_w^2$	$r = 0.9995$ (89)
$Q_b = 0.059 - 0.092 D + 0.042 D^2$	$r = -0.9992$ (90)
$Q_b = 0.0055 + 0.935 J - 35.185 J^2$	$r = 0.9991$ (91)
ii) Hiperbolik Fonksiyon	
$Q_b = 0.0193 Q_w^{0.376}$	$r = 0.675$ (92)
$Q_b = 0.010 D^{-0.845}$	$r = -0.319$ (93)
$Q_b = 0.410 J^{0.819}$	$r = 0.550$ (94)
iii) Üstel Fonksiyon	
$\log Q_b = -2.149 + 46.38 Q_w$	$r = 0.686$ (95)
$Q_b = 0.024 (0.413^D)$	$r = -0.316$ (96)
$\log Q_b = -2.372 + 33.598 J$	$r = 0.568$ (97)
iv) Geometrik Fonksiyon	
$Q_b = 1 / (147.855 - 12805 Q_w)$	$r = -0.683$ (98)
$Q_b = 1 / (21.509 + 82.30 D)$	$r = 0.332$ (99)
$Q_b = 1 / (183.71 - 7115.1 J)$	$r = -0.587$ (100)

### 3.6. Askı ve Sürüntü Maddesi Miktarlarının Grafiklerle İfade Edilmesi

Katı madde taşınımındaki en etkin parametrenin tesbiti için Tablo 4’de verilen deney değerleri kullanılarak, askı ve sürüntü maddesi için Şekil 14 - Şekil 33’de verilen grafikler çizilmiştir. Herbir grafik eksenlerinde temsil edilen  $Q_a$ ,  $Q_b$ ,  $Q_w$  ve  $D$ , o grafikteki kendi ortalamasına bölünerek boyutsuz hale dönüştürülmüştür. Grafiklerden de görüldüğü gibi hem askı maddesine ( $Q_a$ ) hem de sürüntü maddesine ( $Q_b$ ) karşılık gelen, debi ( $Q_w$ ) grafikleri diğer grafiklere göre giderek bir yükseliş gösterdikleri için daha etkin durumdadırlar. Dolayısıyla katı madde taşınımında da akımın debisi ( $Q_w$ ) daha etkin bir parametre olarak görülmektedir. Bu grafiklerde:

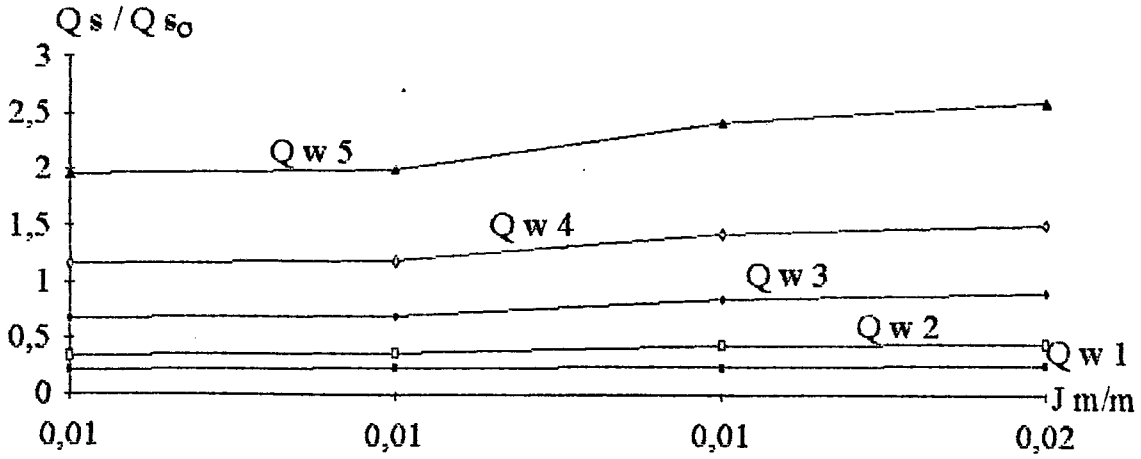
$Q_{s_0}$  : Bu grafiklerin herbirindeki  $D$ ,  $J$  ve  $Q_w$ ’a karşılık gelen  $Q_a$ ’lerin ortalamasını,

$Q_{b_0}$  : Bu grafiklerin herbirindeki  $D$ ,  $J$  ve  $Q_w$ ’a karşılık gelen  $Q_b$ ’lerin ortalamasını,

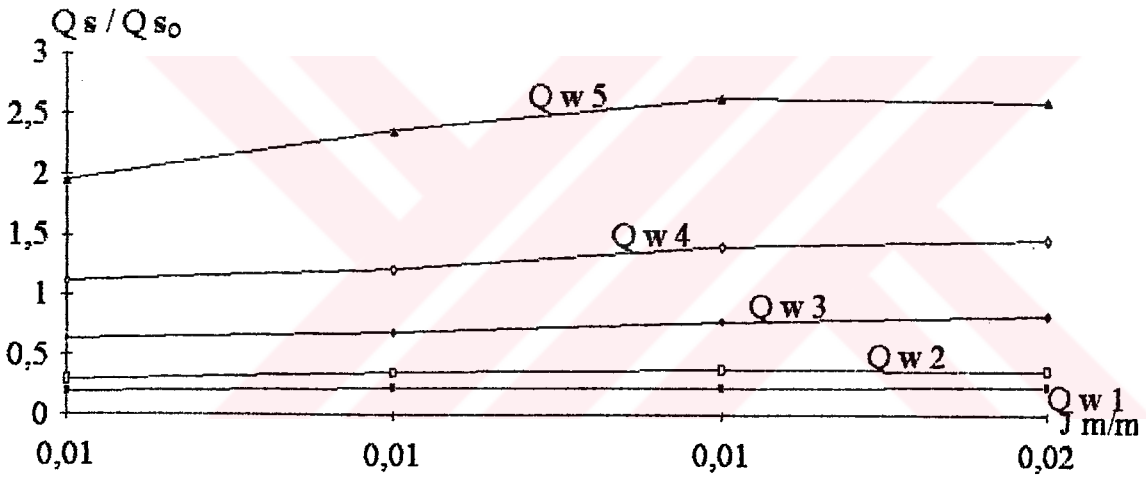
$Q_{w_0}$  : Deneyde kullanılan debilerin ortalamasını,

$D_0$  : Deneylerde kullanılan ortalama dane çaplarının ortalamasını,

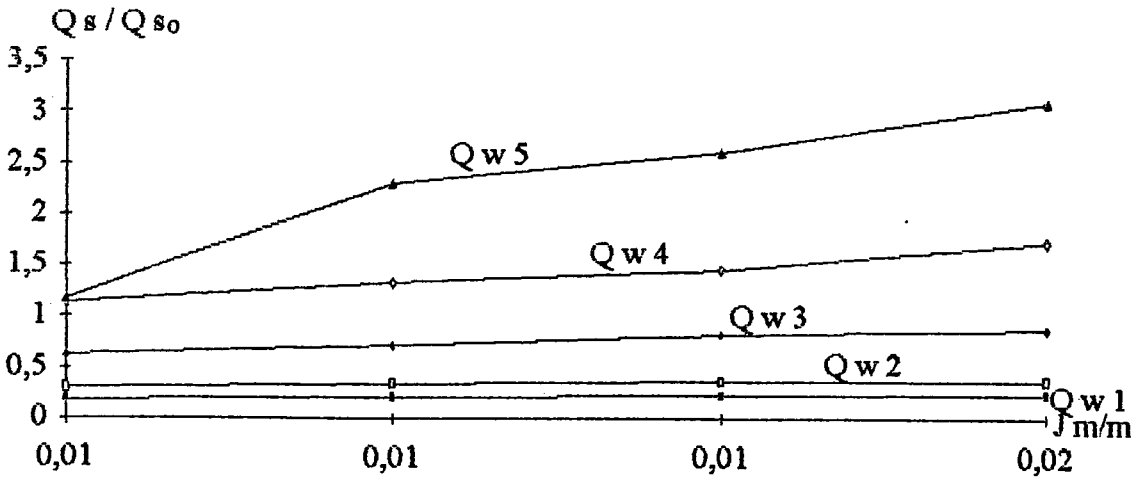
$J$  : Akarsu taban eğimini ifade etmektedir.



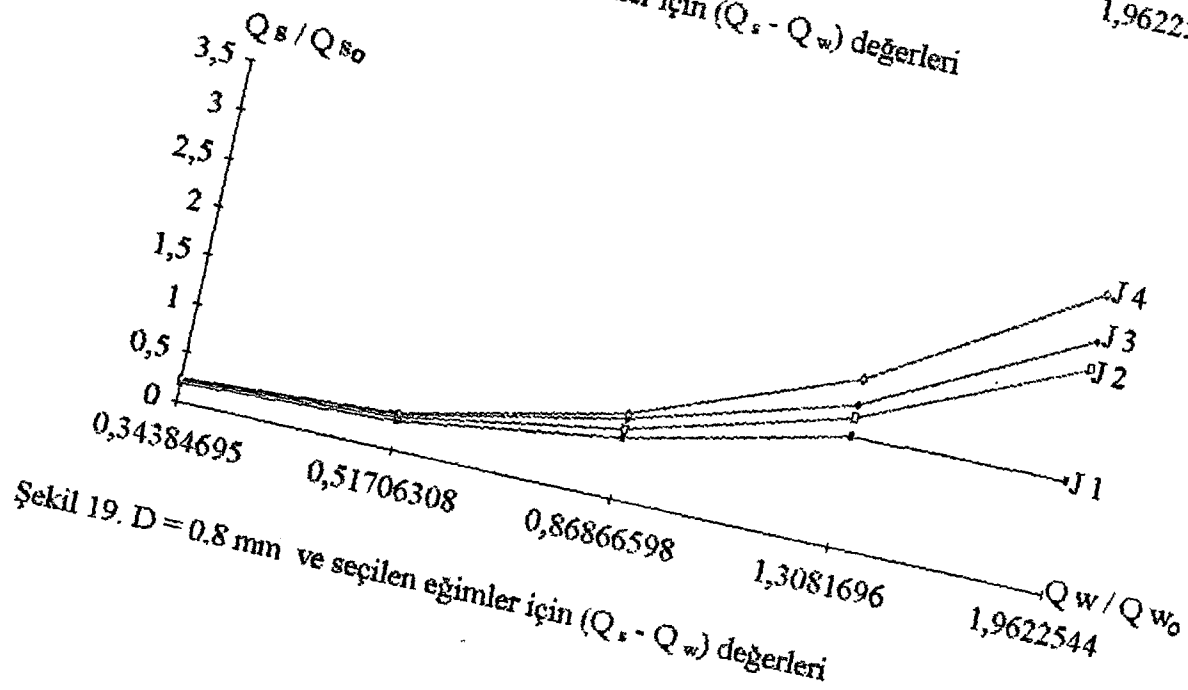
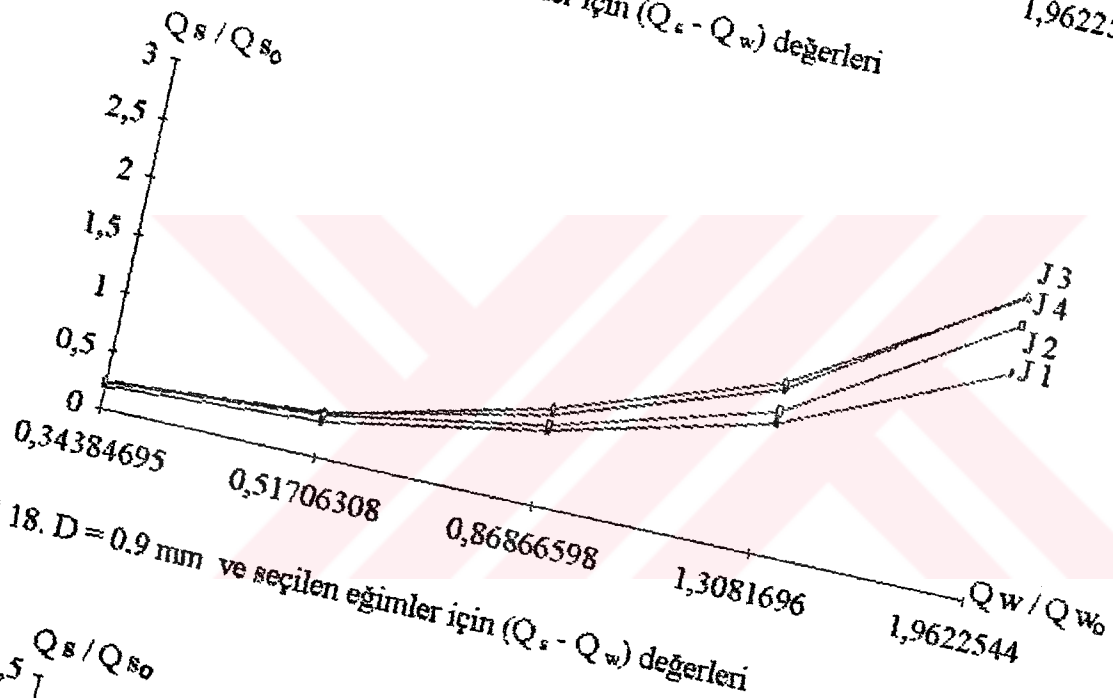
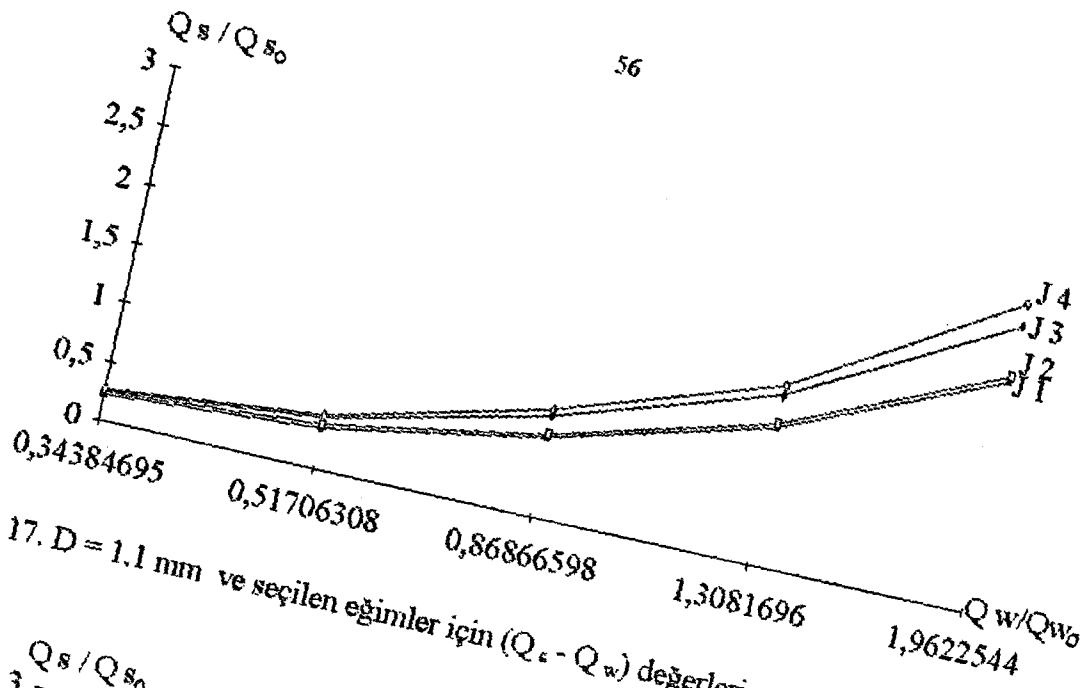
Şekil 14.  $D = 1.1$  mm ve seçilen debiler için ( $Q_s - J$ ) değerleri

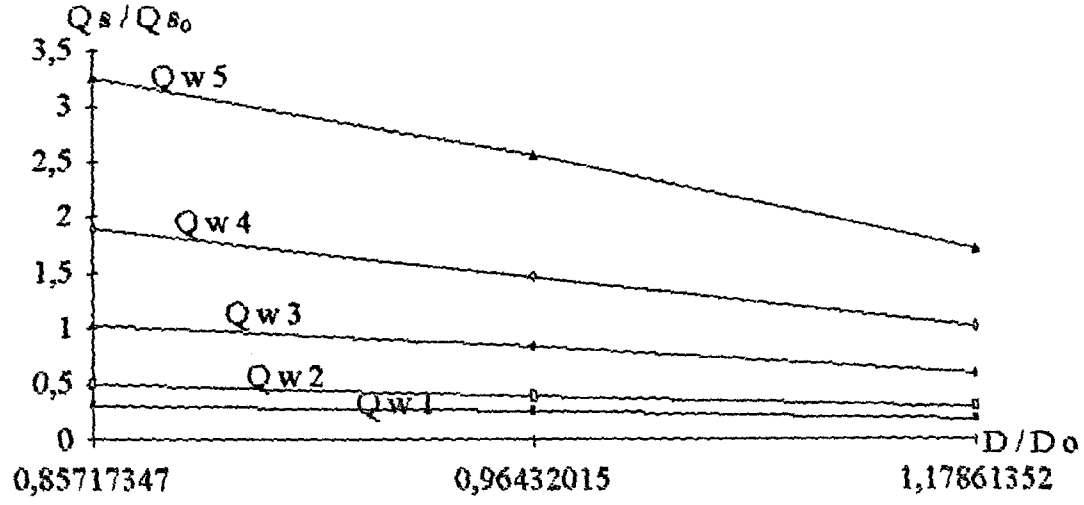


Şekil 15.  $D = 0.9$  mm ve seçilen debiler için ( $Q_s - J$ ) değerleri

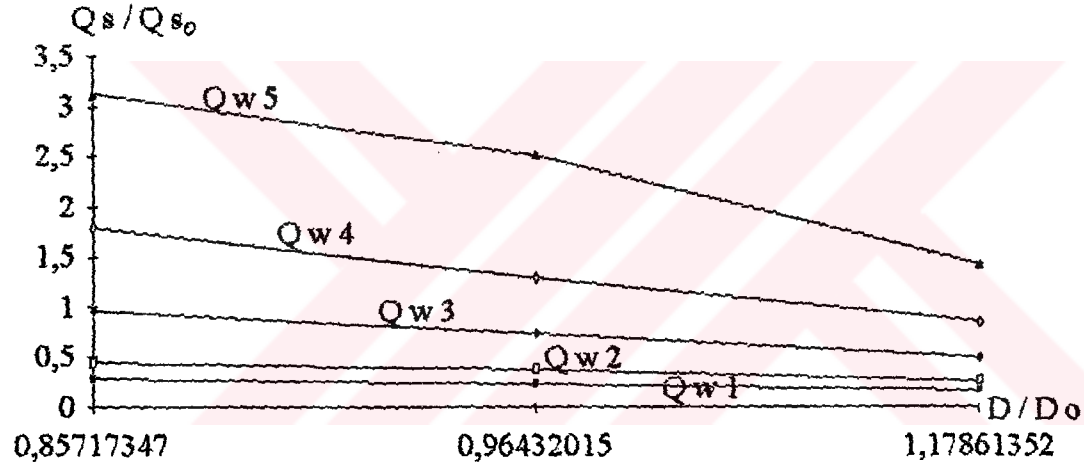


Şekil 16.  $D = 0.8$  mm ve seçilen debiler için ( $Q_s - J$ ) değerleri

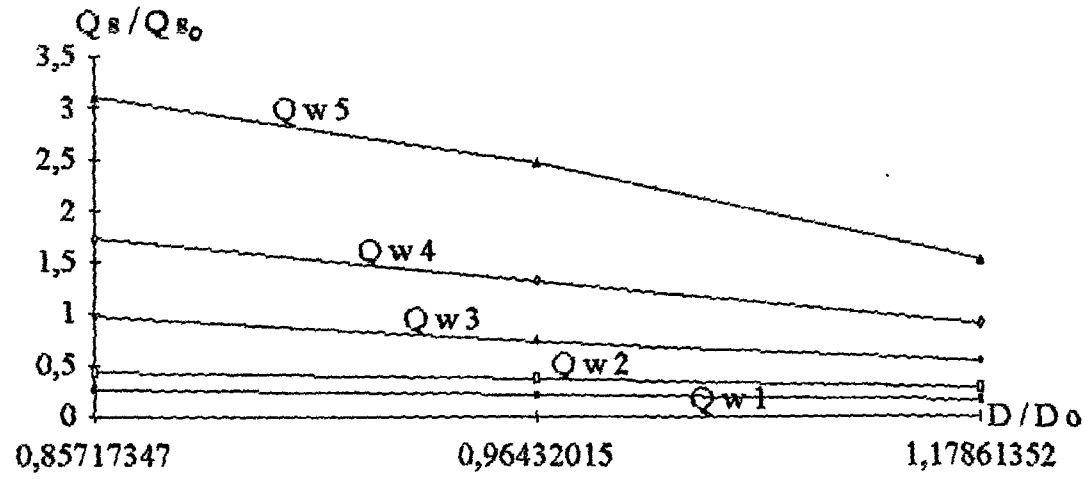




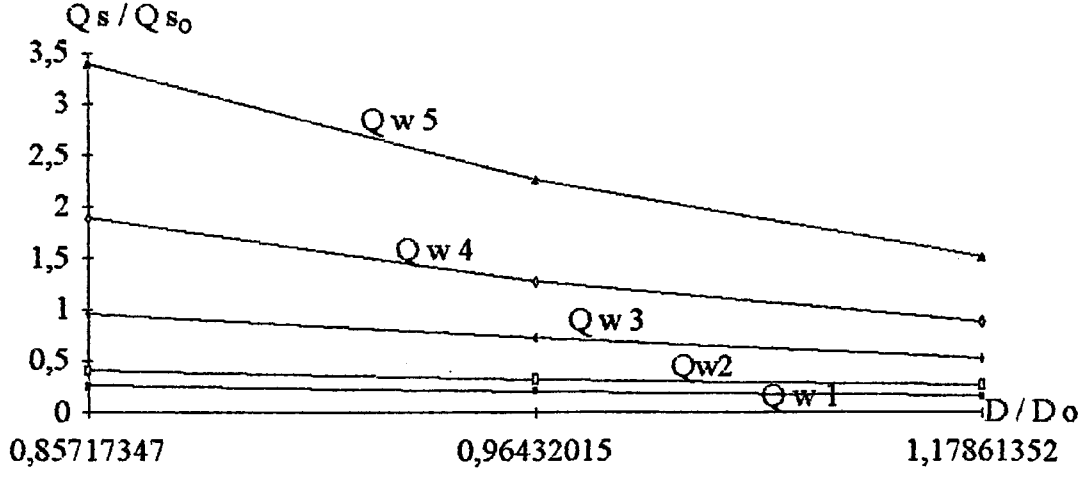
Şekil 20.  $J = 0.008$  ve seçilen debiler için ( $Q_s - D$ ) değerleri



