İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

REZERVUARLARDA SEDİMENT BİRİKİMİNİN ÖNLENMESİ VE REZERVUAR EKONOMİK ÖMRÜNÜN UZATILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burcu ODABAŞI

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Hidrolik ve Su Kaynakları Müh.

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İlhan AVCI

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

REZERVUARLARDA SEDİMENT BİRİKİMİNİN ÖNLENMESİ VE REZERVUAR EKONOMİK ÖMRÜNÜN UZATILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Burcu ODABAŞI
(501091513)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İlhan AVCI (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. M. Emin SAVCI (İTÜ)
Doç. Dr. Ş. Sibel MENTEŞ (İTÜ)

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

Gün geçtikçe daha çok duyar olduk iklim değişimi, yenilebilir enerji, içme suyu azlığı kavramlarını. Tükenen enerji kaynaklarının karşısında üzülürken; hidroelektrik enerji bu ihtiyacı karşılamak için dağ gibi durmakta, barajların popülerliği her geçen gün artmaktadır. Fakat ülkemizde sedimentasyon gibi bir hastalık kol gezerken; kıymetli barajları sadece inşa etmekle kalmayıp, seslerine kulak verip, dertlerini çözmemiz biz su mühendislerinin öncelikli görevidir.

Sevgili tez danışmanım Prof. Dr. İlhan Avcı'yla oldukça uzun bir yolculuğa çıktık barajlar ve dertleri üzerine. Rezervuarlarındaki sediment birikimlerini, ekonomik ömürlerinin ne kadar etkilendiğini inceledik. Literatürü taradık, kim en etkili tedaviyi bulmuş (mu) diye.

Ve gördüm ki eskiden barajlar dizayn edilirken, sediment kendi haline bırakılırmış. Kim nereye çökelmek isterse orada kalır, bu da tasarımlarda dikkate alınmaz, sadece sedimentin miktarıyla ilgilenirlirmiş. Oysa şimdi o sediment nereden gelir, nasıl gelir, niye gelir ve bunları iyi anlayıp nasıl tekrar geldiği yere gönderilir, bol bol araştırma bulduk bunların üzerine ve tabii uygulamalar, gerçek sonuçlar. Rezervuarlarda sedimentasyon konusu su mühendislerini hep rahatsız etmiş, üzerine bol bol araştırma ve deney yapılmış. Fakat olayın karışık, çok parametreli, üç boyutlu olması, çalışmaların genelde deney laboratuarlarında kalmasına neden olmuş; gerçek ölçütlerde çeşitli çözümler halen üretilememiştir. Uygulamalarda ise genellikle deneyimlere başvurularak işlem süreçleri devam etmektedir.

Tezi hazırlama sürecinde danışmanım İlhan Hocam, vizyonu ve cömertliğiyle bana örnek teşkil etmiş, bilim kapılarını ardına kadar açmıştır. Kendisiyle çalıştığım için mutlu ve şanslıyım. Yine çok değer verdiğim, bu konudaki yayınlarıyla beni aydınlatmış, bu kapsamlı konuyu kavramama katkıda bulunmuş sevgili hocam Prof. Dr. Necati Ağıralioğlu'na teşekkürü bir borç bilirim. Bir teşekkür de ADA Mühendislik'e. Sayın Dursun Yıldız ve İhsan Kaş, henüz tanışmıyor olsak da sayenizde daha başlarken çok yol aldığım, çok şey öğrendiğim (hatta ezberlediğim) harika raporunuz için size de ayrıca teşekkürlerimi sunuyorum.

Mayıs 2011

Burcu Odabaşı

(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMALAR vii
ÇİZELGE LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
SEMBOL LİSTESİ xii
ÖZET xv
SUMMARY xvii
1. GİRİŞ VE İNCELENECEK KONUNUN TANITILMASI 1
2. HAVZA VE YATAK EROZYONU, EROZYONUN REZERVUAR EKONOMİK ÖMRÜNE ETKİSİ VE AKARSULARDA SEDİMENT TAŞINIMI 5
2.1 Sediment (Katı Madde) Kavramı ve Temel Özellikleri 5
2.1.1 Sedimentin tane büyüklüğü 6
2.1.2 Sedimentin tane biçimi 7
2.1.3 Sedimentin yoğunluğu ve porozitesi 8
2.1.4 Sedimentin çökelme hızı 8
2.1.5 Sedimentin granülometrisi 11
2.2 Havza ve Yatak/Taban Erozyonu Oluşum Mekanizması ve Baraj Rezervuarı Ekonomik Ömrü Üzerindeki Etkileri 12
2.2.1 Erozyon oluşum mekanizması 12
2.3 Erozyonun baraj rezervuarı ekonomik ömrü üzerindeki etkileri 14
2.4 Havzanın Erozyonu ve Sediment Taşınım Miktarının Tahmini, Hesabı ve Ölçülmesi 16
2.4.1 Tahmin yöntemleri 16
2.4.2 Hesap (ampirik) yöntemleri 16
2.4.3 Ölçüm yöntemi ve uygulamaları 17
2.5 Akarsularda Sediment Taşınımı 19
2.5.1 Sediment taşınım mekaniği 22
2.5.2 Sediment taşınım olayında etkin parametreler 23
2.5.3 Sediment taşınım olayında boyutsuz değişkenler 24
2.5.4 Akarsu yatağında sediment hareketinin başlaması 26
2.5.4.1 Yatakta bulunan sedimente etkiyen kuvvetler 26
2.5.4.2 Kritik yatak kayma gerilmesi 28
2.5.4.3 Kritik hız 29
2.5.5 Akarsu yatağında sürüntü hareketi 32
2.5.6 Akarsu yatağında askı hareketi 34
2.5.6.1 Askı hareketinde konsantrasyon dağılımı 35
2.5.6.2 Askı hareketi yapan tanelerin sınır çapı 35
2.5.6.3 Askı maddesi debisinin belirlenmesi 36
3.REZERVUARLARIN YAPILIŞ AMAÇLARI, TİP VE ÖZELLİKLERİ 37
3.1 Rezervuar Kavramı 37
3.2 Rezervuar Yapılış Amaçları 38
3.3 Rezervuar Tip ve Özellikleri 39
3.4 Rezervuarın Çevreye ve Su Niteliklerine Etkileri 40
4. REZERVUARLARIN PLANLAMA VE TASARIM ESASLARI 43
4.1 Rezervuar Yükseklik-Hacim Bağıntısı 43
4.2 Baraj Rezervuarının Bölümleri 44
4.3 Rezervuar Ölü Hacminin Belirlenmesi 46

5. SEDİMENT TAŞINIMI VE BİRİKİMİ OLAYLARININ REZERVUAR HACMİ VE EKONOMİK ÖMRÜNÜN BELİRLENMESİNDE ÖNEMİ 47
5.1 Rezervuara Taşınan Sediment Miktarının Belirlenmesi 47
5.2 Rezervuarda Biriken Sediment Miktarının Belirlenmesi 48
5.2.1 Biriken sediment miktarının belirlenme amacı 48
5.2.2 Biriken sediment miktarını belirlemede kullanılan yöntemler 50
5.2.2.1 Rezervuarların sediment tutma (tuzaklama) verimliliği 51
5.2.3 Biriken sediment hacminin hesaplanması 53
5.3 Rezervuarda Biriken Sedimentin Dağılımı 54
5.3.1 Akarsu bölgesindeki yığılmalar 55
5.3.2 Delta oluşumları 55
5.3.3 Taban akımları 60
5.3.4 Yoğunluk akımı 60
5.3.5 Bulanıklık akımı 64
6. REZERVUARLARIN NEHİR MORFOLOJİSİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ 67
6.1 Nehir Yatakları Üzerindeki Etkileri 67
6.1.1 Memba nehir yataklarındaki etkileri 67
6.1.2 Mansap nehir yataklarındaki etkileri 68
6.2 Akarsuyun Boşaldığı Deniz ve Göl Kıyı Alanları Üzerindeki Etkileri 72
7. REZERVUARLARIN DEPOLAMA (AKTİF HACİM) KAPASİTELERİNİ KORUMA YÖNTEMLERİ 73
7.1 Rezervuara Sediment Girişini Azaltma Yöntemleri 74
7.2 Rezervuara Giren Veya Biriken/Çökelen Sedimentin Uzaklaştırılması 77
7.2.1 Boşaltma yöntemi ve uygulamaları 78
7.2.1.1 Yoğunluk akımlarının boşaltması 79
7.2.2 Yıkama yöntemleri ve uygulamaları 80
7.2.2.1 Basınçlı yıkama yöntemi 82
7.2.2.2 Rezervuar su seviyesini alçaltarak yıkama 86
7.2.2.3 Boşaltma ve yıkama yöntemi 90
7.2.2.4 Yoğunluk akımlarının yıkanması 94
7.2.2.5 Yıkama yöntemlerinin etkinliği ve kriterleri 99
7.2.3 Sedimentin taranarak uzaklaştırılması ve uygulamaları 103
7.2.3.1 Taramada kullanılan sistemler 110
7.2.3.2 Taranan malzemenin uzaklaştırılması 113
7.2.4 Sedimentin sifonlama yöntemiyle uzaklaştırılması ve uygulamaları 115
7.2.4.1 Jandin yöntemi 119
7.2.4.2 Hydroaspirator yöntemi 120
8. TÜRKİYE'DEKİ BARAJ REZERVUARLARINDA SEDİMENT BİRİKİMİ VE UZAKLAŞTIRMA UYGULAMALARI 123
8.1 Bazı Barajların Sediment Birikimi Miktarları 123
8.2 Seyhan Barajı'nda Sediment Birikimi 132
8.3 Medik Barajı'nda Sediment Birikimi 134
8.4 Çubuk I Barajı'nda Sediment Birikimi 138
8.4.1 Çubuk I Barajı'nın boşaltılması 139
8.5 Güllübağ Barajı ve Sediment Savağı 142
8.5.1 Güllübağ Barajı sediment savağı deneyi 147
9. SONUÇ VE ÖNERİLER 157
KAYNAKLAR 163
ÖZGEÇMİŞ 171

KISALTMALAR

AGM : Ağaçlandırma ve Erozyon Kontrolü Genel Müdürlüğü
AGNPS : Agricultural NonPoint Source Pollution Model
ABD : Amerika Birleşik Devletleri
DSİ : Devlet Su İşleri
EİE : Elektrik İşleri Etüt İdaresi
GPS : Global Pozisyonlama Sistemi
HES : Hidroelektrik Santral
İTÜ : İstanbul Teknik Üniversitesi
ICOLD : International Commission on Large Dams
MUSLE : Revised Universal Soil-Loss Equation
NSS : Normal Su Seviyesi
ODIRMO : One Dimensional Model For River Morphology
SGİ : Sediment Gözlem İstasyonları
SSB : Silindirle Sıkıştırılmış Beton
USBR : United States Bureau of Reclamation
USLE : Universal Soil Loss Equation
WEPP : The Water Erosion Prediction Project

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Çeşitli ülkelerde toplam rezervuar hacminin yüzdesi olarak rezervuar sedimentasyonu tahmini oranları (Wen Shen, 1999) 2
Çizelge 2.1 : Tanelerin büyüklüklerine göre sınıflandırılması (Vanoni, 1975) 6
Çizelge 2.2 : Sediment yığınlarının porozitelerinin değişim bölgeleri (Bayazıt ve Avcı, 2010) 8
Çizelge 2.3 : Çeşitli yatak malzemelerin kritik akım hızı değerleri (Chow, 1959)..... 31
Çizelge 4.1 : Sakarya Nehri üzerindeki Yenice Barajı için yükseklik-alan ve yükseklik-hacim değerleri (Ağıralioğlu, 2004). 43
Çizelge 7.1 : Rezervuarları sediment birikiminden koruma yöntemlerinden biri olan yıkamanın çeşitleri (Yıldız ve Kaş, 2007). 81
Çizelge 7.2 : Taşkın döneminde bazı rezervuarlardan yoğunluk akımları ile mansaba bırakılan sedimentin rezervuara giren sediment miktarına oranları (Bruk, 1985). 98
Çizelge 7.3 : 1957-1968 yılları arasında, dönen bir tarayıcı başlığı ve vakumlu emme sistemi ile tarama işlemi yapılan barajlar (Yıldız ve Kaş, 2007) 105
Çizelge 7.4 : Çeşitli tarama yöntemleri ve tarama derinlikleri (Bozkurt ve Çultu, 1989) .. 110
Çizelge 8.1 : DSİ'nin sediment birikimi bakımından incelediği barajlardan 18 tanesinin bazı karakteristik değerleri (Yıldız ve Kaş, 2007). 125
Çizelge 8.2 : İşletme halindeki barajlardan 18 tanesinin rezervuar dolma oranları ve sediment birikim yüzdeleri (Göğüş ve Adıgüzel, 1991). 126
Çizelge 8.3 : DSİ'nin incelediği bazı barajların toplam hacimlerindeki yıllık azalma oranı (Göğüş ve Adıgüzel, 1991). 127
Çizelge 8.4 : Rezervuar sedimentasyonu açısından incelenen 16 adet baraja ait fiili durumdaki sediment verimi oranlarının orjinal değerlerle kıyaslanması (Göğüş ve Adıgüzel, 1991). 128
Çizelge 8.5 : Türkiye'de işletmeye açılmış bazı barajların, DSİ Etüt ve Plan Dairesi Başkanlığı'nın yapmış olduğu durum analizi (Yıldız ve Kaş, 2007) 130
Çizelge 8.6 : Türkiye'de işletmeye açılmış bazı barajların, DSİ Etüt ve Plan Dairesi Başkanlığı tarafından yapılan sediment durum analizi (Yıldız ve Kaş, 2007) 131

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : 15 yıldan kısa süre içinde, tamamı sedimentle dolmuş Venezuela Camaré sulama rezervuarı (Morris ve Fan, 1997).....2
Şekil 2.1 : Küresellik, yuvarlaklık ve sediment tanelerinin dağılımı (Morris ve Fan, 1997). 7
Şekil 2.2 : Küresel taneler için C_D direnç katsayısının Re_* tane Reynolds sayısı ile değişimi (*ASCE*, 1962).....9
Şekil 2.3 : Küresel bir kuvars tanesinin su içinde çeşitli sıcaklıklarda çökelme hızları (*ASCE*, 1962). 10
Şekil 2.4 : Suyun yoğunluğunun değişmesinin kum tanelerinin çökelme hızlarına etkisi (Mosonyi, 1965).....10
Şekil 2.5 : Granülometri eğrisine bir örnek (Bayazıt ve Avcı, 2010). 11
Şekil 2.6 : Granülometri eğrisinin yarı logaritmik normal olasılık kağıdında gösterilişi (Bayazıt ve Avcı, 2010). 12
Şekil 2.7 : Gökırmak-Pürtülü sediment anahtar eğrisi (EİE, 2011b). 19
Şekil 2.8 : Çoruh Nehri'nde şev erozyonu (Avcı ve diğ., 2009). 20
Şekil 2.9 : Kulekhani Barajı (Nepal), akarsu mansap kısmında kanal erozyonu nedeniyle sökülen iri taneli malzemeler (Galay, 1987). 20
Şekil 2.10 : Sediment tanelerinin akarsularda taşınım şekilleri (Graf, 1998). 22
Şekil 2.11 : Yatak yüzeyindeki bir taneye etkileyen kuvvetler (Bayazıt ve Avcı, 2010) 26
Şekil 2.12 : Kritik kayma gerilmesini veren Shields Eğrisi (Yatağın alacağı çeşitli şekiller Fr^2_* - Re_* düzleminde gösterilmiştir.) (Bayazıt ve Avcı, 2010) 29
Şekil 3.1 : Doğal göl ile rezervuarın karşılaştırılması (Morris ve Fan, 1997) 38
Şekil 3.2 : Sıcak aylarda, bir göldeki sıcaklığın derinlikle değişimi (Ağıralioğlu, 2004). ...41
Şekil 4.1 : Yenice Barajı için yükseklik-alan ve yükseklik-hacim eğrileri (Ağıralioğlu, 2004). 44
Şekil 4.2 : Çok amaçlı bir rezervuarda depolama bölümleri (Yıldız ve Kaş, 2004). 45
Şekil 5.1 : Brune tarafından geliştirilen tuzaklama verimliliği eğrisi (Borland, 1971). 52
Şekil 5.2 : Ölü hacimde biriken sedimentin toplam sediment birikimine oranı (Borland ve Miller, 1958) 53
Şekil 5.3 : Sedimentin rezervuarda birikme şekillerinin boykesitten görünüşleri (Morris ve Fan, 1997) 54
Şekil 5.4 : Bir göl veya rezervuarın sediment ile dolması (Sly, 1978). 55
Şekil 5.5 : Kulekhani Rezervuarı'nda (Nepal) delta birikiminin genel görünüşü (Galay, 1987) 56
Şekil 5.6 : Bir rezervuarda tipik sediment birikimi görünüşü (Morris ve Fan, 1997) 58
Şekil 5.7 : Mead gölünde delta oluşumu, ABD (Graf, 1971) 59
Şekil 5.8 : Baraj haznesinde yoğunluk akım bölgeleri (Ağıralioğlu, 2004) 61
Şekil 5.9 : Dalma noktası (Yıldız ve Kaş, 2007) 61
Şekil 5.10 : Rezervuarda yoğunluk akımlarının ilerleyişi (Yıldız ve Kaş, 2007).....62
Şekil 5.11 : Kış dönemindeki su ve sediment hareketi (Bruk, 1985). 63
Şekil 5.12 : Üst, iç ve dip akım cinsinden yoğunluk akımları (Yıldız ve Kaş, 2007) 63
Şekil 5.13 : Seri dalga hareketiyle yayılan yoğunluk akımları (Alavian, 1986b). 64
Şekil 5.14 : Bir rezervuara giren bulanıklık akımı (Morris ve Fan, 1998) 65
Şekil 5.15 : Düşük rejimde yatak şekilleri (Morris ve Fan, 1997) 66
Şekil 6.1 : ODIRMO Bilgisayar programı ile elde edilen nehir yatağındaki değişmeler (Vermeer, 1985). 68