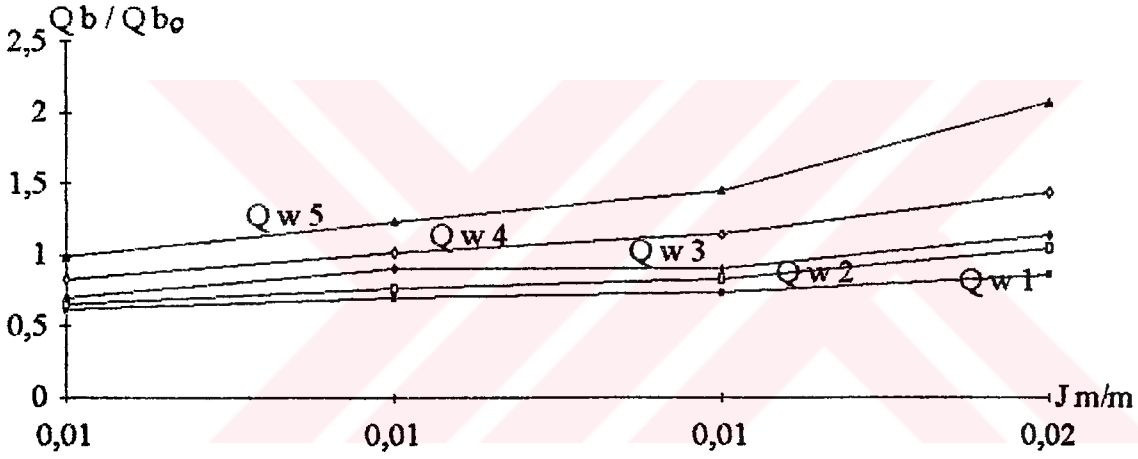
Şekil 21.  $J = 0.012$  ve seçilen debiler için ( $Q_s - D$ ) değerleri



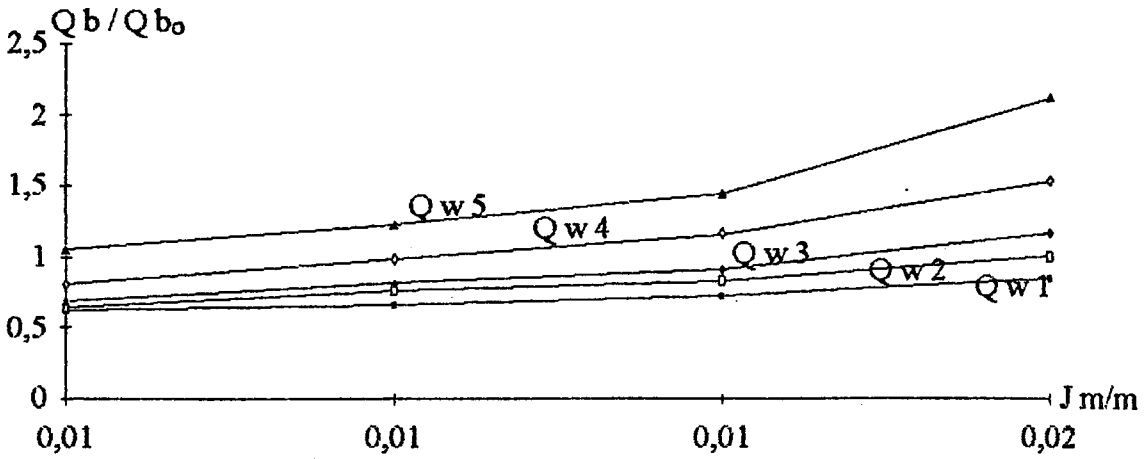
Şekil 22.  $J = 0.013$  ve seçilen debiler için ( $Q_s - D$ ) değerleri



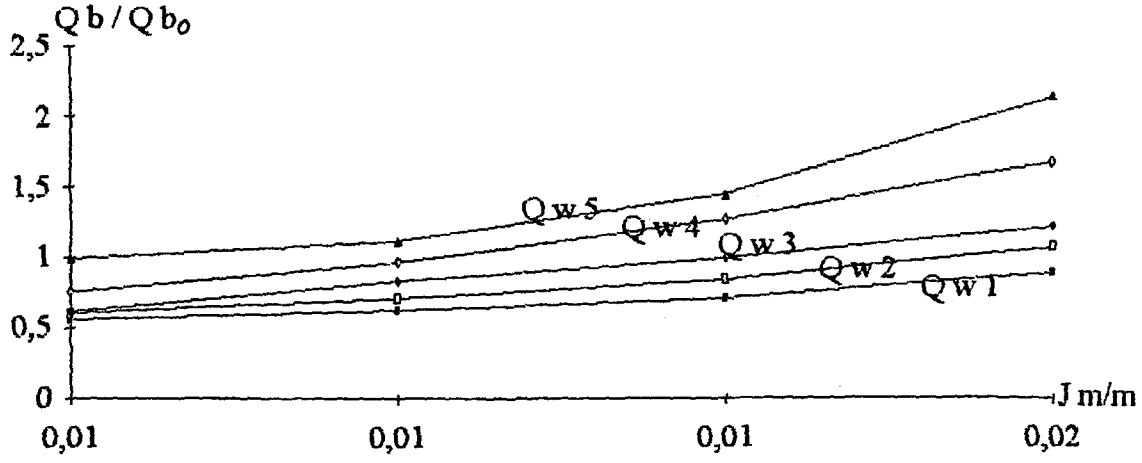
Şekil 23.  $J = 0.015$  ve seçilen debiler için ( $Q_s - D$ ) değerleri



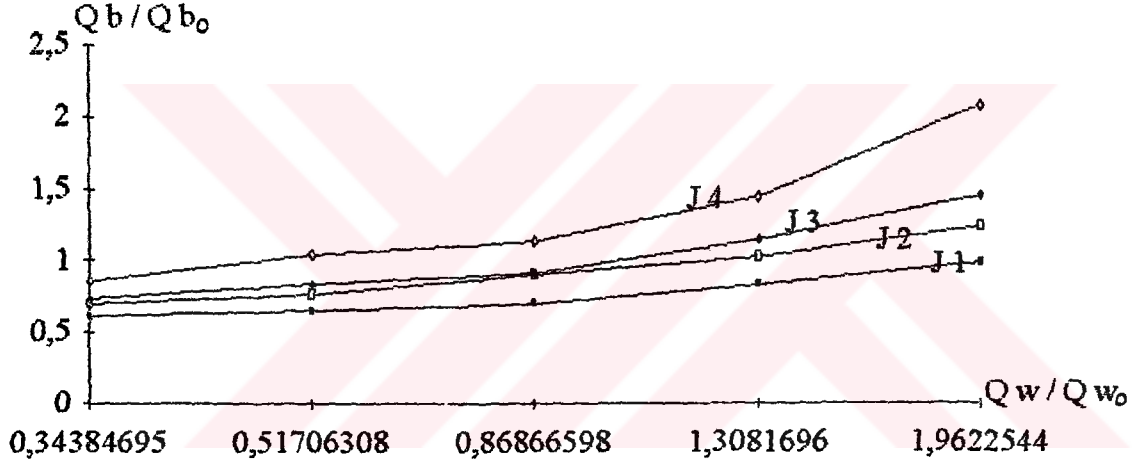
Şekil 24.  $D = 1.1 \text{ mm}$  ve seçilen debiler için ( $Q_b - J$ ) değerleri



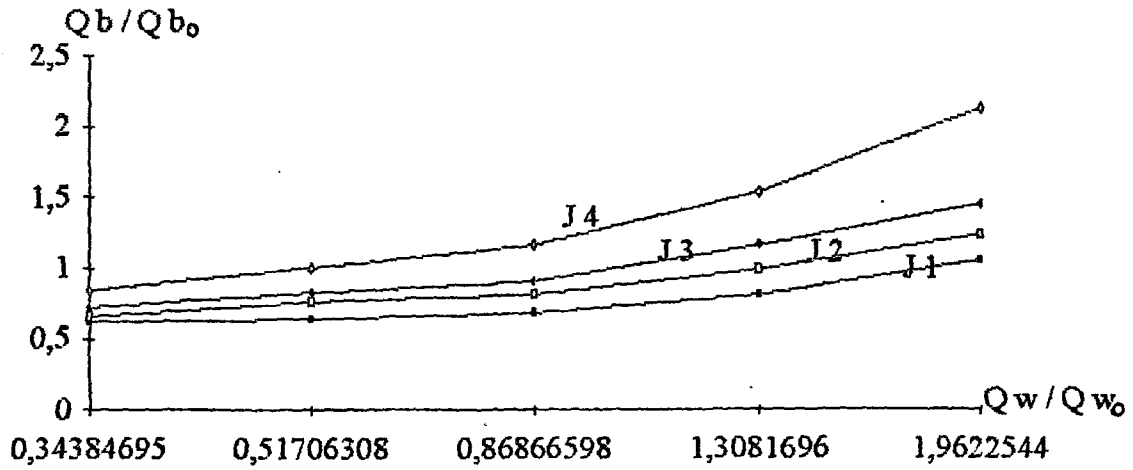
Şekil 25.  $D = 0.9 \text{ mm}$  ve seçilen debiler için ( $Q_b - J$ ) değerleri



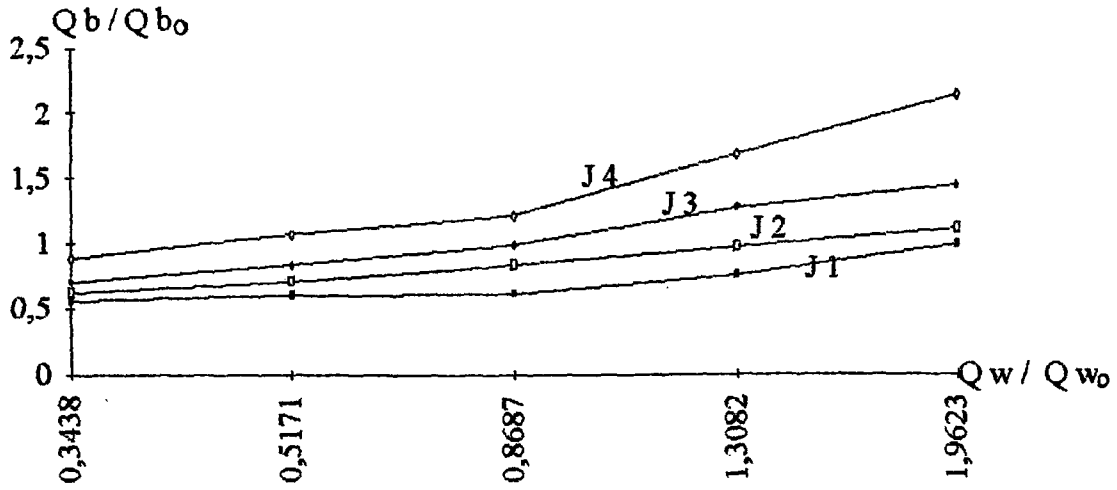
Şekil 26.  $D = 0.8$  mm ve seçilen debiler için ( $Q_b - J$ ) değerleri



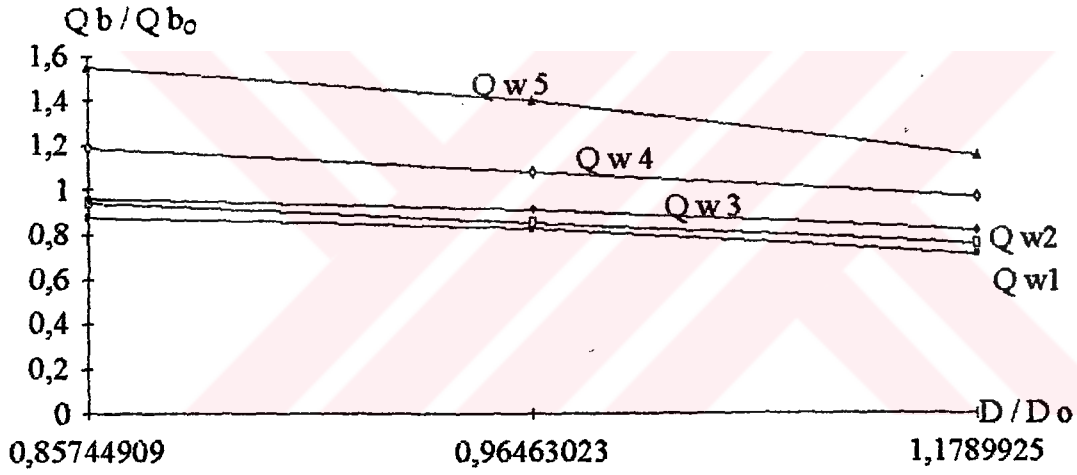
Şekil 27.  $D = 1.1$  mm ve seçilen eğimler için ( $Q_b - Q_w$ ) değerleri



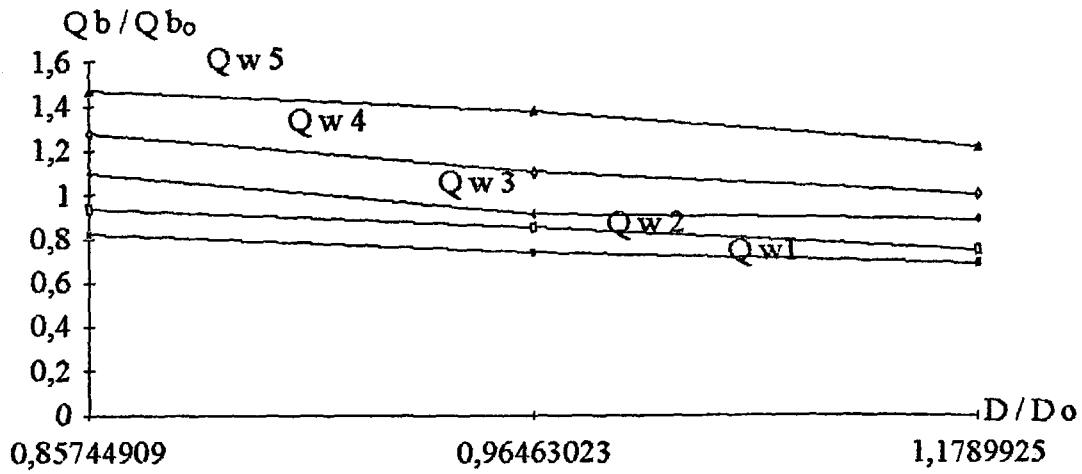
Şekil 28.  $D = 0.9$  mm ve seçilen eğimler için ( $Q_b - Q_w$ ) değerleri



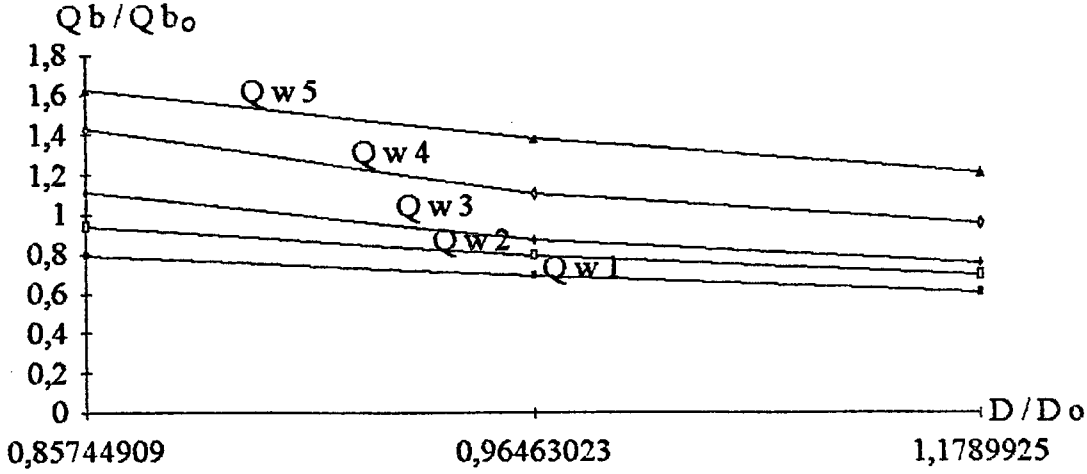
Şekil 29.  $D = 0.8$  mm ve seçilen eğimler için ( $Q_b - Q_w$ ) değerleri



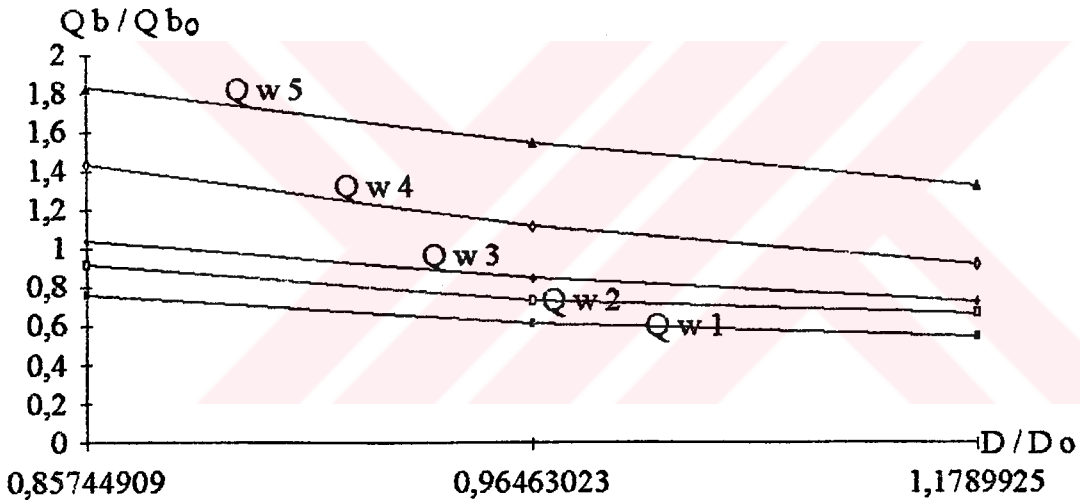
Şekil 30.  $J = 0.008$  ve seçilen debiler için ( $Q_b - D$ ) değerleri