Şekil 6.2 : Baraj mansabı nehir yatağındaki taban alçalması (Bruk, 1985). 69
Şekil 6.3 : Rufiji Nehri yatağında oluşan taban alçalmaları (Kerssens ve Zwaard,1980).... 70
Şekil 6.4 : Kızılırmak Deltası'nda çeşitli yıllara ait kıyı profilleri (DSİ, 2004) 72
Şekil 7.1 : Isparta Uluborlu su havzasının, Ağaçlandırma ve Erozyon Kontrolü Genel Müdürlüğü tarafından ıslah ve rehabilitasyon çalışmaları yapılmadan önceki ve yapıldıktan sonraki hali (AGM, 2011) 74
Şekil 7.2 : Kontrol barajı ile sediment birikimini kontrol etmenin şematik gösterimi (Durgunoğlu ve Singh, 1993) 76
Şekil 7.3 : Amsteg Rezervuarı'nda bulunan çevirme tünelinin şematik gösterimi (Reed, 1931)..... 76
Şekil 7.4 : Jiroft Barajı'nda (İran) taşkın zamanı sediment yüklü akımın dipsavak ve dolusavaklarla mansaba aktarılması (Anonim, 2011) 80
Şekil 7.5 : Yıkanan alanın plan ve boykesitte görünüşü (Meshkati Shahmirzadi ve diğ., 2010) 82
Şekil 7.6 : Jiroft Barajı'nda basınçlı yıkama işlemi (Emamgholizadeh ve diğ., 2005)..... 83
Şekil 7.7 : Dipsavak çevresinde, yıkanma sonrası oluşan yarım koni şeklindeki bölge (Meshkati Shahmirzadi ve diğ., 2010) 85
Şekil 7.8 : a) Su seviyesi düşürülmeden birikimin yıkama etkisiyle temizlenmesi b) Su seviyesi düşürülerek birikimin yıkama etkisiyle temizlenmesi (Wen Shen, 1999)..... 87
Şekil 7.9 : Birikim deltasının boykesitden görünüşü (Wen **S**hen, 1999). 87
Şekil 7.10 : 1968-1995 yılları arasında düzenli olarak yapılan yıllık yıkama işlemlerinden sonra Gebidem rezervuarının membasının genel görünüşü (Morris, 1996). 88
Şekil 7.11 : 1981-1982 yılları arasında, su seviyesi alçaltarak yapılan yıkama işlemi sırasında baraj membasından bir görünüş (Tolouie, 1989) 89
Şekil 7.12 : Hengshan Barajı membasında biriken siltli malzeme içinde oluşmuş yıkama kanalı (Morris ve Fan, 1998). 91
Şekil 7.13 : Hengshan Barajı rezervuarı boşaltma ve yıkama işletmeleri önce ve sonrasında elde edilen boyuna nehir yatağı profilleri (Bruk, 1985). 92
Şekil 7.14 : Dashikau Sulama Barajı'nın (Çin), biriken sedimentin yıkanması için taşkın sezonu öncesi boşaltılan rezervuarı (Morris ve Fan, 1998) 93
Şekil 7.15 : Steeg Barajı'nda (Cezayir) küçük çaplı ve düşük seviyedeki dipsavaktan yoğunluk akımının mansaba bırakılması (Morris ve Fan, 1998)..... 94
Şekil 7.16 : Taşkın zamanı, $Q_ç / Q_g$ oranına karşı $Q_{sç} / Q_{sg}$ oranının rezervuarın uzunluğu ile ilişkisi (Fan ve Jiang, 1980)..... 98
Şekil 7.17 : Çubuk I Barajı dipsavağı önünde sediment birikimi (Yıldız ve Kaş, 2007)..... 102
Şekil 7.18 : Cogswell Barajı'nda sedimentin ekskavatörlerle taşınması ve bu işlem için boşaltılmış olan rezervuarı (Morris ve Fan, 1998) 104
Şekil 7.19 : Rezervuarın boyuna kesiti ve yüzer tarayıcı sistem (Liechti ve Haeberli, 1970)..... 106
Şekil 7.20 : Plagnedra rezervuarını yüzen tarayıcı ile tarama işlemi (Liechti ve Haeberli, 1970) 107
Şekil 7.21 : Hidrolik tarama sistemi (Aras, 2009) 111
Şekil 7.22 : Mekanik tarayıcı sistemlerine bir örnek, kepçeli tarayıcı (Aras, 2009)..... 112
Şekil 7.23 : Derin tarayıcı *TIJL-3*'ün üretim hızları (Bozkurt ve Çultu, 1989). 113
Şekil 7.24 : Taranan sedimentin işlenmesi (Bozkurt ve Çultu, 1989). 114
Şekil 7.25 : Sifonlama yönteminde uygulanan sistem (Scheuerlein, 1987). 115
Şekil 7.26 : Sifonlama sistemi mansap borusu konumu (Durgunoğlu ve Singh, 1993) 115
Şekil 7.27 : Rioumajou Barajı'ndaki hidrolik sifon sistemi (Evrard, 1980) 116
Şekil 7.28 : Tianjiawan rezervuarındaki tarama borusu sistemi krokisi (Bruk, 1985)..... 118
Şekil 7.29 : Jandin'in sifonlama sistemi (Hannoyer, 1974)..... 119
Şekil 7.30 : Hydroaspirator sistemi (Hotchkiss ve Huang, 1995). 120
Şekil 7.31 : Sifonlanan sedimentli akımın uzaklaştırılması (Aras, 2009). 122
Şekil 8.1 : Türkiye'deki barajlar ve hidroelektrik santraller (Yıldız ve Kaş, 2007). 124
Şekil 8.2 : Seyhan Barajı haznesi ve ölçüm yapılan kesitler (Özcan ve Kırkgöz, 1994).. 132

Şekil 8.3 : Seyhan Barajı haznesinde yükseklik-depolama hacmi eğrileri (Özcan ve Kırkgöz, 1994) 133
Şekil 8.4 : Seyhan Barajı'nda ölçülen taban profilleri (Özcan ve Kırkgöz, 1994) 133
Şekil 8.5 : Medik Barajı ve rezervuarının görünüşü (1980) (Yıldız ve Kaş, 2007).....134
Şekil 8.6 : Medik Barajı'nın sedimentle dolan ve bitki örtüsüyle kaplanan rezervuarının görünüşü (Mayıs 1996) (Yıldız ve Kaş, 2007). 135
Şekil 8.7 : Medik Barajı'nın sedimentle dolan ve bitki örtüsüyle kaplanan su alma yapısının görünüşü (Eylül 1996) (Yıldız ve Kaş, 2007). 136
Şekil 8.8 : Sedimentle dolan Medik Barajı rezervuarında doğal olarak oluşan kanallar (Eylül 1996) (Yıldız ve Kaş, 2007).....137
Şekil 8.9 : Çubuk I Barajı genel görünümü (DSİ, 2011e). 138
Şekil 8.10 : Çubuk I Barajı plan ve kesitleri (Yıldız ve Kaş, 2007). 139
Şekil 8.11 : Çubuk I Barajı rezervuarının boşaltıldıktan sonraki durumu (13 Kasım 1992) (Yıldız ve Kaş, 2007). 140
Şekil 8.12 : Çubuk I Barajı rezervuarının dipsavaklar ile boşaltılmasından sonra gölde biriken malzemenin genel görünüşü (13 Kasım 1992) (Yıldız ve Kaş, 2007)....141
Şekil 8.13 : Çubuk I Barajı'ndaki yıkamadan sonra mansap kanalına çökelen malzemenin görünüşü (Yıldız ve Kaş, 2007).....142
Şekil 8.14 : Çoruh Nehri ve Güllübağ Barajı aksı (Avcı ve diğ., 2009). 143
Şekil 8.15 : Güllübağ Barajı membadan görünüşü (Avcı ve diğ., 2009). 144
Şekil 8.16 : Güllübağ Barajı kesin projesi, dolusavak boy kesiti ve detayı (Avcı ve diğ., 2009) 145
Şekil 8.17 : Güllübağ Barajı kesin projesi, dipsavak (sediment savağı) boy kesiti (Avcı ve diğ., 2009) 146
Şekil 8.18 : Güllübağ Barajı proje alanındaki yamaç molozu (Avcı ve diğ., 2009).....148
Şekil 8.19 : Deney başlamadan önce dolgunun görünüşü (Avcı ve diğ., 2009).....150
Şekil 8.20 : İkinci deney serisi sırasında dipsavak ve akımın sol sahilden görünüşü (Avcı ve diğ., 2009) 151
Şekil 8.21 : Dipsavak giriş ağzı seviyesinin 2 m altındaki (1108 m kotu) derinlikten geçen düzlemdeki hız alanı (baraj gölü maks. işletme seviyesinde, dipsavak ve enerji tünel kapakları tam açık) (hızlar cm/s) (Avcı ve diğ., 2009) 152
Şekil 8.22 : Dipsavak girişinde 1118 m kotundaki yaklaşım hızı dağılımı (baraj gölü maks. işletme seviyesinde, dipsavak ve enerji tünel kapakları tam açık) (hızlar cm/s) (Avcı ve diğ., 2009) 153
Şekil 8.23 : Deney modelinin mansaptan görünüşü (Avcı ve diğ., 2009) 154
Şekil 8.24 : Deney düzeneğinin sediment deneyi sırasında sol sahilden görünüşü (Avcı ve diğ., 2009) 155
Şekil 8.25 : Deney düzeneğinin sediment deneyi sırasında üstten görünüşü (Avcı ve diğ., 2009) 155
Şekil 8.26 : Deney sonrasında düzeneğin sağ sahilden görünüşü (Avcı ve diğ., 2009) 156

SEMBOL LİSTESİ

A : Tanenin akıma dik izdüşümünün alanı
A_b : Baraj alanı
$A_{\text{çıkış}}$: Dipsavağın kesit alanı
A_h : Havza alanı
B : Akarsu kesit genişliği
B_r : Rezervuarın genişliği
c : Akarsuda askı maddesinin konsantrasyonu
c_a : Askı maddesi referans konsantrasyon
C_D : Direnç katsayısı (drag coefficient)
C_L : Kaldırma katsayısı
D : Katı tane çapı
D_n : Nominal çap
g : Yer çekimi ivmesi
F_D : Hidrodinamik sürükleme kuvveti
F_L : Hidrodinamik kaldırma kuvveti
F_{r*} : Tane froude sayısı
G : Sediment verimi
G' : Tanenin su altındaki ağırlığı
h : Akım derinliği
h_b : Baraj yüksekliği
H_P : Yoğunluk akımının dalma derinliği
H_s : Dipsavağın ekseninden itibaren birikmiş sedimentin yüksekliği
H_w : Dipsavağın ekseninden itibaren barajdaki su yüksekliği
L : Rezervuar uzunluğu
$L_{yıkanma}$: Yıkanma konisinin uzaklığı
Q : Akarsu debisi
Q_a : Rezervuara yıllık akım girişi
$Q_ç$: Taşkın zamanı rezervuardan mansaba bırakılan akımın debisi
Q_g : Rezervuara giren taşkın debisi
Q_s : Tahmini günlük süspanse sediment miktarı
$Q_{sç}$: Yoğunluk akımı ile mansaba bırakılan sediment miktarı
Q_{sg} : Yoğunluk akımı ile rezervuara giren sediment miktarı
Q_T : Toplam sediment (yıkanma ve yatak malzemesi) debisi
q_B : Akarsuyun birim genişliğinden birim zamanda geçen sürüntü malzemesi ağırlığı
q_s : Askı maddesi debisi
R : Akımın hidrolik yarıçapı
R^2 : Belirlilik (determination) katsayısı
R_{e*} : Tane reynolds sayısı
S : Enerji çizgisi eğimi
t : Süre (yıl)
A : Tanenin akıma dik izdüşümünün alanı
t_E : Tuzaklama verimliliği (%)

u : Tanenin yakınında akım hızı
u_* : Yatak kayma gerilmesi hızı
u_{*c} : Taneyi harekete geçirecek kritik yatak kayma gerilmesi hızı
u', v' : Çalkantılı akımın x ve y yönlerinde hız bileşenleri
$U_{\text{çıkış}}$: Dipsavak girişinde akımın hızı
V : Akımın ortalama hızı
V_c : Taneyi harekete geçirecek kritik akım hızı
V_k : Haznede yığılan sediment hacmi
$V_{yıkanma}$: Yıkanma konisinin hacmi
V_r : Rezervuar hacmi
W : Katı tane çökelme hızı
$W_{yıkanma}$: Yıkanma konisinin genişliği
γ : Suyun özgül ağırlığı
γ_s : Katı tanenin özgül ağırlığı
γ_{s*} : Tanenin su altındaki yoğunluğunun boyutsuz ifadesi
υ : Suyun kinematik viskozitesi
ρ : Suyun özgül kütlesi
ρ_s : Katı tane özgül kütlesi
τ_o : Yatak/Taban kayma gerilmesi
τ_c : Kritik yatak kayma gerilmesi
θ : Shields sayısı (hareketlilik sayısı)
θ_c : Shields sayısının kritik değeri
α : Tuzaklama oranı
σ_g : Katı tane çapı dağılımının standart sapması
^oC : Santigrat derece

REZERVUARLARDA SEDİMENT BİRİKİMİNİN ÖNLENMESİ VE REZERVUAR EKONOMİK ÖMRÜNÜN UZATILMASI

ÖZET

Tüm dünyadaki barajlar, rezervuarlarına boşalan akarsuların taşıdığı sedimentin birikimi sonucu, depolama kapasitelerini her yıl yaklaşık yüzde bir oranında yitirmektedir. Çeşitli araştırmacılar tarafından; oluşan bu kaybın maliyeti, kabaca yılda 6 milyar dolar olarak hesaplanmış ve rezervuarların ortalama hizmet süresinin yaklaşık 22 yıla gerilediği ileri sürülmüştür.

Barajların depolama kapasitelerindeki bu kayıp, barajların ekonomik ömürlerini azaltmakta ve taşkın önleme, hidroelektrik enerji üretimi, sulama, içme suyu temini ve rekreasyon gibi işlevlerin üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Sediment birikimi aynı zamanda, yeraltı suyu seviyesini yükseltmekte ve nehrin taşkın kapasitesini azaltmaktadır. Rezervuarda tutulan sedimentten ötürü, nehir morfolojisi ve ekolojisi de olumsuz yönde etkilenmektedir.

Rezervuarlardaki sedimentasyon sorunu; yarı kurak bir iklimin egemen olduğu ve oldukça engebeli bir yapıya sahip olan ülkemizde, son derece önem kazanmaktadır. Araştırmacıların belirttiğine göre; akarsu havzalarından, yılda toplam 450 milyon ton sedimentin rezervuarlara taşındığı tahmin edilmektedir.