Şekil 31.  $J = 0.012$  ve seçilen debiler için ( $Q_b - D$ ) değerleri



Şekil 32.  $J = 0.013$  ve seçilen debiler için ( $Q_b - D$ ) değerleri



Şekil 33.  $J = 0.015$  ve seçilen debiler için ( $Q_b - D$ ) değerler

### 3.7. Deney Sonuçlarına Göre En Uygun Regresyon Denklemlerinin Tespiti

Bu çalışmada yapılan deneyler neticesinde toplam katı madde miktarını veren askı ve sürüntü maddesi debileri için 32 regresyon denklemi kurularak ve herbir denklem için de korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Bu noktadan sonra hangi katı madde miktarı için hangi regresyon denkleminin daha uygun ya da daha anlamlı olduğuna, bu regresyon denklemleri ile bunlara ait korelasyon katsayılarının yer aldığı Tablo 5 ve Tablo 6'ya bakılarak karar verilecektir. Hem askı hem de sürüntü maddesi için geliştirilmiş olan regresyon denklemlerinden korelasyon katsayısı mutlak değer olarak 1'e en yakın olan denklem o katı madde türü için en uygun olan denklemdir. Buna göre:



a) Askı maddesi için en uygun regresyon denklemini :

Lineer olmayan, parabolik olarak kabul edilen ve korelasyon katsayısı  $r = 0,862$  olarak bulunan  $Q_s = f(Q_w)$  fonksiyonuna ait olan denklem (Denklem 73) askı maddesi için en uygun denklem olarak seçilmiştir.

$$Q_s = -0.031 + 33.472 Q_w + 0.653 Q_w^2 \quad (73)$$

Bu denklemde:  $-0.031 = a_0$ ,  $33.472 = a_1$  ve  $0.653 = a_2$  regresyon katsayılarıdır ve bu katsayıların alt ve üst sınırları Tablo 3 ve Tablo 4'de verilen deney değerleri de kullanılarak;

$$A a_i = a_i - t (S a_i) \quad (101)$$

$$\bar{U} a_i = a_i + t (S a_i) \quad (102)$$

şeklindeki bağıntılarla hesaplanır [6] Burada:

$t$  :  $n - 2$  serbestlik derecesi için % 90 güven düzeyindeki  $t$ , dağılımı değerini (bu tezde  $n = 60$  olduğundan 58 için  $t$  ilgili tablodan % 90 güven düzeyi için 1.670 olarak okunur),

$A a_i$  ve  $\bar{U} a_i$  : Sırasıyla ilgili regresyon katsayısının alt ve üst sınırını,

$a_i$  : Alt veya üst sınırı hesaplanan regresyon katsayısını,

$S a_i$  : İlgili regresyon katsayısını standart sapmasını ifade eder ve bu terim  $a_0$ ,  $a_1$  ve  $a_2$  regresyon katsayıları için

$$S a_0 = S_{ey} [(1/n) + (x^2 / \sum (x - \bar{x})^2)]^{0.5} \quad (103)$$

$$S a_1 = S_{ey} / \sum [(x - \bar{x})^2]^{0.5} \quad (104)$$

$$S a_2 = (S_{ey} / S_x) [(1 / (n - N - 1) (1 - r^2))]^{0.5} \quad (105)$$

şeklindeki formüllerle [5], [24] hesaplanır. Bu formüllerdeki  $S_{ey}$ ,  $S_x$ ,  $n$ ,  $N$ ,  $r$ ,  $x$  ifadelerine ait ayrıntılı açıklamaları Eklerdeki regresyon denklemlerine ait olan işlemlerin

içerisinde verilmiş olup değerleri ise Tablo 3 ve Tablo 4'de hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak Denklem (103), Denklem (104) ve Denklem (105)'den askı maddesi için:

$$S a_0 = 0.0425 [(1/60) + ((0.00387^2 / (0.01749))^2)]^{0.5} = 0.0108$$

$$S a_1 = 0.0425 / (0.01749)^2)^{0.5} = 2.4299$$

$$S a_2 = (0.0425 / 0.00228) [1 / ((60 - 1 - 1) (1 - 0.868^2))]^{0.5} = 0.492$$

olarak hesaplanır. Bu değerler ile ilgili tablodan okunan t, değeri Denklem (101) ve Denklem (102)'de yerine yazılarak askı maddesi denklemine ait regresyon katsayılarının alt ve üst sınırları:

$$A a_0 = -0.031 - [(1.670) (0.0108)] = -0.049$$

$$\bar{U} a_0 = -0.031 + [(1.670) (0.0108)] = -0.012$$

$$A a_1 = 33.472 - [(1.670) (2.4299)] = 29.415$$

$$\bar{U} a_1 = 33.472 + [(1.670) (2.4299)] = 36.812$$

$$A a_2 = 0.653 - [(1.670) (0.492)] = -0.168$$

$$\bar{U} a_2 = 0.653 + [(1.670) (0.492)] = 1.474$$

olarak hesaplanır.

#### b) Sürüntü maddesi için en uygun regresyon denklemi

Lineer olmayan, parabolik olarak kabul edilen ve korelasyon katsayısı  $r = 0,9995$  olarak bulunan  $Q_b = f(Q_w)$  fonksiyonuna ait olan denklem (Denklem 89) askı maddesi için en uygun denklem olarak seçilmiştir.

$$Q_s = 0.0063 + 1.323 Q_w + 0.053 Q_w^2 \quad (89)$$

Bu denklemde:  $0.0063 = a_0$ ,  $1.323 = a_1$  ve  $0.053 = a_2$  regresyon katsayılarıdır ve bu katsayıların alt ve üst sınırları, Tablo 3 ve Tablo 4'deki sürüntü maddesine ait deney değerleri yukarıda verilen Denklem (101) - Denklem (105)'de yerine yazılarak sürüntü maddesi için:

$$S a_0 = 0.003316 [(1/60) + ((0.00387^2 / (0.01749)^2)]^{0.5} = 0.00022$$

$$S a_1 = 0.003316 / (0.01749)^2)^{0.5} = 0.189$$

$$S a_2 = (0.003316 / 0.00228) [1 / ((60 - 1 - 1) (1 - 0.999^2))]^{0.5} = 0.420$$

olarak hesaplanır. Bu değerler ile ilgili tablodan okunan  $t_s$  değeri Denklem (101) ve Denklem (102)'de yerine yazılarak sürüntü maddesi denkleminde ait regresyon katsayılarının alt ve üst sınırları:

$$A a_0 = 0.0063 - [(1.670) (0.00022)] = 0.0059$$

$$\bar{U} a_0 = 0.0063 + [(1.670) (0.00022)] = 0.0067$$

$$A a_1 = 1.323 - [(1.670) (0.189)] = 1.008$$

$$\bar{U} a_1 = 1.323 + [(1.670) (0.189)] = 1.638$$

$$A a_2 = 0.053 - [(1.670) (0.420)] = - 0.648$$

$$\bar{U} a_2 = 0.053 + [(1.670)(0.420)] = 0.754$$

olarak hesaplanır.

c) Toplam katı madde için en uygun denklem

Toplam katı madde miktarı ise, Tablo 5 ve Tablo 6'da verilen Denklem (73) ve Denklem (89)'dan elde edilen değerlerin toplanması ile belirlenilir ve Denklem (106)'da verilmiştir.

$$Q_t = Q_s + Q_b = -0.025 + 34.795 Q_w + 0.706 Q_w^2 \quad (106)$$

Görüldüğü gibi bu çalışma sonunda geliştirilen ve katı madde taşınımı için en uygun regresyon denklemi olarak tespit edilen bu denklemlere göre katı madde türlerinin hepsinde (askı, sürüntü ve dolayısıyla toplam katı madde) en etkin parametre  $Q_w$  olarak görülmektedir. Çünkü en uygun regresyon denklemlerinin fonksiyonları  $Q_s = f(Q_w)$  ve  $Q_b = f(Q_w)$  şeklindedir. Buradan da;  $Q_t = Q_s + Q_b$  teorisine göre:  $Q_t = f(Q_w)$  olur.

### 3.8. Deney Sonuçlarına Göre En Uygun Grafiğin Tesbiti

DeneySEL çalışma sonunda geliştirilen, katı madde taşınımı için en uygun denklem olarak tespit edilen ve 3.7'de verilen regresyon denklemlerine göre katı madde taşınımında en etkin parametre  $Q_w$  olarak belirtildiğine göre böyle bir durumda en uygun grafikler de her bir katı madde türü için  $Q_w$  grafikleri olacaktır. Buna göre en uygun grafikler:

a) Askı Maddesi İçin

Askı maddesi için en uygun grafikler; Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19'da verilen  $D = 1.1 \text{ mm}$ ,  $D = 0.9 \text{ mm}$  ve  $D = 0.8 \text{ mm}$  için  $Q_s - Q_w$  grafikleridir.

b) Sürüntü Maddesi İçin

Sürüntü maddesi için en uygun grafikler; Şekil 27, Şekil 28 ve Şekil 29'da verilen  $D = 1.1 \text{ mm}$ ,  $D = 0.9 \text{ mm}$  ve  $D = 0.8 \text{ mm}$  için  $Q_b - Q_w$  grafikleridir.

## 4. İRDELEME

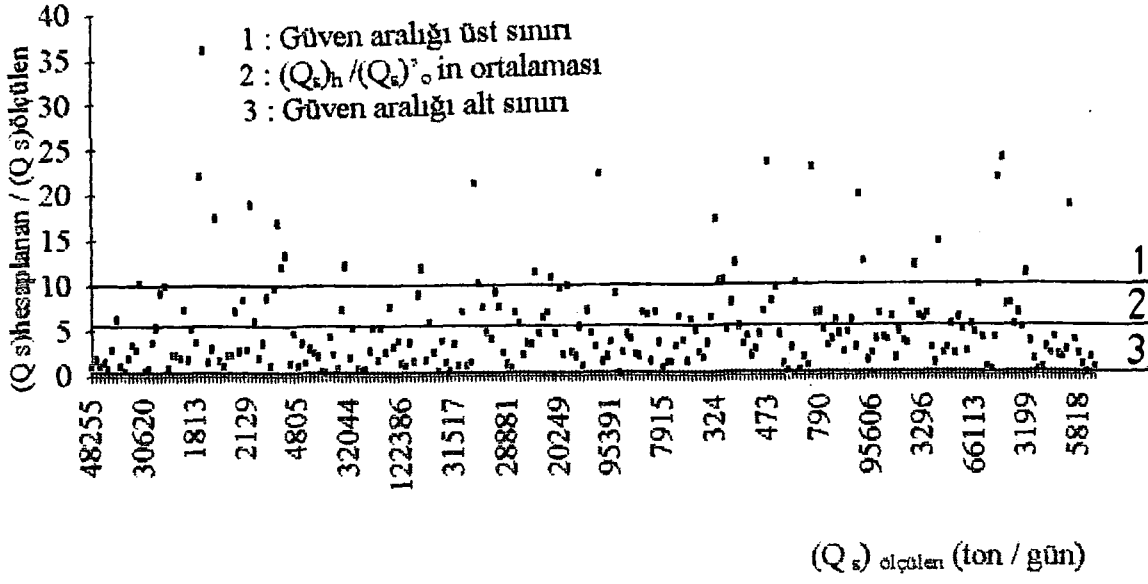
### 4.1. Bu Tezde Elde Edilen Bağntıların Pratiğe ve Teoriye Uygulanması

Bu çalışma sonucunda katı madde taşınım debisini belirlemek için elde edilen ve Bölüm 3.7’de verilen bağıntıların verdikleri sonuçların pratikte ölçülen değerlere ve katı madde taşınım miktarının hesabında kullanılan bazı formüllere yakın değerler verip verip vermediğini görmek için bu bağıntıların, daha önceden değişik gözlem istasyonlarında ölçümleri yapılarak akım debileri ile katı madde taşınım miktarları belirlenmiş çeşitli akarsu havzalarına uygulanması ve katı madde taşınımında kullanılan bazı formüllerle karşılaştırılması uygun olacaktır. Ancak uygulamada, bu tezde önerilen bağıntıların verdiği sonuçlarla diğer sonuçların birbirine %100 olarak yaklaşması beklenemez. Çünkü; uygulama için baz alınacak akarsuya ait ölçümlerin doğruluk derecesi, anlık değişen akım şartları, akarsu eğimi, taşıdığı malzemenin ortalama çapı ile karşılaştırma için seçilen formüllerdeki çeşitli kabul ve parametrelerin de bu olaya etkisinin olduğu bilinmektedir. Buna rağmen yinede bu iki sonucun birbirine yakın sınırlar içerisinde olması beklenmektedir.

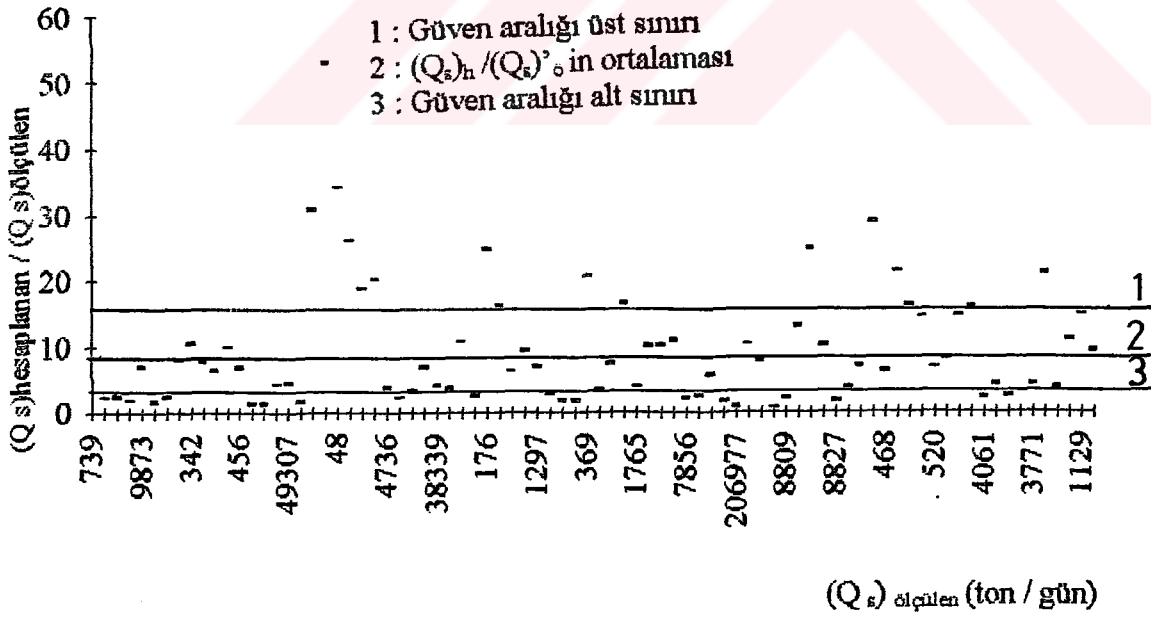
### 4.2. Bu Tezde Elde Edilen Bağntıların Pratikte Ölçülen Değerlere Uygulanması

Elde edilen bu bağıntıların pratikte ölçülen değerlere uygulanabilmesi için; Türkiye akarsularının taşıdığı katı madde miktarının ölçümü konusunda yakından ilgilenen ve birçok akarsu havzası üzerinde gözlem istasyonu bulunan Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü’nün (E.İ.E.) ölçüm değerleri kullanılmaktadır [14]. Ancak, E.İ.E. kurmuş olduğu bu gözlem istasyonlarında sadece askı maddesi miktarını ölçtüğü için yapılan uygulama da bu tezde askı maddesi için önerilen bağıntı üzerinde yapılmıştır. Pratikte ölçülen değerler üzerine yapılan bu uygulama için seçilen akarsu havzaları ile bu akarsulara ait bazı özellikler ve yapılan uygulama sonucunda çıkan değerler Şekil 34 - Şekil 43’de ve Tablo 7 ile Tablo 8’de yer almış ve bu tablo ile şekillere ait açıklamalar aşağıda sunulmuştur.

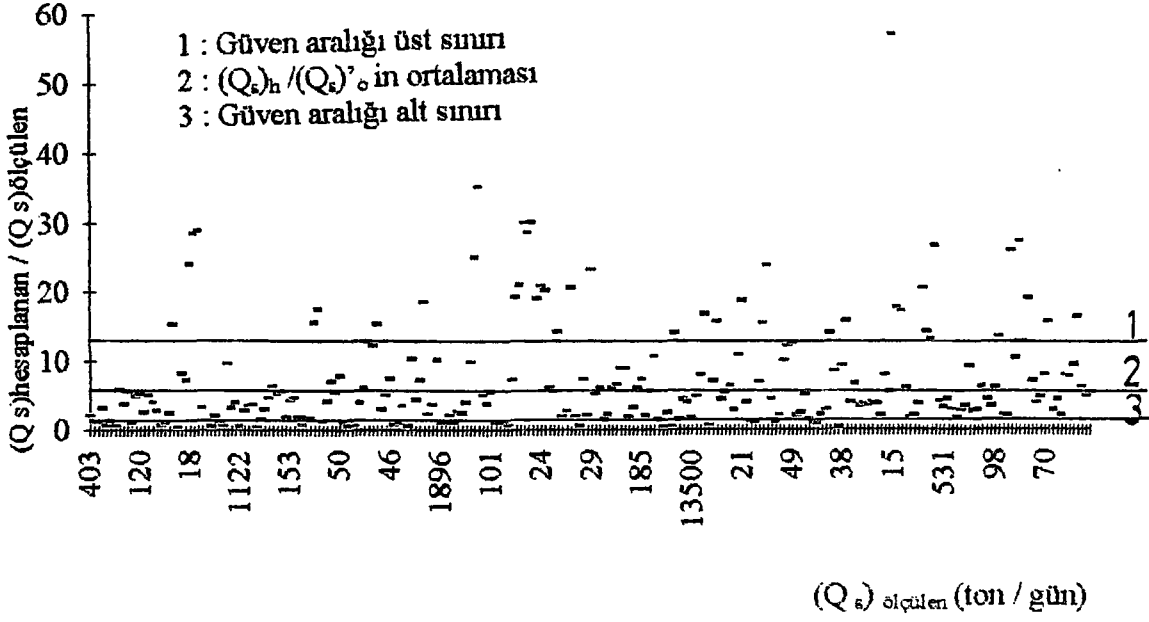
Şekil 34 - 43’de verilen grafiklerin x ekseni pratikte ölçülen askı maddesi miktarını, y ekseni ise hesaplanan askı maddesi miktarının pratikte ölçülen askı maddesi miktarına oranını temsil etmektedir. Bu grafikler aynı zamanda, hesaplanan askı maddesinin pratikte ölçülen askı maddesi içerisindeki dağılımını ve bu dağılımın sınırlarını da göstermektedir. Grafiklerde x eksenine paralel olarak çizilmiş olan çizgilerden; en altta olanı dağılımdaki güven aralığının alt sınırını, en üstte olanı güven aralığının üst sınırını ortada olan çizgi ise bu iki sınırın ya da Tablo 7’den de görüldüğü gibi  $(Q_s)_h / (Q_s)_o$  in ortalamasını ifade etmektedir. Güven aralıklarının alt ve üst sınırları ise güven düzeyine göre hesaplanmış ve bununla ilgili açıklamalar Bölüm 4.3’de verilmiştir.



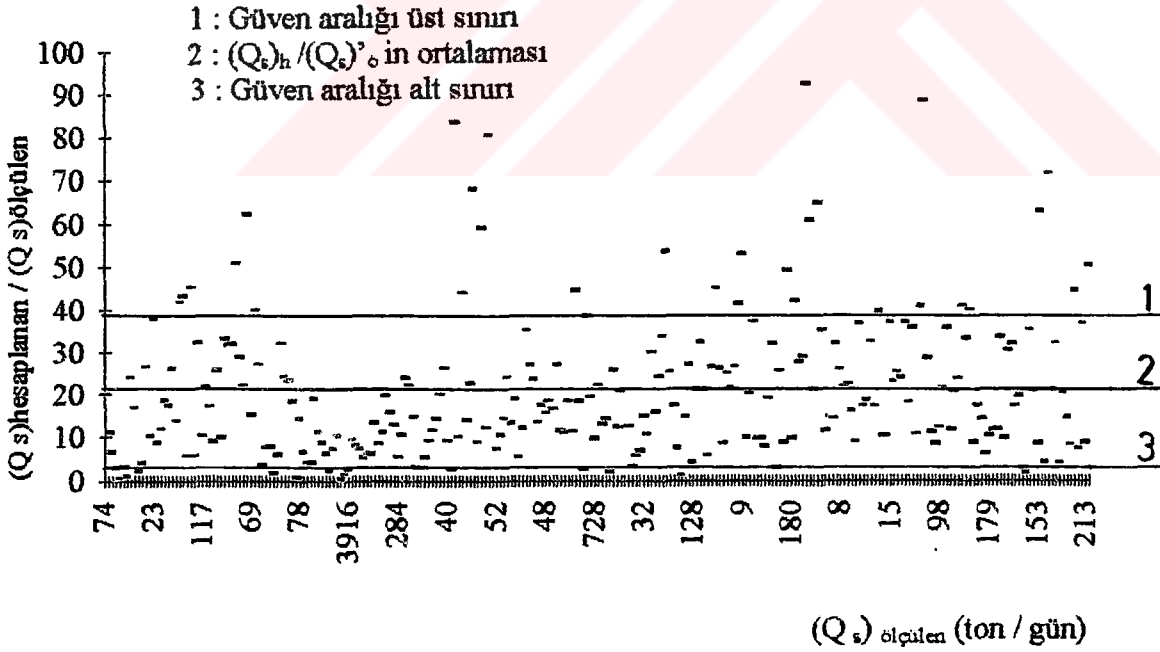
Şekil 34. Çoruh-Karşıköy suyu için hesaplanan ile ölçülen  $Q_s$  değerlerinin karşılaştırılması



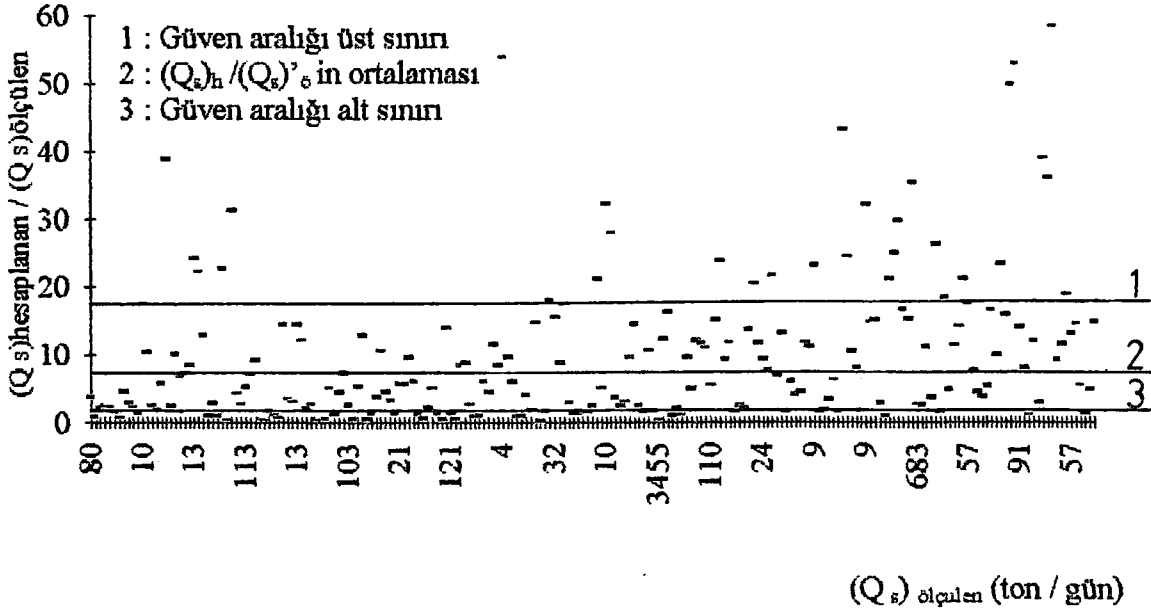
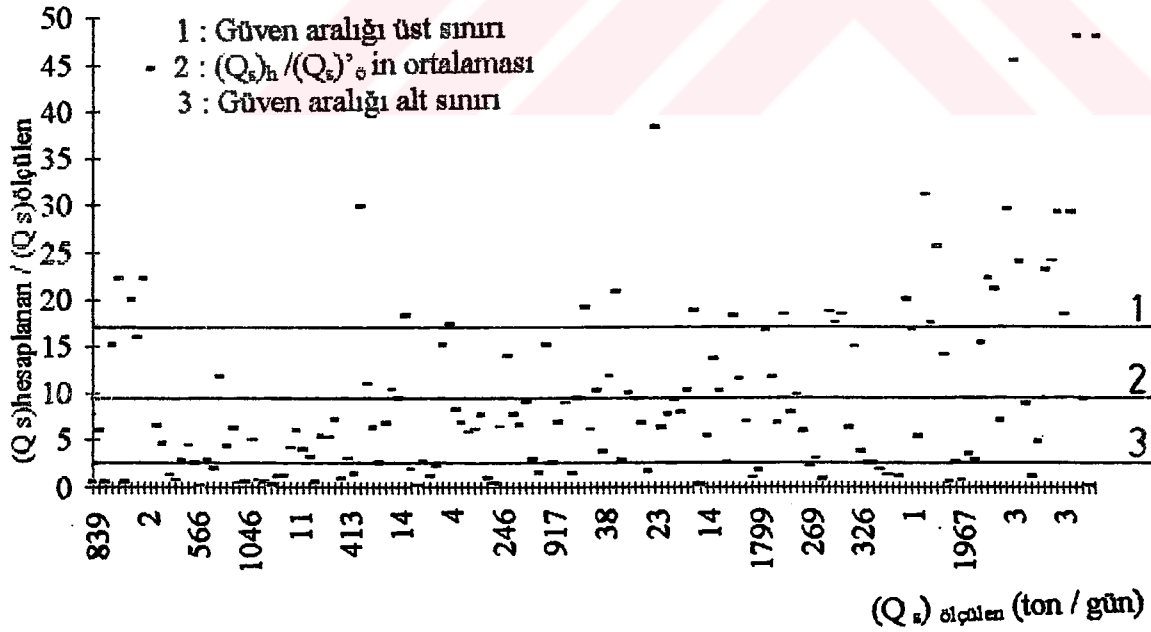
Şekil 35. Çoruh-Altınsu suyu için hesaplanan ile ölçülen  $Q_s$  değerlerinin karşılaştırılması



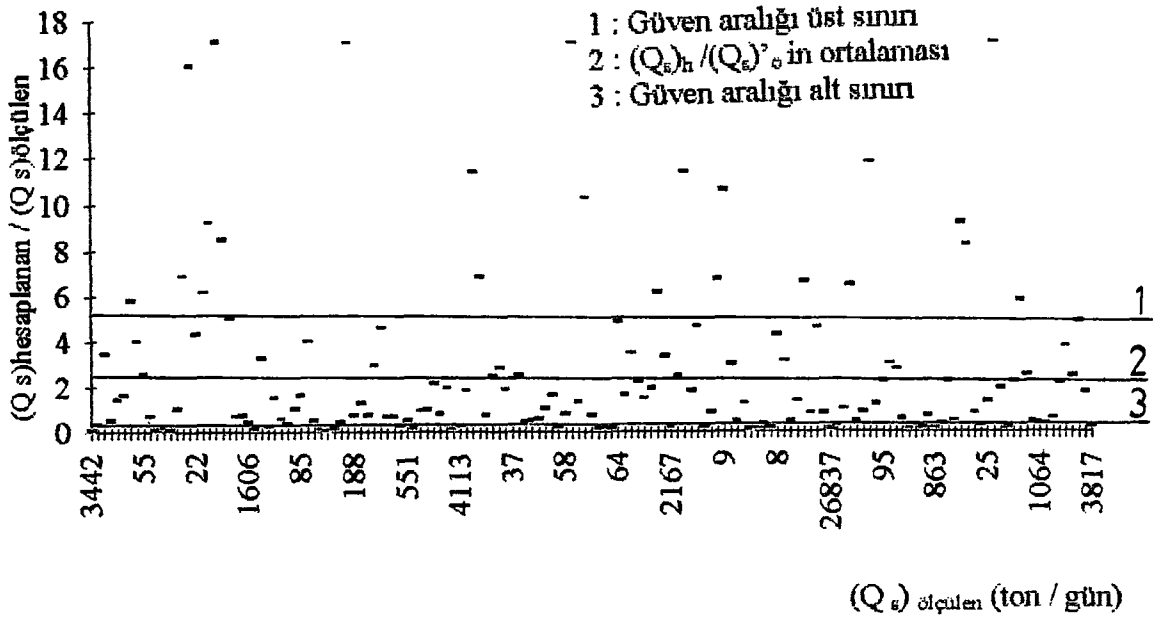
Şekil 36. Çoruh-İspir Köprüsü için hesaplanan ile ölçülen  $Q_s$  değerlerinin karşılaştırılması



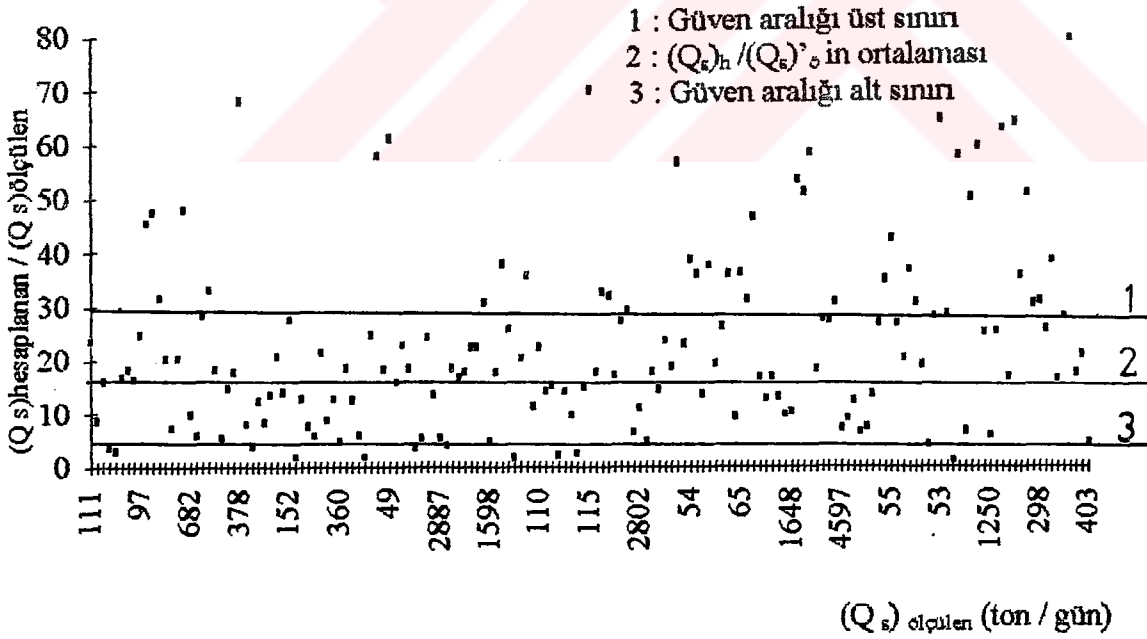
Şekil 37. İyidere - Şimşirli suyu için hesaplanan ile ölçülen  $Q_s$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 38. Harşit - Kürtün suyu için hesaplanan ile ölçülen  $Q_s$  değerlerinin karşılaştırılmasıŞekil 39. Melet - Arıcılar suyu için hesaplanan ile ölçülen  $Q_s$  değerlerinin karşılaştırılması

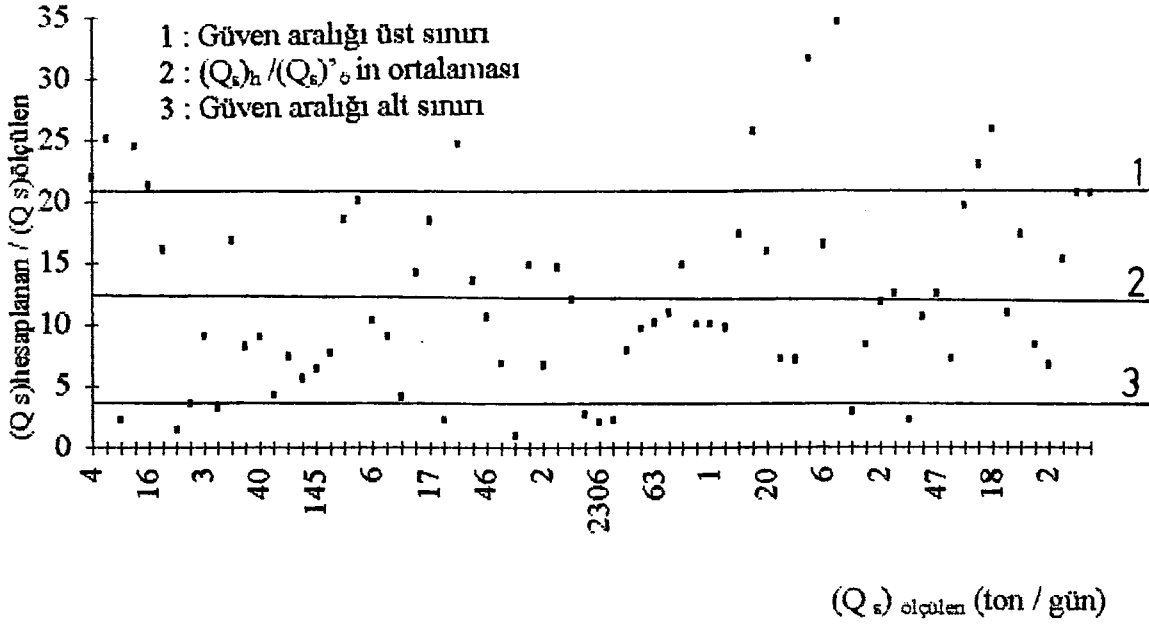
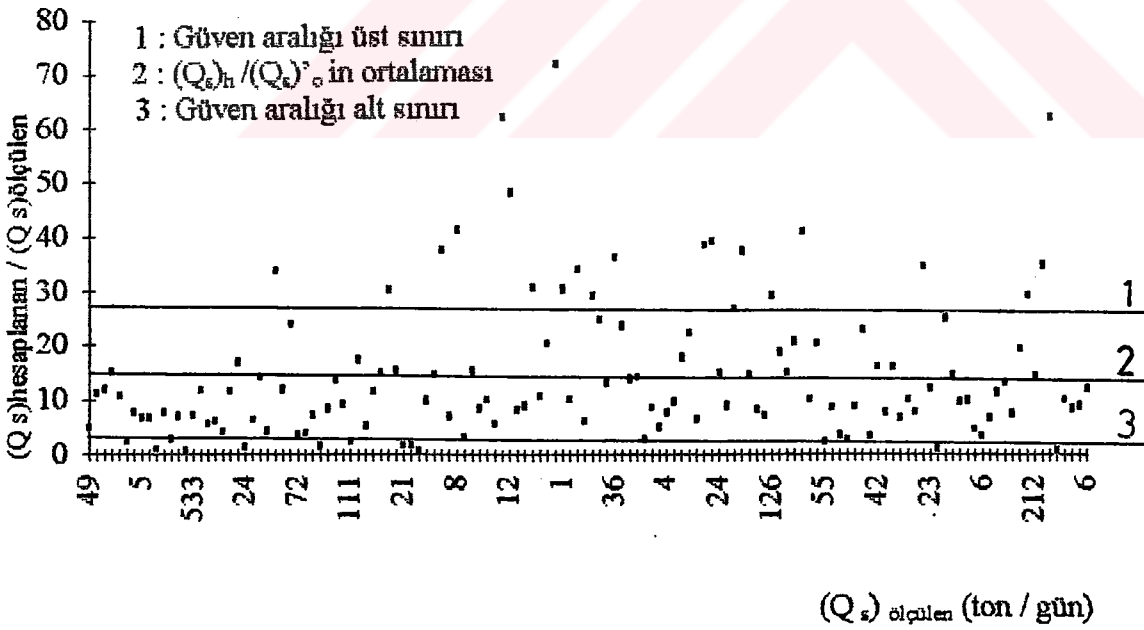




Şekil 40. Oltu-Aşağıkumlu suyu için hesaplanan ile ölçülen  $Q_s$  değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 41. Köprüçay-Beşkonak suyu için hesaplanan ile ölçülen  $Q_s$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 42. Karamenderes suyu için hesaplanan ile ölçülen  $Q_s$  değerlerinin karşılaştırılmasıŞekil 43. Gönen - Kumköy Çayı için hesaplanan ile ölçülen  $Q_s$  değerlerinin karşılaştırılması

### 4.3. Güven Düzeyi ve Güven Aralıklarının Tespiti

Güven aralıklarının belirlenmesi amacıyla ilk önce, seçilen akarsulara ait tüm veriler kullanılarak hesaplanan  $(Q_s)_h / (Q_s)_o$  değerlerinin her bir akarsuda normal dağılıma uydukları  $\chi^2$  dağılımı ile belirlenilmiştir. Bu değerlerin normal dağılıma uydukları Şekil 34 - Şekil 43'de görülmektedir. Diğer yandan hidrolojide genellikle bir yıl ya da daha uzun zaman sürelerine ait değerleri gösteren rastgele değişkenlerin dağılımı normal dağılım olarak kabul edilir [4]. Dolayısıyla normal dağılıma uyduğu kabul edilen  $(Q_s)_h / (Q_s)_o$  değerlerinin güven düzeyleri de tespit edilerek güven aralıkları:

$$A_s = \bar{x} - z S_x \quad (107)$$

$$Ü_s = \bar{x} + z S_x \quad (108)$$

şeklindeki formüllerle [4] hesaplanır. Bu formüllerde:

$A_s$  ve  $Ü_s$  : Sırasıyla güven aralığının alt ve üst sınırını,

$\bar{x}$  : Örneğin aritmetik ortalamasını,

$S_x$  : Örneğin standart sapmasını,

$z$  :  $\alpha$  anlamlılık düzeyine karşılık gelen ve örnekteki güven aralığının her iki yanındaki standart sapmanın değerini ifade eder ve bu değer ilgili tablodan okunur. Burada  $\alpha$  anlamlılık düzeyi ise

$$\alpha = 1 - P_c \quad (109)$$

formülü ile hesaplanır ve buradaki  $P_c$ , güven düzeyini ifade eder (% 70, % 80, % 90 gibi).

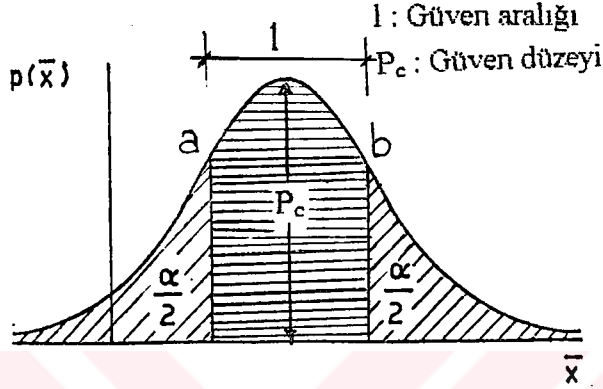
Güven düzeyi ( $P_c$ ),  $\alpha$  anlamlılık düzeyine (Şekil 44) karşılık gelen ve örnekteki güven aralığının her iki yanındaki standart sapmayı ifade eden ve ilgili tablodan okunan  $z$  değerinin, örneğin standart sapması ile çarpımının örneğin aritmetik ortalamasını geçmemesi koşuluyla en son noktaya kadar seçilebilir. İşte bu koşulu sağlayacak şekilde bu tezde güven düzeyi, % 90'dan başlamak suretiyle aşağıya doğru Denklem (107) ve Denklem (108) üzerinde deneme yanılma yöntemi ile % 75 olarak tespit edilmiştir. Bu güven düzeyi örnekteki tüm akarsuların ulaştığı asgari sınırdaki ortak bir düzeydir. Örnekteki bazı akarsular %75 güven düzeyini aştıkları halde, birlik sağlansın diye bu ortak düzey alınmıştır.