Barajların ekonomik ömürlerinin kısalması, yeni barajların inşa edilmesini akla getirmektedir. Oysa ki çevresel etkiler, baraj yapımına uygun alanların kısıtlılığı ve inşa maliyetinin çok yüksek olması nedeniyle; yeni bir baraj inşa etmek yerine, mevcut barajın rezervuar kapasitesini korumak, son yıllarda daha çok tercih edilen ve önemi tartışılan bir konu olmuştur.

Rezervuarlardaki sedimentasyon sorununu çözmenin bir yolu, sedimentin rezervuara girişini azaltmaktır. Fakat bu çeşit yöntemlerin maliyetleri yüksek olup, sonuçları uzun sürede alınmaktadır. Rezervuara giren/çökelen sedimentin mansaba aktarılmasını sağlayan hidrolik ve mekanik yöntemler de mevcuttur. Bu çeşit yöntemler ise; maliyet, işletme ve uygulanabilirlik açısından sağladıkları faydalar sebebiyle son yıllarda önem kazanmıştır. Yine son yıllarda, bu yöntemlerin geliştirilmesine de ağırlık verilmiştir.

Bu tez kapsamında ise; rezervuarların ekonomik ömrünü azaltan sediment birikimi problemi ve barajların ekonomik ömürlerini yeniden kazanabilmeleri için bu sedimentin kontrol edilmesi ve uzaklaştırılması yöntemleri üzerinde detaylı bir şekilde durulmuştur. Bahsedilen yöntemlerin dünya ve ülkemizde işletme halinde bulunan baraj rezervuarlarında uygulanma şekilleri ve sonuçları da incelenmiştir.

REDUCING SEDIMENTATION DEPOSIT IN REZERVOIRS AND EXTENDING EFFECTIVE LIFE OF RESERVOIRS

SUMMARY

As a result of accumulation of sediment deposits decreases worldwide reservoir storage by 1% per year. A rough estimate for the loss of storage due to sedimentation and the cost of replacing lost storage is estimated to be $130 billion and their service time falls to 22 years according to various researchers in 1987.

This loss of reservoir storage reduces the effective life of dams and diminishes benefits for flood control, hydroelectricity generation, irrigation, water supply, and recreation. At the same time, sediment deposition within the resorvoir extends upstream and up tributaries, raises local ground-water tables, reduces channel flood capacity.

In our country which has a semi-drought season and a strict topogrophy, sedimentation is a serious problem. Amount of the sediment deposition in Turkey is around 450 million tons due to researchers.

Shorter economic use of dams creates a need for new ones. But improving the storage capacity of existing reservoirs is more important issue rather than building new reservoirs because of high costs of construction and absence of suitable dam site.

Reducing sediment enterance to reservoirs solves sedimentation problem. But these techniques are very expensive and have long term results. There are also hydraulic and mechanic techniques with advantages of low-cost, and maintanence. They are preferred for their sustainability and feasability in recent years. Also beyond applications, there are studies on improving those methods.

In short, content of this thesis is a comprehensive study about methods and techniques that focus on sedimentation which shortens economic use of reservoirs, and dams. Also it is examined of the discussed methods results respond to the applications in the country and also in all around the world.

1. GİRİŞ VE İNCELENECEK KONUNUN TANITILMASI

‘‘Dünyadaki toplam su miktarı 1.4 milyar km^3’tür. Bu suların %97.5’i okyanus ve denizlerde tuzlu su olarak, geriye kalan %2.5’i ise nehir ve göllerde tatlı su olarak bulunmaktadır. Bu kadar az tatlı suyun kaynaklarının da kutuplarda ve yer altında hapsedilmiş olması sebebiyle insanoğlunun kolaylıkla erişip yararlanabileceği tatlı su miktarının ne kadar az olduğu anlaşılmaktadır.’’ (DSİ, 2011a).

‘‘Tarih boyunca insanın suya olan gereksinimi, onu suyun biriktirilmesine zorlamıştır. Bu nedenle önceleri günlük ihtiyaçlarını giderecek su kapları yapan insan, daha sonraları bilhassa su kaynaklarının kıt olduğu yörelerde su biriktirme yapıları yapmak zorunda kalmıştır. Bu yapılardan en önemlisi barajlardır. Çeşitli özel amaçlarla yapılanlar olduğu gibi genel olarak suların faydasını arttırmak için vadilerin kapatılması suretiyle yapılan, 15 metreden yüksek, su depolayan yapay yapılara baraj diyoruz.’’ (EİE, 2011a).

Büyük Barajlar Uluslararası Komisyonu (ICOLD, 1988) 1996 yılı raporuna göre, dünya çapında bütün barajların sayısı (15 m ve üzeri olan) 42000’i aşmaktadır (Morris ve Fan, 1997).

Rezervuarlar (baraj gölleri) suyun depolanması için oluşturulan suni göllerdir. Bunların birçoğu oldukça büyük olup ekonomik, çevre ve estetik açıdan ilgi odağı olmaktadır. Tüm dünyadaki rezervuarlar, rezervuara boşalan nehirlerin taşıdığı sürüntü malzemelerinin birikimi sonucu, depolama kapasitelerini her sene yaklaşık %1 oranında (yaklaşık 50 km^3) yitirmektedir (Çizelge 1.1). Oluşan bu kaybın maliyeti kabaca yılda 130 milyar $ olarak hesaplanmıştır. Dünyadaki rezervuarların ortalama hizmet süresi yaklaşık 22 yıl olarak ileri sürülmüştür (Mahmood, 1987).

Depolama kapasitelerindeki bu kayıp barajların ekonomik ömürlerini azaltmakta, taşkın önleme, hidroelektrik enerji üretimi, sulama, içme suyu temini ve rekreasyon gibi işlevlerin üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır (Şekil 1.1) (Hotchkiss ve Huang, 1995).

Bunun yanı sıra sediment birikimi yeraltı suyu seviyesini yükseltir, nehrin taşkın kapasitesini azaltır (Fan, 1985). Rezervuarda tutulan sedimentten ötürü, baraj mansabına sediment bakımından daha temiz akımın bırakılması nehir morfolojisini de bozmaktadır.

Çizelge 1.1 : Çeşitli ülkelerde toplam rezervuar hacminin yüzdesi olarak rezervuar sedimentasyonu tahmini yıllık oranları (Wen Shen, 1999).

Yer	Sedimentasyon oranı (%)	Kaynak
Dünya	1	Mahmood (1987)
Tunus	2.3	Abdelhadi (1995)
Çin	2.3	Morris ve Fan (1998)
Türkiye	1.2	Morris ve Fan (1998)
Fas	0.7	Abdelhadi (1995)
Hindistan	0.5	Morris (1995)
ABD	0.22	Crowder (1987)



Şekil 1.1 : 15 yıldan kısa süre içinde, tamamı sedimentle dolmuş Venezuela Camaré sulama rezervuarı (Morris ve Fan, 1997).

Sedimentasyon konusu, yarı kurak bir iklimin egemen olduğu ve karmaşık bir topoğrafik yapıya sahip olan ülkemizde de son derece önem kazanmaktadır. Öyle ki yılda toplam 450 milyon ton sedimentin taşındığı tahmin edilmektedir.

Bu durum aynı zamanda tarımsal ekonomimizin en önemli üretim kaynaklarından birisi olan toprağın en verimli tabakasının, erozyonla yok olması anlamına da gelmektedir. Ülkemiz topraklarında erozyon ve sedimentasyon kaynaklı çevre kirliliği sorunu gündeme gelmiş bulunmaktadır.

Çevresel etkiler, baraj yapımına uygun alanların kısıtlılığı ve inşa maliyetinin çok yüksek olması nedeniyle; sedimentasyon sorununun çözümü için yeni bir baraj inşa etmek yerine, mevcut barajın rezervuar kapasitesini korumak daha tercih edilir ve önemi tartışılır bir konu olmuştur (Wen Shen ve Lai, 1996).

Bu tez kapsamında rezervuarların ekonomik ömrünü azaltan sediment birikimi problemi ve barajların ekonomik ömürlerini yeniden kazanabilmeleri için, bu sedimentin kontrol edilmesi ve uzaklaştırılması yöntemleri üzerinde durulmuştur.

Sediment birikimi sorununu iyi tanımlayabilmek için öncelikle Bölüm 2'de sedimentin nasıl oluştuğu, havzalardan akarsuya taşınma miktarı, akarsularda sedimentin taşınım şekli ve miktarından detaylı olarak bahsedilmiştir. Sediment kavramı, başka kaynaklarda *katı madde* veya *rusubat* adıyla da karşımıza çıkmaktadır fakat bu tez kapsamında sadece sediment olarak bahsedilmiştir.