Tablo 7. Bu çalışmada elde edilen bağıntının pratikte ölçümleri yapılmış bazı akarsular üzerine uygulanması sonucu elde edilen değerler

Akarsuyun ve Gözlem	Ölçülen Debi ( $m^3/sn$ )			Ölçülen Askı Debisi ( $Q_{a0}$ , t/gün)			Hesaplanan Askı Debisi ( $Q_{ah}$ , t/gün)			$(Q_{ah}) / (Q_{a0})$		
	min	max	ort.	min	max	ort.	min	max	ort.	min	max	ort.
Çoruh - Karşıköy (2315)	38	1115	207	163	390068	23339	2182	848998	57196	0,24	36,1	5,2
Çoruh - Alınsu (2322)	26	994	206	48	392887	22730	1278	678059	56868	0,60	53,01	9,3
Çoruh-İspir Köpr. (2316)	8	327	43	11	45412	2690	288	80586	4303	0,29	56,94	7
İyidere - Şimşirdi (2218)	6	148	29	4	16742	430	207	19189	1922	0,34	92,31	20,8
Harşit - Kürtün (2201)	2	313	28	3	34389	1504	84	74627	2271	0,27	58,55	9,47
Melet - Arıcılar (2238)	0,5	95	12	1	46047	872	17	9073	654	0,18	48,1	9,41
Oltu-Aşağı Kumlu(2316)	1	44	7	2	26387	1409	34	2773	299	0,06	17,07	2,67
Köprüçay-Beşkonak (902)	26	308	81	21	30767	1265	1325	72299	8698	1	79	16
Karamenderes-A.köp(407)	0,1	111	11	1	5242	175	3	11671	655	1	34,7	12,2
Gönen Çayı-Kumköy(210)	0,3	185,5	18	1	26828	428	10	28679	1446	0,65	72	14,6

Böylece güven düzeyi ( $P_c$ ) %75 olarak tespit edildikten sonra Denklem (109)'dan  $\alpha$ , anlamlılık düzeyi:

$\alpha = 1 - 0.75 = 0.25$  olarak hesaplanmış ve bu değer, örnekteki güven aralığının her iki yanına ait olduğundan ve her iki taraf birbirine simetrik olduğundan (Şekil 44) örneğin bir tarafı için  $0.25 / 2 = 0.125$  olarak bulunur. Başka bir ifade ile örneğin bir tarafı için güven düzeyi,  $P_c = 1 - 0.125 = 0.875$  yani % 87.5 olarak bulunur.



Şekil 44. Güven aralığı ve güven düzeyinin şekilsel olarak ifadesi

Bu noktadan sonra ilgili tablodan 0.125 anlamlılık düzeyine karşılık gelen  $z$  değeri, tatonman yapılarak  $z = 1.115$  olarak bulunmuştur. Daha sonra bulunan bu değerler ile Tablo 7'de hesaplanmış olan bazı değerler Denklem (107) ve Denklem (108)'de yerine yazılarak, örnekteki akarsuların hesaplanmış  $(Q_s)_h / (Q_s)_o$  değerlerinin güven aralıkları bulunmuş ve bulunan bu güven aralıkları güven düzeyleri ile birlikte Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Seçilen akarsulara ait bazı bilgiler ile bulunan güven düzeyleri ve güven aralıkları

Akarsu ve Gözlem İstasyonunun Adı	Eğim (%)	Gözlem Süresi (yıl)	Veri Sayısı	$(Q_s)_h / (Q_s)_o$ değerleri için	
				Güven Düzeyi (%)	Güven Aralığı
Çoruh - Karşıköy	0.001	25	252	75	0.38 - 10
Çoruh - Altınsu	0.002	18	81	75	2.5 - 16
Çoruh - İspir Köprüsü	0.008	25	239	75	0.68 - 13.3
İyidere - Şimşirli	0.015	27	262	75	1.82 - 39.8
Harşit Çayı - Kürtün	0.013	24	215	75	0.5 - 18.4
Melet Suyu - Arıcılar	0.009	18	160	75	2 - 16.7
Oltusuyu-Aşağıkumlu	0.012	17	151	75	0,4 - 5.2
Köprüçay - Beşkonak	0.005	19	180	75	2.2 - 29.8
Karamenderes-A.Köp.	0.007	21	70	75	3.46 - 20.9
Gönen Çayı - Kumköy	0.003	11	140	75	1.95 - 27

Hidrolojide, gözlenmiş değerlerden en büyük ve en küçük olanlar eğer dağılımın güven bölgesini oluşturan noktaların arasından geçirilen doğrusal çizginin çok uzağına düşüyorlarsa bunların başka bir dağılıma uydukları kabul edilerek bu değerler göz önüne alınmazlar yani atılırlar [4]. Bu tezde de uygulama için seçilen akarsuların gözlenmiş değerlerinden bu çizginin çok uzağına düşen birer değer göz önüne alınmayarak atılmıştır. Bu tezde, deneysel çalışma sonucunda elde edilen bağıntıların, pratikte yapılan ölçümler üzerine uygulanmasıyla elde edilen ve Tablo 7 ve Tablo 8’de verilen değerlere göre:

Uygulama için seçilen akarsuların gözlem süresi içerisinde gözlenmiş olan verilerinin genel aritmetik ortalaması alındığında,  $(Q_n)_h / (Q_n)_o$  oranının 0.21 ile 6.8 arasında, genel aritmetik ortalaması yerine gözlem süresi içerisinde gözlenmiş olan tüm verilerin herbiri tek tek değerlendirilip  $(Q_n)_h / (Q_n)_o$  hesaplandığında ise bu oranın 2.67 ile 20.8 arasında değiştiği görülmektedir. Bunlardan birinci oranın, daha yakın değerlere sahipmiş gibi görünmesine rağmen bu tezde, ikinci oran dikkate alınmıştır. Çünkü hidroloji ve istatistiki işlemlerde bu yaklaşımın gerçeği temsil etme bakımından daha doğru olduğu bilinmektedir.

Buradan çıkarılan sonuca göre ölçülen değerler ile hesaplanan değerlerin birbirlerine yakın oldukları kabul edilebilir. Dolayısıyla; deneysel çalışma ile elde edilen ve katı madde taşınım miktarını hesaplayan bu bağıntıların çok sayıda akarsu için kullanılabilirlik yüzdesinin yüksek olduğu söylenebilir.

#### 4.4. Bu Tezde Elde Edilen Bağıntıların Bazı Formüllerle Karşılaştırılması

Bu çalışma sonucunda katı madde taşınım debisini belirlemek için elde edilen ve Bölüm 3.7’de verilen bağıntıların verdikleri sonuçların katı madde taşınım miktarının hesabında kullanılan bazı formüllere yakın değerler verip vermediğini görmek için bu bağıntıların, bazı formüllerle karşılaştırılması uygun olacaktır. Ancak bu karşılaştırmada, seçilen formüllerde yapılmış olan çeşitli kabullerin hangi şartlar altında geçerli olduğunun ve katı madde taşınımına ilişkin bazı parametrelerin ( $Q_w$ ,  $D_{50}$ ,  $J$  gibi ) hangi değerleri için bu formüllerin daha uygun olduğunun tam olarak bilinmemesi sebebiyle, bu formüllerin verdiği sonuçların bu tezde önerilen bağıntıların verdiği sonuçlarla aynı ya da çok yakın çıkması beklenemez. Bu sebeple, ilk olarak karşılaştırma için seçilen formüllerin katı madde taşınımına ilişkin bazı parametrelerin hangi değerleri için uygun olduklarının araştırılması gerekmektedir.

Bu araştırma sonucunda bu karşılaştırma için daha önce Doğu Karadeniz Bölgesi'ndeki bazı akarsularda, katı madde taşınımında kullanılan bazı formüllerin karşılaştırılması [9] amacıyla yapılan bir çalışmadan yararlanılmıştır. Söz konusu bu çalışmada ince, orta ve iri malzeme için katı madde taşınımında kullanılan bazı formüller, bölgedeki bazı akarsulara tatbik edilerek, bu formüllerin birbirleriyle karşılaştırılması yapılmıştır. Ortalama dane çapının ( $D_{50}$ ) kriter olarak alındığı bu karşılaştırmaya deneysel çalışma sonucunda elde edilen ve Bölüm 3.7'de verilen Denklem (73)'de eklenerek önerilen bu bağıntının verdiği sonuçların diğer formüllerin verdiği sonuçlara yakınlık veya uzaklık derecesi tespit edilmiştir. Karşılaştırmada kullanılan formüller askı maddesi miktarını hesaplamaya yönelik oldukları için karşılaştırma da askı maddesi için gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırmaya geçmeden önce, bu tezde kullanılan malzeme çapının büyüklük bakımından hangi sınıfa girdiği tespit edilmelidir.

Dane çapına göre sınıflandırma ; 0.06 mm - 0.2 mm ince kum, 0.2 mm - 0.6 mm orta kum ve 0.6 mm - 2 mm olanlar ise iri kum olarak sınıflandırılmaktadır [16]. Buna göre deneylerde kullanılan malzemelerin üçü de (0.8 mm, 0.9 mm ve 1.1 mm olduklarından) iri kum sınıfına girmektedirler.

#### 4.5. Karşılaştırma İçin Seçilen Katı Madde Taşınım Formülleri

a) Einstein Formülü : Analitik çalışmaya dayalı bu formül, parametre olarak dane çapını, hidrolik yarıçapı, akım hızını, su derinliğini ve viskoziteyi kullanmaktadır. Bu formül; iri çaplı malzemede çok iyi, orta çaplı malzemede vasat değerler verirken, ince çaplı malzemede gerçek değerlerden daha büyük değerler vermektedir ve bu formül [13] :

$$q_s = 11.6 q_b [2.3 \log (30.2 h / d) (I_1 + I_2)] \quad (110)$$

şeklinde ifade edilir. Buradaki  $I_1$  ve  $I_2$  sırasıyla integral 1 ve integral 2'yi ifade ederler ve bunlar çok uzun ifadeler içerdiklerinden Einstein buradaki  $I_1$  ve  $I_2$ 'yi veren değerleri grafik haline dönüştürmüştür.

b) Shen ve Hung Formülü : Askı maddesi konsantrasyonu  $C$ 'yi ve daha sonra da  $Q_s = Q_w C$ 'den askı maddesini hesaplamaya yönelik bu formül, parametre olarak akım hızını, dane çökme hızını ve eğimi kullanmaktadır. Bu formül; iri çaplı malzemede iyi, orta çaplı

malzemede vasat değerler verirken ince çaplı malzemede gerçekte olan değerlerden çok büyük değerler vermektedir ve bu formül [24] :

$$\text{Log}C=107404.4594+324214.7474Y-26309.5891Y^2+109503.8723Y^3 \quad (111)$$

$$Y = [v (J)^{0.57} / w^{0.32}]^{0.00750189} \quad (112)$$

eklindeki bağıntılarla ifade edilir.

c) Yang Formülü : Askı maddesi konsantrasyonu C'yi daha sonra da  $Q_s = Q_w C$ 'den askı maddesini hesaplamaya yönelik bu formül, parametre olarak akım hızını, dane okelme hızını, dane çapını, hidrolik yarıçapı, viskoziteyi ve eğimi kullanmaktadır. Bu formül; orta çaplı malzemede iyi, ince çaplı malzemede vasat değerler verirken, iri çaplı malzemede gerçekte olan değerlerden daha büyük değerler vermektedir ve bu formül [32] :

$$\text{Log } C_t = 5.435 - 0.286 \log (w D / v) - 0.457 \log (u_* / w) + [(1.799 - 0.409 \log (w D / v) - 0.314 \log (u_* / w)) \log [(v J - v_{kr} J) / w]] \quad (113)$$

eklinde ifade edilir.

d) Acaroğlu Formülü : Askı maddesi konsantrasyonu C'yi daha sonra da  $Q_s = Q_w C$  den askı maddesini hesaplamaya yönelik bu formül, parametre olarak akım hızını, dane çapını, hidrolik yarıçapı ve eğimi kullanmaktadır. Bu formül; ince çaplı malzemede iyi, iri çaplı malzemede vasat sonuçlar verirken, orta çaplı malzemede gerçekte olan değerlerden daha küçük değerler vermektedir ve bu formül [1]:

$$C = [21.44 (D^{3/2}) / R v] (J R / D)^{2.52} \quad (114)$$

eklinde ifade edilir.

e) Graf Foml : Askı maddesi konsantrasyonu C'yi daha sonra da  $Q_s = Q_w C$ 'den askı maddesini hesaplamaya yönelik bu formül, parametre olarak birim genişlikten geçen akımın debisini, dane çapını, hidrolik yarıçapı ve eğimi kullanmaktadır. Bu formül; özellikle



ince çaplı malzeme başta olmak üzere ince ve orta çaplı malzemede diğer formüllere göre en iyi sonucu verirken, iri çaplı malzemede gerçekte olan değerlerden daha küçük değerler vermektedir ve bu formül [17] :

$$C = [16.69 (g R J D)^{0.5} / q_w] (\tau_*)^{2.02} \quad (115)$$

$$q_w = Q_w / B \quad (116)$$

$$\tau_* = 0.606 R J / D \quad (117)$$

şeklindeki bağıntılarla ifade edilir.

f) Engelund ve Hansen Formülü : Askı maddesi miktarını hesaplamaya yönelik bu formül, parametre olarak dane çapını, hidrolik yarıçapı, akım hızını, su derinliğini ve eğimi kullanılmaktadır. Bu formül; sadece ince çaplı malzemelerde iyi sonuçlar, iri çaplı malzemede bazı akarsularda gerçekte olan değerlerden büyük bazılarında ise küçük değerler verirken, orta çaplı malzemede ise gerçekte olan değerlerden çok küçük değerler vermektedir ve bu formül [15] :

$$q_s = \tau_*^{2.5} v^2 D^3 / 88.34 h J \quad (118)$$

$$\tau_* = R J / 1.65 D \quad (119)$$

şeklindeki bağıntılarla ifade edilir. Bu bölümde verilen formüllerde:

C : Askı maddesi konsantrasyonunu (ppm),

v : Ortalama akım hızını (m/s),

$v_{kr}$  : Kritik akım hızını (m/s),

R : Hidrolik yarıçapı (m)

D : Dane çapını (m),

w : Dane çökme hızını (m/s),

J : Akarsu taban eğimini (m/m),

$u_*$  : Kritik kayma hızını (m/s),

- $\tau_c$  : Kritik kayma gerilmesini ( $\text{kg/m}^2$ ),  
 $q_b$  : Birim genişlikten geçen sürüntü maddesi debisini ( $\text{kg/s/m}$ ),  
 $q_a$  : Birim genişlikten geçen askı maddesi debisini ( $\text{kg/s/m}$ ),  
 $q_w$  : Birim genişlikten geçen akımın debisini ( $\text{m}^3/\text{s/m}$ ),  
 $Q_w$  : Tüm genişlikten geçen akımın debisini ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  
 $I_1, I_2$  : Einstein'ın grafik haline dönüştürdüğü integral 1 ve integral 2 değerleri,  
 $Y$  : Shen ve Hung formülünde kullanılan bir katsayıyı,  
 $h$  : Ortalama su derinliğini (m),  
 $B$  : Akarsu su yüzü ortalama genişliğini (m) ifade ederler.

Bu bölümde verilen formülleri birbirleri ile karşılaştırmak amacıyla daha önce yapılmış olan ve Bölüm 4.4'de belirtilen çalışmada, karşılaştırma için dane büyüklük sınıfları kriter olarak alınmış ve ince, orta, iri çaplı danelere göre bu formüllerin verdiği değerler çok iyi, iyi, vasat, büyük, çok büyük, küçük, çok küçük şeklinde nitelendirilmiştir [9]. Bu nitelendime, karşılaştırmanın daha kolay anlaşılması için Tablo 9'da özetlenmiştir.

Tablo 9. Seçilen formüllerin malzeme sınıfına göre verdiği değerlerin niteliği

Formülün Adı	Malzeme sınıfına göre verdiği değerler			En iyi sonucu verdiği malzeme
	İnce	Orta	İri	
Einstein	Büyük	Vasat	Çok İyi	İri
Shen ve Hung	Çok Büyük	Vasat	İyi	İri
Yang	Vasat	İyi	Büyük	Orta
Acaroğlu	İyi	Küçük	Vasat	İnce
Graf	Çok İyi	İyi	Küçük	İnce /Orta
Engelund ve Hansen	İyi	Çok Küçük	Büyük / Küçük	İnce

Tablo 9'da verilen sonuçlara göre katı madde taşınım miktarının hesabında ince çaplı malzeme için en iyi değeri Graf formülü verirken Acaroğlu ile Engelund-Hansen formülleri de iyi değerler vermektedir. Orta çaplı malzeme için en iyi değeri Graf ve Yang formülü vermektedir. İri çaplı malzemede ise en iyi değeri Einstein formülü verirken, Shen-Hung formülü de iyi değerler vermektedir. Bu tezdeki deneylerde kullanılan malzemenin iri çaplı malzeme sınıfına girdiği daha önce Bölüm 4.4'de belirtilmişti. Tablo 9'a göre bu çalışmada elde edilen bağıntının katı madde taşınım miktarı için verdiği değerlerin başta Einstein'ın formülü olmak üzere Einstein ve Shen-Hung formüllerinin verdiği değerlere yakın olması beklenmektedir. Çünkü Einstein formülünün iri çaplı malzemede en iyi değerleri verdiği Tablo 9'da belirtilmiştir.

#### 4.6. Karşılaştırma İçin Seçilen Akarsular ve Karşılaştırma İçin Yapılan İşlemler

DeneySEL çalışmalar sonucunda elde edilen ve Denklem 73'de önerilen bağıntının katı madde taşınımında kullanılan bazı formüllerle karşılaştırma işleminde, daha önce yapılan bir çalışmada, iri çaplı malzeme için bu formüllerin birbirleriyle karşılaştırılmasında kullanılan akarsular [9] seçilmiştir. Seçilen bu akarsular üzerinde yapılan karşılaştırma işlemi ve çıkan değerler Tablo 10 - Tablo 14'de verilmiştir.

Tablo 10. Hemşin Deresi için yapılan karşılaştırma ( $D_{50} = 1$  mm : İri çaplı malzeme)

$Q_w$ m <sup>3</sup> /s	$(Q_s)_{ölçül}$ ton/gün	$(Q_s)_{hesap}$ ton/gün	Seçilen Formüller ve Bu Formüllere Göre Bulunan $Q_s$ : ton/gün					
			Einst.	Shen-Hu.	Yang	Acaroğ.	Graf	Engelund
2.4	0.59512	84.1	4.5	5911.4	164019.	0.0578	0.0003	5.8681
3	2.31749	106.3	11.9	8077.1	502726.	0.1003	0.0005	8.2323
3.5	3.43224	125.1	15.7	9515.1	631650.	0.1406	0.0007	0.9784
3.8	6.39896	136.6	20.8	10633.2	1077271	0.1730	0.0008	11.145
4.3	3.80437	156	27.2	12735.4	561916.	0.2236	0.0011	12.420
4.5	10.3654	163.9	28.4	13705.4	1457736	0.2496	0.0012	13.274
6.2	15.8615	232.6	57.1	22006.2	1581891	0.5040	0.0025	19.208
8.2	7.58074	318.3	98.3	34214.7	558967.	0.9323	0.0048	26.733
10	27.4147	400	125.9	46010.5	1633150	1.3979	0.0075	31.681
11	8.47757	447.2	144.5	55209.8	455563.	1.7040	0.0092	35.292
13	18.3980	545.5	176.6	77689.7	823622.	2.4508	0.0123	42.827
15	42.9754	649	196.6	103597.5	1647019	3.2749	0.0181	49.423
16	47.9140	702.7	202.2	118534.3	1712922	3.7020	0.0207	51.843
19	41.1057	871.7	297.6	161320.1	1215490	5.3959	0.0295	64.152
28	132.137	1449.1	375.5	372205.8	2555080	11.7065	0.6773	91.228
48	566.673	3111.1	673.8	1266299	6002252	36.2921	0.1949	61.967

Yapılan bu karşılaştırmada özellikle başta Graf formülü olmak üzere, bazı formüller gerek ölçülen ve gerekse hesaplanan değerler bakımından birbirlerinden çok farklı sonuçlar vermektedir. Bu büyük farklılıkların sebebinin araştırılması amacıyla, bu tezde karşılaştırma işlemi için referans alınan ve kaynak [9]'da verilen çalışmanın asıl kaynağına ulaşılmış ve karşılaştırma için seçilen formüllere ait bu değerler tekrar gözden geçirilmiştir. Bu kontrolde sonuçları değiştirebilecek ölçüde herhangi bir hatanın yapılmadığı sonucuna varılmıştır.

Bu noktadan sonra, yukarıda belirtilen kaynağın yazarı ve araştırmacısı bu farklılıkların sürpriz olmadığını ve bazı formüllerde görülen bu farklılıkların dane çapına bağlı olarak meydana geldiğini belirtmiştir. Örneğin; dane çapı 0.25 mm'den 1 mm'ye çıkarıldığında, katı madde taşınım miktarı da bir formülden diğer bir formüle göre aşırı derecede değişmektedir.

Tablo 11. Fırtına Deresi için yapılan karşılaştırma ( $D_{50} = 1 \text{ mm}$  : İri çaplı malzeme)

$Q_w$ $m^3/s$	$(Q_s)_{ölçül}$ ton/gün	$(Q_s)_{hesap}$ ton/gün	Seçilen Formüller ve Bu Formüllere Göre Bulunan $Q_s$ :					
			Einstein	Shen-Hu.	Yang	Acaro.	Graf	Engel.
8	6.2208	309.537	1817.204	42.31	0.455	0.032	0.0010	609E4
9	7.776	354.11	1946.434	71.94	2.969	0.041	0.0013	602E4
10	9.504	399.989	1988.861	95.67	6.988	0.050	0.0016	615E4
11	9.0288	447.174	1786.714	144.65	171.151	0.063	0.0020	621E4
12	16.5888	495.665	1804.983	181.81	260.469	0.073	0.0024	624E4
14	6.048	596.565	1580.831	342.52	611.477	0.103	0.0033	628E4
22	41.8176	1052.405	1528.312	1302.87	2111.702	0.186	0.0084	715E4
26	42.6816	1311.669	1593.957	2042.72	3062.497	0.297	0.0119	716E4
28	38.7072	1449.137	1610.107	2549.09	3651.214	0.380	0.0138	717E4
30	67.392	1591.829	1626.314	2990.44	4160.48	0.441	0.0158	724E4
33	54.1728	1815.662	1661.974	2883.84	5113.112	0.510	0.0194	736E4
36	115.085	2051.249	1714.642	4917.35	6151.518	0.619	0.0233	749E4
55	99.792	3816.254	1752.187	13638.14	13732.87	1.050	0.0523	863E4
60	129.6	4359.089	1789.708	16624.62	16051.04	1.763	0.0669	878E4
65	78.624	4934.574	1857.028	19565.69	18300.21	2.072	0.0792	905E4
70	211.68	5542.709	1911.115	23219.75	20917.76	2.419	0.0925	945E4
90	155.52	8301.749	1860.925	40422.81	32310.35	3.378	0.1555	1006E4

Tablo 12. İyidere için yapılan karşılaştırma ( $D_{50} = 1 \text{ mm}$  : İri çaplı malzeme)

$Q_w$ $m^3/s$	$(Q_s)_{ölçül}$ ton/gün	$(Q_s)_{hesap}$ ton/gün	Seçilen Formüller ve Bu Formüllere Göre Bulunan $Q_s$ :				
			Einstein	Shen-Hung	Yang	Acaroğlu	Graf
5	6.912	183.654	175141.6	2590.233	1666.065	0.0509	0.0005
8	22.1184	309.537	8.424881	4539.567	3745.98	0.1426	0.0014
9	13.9968	354.11	18.69316	5565.167	4471.605	0.1850	0.0019
10	13.824	399.989	244986.3	6814.446	5253.446	0.2298	0.0023
11	20.9088	447.174	263634.8	8214.279	6150.37	0.2832	0.0029
12	17.6256	495.665	302997.2	10468.32	7107.224	0.3421	0.0035
14	27.8208	596.565	347138.7	13733.16	9127.984	0.4790	0.0050
16	45.6192	702.689	390989.7	17311.82	11171.78	0.6469	0.0066
18	69.984	814.037	412152.3	21860.92	13297.18	0.8273	0.0087
20	65.664	930.609	2.946507	26512.38	15796.41	1.0298	0.0108
22	55.1232	1052.405	11.13267	31711.69	18224.98	1.2716	0.0134
24	97.4592	1179.425	3.078513	37490.52	20815.26	1.5199	0.0161
26	159.494	1311.669	6.198583	46849.89	23512.59	1.8308	0.0195
30	160.704	1591.829	6.491506	60212.37	29215.35	2.4749	0.0259
33	171.072	1815.662	608020.1	72187.62	33929.97	3.0621	0.0313
36	62.208	2051.249	729898.3	92718.07	38583.92	3.6982	0.0373
42	97.978	2557.685	856517.2	118716.2	48565.57	5.2182	0.0544
45	171.072	2828.534	948645.6	142235.6	54361.37	6.0769	0.0622
50	224.64	3306.069	1007866	175939	63612.98	7.4044	0.0777
55	199.584	3816.254	1063844	217515.7	73239.43	9.1571	0.0997
65	235.872	4934.574	1154021	308634.4	94364.2	12.922	0.1404
70	84.672	5542.709	1215845	383278.5	105776.8	15.029	0.1633
100	1123.2	9877.169	1386587	786184	175158.2	32.063	0.3629
140	6217.34	17484.85	1487154	1424986	274115.9	65.935	0.7499

Tablo 13. Değirmendere için yapılan karşılaştırma ( $D_{50} = 1 \text{ mm}$  : İri çaplı malzeme)

$Q_w$ $m^3/s$	$(Q_s)_{ölçül}$ ton/gün	$(Q_s)_{hesap}$ ton/gün	Seçilen Formüller ve Bu Formüllere Göre Bulunan $Q_s$ :					
			Einstei.	Shen-Hu.	Yang	Acaro.	Graf	Engelu
3	6.48	106.262	9.3082	1743.231	1460.97	0.010	4.41E-5	609E4
4	33.8688	144.305	21.575	2418.474	2049.76	0.018	8.64E-5	602 E4
5	31.104	183.654	24.019	3082.601	2602.03	0.025	14.3E-5	615 E4
6	40.9536	224.309	56.653	4137.615	3429.92	0.035	21.3E-5	621 E4
7	33.264	266.270	12.686	5269.393	4281.62	0.053	30.2E-5	624 E4
8	25.5744	309.537	25.286	6650.706	5269.30	0.076	41.5E-5	628 E4
9	35.7696	354.110	36.630	7968.806	6191.22	0.103	56 E-5	715 E4
14	101.606	596.565	126.39	16479.98	11661.0	0.275	145 E-5	716 E4
2	48.384	930.609	202.97	29783.86	19185.4	0.611	346 E-5	717 E4
22	148.262	1052.405	223.30	34308.87	21679.6	0.724	418 E-5	724 E4
24	746.496	1179.425	260.91	40034.17	24033.5	0.877	518 E-5	736 E4
26	166.234	1311.669	301.51	46293.59	26446.4	1.049	629 E-5	749 E4
45	979.776	2828.534	724.68	120785.6	48701.1	3.973	2255 E-	863 E4

Tablo 14. Solaklı Deresi için yapılan karşılaştırma ( $D_{50} = 1 \text{ mm}$  : İri çaplı malzeme)

$Q_w$ $m^3/s$	$(Q_s)_{ölçül}$ ton/gün	$(Q_s)_{hesap}$ ton/gün	Seçilen Formüller ve Bu Formüllere Göre Bulunan $Q_s$ :				
			Shen-Hung	Yang	Acaroğlu	Graf	Egelund
2.7	5.00152	95.103	41.9267	1797781	0.009681	0.000201	2.10233
4.2	22.9413	152.070	164.8033	5241010	0.024095	0.000507	3.31789
4.7	28.9251	171.712	218.6882	5429157	0.030009	0.000642	3.69850
5	6.3504	183.654	271.4342	1068681	0.034733	0.000732	4.02929
5.2	8.61270	191.680	282.2916	1393647	0.036122	0.000792	3.99343
6.3	11.5069	236.760	504.2580	1420349	0.055085	0.001186	4.99378
6.6	33.0226	249.328	558.7497	3857185	0.060217	0.001309	5.21696
6.9	11.6311	262.015	616.5987	1289047	0.065637	0.001439	5.44613
8.9	21.4540	349.593	1202.613	1740897	0.110807	0.002453	7.05625
9	24.8365	354.110	1216.126	1993707	0.113918	0.002521	7.16784
23	316.462	1152.262	10587.41	8604715	0.792795	0.018435	18.7376
27	46.3527	1379.75	15223.30	1048346	1.119511	0.025661	22.5357
29	274.113	1519.830	17806.60	5714559	1.297901	0.030067	14.3663
32	90.0219	1739.745	21861.12	1678135	1.581466	0.035942	26.5591
36	321.956	2051.249	2770.128	5258612	2.009318	0.047900	9.29777
51	303.909	3405.494	57285.23	3344309	4.150829	0.101347	14.0826
70	1489.14	5542.709	107156	1145081	8.061984	0.202608	19.4570

Bu bölümde belirtilen ve önceden yapılmış olan bir çalışmada, seçilmiş beş akarsuda, katı madde taşınım miktarının hesabında kullanılan bazı formüllerin birbirleriyle karşılaştırılması amacıyla yapılan çalışmaya; deneysel çalışma sonucunda bulunan ve bu tezde önerilerek Denklem (73)'de verilen bağıntının da eklenmesiyle; bu denklemin de diğer formüllerle karşılaştırılması sağlanmıştır.

Başta ince çaplı malzeme olmak üzere ince ve orta çaplı malzemede Graf, iri çaplı malzemede ise Einstein formülünün en iyi değerleri verdiği bunun yanı sıra iri malzemede Shen-Hung formülünün de iyi değerler verdiği Bölüm 4.5'de belirtilmişti. Buna göre bu tezdeki deneylerde kullanılan malzemenin iri çaplı malzeme olduğu da dikkate alınarak, Tablo10-Tab 14'de bakıldığında en iyi değerleri Einstein formülünün verdiği görülmektedir.

#### 4.7. Katı Madde Taşınımında En Etkin Parametre

Bagnold [2] yaptığı bir çalışmada, katı madde taşınım miktarı ile akımın gücü (debisi) arasında doğrusal bir ilişkinin olduğunu katı madde taşınımında yapılan işin akımın gücüne bağlı olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada elde edilerek en uygun denklem olarak önerilen ve Bölüm 3.7'de verilen denklemlere göre hem askı hem de sürüntü maddesi ve dolayısıyla toplam katı madde taşınımında en etkin parametrenin  $Q_w$  yani akımın debisi olduğu görülmektedir. Çünkü en uygun olarak belirtilen bu regresyon denklemlerinin fonksiyonları askı ve sürüntü maddesi debileri için  $Q_s = f(Q_w)$  ve  $Q_b = f(Q_w)$  şeklindedir. Toplam katı madde miktarı teorik olarak  $Q_t = Q_s + Q_b$  olduğuna göre;  $Q_t = f(Q_w)$  olur.

Katı madde taşınımında, akımın debisinin etkin olmasına bağlı olarak özellikle askı maddesi taşınımı da etkinlik kazanır. Çünkü katı madde taşınımının % 80 - %90'nu askı maddesinin oluşturduğu kaynak [3]'de belirtilmektedir. Askı maddesi miktarı konsantrasyonla, konsantrasyon ise akımın debisi ile doğru orantılıdır. Akarsularda katı madde taşınımında, konsantrasyon akarsu derinliğine bağlı olarak sürekli değişir.

#### 4.8. Akarsu Derinliğine Bağlı Olarak Konsantrasyon Değişimi

Askı hareketinin ilk anlarında akım yönünde radyal olarak hareket eden askı maddesi zamanla değişmeyen bir dağılım oluşturur. Burada, akarsuda oluşan türbülansın etkisiyle taban bölgesine yakın yerlerden koparak yukarıya doğru belli bir hızla fırlayan farklı büyüklüklerdeki katı madde danelerinden oluşan küçük toplulukların olduğu gözlenebilir. Akım içerisindeki yüzdeleri daha fazla olan bu küçük topluluklar, viskoz kuvvetlerin etkisiyle daha fazla yukarıya çıkamadan enerjilerini kaybederek sönmümlenirler. Böylece bu toplulukların taşıdığı katı madde konsantrasyonu da tabandan uzaklaştıkça azalır. Dolayısıyla, türbülansın etkisiyle oluşan harekette yukarıya doğru yönelen katı madde miktarı aşağıya doğru yöneleninkinden daha fazla olur [3], [11].

Fazla olan bu miktar ise çökeltme hızının etkisiyle aşağıya doğru hareket eden daneler tarafından karşılanır ve böylece akarsu kesiti içerisinde zamanla değişmeyen bir askı maddesi dağılımı meydana gelir. Bu çalışmada konsantrasyonun derinlikle değişimi aşağıdaki gibi izlenmiştir.

Bu çalışmada akarsu boyunca üç ayrı enkesit noktasından ve her enkesit noktası boyunca da 1/4, 1/2 ve 3/4 mesafelerinin herbirinden 4-10 arasında konsantrasyon numunesi alınarak herbir numunenin konsantrasyonu ölçülerek hesaplanmış ve sonuçta bir deney için geçerli olan ortalama konsantrasyon hesaplanmıştır. Bu hesaplama işlemi Şekil 45'e göre:

$$C'_0 = (C'_1 + C'_2 + C'_3 + C'_4 + C'_5) / 5 \quad (120)$$

şeklinde gerçekleştirilir. Burada:

$C'_1$  = Bir deneyde  $h_1$  derinliğinden alınan numunelere ait ortalama konsantrasyon,

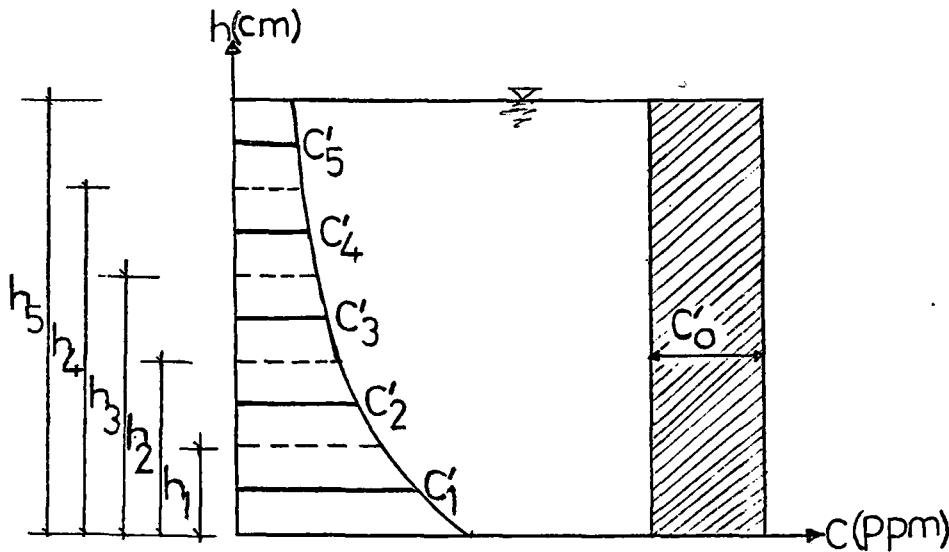
$C'_2$  = Bir deneyde  $h_2$  derinliğinden alınan numunelere ait ortalama konsantrasyon,

$C'_3$  = Bir deneyde  $h_3$  derinliğinden alınan numunelere ait ortalama konsantrasyon,

$C'_4$  = Bir deneyde  $h_4$  derinliğinden alınan numunelere ait ortalama konsantrasyon,

$C'_5$  = Bir deneyde  $h_5$  derinliğinden alınan numunelere ait ortalama konsantrasyon,

$C'_0$  = Bir deney için geçerli olan ve o deneyde tüm derinliklerden alınan numunelere ait ortalama konsantrasyondur (ppm).



Şekil 45. Konsantrasyonun düşey dağılımı

Bütün bu işlemler gerçekleştirilirken de konsantrasyonun düşey boyunca değişimi de izlenmiştir. Şekil 45'de verilen bu değişim, bu çalışmada yapılan deneylerden birkaçı (örneğin  $D = 1.1$  mm,  $J = 0.008$  ve  $Q_w = 0.00133$  m<sup>3</sup>/s ile  $Q_w = 0.00336$  m<sup>3</sup>/s arasında değişen) için sadece bir örnek teşkil etmesi açısından Şekil 45'e göre aşağıda hesaplanmıştır.

a)  $h = 4$  cm ve  $Q_w = 0.00133$  m<sup>3</sup>/s için tabandan itibaren:

$$h_1 = 0.8 \text{ cm için } C'_1 = 271.4 \text{ ppm}$$

$$h_2 = 1.6 \text{ cm için } C'_2 = 179.1 \text{ ppm}$$

$$h_3 = 2.4 \text{ cm için } C'_3 = 101.7 \text{ ppm}$$

$$h_4 = 3.2 \text{ cm için } C'_4 = 63 \text{ ppm}$$

$$h_5 = 4 \text{ cm için } C'_5 = 16.9 \text{ ppm}$$

olarak ölçülmektedir.

b)  $h = 6$  cm ve  $Q_w = 0.002$  m<sup>3</sup>/s için tabandan itibaren:

$$h_1 = 1.2 \text{ cm için } C'_1 = 289.8 \text{ ppm}$$

$$h_2 = 2.4 \text{ cm için } C'_2 = 182 \text{ ppm}$$

$$h_3 = 3.6 \text{ cm için } C'_3 = 102.2 \text{ ppm}$$

$$h_4 = 4.8 \text{ cm için } C'_4 = 66.5 \text{ ppm}$$

$$h_5 = 6 \text{ cm için } C'_5 = 18.05 \text{ ppm}$$

olarak ölçülmektedir.

c)  $h = 7.5$  cm ve  $Q_w = 0.00336$  m<sup>3</sup>/s için tabandan itibaren:

$$h_1 = 1.5 \text{ cm için } C'_1 = 382.9 \text{ ppm}$$

$$h_2 = 3 \text{ cm için } C'_2 = 201.6 \text{ ppm}$$

$$h_3 = 4.5 \text{ cm için } C'_3 = 110.9 \text{ ppm}$$

$$h_4 = 6 \text{ cm için } C'_4 = 70.3 \text{ ppm}$$

$$h_5 = 7.5 \text{ cm için } C'_5 = 18.9 \text{ ppm}$$

olarak ölçülmektedir.