Akarsuyla taşınan sediment baraj rezervuarında birikeceği için önce rezervuar yapısını iyi anlamak gerekir. Bu sebeple Bölüm 3'te rezervuar yapılış amaçları, tip ve özellikleri; Bölüm 4'te ise rezervuarın planlama ve tasarım aşamaları anlatılmıştır.

Akarsularla rezervuara taşınan sediment rezervuar içinde, tane biçimine ve rezervuar özelliklerine bağlı olarak faklı biçimlerde hareket eder ve çökelir. Sedimentin rezervuara giriş biçimleri, rezervuarda biriken sedimentin dağılımı ve biriken sedimentin miktarının hesaplanmasında kullanılan yöntemlerden Bölüm 5'te detaylı olarak bahsedilmiştir.

Akarsuyla taşınan sedimentin sadece rezervuarda değil, akarsuyun rezervuara bağlandığı memba kısmında ve barajın tekrar akarsuya bağlandığı baraj mansap kısmında da çeşitli etkileri olmaktadır. Sedimentin memba ve mansap nehir yatakları ve nehrin boşaldığı deniz ve göl kıyı alanları üzerindeki etkileri Bölüm 6'da anlatılmıştır.

Rezervuardaki sedimentasyonun kontrolü için birçok uygulama bulunmaktadır. Bu uygulamaların bazılarında akarsuyla taşınan sedimentin rezervuara girişi azaltılmaktadır. Fakat bu çözüm maliyeti yüksek ve sonuçları uzun sürede alınacak bir önlem olduğu için, bunun yerine daha çabuk sonuç alınan ve daha ekonomik olan başka yöntemler de geliştirilmiştir.

Bu yöntemler rezervuara girmiş olan sedimenti çökelmesine izin vermeden mansaba aktarmak veya sediment çökelmiş ise, bu sedimenti harekete geçirip yine mansaba aktarmak şeklinde gerçekleştirilen, rezervuarların depolama (aktif hacim) kapasitesini korumak için yapılan çeşitli hidrolik ve mekanik yöntemlerdir. Bu yöntemler dünya çapında birçok barajda başarıyla uygulanmıştır. Bunların uygulama şekli ve sonuçlarından, dünya üzerindeki örneklerinden Bölüm 7'de bahsedilmiştir.

Hidrolik potansiyeli oldukça yüksek olan ülkemizde birçok işlevi yerine getiren barajlarımız büyük bir öneme sahiptir. Tüm dünyada olduğu gibi sedimentasyon ülkemizde de ciddi bir sorundur. Bu konu üzerine araştırmacılarımız çalışmalar yapmakta, yeni barajların tasarımında veya mevcut barajların işletilmesinde sedimentin mansaba aktarılması önem kazanmaktadır. Bölüm 8'de Türkiye'de bulunan baraj rezervuarlarındaki sediment birikimi sorunu, bu sedimentin uzaklaştırılma yöntemleri ve uygulamaları anlatılmıştır.

2. HAVZA VE YATAK EROZYONU, EROZYONUN REZERVUAR EKONOMİK ÖMRÜNE ETKİSİ VE AKARSULARDA SEDİMENT TAŞINIMI

2.1 Sediment (Katı Madde) Kavramı ve Temel Özellikleri

‘‘Sediment, oluştuğu yerden çökeldiği yere kadar su tarafından taşınan katı maddelerdir. Su yataklarındaki sediment suda asılı halde veya tabanda sürüntü malzemesi olarak taşınan alüvyon malzemeleri kapsamaktadır (Hidroloji Sözlüğü)’’ (DSİ, 2011b).

‘‘Sedimentasyon, suda asılı halde bulunan katı maddelerin yer çekimi etkisiyle çökelip birikmesidir (Hidroloji Sözlüğü)’’ (DSİ, 2011c).

Akarsularda çakıl, kum, silt, kil gibi sediment tanelerinden oluşan bir yatak üzerindeki su akımı yataktaki taneleri harekete geçirebilir. Sökülüp taşınan sediment miktarı akım ve sediment özelliklerine bağlıdır. Tanelerin hareketi de akımı etkilediğinden, sıvı ve katı fazlardan oluşan bu iki fazlı hareketin incelenmesi sabit (rijit) yataklı bir açık kanaldaki akıma göre çok daha zordur. Akışkan ve katı taneler için yazılan süreklilik ve hareket denklemlerinin verilen sınır koşulları ile çözülmesi, akım türbülanslı olduğundan genellikle mümkün olmaz. Olayın karmaşıklığı yüzünden uniform tanelerden oluşan bir yatak üzerinde zamanla değişmeyen, uniform iki boyutlu akımda bile katı tanelerin hareketi için kesin çözüm elde etmekte büyük güçlükle karşılaşılır. Yataktaki tanelerin uniform olmayışı, akarsu kesitinin üç boyutlu yapısı, çeşitli yapımların etkisi ve akımın zamanla değişen karakteri olayların incelenmesini daha da zorlaştırır (Bayazıt, 1971).

Sedimentin akım içindeki hareketi sadece akımın özelliklerine bağlı değil, aynı zamanda tanenin özelliklerine de bağlıdır. Tanenin hidrolik açıdan en önemli özelliği tane çapıdır ve tanenin akım içindeki hareketi tane büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir.

Sediment tanelerini tanımlarken ortalama tane çapının yanında; tanenin yoğunluk, granülometri gibi diğer özellikleri de göz önüne alınır. Ya da bu özelliklerin hepsini karakterize eden çökelme hızı ile tane tanımlanır (Bayazıt ve Avcı, 2010).

2.1.1 Sedimentin tane büyüklüğü

Akarsulardaki taneler küresel biçimde olmadığı için tane büyüklüğünü ifade edebilmek için karakteristik bir çap kullanmak gerekir. Bu çap farklı şekillerde belirlenir;

Elek çapı: Tanenin geçebildiği en küçük elek açıklığı bize elek çapını verir. Kum gibi iri taneler elekten geçebildiği için bu taneler daha çok elek çapıyla ifade edilir.

Çökelme çapı: Aynı akışkan içinde çapı belirlenecek tane ile aynı çökelme hızına sahip, aynı yoğunluktaki küresel tanenin çapıdır. Kil ve siltler için çökelme çapı kullanılır. Çökelme çapı hidrolik açıdan en anlamlı büyüklüktür.

Nominal çap: Sediment yığınlarının hacminin belirlenmesinde kullanılan bu çap, tane ile aynı hacimdeki kürenin çapıdır (Çizelge 2.1). Nominal çap elek çapından biraz büyüktür.

Çizelge 2.1 : Tanelerin büyüklüklerine göre sınıflandırılması (Vanoni, 1975).

Adı	*D* tane çapı (mm)
Kaya	*D*>250
İri taş	60-250
Çakıl	2-60
Kaba kum	0.5-2
Orta kum	0.25-0.5
İnce kum	0.06-0.25
Silt	0.004-0.06
Kil	*D*<0.004

Çizelge 2.1'de gösterilen sınıflara ek olarak ara sınıflardan da söz edilebilir. 0.03-0.06 mm arasındaki kaba silt az kohezyonlu olduğu halde, 0.03 mm'den küçük olan ince siltin kohezyonu daha fazladır. Kum ile 0.008 mm'den ince siltin karışması halinde, kohezyonu zayıf olan çamurlu kum ortaya çıkar. Kum, silt ve kil karışımı 0.06 mm'den ince ise ve tanelerin oranı %30'dan büyükse, karışım kohezyonlu olur.

Bu oran %30'dan küçükse karışımın kohezyonu çok az olduğundan kum gibi davranır. Karışımda kil ve siltin varlığı tanelerin harekete başlamasını güçleştirdiğinden, kritik kayma gerilmesi artar (Van Rjin, 2007).