## 5. SONUÇLAR

Akarsularda katı madde taşınım miktarının deneysel yolla hesaplanması ve elde edilen değerlerin belli bağıntılar haline dönüştürülerek genelleştirilmesi amacıyla, ortalama dane çapları farklı olan üç değişik malzeme, dört farklı eğim ve beş değişik debi için yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar özetle aşağıda sunulmaktadır.

a) Askı maddesi için en uygun denklem; lineer olmayan, parabolik bir fonksiyona ait:

$$Q_a = -0.031 + 33.472 Q_w + 0.653 Q_w^2 \text{ şeklindeki regresyon denklemidir.}$$

b) Sürüntü maddesi için en uygun denklem; aynı şekilde lineer olmayan, yine parabolik bir fonksiyona ait olan :

$$Q_b = 0.0063 + 1.323 Q_w + 0.053 Q_w^2 \text{ şeklindeki regresyon denklemidir.}$$

c) Toplam katı madde için en uygun denklem; askı ve sürüntü maddesi denklemlerinin toplamı olan ve dolayısıyla lineer olmayan, parabolik bir fonksiyona ait olan :

$$Q_t = -0.025 + 34.795 Q_w + 0.706 Q_w^2 \text{ şeklindeki regresyon denklemidir.}$$

d) Bu çalışmada, askı ve sürüntü maddesi hareketinde ve dolayısıyla toplam katı madde hareketinde en etkin parametre olarak  $Q_w$ , yani akımın debisi görülmekte ve toplam katı madde miktarının da yaklaşık % 68 ile % 95'ni askı maddesi oluşturmaktadır.

e) Bu çalışmada elde edilen ve Bölüm 3.7, Denklem 73'de verilen bağıntının (pratikteki ölçümler askı maddesi miktarını ölçmeye yönelik olduğu için burada da askı maddesi için elde edilen Denklem 73 kullanılmıştır), pratikte ölçülen değerlere ve katı madde taşınım miktarının hesaplanmasında kullanılan bazı formüllere göre yakın sonuçlar verip vermediği test edilmiştir. Bu işlemler için bu bağıntı, daha önceden değişik gözlem istasyonlarında ölçümleri yapılarak akım debileri ile katı madde taşınım miktarları belirlenmiş bazı akarsu havzalarına uygulanmış ve bu uygulamanın sonucu, genel ortalama bazında %0.21 ile %6.8 arasında, seçilen akarsuların herbiri için kendi veri sayılarının tamamı baz alındığında ise bu oran %2.67 ile %20.8 arasında değiştiği gözlenmiştir.

Diğer yandan yine bu bağıntı, katı madde taşınım miktarının hesaplanmasında kullanılan bazı formüllerin, birbirleriyle karşılaştırılması amacıyla daha önce yapılmış bir çalışmaya tatbik edilerek bu bağıntının da bu formüllerle karşılaştırılması sağlanmış ve sonuçta hangi formül veya formüllerle yakın değerler verdiği tespit edilmiştir.

## 6. ÖNERİLER

Bu çalışmada, belli sayıda parametre seçilerek bu parametrelerinde belli sayılardaki değişik boyutları için, 60'ı hesap ve değerlendirilme işlemlerinde kullanılmış olmak üzere ön hazırlık ve kontrol deneyleri de sayıldığında yaklaşık 100'e yakın deney yapılmış ve bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre yapılan çeşitli hesaplamalar neticesinde, askı maddesi, sürüntü maddesi ve  $Q_t = Q_a + Q_b$  olduğundan dolayısıyla toplam katı madde miktarını veren en uygun bağıntılar geliştirilmiştir. Bundan sonra bu konuda çalışacak araştırmacı ve uygulamacılara şu öneriler sunulabilir.

Katı madde taşınım miktarını hesaplayan çok sayıdaki formül ve bağıntıları azaltılmak ve katı madde taşınım miktarının hesabını daha sade ve kolay bir hale getirmek için; askı maddesi ile sürüntü maddesini birbirine bağlı olarak birini diğeri cinsinden ya da birini diğेरinin yüzdesi olarak ifade etmek için bu yönde bir takım çalışmaların yapılması bu konudaki zorlukların azaltılması için faydalı olabilir.

Hidrolik ve hidrolojik özellikleri çok farklı yapılara sahip olan, özellikle eğimi çok fazla olan vahşi derelerde ve dik topoğrafik koşullara sahip akarsularda daha özel araştırmaların yapılması gerekir.

Bu çalışmalar yapılırken; bu tezdeki bilgilerden de faydalanılarak, bu çalışma için seçilen parametrelerden farklı parametreler ya da bu parametrelerin farklı boyutları için çeşitli deneysel veya teorik çalışmaların yapılması gerekir.

## 7. KAYNAKLAR

1. Acaroğlu, E.R., Sediment Transport in Conveyance System, Ph. D. Thesis, Cornell University, Ithaca, New York, U.S.A., 1968.
2. Bagnold, R.A., An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics, U.S. Geological Survey, Prof. Paper, (1966) 422-J.
3. Beyazıt, M., Hareketli Tabanlı Akımların Hidroliği, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul, 1971.
4. Beyazıt, M., Hidrolojide İstatistik Yöntemler, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul, 1981.
5. Beyazıt, M., Oğuz, B., Mühendisler İçin İstatistik, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1994.
6. Bulu, A., İstatistik Problemleri, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, 1986.
7. Çataklı, O.N., Model Tekniği, Kutulmuş Matbaası, İstanbul, 1963.
8. Çeçen, K., Hidrolik, Cilt 1, İ.T.Ü., Matbaası, İstanbul, 1970.
9. Çetin, C., Doğu Karadeniz Akarsularında Sediment Taşınım Formüllerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Ens., Trabzon 1998.
10. Davies, H.G., Hicks, G.A., General Mathematics, Second Edition, McGraw - Hill Book Company, Maidenhead-Berkshire, England, 1971.
11. Demiröz, E., Measurement of Sediment Load, Post Graduate Course in Sediment Transport Technology, June-July 1988, Ankara-Turkey, Volume: 2, 13.3 -13.
12. Dyball, E.G., Mathematics for Technician Engineers, McGraw - Hill Book Company, Maidenhead-Berkshire, England, 1983.
13. Einstein, H.A., The Bed Load Function for Sediment Transport in Open Channel Flows, Tech. Bull., 1026, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1950.
14. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Türkiye Akarsularında Sediment Gözlemleri ve Sediment Taşınım Miktarları, Yayın No: 87-44, Ankara, 1987.
15. Engelund, F., Hansen, E., A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams, Teknisk Vorlag, Copenhagen Denmark, 1967.
16. Erkek, C., Ağırallıoğlu, N., Su Kaynakları Mühendisliği, Beta Yayınevi, İstanbul, 1993.

17. Graf, W.H., *Hydraulics of Sediment Transport*, McGraw - Hill Book Company, New York - U.S.A., 1971.
18. Hughes, S.A., *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*, Volume: 7, *Advanced Series on Ocean Engineering*, U.S.A., 1993.
19. Ingram, J.J., Abt, S.R., Richardson, E.V., *Sediment Discharge Computation Using Point Sampled Suspended - Sediment Data*, *Journal of Hydraulics Engineering*, 117, 6 (1991) 758 - 773.
20. Karim, F., Kennedy, J.F., *Menu of Coupled Velocity and Sediment Discharge Relations for Rivers*, *Journal of Hydraulics Engineering*, 116, 8 (1990) 978-995.
21. Low, H.S., *Effect of Sediment Density on Bed-Load Transport*, *Journal of Hydraulics Engineering*, 115, 1 (1989) 124-137.
22. Nakato, T., *Test of Selected Sediment Transport Formulas*, *Journal of Hydraulics Engineering*, 116, 3 (1990) 362-379.
23. Niekerk, A.V., Vogel, K.R., Slingerland, R.L., Bridge, J.S., *Routing of Heterogeneous Sediments Over Movable Bed: Model Development*, *Journal of Hydraulics Engineering*, 118, 2 (1991) 246-261.
24. Shen, H.W., Hung, C.S., *An Engineering Approach to Total Bed - Material Load by Regression Analysis*, *Symposium to H.A. Einstein*, U.S.A., 1971.
25. Sherwood, G.E.F., Taylor, A.E., *Calculus*, Third Edition, Prentice-Hall, L.A.-U.S., 1954.
26. Simons, D.B., Şentürk, F., *Sediment Transport Technology*, Water Resources Publications, Colorado, 1977.
27. Sümer, B.M., Ünsal, I., Beyazıt, M., *Hidrolik*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1983.
28. Sümer, B.M., *Hidrolik Problemleri*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1984.
29. Yalın, M.S., *Mechanics of Sediment Transport*, Second Edition Pergamon Press, New York - U.S.A., 1977.
30. Yang, C.T., *Incipient Motion and Sediment Transport*, *Journal of Hydraulics Division*, 99,10 (1973) 1679-1704
31. Yang, C.T., Wan, S., *Comparisons of Selected Bed-Material Load Formulas*, *Journal of Hydraulics Engineering*, 117, 8 (1991) 973-989.
32. Yang, C.T., Molinas, A., *Sediment Transport on the Yellow River*, *Journal of Hydraulics Engineering*, 122, 5 (1996) 237-244.
33. Zeller, J., *Einführung in der Sedimenttransport Offener Gerinne*, Schweizerische Bauzeitung, 1963.

## 8. EKLER

### EK 1. Askı Maddesi İçin Regresyon Denklemleri ve Korelasyon Katsayıları

#### Ek 1.1. Basit Lineer Regresyon

Basit lineer regresyonun genel denklemi :

$$y = f(x) \text{ den } y = a + b x \quad (\text{E.1})$$

şeklinde olup, a ve b regresyon katsayılarını ifade eder ve bu katsayılar :

$$1) b = \frac{\sum [(x - \bar{x})(y - \bar{y})]}{\sum (x - \bar{x})^2} \quad (\text{E.2})$$

$$2) a = \bar{y} - b \bar{x} \quad (\text{E.3})$$

denklemleri ile hesaplanır. Bu çalışmada üç ayrı bağımsız değişken (x) olduğundan :

$$a) Q_s = f(Q_w) \text{ için (burada } Q_s = y, Q_w = x)$$

Bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_s = a + b Q_w \quad (\text{E.4})$$

şeklinde olup a ve b regresyon katsayıları Denklem (E.2) ve Denklem (E.3)'den:

$b = 8.555$  ,  $a = 0.065$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi:

$Q_s = 0.065 + 8.555 Q_w$  şekline döndürür. Bu fonksiyonun korelasyon katsayısı ise:

$$r = \frac{\sum [(x y) - (n \bar{x} \bar{y})]}{(n S_x S_y)} \quad (\text{E.5})$$

şeklinde bir bağıntı ile hesaplanır. Burada  $n$ , toplam veri sayısını ( $n = 60$ ),  $S_x$  ve  $S_y$  ise standart sapmayı ifade eder. Buna göre bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı:

$r = 0.858$  olarak bulunur.

b)  $Q_s = f(D)$  için (burada  $Q_s = y$ ,  $D = x$ )

Bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_s = a + bD \quad (E.6)$$

şeklinde olup  $a$  ve  $b$  regresyon katsayıları Denklem (E.2) ve (E.3)'den:

$b = -0.003$ ,  $a = 0.101$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi:

$$Q_s = 0.101 - 0.003D \quad (E.7)$$

şeklinde olur ve bu fonksiyonun korelasyon katsayısı Denklem (E.5)'den :

$r = -0.280$  olarak bulunur.

c)  $Q_s = f(J)$  için (burada  $Q_s = y$ ,  $J = x$ )

Bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_s = a + bJ \quad (E.8)$$

şeklinde olup  $a$  ve  $b$  regresyon katsayıları Denklem (E.2) ve Denklem (E.3)'den:

$b = 0.250$ ,  $a = 0.095$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi:

$$Q_s = 0.095 + 0.250J \quad (E.9)$$

şeklinde olur ve bu fonksiyonun korelasyon katsayısı Denklem (E.5)'den :

$r = 0.167$  olarak bulunur.

## Ek 1.2. Çoklu Lineer Regresyon

Çoklu lineer regresyonun genel denklemi :

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \text{ den } y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \quad (\text{E.10})$$

şeklinde olup, burada  $a_0, a_1, a_2,$  ve  $a_3$  regresyon katsayılarını ifade eder ve bu katsayılar :

$$1) \sum y = n a_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 + a_3 \sum x_3 \quad (\text{E.11})$$

$$2) \sum x_1 y = a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_1 x_2 + a_3 \sum x_1 x_3 \quad (\text{E.12})$$

$$3) \sum x_2 y = a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1 x_2 + a_2 \sum x_2^2 + a_3 \sum x_2 x_3 \quad (\text{E.13})$$

$$4) \sum x_3 y = a_0 \sum x_3 + a_1 \sum x_1 x_3 + a_2 \sum x_2 x_3 + a_3 \sum x_3^2 \quad (\text{E.14})$$

denklemleriyle hesaplanır. Bu çalışmada üç ayrı bağımsız değişken olduğundan fonksiyon :

$$Q_s = f(Q_w, D, J) \text{ (burada } y = Q_s, x_1 = Q_w, x_2 = D, x_3 = J)$$

şeklinde olup, bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_s = a_0 + a_1 Q_w + a_2 D + a_3 J$$

şeklinde ifade edilir ve buradaki regresyon katsayıları Denklem (E.11)-Denklem (E.14)'den:

$a_0 = -0.049, a_1 = 24.11, a_2 = 0.005$  ve  $a_3 = 4.109$  olarak bulunur. Buna göre bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_s = -0.049 + 24.11 Q_w + 0.005 D + 4,109 J \quad (\text{E.15})$$

şekline dönüşür. Bu tip regresyon denkleminde korelasyon katsayısı denklemi :

$$r = [1 - (S_{ey}^2 / S_y^2)]^{0.5} \quad (E.16)$$

şeklinde olup,

$$S_y^2 = \sum (y - \bar{y})^2 / n \quad (E.17)$$

$$S_{ey}^2 = \sum e^2 / (n - N - 1) \quad (E.18)$$

$$\sum e^2 = (y_{\text{gerçek}} - Y_{\text{hesaplanan}})^2 \quad (E.19)$$

şeklinde ifade edilirler. Burada:

$y_{\text{gerçek}}$ , deneyde bulunan  $y$ ' dir.  $y_{\text{hesaplanan}} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n$  ifadesi ile hesaplanır.  $N$  ise bağımsız değişken sayısını göstermektedir. Buna göre bu fonksiyonun korelasyon katsayısı Denklem (E.16)'dan :

$r = 0.842$  olarak bulunur.

### Ek 1.3. Lineer Olmayan Regresyon

Bu tip regresyon denklemleri için dört tip fonksiyonun olduğu Bölüm 3.3'de belirtilmektedir.

#### 1) Parabolik Fonksiyon İçin

$y = f(x)$  parabolik bir fonksiyon olarak düşünüldüğünde, bu fonksiyona ait genel regresyon denklemi :

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \quad (E.20)$$

şeklinde olup, burada  $a_0$ ,  $a_1$  ve  $a_2$  regresyon katsayılarını ifade eder ve bu katsayılar :



$$1) \sum y = n a_0 + a_1 \sum x + a_2 \sum x^2 \quad (E.21)$$

$$2) \sum xy = a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 + a_2 \sum x^3 \quad (E.22)$$

$$3) \sum x^2 y = a_0 \sum x^2 + a_1 \sum x^3 + a_2 \sum x^4 \quad (E.23)$$

denklemleri ile hesaplanır. Bu çalışmada üç tane bağımsız değişken (x) olduğuna göre:

$$a) Q_s = f(Q_w) \text{ için (burada } Q_s = y, Q_w = x)$$

Bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_s = a_0 + a_1 Q_w + a_2 Q_w^2 \quad (E.24)$$

şeklinde olup, regresyon katsayıları Denklem (E.21) - Denklem (E.23)'den:

$a_0 = -0.031$ ,  $a_1 = 33.472$ ,  $a_2 = 0.653$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi:

$$Q_s = -0.031 + 33.472 Q_w + 0.653 Q_w^2 \quad (E.25)$$

şekline döndürür ve bu denklemin korelasyon katsayısı Denklem (E.16) -Denklem (E.19)'dan ( $y_{\text{hesaplanan}} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$  almak şartıyla) :

$$r = 0.868 \text{ olarak bulunur.}$$

$$b) Q_s = f(D) \text{ için (burada } Q_s = y, D = x)$$

Bu fonksiyona ait regresyon denklemleri :

$$Q_s = a_0 + a_1 D + a_2 D^2 \quad (E.26)$$

şeklinde olup, regresyon katsayıları Denklem (E.21) - Denklem (E.23)'den:

$a_0 = -4.438$ ,  $a_1 = 9.826$ ,  $a_2 = -5.226$  olarak bulunur ve bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_s = -4.438 + 9.826 D - 5.226 D^2 \quad (E.27)$$

şekline dönüşür ve bu fonksiyonun korelasyon katsayısı Denklem (E.16) - Denklem (E.19)' dan ( $y_{\text{hesaplanan}} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$  almak şartıyla) :

$r = -0.592$  olarak bulunur.

c)  $Q_s = f(J)$  için (burada  $Q_s = y$ ,  $J = x$ )

Bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_s = a_0 + a_1 J + a_2 J^2 \quad (E.28)$$

şeklinde olup, regresyon katsayıları Denklem (E.21) - Denklem (E.23)' den:

$a_0 = 0.06$ ,  $a_1 = -0.005$ ,  $a_2 = 248.888$  olarak bulunur ve bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_s = 0.06 - 0.005 J + 248.888 J^2 \quad (E.29)$$

şekline dönüşür ve bu fonksiyonun korelasyon katsayısı Denklem (E.16) -Denklem (E.19)' dan ( $y_{\text{hesaplanan}} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$  almak şartıyla):

$r = 0.449$  olarak bulunur.

## ii) Hiperbolik Fonksiyon İçin

$y = f(x)$  hiperbolik bir fonksiyon olarak düşünüldüğünde, bu fonksiyona ait genel regresyon denklemi  $y = a x^b$  şeklinde olup  $y = \log y$ ,  $x = \log x$  denilerek her iki tarafın logaritması alındığında bu fonksiyonun regresyon denklemi :

$$\log y = \log a + b \log x \quad (\text{E.30})$$

şekline dönüştür. Burada,  $\log a$  ve  $b$  regresyon katsayılarını ifade eder ve bu katsayılar :

$$1) \sum \log y = n \log a + b \sum \log x \quad (\text{E.31})$$

$$2) \sum (\log x \log y) = \log a \sum \log x + b \sum (\log x)^2 \quad (\text{E.32})$$

denklemleri çözülerek bulunur.

Bu tip bir fonksiyonda korelasyon katsayısını veren bağıntı ise :

$$r = \frac{\sum[(\log x \log y) - (n \log \bar{x} \log \bar{y})]}{(n S_{\log x} S_{\log y})} \quad (\text{E.33})$$

şeklinde dir. Bu çalışmada üç tane bağımsız değişken ( $x$ ) olduğuna göre:

a)  $Q_s = f(Q_w)$  için :

Denklem (E.30)'dan bu fonksiyona ait regresyon denklemi,  $\log Q_s = \log a + b \log Q_w$  şeklinde olup, regresyon katsayıları ise Denklem (E.31) ve Denklem (E.32)'den :

$\log a = 2.1719$ ,  $a = 148.59$ ,  $b = 1.34119$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi :  $\log Q_s = 2.1719 + 1.34119 \log Q_w$  den:

$$Q_s = 148.59 (Q_w)^{1.341} \quad (\text{E.34})$$

şekline dönüştür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.33)'den :

$r = 0.827$  olarak bulunur.

b)  $Q_s = f(D)$  için :

Denklem (E.30)'dan fonksiyona ait regresyon denklemi,  $\log Q_s = \log a + b \log D$  şeklinde olup, regresyon katsayıları ise Denklem (E.31) ve Denklem (E.32)'den :

$\log a = - 1.11$ ,  $a = 0.077$ ,  $b = 1.81$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemini :  $\log Q_s = - 1.1103 + 1.8101 \log D$  den:

$$Q_s = 0.077 (D^{1.81}) \quad (E.35)$$

şekline dönüştür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem E.33'den :

$r = - 0.264$  olarak bulunur.

c)  $Q_s = f(J)$  için :

Denklem (E.30)'dan bu fonksiyona ait regresyon denklemini,  $\log Q_s = \log a + b \log J$  şeklinde olup, regresyon katsayıları ise Denklem E.(31) ve Denklem (E.32)'den:

$\log a = - 0.205$ ,  $a = 0.624$ ,  $b = 0.5$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemini :  $\log Q_s = - 0.205 + 0,5 \log J$  den:

$$Q_s = 0.624 (J)^{0.5} \quad (E.36)$$

şekline dönüştür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.33)'den :

$r = 0.130$  olarak bulunur.

### iii) Üstel Fonksiyon İçin

$y = f(x)$  üstel bir fonksiyon olarak düşünüldüğünde, bu fonksiyona ait genel regresyon denklemini  $y = a b^x$  şeklinde olup  $y = \log y$ ,  $x = x$  denilerek her iki tarafın logaritması alındığında bu fonksiyonun regresyon denklemini :

$$\log y = \log a + x \log b \quad (E.37)$$

şekline dönüştür. Burada,  $\log a$  ve  $\log b$  regresyon katsayılarını ifade eder ve bu katsayılar :

$$1) \sum \log y = n \log a + \log b \sum x \quad (E.38)$$

$$2) \sum (x \log y) = \log a \sum x + \log b \sum x^2 \quad (E.39)$$

denklemleri çözülerek bulunur ve bu tip fonksiyonda korelasyon katsayısını veren bağıntı ise

$$r = \frac{\sum[(x \log y) - (n \bar{x} \log \bar{y})]}{(n S_x S_{\log y})} \quad (\text{E.40})$$

şeklinde dir. Bu çalışmada üç tane bağımsız değişken (x) olduğuna göre:

a)  $Q_s = f(Q_w)$  için :

Denklem (E.37)'den bu fonksiyona ait regresyon denklemi,  $\log Q_s = \log a + Q_w \log b$  şeklinde olup, regresyon katsayıları Denklem (E.38) ve Denklem (E.39)'dan:

$\log a = -1.786$ ,  $\log b = 158.906$  olarak bulunur. Dolayısıyla bu fonksiyonun regresyon denklemi :

$$\log Q_s = -1.786 + Q_w 158.906 \quad (\text{E.41})$$

şekline dönüştür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.40)'dan :

$r = 0.796$  olarak bulunur.

b)  $Q_s = f(D)$  için :

Denklem (E.37)'den bu fonksiyona ait regresyon denklemi,  $\log Q_s = \log a + D \log b$  şeklinde olup, regresyon katsayıları Denklem (E.38) ve Denklem (E.39)'dan:

$\log a = -0.4$ ,  $a = 0.398$ ,  $\log b = -0.827$ ,  $b = 0.149$  olarak bulunur. Dolayısıyla bu fonksiyonun regresyon denklemi:  $\log Q_s = -0.4 - 0.827 D$  den:

$$Q_s = 0.398 (0.149)^D \quad (\text{E.42})$$

şekline dönüştür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.40)'dan :

$r = -0.263$  olarak bulunur.

c)  $Q_s = f(J)$  için :

Denklem (E.37)'den bu fonksiyona ait regresyon denklemi,  $\log Q_s = \log a + J \log b$  şeklinde olup, regresyon katsayıları Denklem (E.38) ve Denklem (E.39)'dan:

$\log a = -1.412$ ,  $\log b = 20.085$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi:

$$\log Q_s = -1.412 + 20.085 J \quad (E.43)$$

şekline dönüşür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.40)'dan:

$r = 0.131$  olarak bulunur.

#### iv) Geometrik Fonksiyon İçin

$y = f(x)$  geometrik bir fonksiyon olarak düşünülerek,  $y = 1/y$ ,  $x = x$  denilirse bu fonksiyonun regresyon denklemi :

$$y = 1 / (a + b x) \text{ veya } 1 / y = a + b x \quad (E.44)$$

şekline dönüşür. Burada, a ve b regresyon katsayılarını ifade eder ve bu katsayılar :

$$1) \sum 1 / y = n a + b \sum x \quad (E.45)$$

$$2) \sum [x (1/y)] = a \sum x + b \sum x^2 \quad (E.46)$$

denklemleri çözülerek bulunur ve bu tip fonksiyonda korelasyon katsayısını veren bağıntı ise

$$r = \frac{\sum [(x (1/y)) - (n \bar{x} (\overline{1/y}))]}{(n S_x S_{1/y})} \quad (E.47)$$

şeklindedir. Bu çalışmada üç tane bağımsız değişken (x) olduğuna göre:

a)  $Q_s = f(Q_w)$  için :

Denklem (E.44)'den bu fonksiyona ait regresyon denklemi,  $Q_s = 1 / (a + b Q_w)$  şeklinde olup, regresyon katsayıları Denklem (E.45) ve Denklem (E.46)'dan:

$a = 56.984$ ,  $b = - 8489.044$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi:

$$Q_s = 1 / (56.984 - 8489.044 Q_w) \quad (E.48)$$

şekline dönüştür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.47)'den :

$r = - 0.799$  olarak bulunur.

b)  $Q_s = f(D)$  için :

Denklem (E.44)'den denkleminde bu fonksiyona ait regresyon denklemi,  $Q_s = 1 / (a + b D)$  şeklinde olup, regresyon katsayıları Denklem (E.45) ve Denklem (E.46)'dan:

$a = - 13.833$ ,  $b = 37.599$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi :

$$Q_s = 1 / (- 13.833 + 37.599 D) \quad (E.49)$$

şekline dönüştür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.47)'den:

$r = 0.267$  olarak bulunur.

c)  $Q_s = f(J)$  için :

Denklem (E.44)'den bu fonksiyona ait regresyon denklemi,  $Q_s = 1 / (a + b J)$  şeklinde olup, regresyon katsayıları Denklem (E.45) ve Denklem (E.46)'dan:

$a = 30.679$ ,  $b = -784.969$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi:

$$Q_s = 1 / (30.679 - 784.969 J) \quad (E.50)$$

şekline dönüştür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.47)'den:

$r = - 0.114$  olarak bulunur.

## EK 2. Sürüntü Maddesi İçin Regresyon Denklemleri ve Korelasyon Katsayıları

### Ek 2.1. Basit Lineer Regresyon

Bu tip regresyona ait genel denklem daha önce Denklem (E.1)'de  $y = f(x)$  den  $y = a + b x$  şeklinde verilmişti. Bu çalışmada üç ayrı bağımsız değişken olduğundan :

a)  $Q_b = f(Q_w)$  için (burada  $Q_b = y, Q_w = x$ ) :

Bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_b = a + b Q_w \quad (E.51)$$

şeklinde olup a ve b regresyon katsayıları Denklem (E.2) ve Denklem (E.3)'den:

$b = 0.340$  ,  $a = - 0.306$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi:

$$Q_b = - 0.306 + 0.340 Q_w \quad (E.52)$$

şeklinde olur ve bu fonksiyonun korelasyon katsayısı Denklem (E.5)'den :

$r = 0.655$  olarak bulunur.

b)  $Q_b = f(D)$  için (burada  $Q_b = y, D = x$ ) :

Bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_b = a + b D \quad (E.53)$$

şeklinde olup a ve b regresyon katsayıları Denklem (E.2) ve Denklem (E.3)'den:

$b = - 0.0002$  ,  $a = 0.011$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi:

$$Q_b = 0.011 - 0.0002 D \quad (E.54)$$



şeklinde olur ve bu fonksiyonun korelasyon katsayısı Denklem (E.5)'den :

$r = -0.291$  olarak bulunur.

c)  $Q_b = f(J)$  için (burada  $Q_b = y, J = x$ ) :

Bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_b = a + b J \quad (E.55)$$

şeklinde olup  $a$  ve  $b$  regresyon katsayıları Denklem (E.2) ve Denklem (E.3)'den:

$b = 0.041$  ,  $a = 0.011$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi:

$$Q_b = 0.011 + 0.041 J \quad (E.56)$$

şeklinde olur ve bu fonksiyonun korelasyon katsayısı Denklem (E.5)'den :

$r = 0.526$  olarak bulunur.

## Ek 2.2. Çoklu Lineer Regresyon

Bu tip regresyona ait olan genel denklem daha önce Denklem (E.10)'da :

$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  den  $y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n$  şeklinde verilmişti.

Burada  $a_0, a_1, a_2,$  ve  $a_3$  regresyon katsayıları, Denklem (E.11) - Denklem (E.14)'den:

$a_0 = 0.011,$   $a_1 = -0.0078,$   $a_2 = 0.000041$  ve  $a_3 = 0.00565$  olarak bulunur ve bu fonksiyona ait regresyon denklemi,  $Q_b = a_0 + a_1 Q_w + a_2 D + a_3 J$  den:

$$Q_b = 0.011 - 0.0078 Q_w + 0.000041 D + 0.00565 J \quad (E.57)$$

şekline dönüştür ve bu denklemin korelasyon katsayısı Denklem (E.16)-Denklem (E.19)'dan:

$r = 0.9990$  olarak bulunur.

### Ek 2.3. Lineer Olmayan Regresyon

Bu tip regresyon için dört tip fonksiyonun olduğu Bölüm 3.3'de belirtilmiştir. Bunlar

#### 1) Parabolik Fonksiyon için

$y = f(x)$  parabolik bir fonksiyon olarak düşünüldüğünde, bu tip fonksiyona ait genel regresyon denklemi daha önce Denklem (E.20)'de:  $y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$  şeklinde belirtilmişti. Bu çalışmada üç tane bağımsız değişken ( $x$ ) olduğuna göre:

a)  $Q_b = f(Q_w)$  için (burada  $Q_b = y$ ,  $Q_w = x$ ):

Bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_b = a_0 + a_1 Q_w + a_2 Q_w^2 \quad (E.58)$$

şeklinde olup, regresyon katsayıları Denklem (E.21) - Denklem (E.23)'den:

$a_0 = 0.0063$ ,  $a_1 = 1.323$ ,  $a_2 = 0.053$  olarak bulunur ve bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_b = 0.0063 + 1.323 Q_w + 0,053 Q_w^2 \quad (E.59)$$

şekline dönüştür ve bu denklemin korelasyon katsayısı Denklem (E.16) -Denklem (E.19)'dan ( $Y_{\text{hesaplanan}} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$  almak şartıyla) :

$r = 0.9995$  olarak bulunur.

b)  $Q_b = f(D)$  için (burada  $Q_b = y$ ,  $D = x$ )

Bu fonksiyona ait regresyon denklemi :

$$Q_b = a_0 + a_1 D + a_2 D^2 \quad (E.60)$$

şeklinde olup, regresyon katsayıları Denklem (E.21) - Denklem (E.23)'den:

$a_0 = 0.059$ ,  $a_1 = -0.092$ ,  $a_2 = 0.042$  olarak bulunur ve bu fonksiyona ait regresyon denklemini :

$$Q_b = 0.059 - 0.092 D + 0.042 D^2 \quad (E.61)$$

şekline dönüştür ve bu denklemin korelasyon katsayısı Denklem (E.16)-Denklem (E.19)'dan ( $Y$  hesaplanan  $= a_0 + a_1 x + a_2 x^2$  almak şartıyla) :

$r = -0.9992$  olarak bulunur.

c)  $Q_b = f(J)$  için (burada  $Q_b = y$ ,  $J = x$ )

Bu fonksiyona ait regresyon denklemini :

$$Q_b = a_0 + a_1 J + a_2 J^2 \quad (E.62)$$

şeklinde olup, regresyon katsayıları Denklem (E.21) - Denklem (E.23)'den:

$a_0 = 0.0055$ ,  $a_1 = 0.935$ ,  $a_2 = -35.185$  olarak bulunur ve bu fonksiyona ait regresyon denklemini :

$$Q_b = 0.0055 + 0.935 J - 35.185 J^2 \quad (E.63)$$

şekline dönüştür ve bu denklemin korelasyon katsayısı Denklem (E.16)-Denklem (E.19)'dan ( $Y$  hesaplanan  $= a_0 + a_1 x + a_2 x^2$  almak şartıyla):

$r = 0.9991$  olarak bulunur.

## ii) Hiperbolik Fonksiyon İçin

$y = f(x)$  hiperbolik bir fonksiyon olarak düşünüldüğünde, bu fonksiyona ait genel regresyon denklemini  $y = a(x)^b$  şeklinde olup  $y = \log y$ ,  $x = \log x$  denilerek her iki tarafın

logaritması alındığında bu fonksiyonun regresyon denkleminin  $\log y = \log a + b \log x$  şekline dönüştüğü Denklem (E.30)'da verilmişti. Bu çalışmada üç tane bağımsız değişken (x) olduğuna göre:

a)  $Q_b = f(Q_w)$  için :

Denklem (E.30)'a göre bu fonksiyonun regresyon denklemi,  $\log Q_b = \log a + b \log Q_w$  şeklinde olur ve regresyon katsayıları ise Denklem (E.31) ve Denklem (E.32)'den:

$\log a = -1.032$ ,  $a = 0.093$ ,  $b = 0.376$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi:  $\log Q_b = -1.032 + 0.376 \log Q_w$  dan:

$$Q_b = 0.093 (Q_w)^{0.376} \quad (E.64)$$

şekline dönüştür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.33)'den :

$r = 0.675$  olarak bulunur.

b)  $Q_b = f(D)$  için :

Denklem (E.30)'a göre bu fonksiyonun regresyon denklemi,  $\log Q_b = \log a + b \log D$  şeklinde olur ve regresyon katsayıları ise Denklem (E.31) ve Denklem (E.32)'den:

$\log a = -1.998$ ,  $a = 0.01$ ,  $b = -0.845$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi :  $\log Q_b = -1.998 - 0.845 \log D$  den:

$$Q_b = 0,01 (D)^{-0.845} \quad (E.65)$$

şekline dönüştür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.33)'den:

$r = -0.319$  olarak bulunur.

c)  $Q_b = f(J)$  için :

Denklem (E.30)'a göre bu fonksiyonun regresyon denklemi,  $\log Q_b = \log a + b \log J$  şeklinde olur ve regresyon katsayıları ise Denklem (E.31) ve Denklem (E.32)'den:

$\log a = -0.387$ ,  $a = 0.410$ ,  $b = 0.819$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi :  $\log Q_b = -0.387 + 0.819 \log J$  den:

$$Q_b = 0,410 (J)^{0.819} \quad (E.66)$$

şekline dönüştür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.33)'den:

$r = 0.550$  olarak bulunur.

### iii) Üstel Fonksiyon İçin

$y = f(x)$  üstel bir fonksiyon olarak düşünüldüğünde, bu fonksiyona ait genel regresyon denklemi  $y = a b^x$  şeklinde olup  $y = \log y$ ,  $x = x$  denilerek her iki tarafın logaritması alındığında bu fonksiyonun regresyon denkleminin  $\log y = \log a + x \log b$  şekline dönüştüğü Denklem (E.37)'de verilmişti. Bu çalışmada üç tane bağımsız değişken ( $x$ ) olduğuna göre:

a)  $Q_b = f(Q_w)$  için :

Denklem (E.37)'ye göre bu fonksiyonun regresyon denklemi,  $\log Q_b = \log a + Q_w \log b$  şeklinde olup, regresyon katsayıları ise Denklem (E.38) ve Denklem (E.39)'dan:

$\log a = -2.149$ ,  $\log b = 46.381$  olarak bulunur. Bu fonksiyonun regresyon denklemi

$$\log Q_b = -2.149 + 46.381 Q_w \quad (E.67)$$

şekline dönüştür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.40)'dan:

$r = 0.686$  olarak bulunur.

**b)  $Q_b = f(D)$  için :**

Denklem (E.37)'ye göre bu fonksiyonun regresyon denklemi,  $\log Q_b = \log a + D \log b$  şeklinde olup, regresyon katsayıları ise Denklem (E.38) ve Denklem (E.39)'dan:

$\log a = - 1.611$ ,  $a = 0.024$   $\log b = - 0.383$ ,  $b = 0.413$  olarak bulunur. Dolayısıyla bu fonksiyonun regresyon denklemi :  $\log Q_b = - 1.611 - 0.383 D$  den :

$$Q_b = 0.024 (0.413)^D \quad (E.68)$$

şekline dönuşür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.40)'dan:

$r = - 0.316$  olarak bulunur.

**c)  $Q_b = f(J)$  için :**

Denklem (E.37)'ye göre bu fonksiyonun regresyon denklemi,  $\log Q_b = \log a + J \log b$  şeklinde olup, regresyon katsayıları ise Denklem (E.38) ve Denklem (E.39)'dan:

$$\log a = - 2.372, \log b = 33.598$$

olarak bulunur. Dolayısıyla bu fonksiyonun regresyon denklemi :

$$\log Q_b = - 2.372 + 33.598 J \quad (E.69)$$

şekline dönuşür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem E.40'dan:

$r = 0.568$  olarak bulunur.

#### **iv) Geometrik Fonksiyon**

$y = f(x)$  geometrik bir fonksiyon olarak düşünöldüğünde,  $y = 1 / y$ ,  $x = x$  denilirse bu fonksiyonun regresyon denkleminin  $y = 1 / (a + b x)$  veya  $1 / y = a + b x$  şekline dönuştüğü Denklem (E.44)'de verilmişti. Bu çalışmada üç tane bağımsız değişken ( $x$ ) olduğuna göre:

a)  $Q_b = f(Q_w)$  için :

Denklem (E.44)'e göre bu fonksiyonun regresyon denklemi,  $Q_b = 1 / (a + b Q_w)$  şeklinde olup, regresyon katsayıları ise Denklem (E.45) ve Denklem (E.46)'dan:

$a = 147.855$ ,  $b = -12805.41$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi:

$$Q_b = 1 / (147.855 - 12805.41 Q_w) \quad (E.70)$$

şekline dönüşür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.47)'den:

$r = -0.683$  olarak bulunur.

b)  $Q_b = f(D)$  için :

Denklem (E.44)'e göre bu fonksiyonun regresyon denklemi,  $Q_b = 1 / (a + b D)$  şeklinde olup, regresyon katsayıları ise Denklem (E.45) ve Denklem (E.46)'dan:

$a = 21.509$ ,  $b = 82.301$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi :

$$Q_b = 1 / (21.509 + 82.301 D) \quad (E.71)$$

şekline dönüşür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.47)'den:

$r = 0.332$  olarak bulunur.

c)  $Q_b = f(J)$  için :

Denklem (E.44)'e göre bu fonksiyonun regresyon denklemi,  $Q_b = 1 / (a + b J)$  şeklinde olup, regresyon katsayıları ise Denklem (E.45) ve Denklem (E.46)'dan:

$a = 183.707$ ,  $b = -7115.094$  olarak bulunur ve bu fonksiyonun regresyon denklemi:

$$Q_b = 1 / (183.707 - 7115.094 J) \quad (E.72)$$

şekline dönüşür ve bu fonksiyona ait korelasyon katsayısı Denklem (E.47)'den :

$r = -0.587$  olarak bulunur.

**EK 3. Deneysel Çalışmalara Ait Bazı Fotoğraflar**

Ek Şekil 3.1 Modeldeki akarsu menbasından bir görüntü



Ek Şekil 3.2 Eğitim düzeltme ve taban malzemesi için nivelman yapılması





Ek Şekil 3.3 Kum toplama ve çökeltim havuzlarından bir görünüş



Ek Şekil 3.4 Modeldeki akarsu yatağından bir görünüş



Ek Şekil 3.5 Kum toplama havuzunda biriken sürüntü maddesinin görünüşü



Ek Şekil 3.6 Konsantrasyon ölçümü için askı maddesinden nümune alınması

## ÖZGEÇMİŞ

1965 yılında Erzurum'da doğan İbrahim YÜKSEL, Erzurum İnşaat Teknik Lisesi'ni bitirdikten sonra 1984 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi İnşaat Bölümüne girdi. 1988 yılında bu fakülteden mezun olarak aynı yıl Rize Mimar Sinan İnşaat Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi'nde göreve başladı. 1989 - 1990 tarihleri arasında yedek subay olarak askerlik görevini tamamladı. Askerlik dönüşü aynı okulda inşaat bölüm başkanı olarak yeniden göreve başladı. 1991 yılında Y.Ö.K.'ün Ankara'da açmış olduğu sınavı kazanarak, K.T.Ü. Rize Meslek Yüksek Okulu İnşaat Bölümüne Öğretim Görevlisi olarak atandı. 1992 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü M.M.F. İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı.

1993 -1994 yıllarında Y.Ö.K. bursu ile, mesleki eğitim ve araştırma amacıyla İngiltere'de ( Mid - Kent Colloge'de ) bulundu. Yurtdışında iken yüksek lisansına devam eden Yüksel, yurtdışından döndükten sonra 1995 yılında yüksek lisansını tamamladı. 1995-1996 yılında yine aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü M.M.F. İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Anabilim Dalında doktora çalışmasına başladı.

Yayınlanmış 18 adet bildiri, makale, proje, rapor, v.b eseri vardır. Çeşitli alanlarda ödül ve sertifikaya sahip olan Yüksel İngilizce bilmekte olup evli ve üç çocuk babasıdır.