2.1.2 Sedimentin tane biçimi

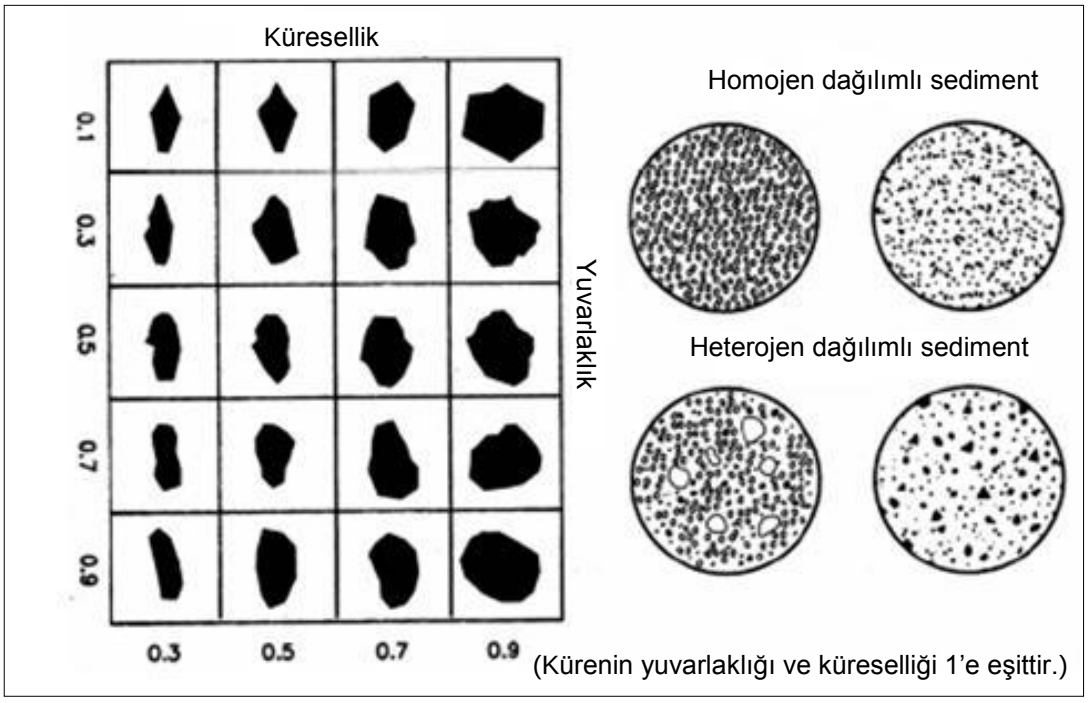
Tanenin biçimi çökelme hızını ve tanenin akım tarafından hareket ettirilmesini etkilediği gibi sediment yığınlarının boşluk oranlarını da belirler. Tane biçimini ifade eden iki büyüklük vardır;

Küresellik: Tane ile aynı hacimde olan kürenin yüzey alanının, tanenin yüzey alanına oranı olarak ifade edilen tane biçimine *Küresellik (sphericity)* denir.

Küresellik nominal çapın, tanenin içine yaklaşık olarak çizilebilecek en büyük dairenin çapına oranı olarak ölçülebilir.

Yuvarlaklık: Tanenin köşelerinin eğrilik yarıçaplarının ortalamasının, tane kesiti içine çizilebilecek yaklaşık en büyük dairenin yarıçapına oranı olarak ifade edilen tane biçimine de *Yuvarlaklık (roundness)* denir.

Küresellik ve yuvarlaklık aynı değildir, küreselliği yüksek olan bir tanenin yuvarlaklığı küçük ya da tam tersi olabilir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Küresellik, yuvarlaklık ve sediment tanelerinin dağılımı (Morris ve Fan, 1997).

Tanenin biçimi oluştuğu kayanın özelliklerine bağlıdır. Taneler akarsu tarafından zamanla daha yuvarlak hale getirilirse de ilk biçim tamamıyla kaybolmaz.

Tane biçimi elipsoid kabul edilirse akarsulardaki taneler için ortalama elipsoidin asıl eksen uzunlukları; D_n nominal çapı ve a, b, c ise eksen uzunluklarını göstermek üzere, a=1.39D_n, b=1.05D_n, c=0.72D_n'dir. Buna göre küreselliğin ortalama değeri 0.75'tir.

Tanenin çökelme hızını karakterize etmek için $c/\sqrt{ab}$ şeklinde bir biçim faktörü *(Corey shape factor)* tanımlanabilir. Doğal taneler için bu faktörün değeri 0.5-0.7 arasında değişir (ASCE, 1962), küre içinse bu değer 1.0'a eşittir.

2.1.3 Sedimentin yoğunluğu ve porozitesi

Sediment tanelerinin yoğunluğu meydana geldikleri kayanın özelliklerine bağlıdır ve genellikle 2.1 ile 2.8 g/cm^3 arasında değişir. Kayalarda en çok kuvars minerali bulunması nedeniyle ortalama sediment yoğunluğu 2.65 g/cm^3 alınabilir.

Bir sediment yığınında tanelerin kendi hacimlerinin yığının hacmine oranı, yığındaki boşluklar nedeniyle, her zaman 1'den küçüktür. Örneğin kum ve çakıl için bu değer 0.5 ile 0.7 arasında değişir. Bu sebeple yığının yoğunluğu tanelerin yoğunluğundan daha küçüktür.

Porozite sediment yığınındaki boşluk oranı olarak tanımlanır ve granülometriye, tane biçimine ve sıkıştırma derecesine bağlıdır. İnce tanelerin poroziteleri daha büyüktür (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 : Sediment yığınlarının porozitelerinin değişim bölgeleri (Bayazıt ve Avcı, 2010)

Sediment Sınıfı	Porozite (%)
Kaba kum	39-41
Orta kum	41-48
İnce kum	44-49
Kumlu lem	50-54

2.1.4 Sedimentin çökelme hızı

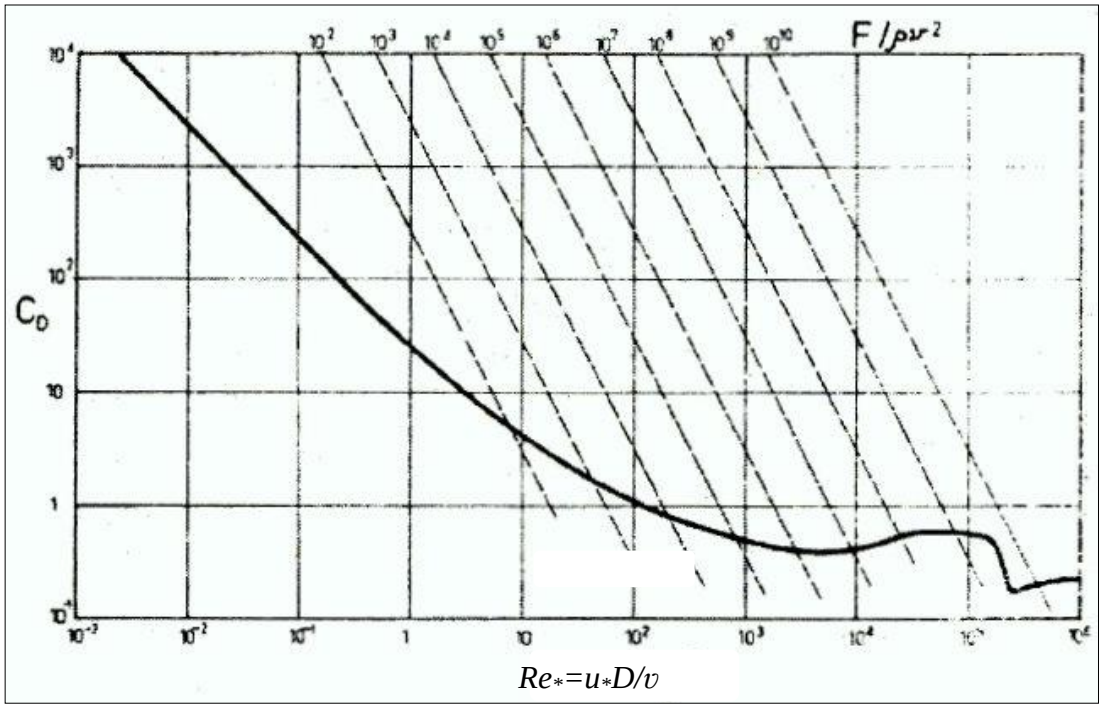
Çökelme Hızı (fall velocity, settling velocity), bir katı tanenin durgun suya bırakıldığı zaman gittikçe artan ve sonra sabit bir değere ulaşan hızına denir.

Çökelme hızı ile hareket eden bir tanenin sudaki ağırlığı, suyun tanenin hareketine gösterdiği dirence eşittir. *D* çaplı küresel bir tanenin *W* çökelme hızı için denklem şöyle yazılabilir:

$$(\gamma_s - \gamma)\pi\frac{D^3}{6} = C_D\left(\frac{\gamma}{g}\right)\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)\frac{W^2}{2} \qquad (\mathbf{2.1})$$

γ_s : tanenin özgül ağırlığı
γ: suyun özgül ağırlığı
C_D: direnç katsayısı (*drag coefficient*)

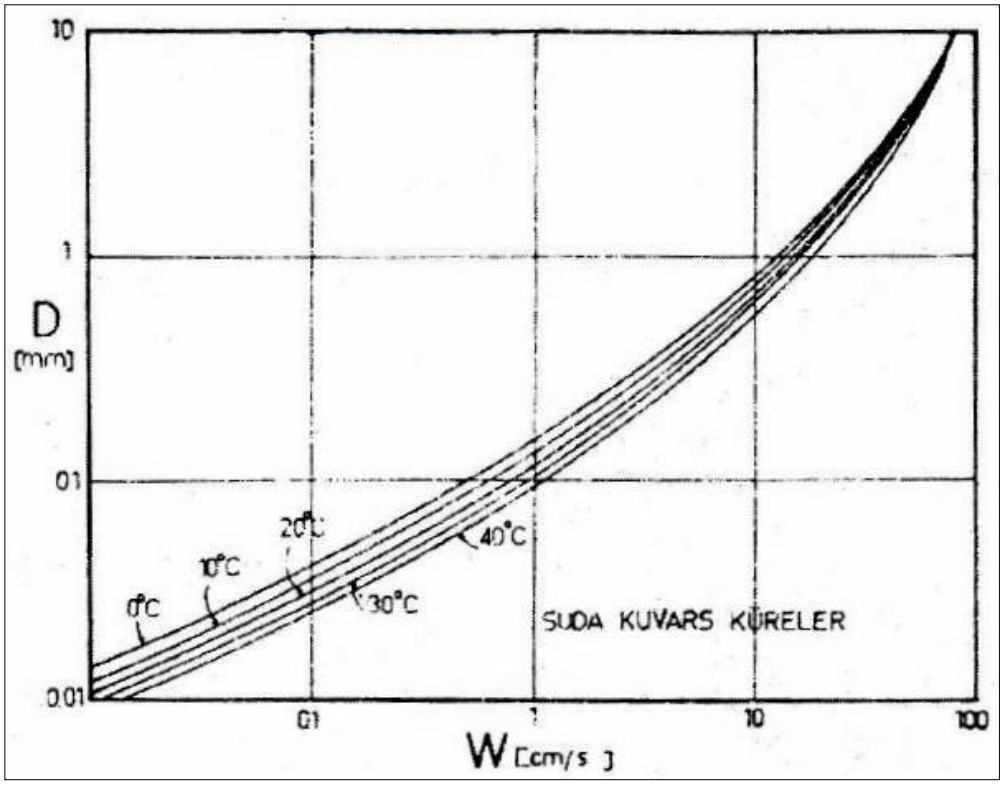
Burada C_D katsayısı, $Re_*=u_*D/v$ tane Reynolds sayısının deneysel olarak belirlenen bir fonksiyonudur (Şekil 2.2).



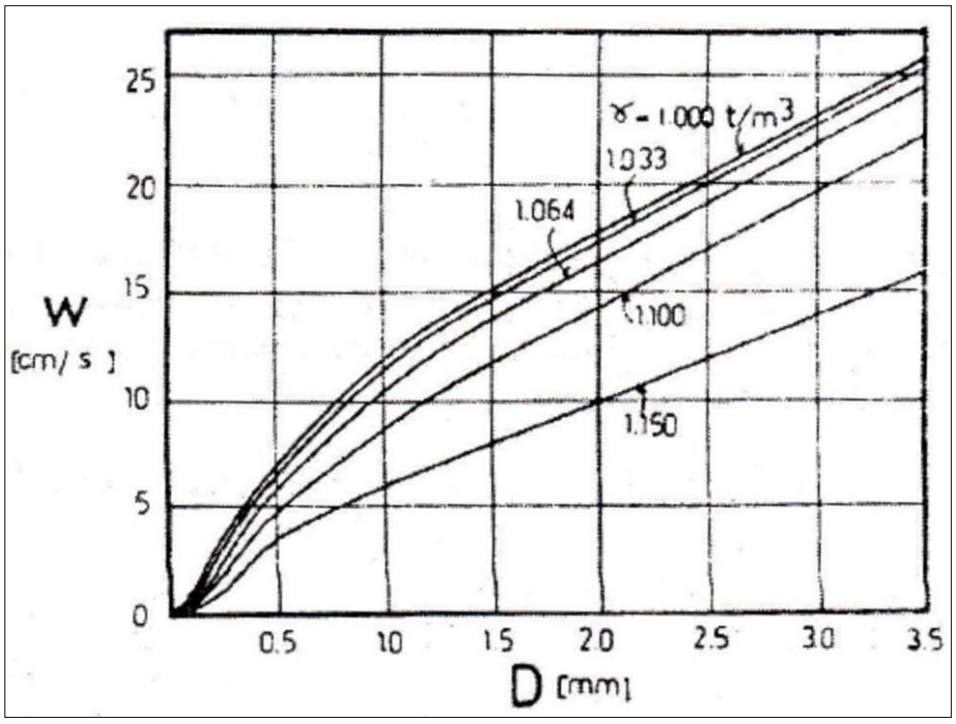
Şekil 2.2 : Küresel taneler için C_D direnç katsayısının Re_* tane Reynolds sayısı ile değişimi (*ASCE*, 1962).

Sudaki bir kuvars tanesi için $(\gamma_s/\gamma_= 2.65)$ çeşitli su sıcaklıklarında çökelme hızları Şekil 2.3'de gösterilmiştir.

Çökeltme havuzlarında olduğu gibi akışkan ortamında katı tanelerin yüksek konsantrasyonda bulunması halinde, suyun yoğunluğunun ve viskozitesinin artmasıyla çökelme hızı da değişir (Şekil 2.4).



Şekil 2.3 : Küresel bir kuvars tanesinin su içinde çeşitli sıcaklıklarda çökelme hızları (*ASCE*, 1962).



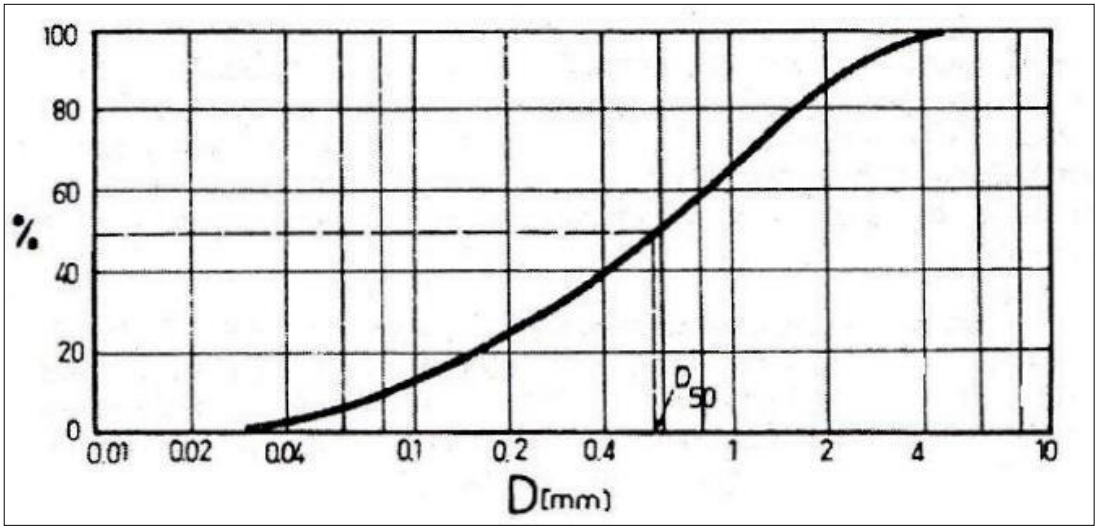
Şekil 2.4 : Suyun yoğunluğunun değişmesinin kum tanelerinin çökelme hızlarına etkisi (Mosonyi, 1965).

Akımda türbülansın varlığı, tanenin yüzey pürüzlülüğü, sınırların yakınlığı ve hız dağılımı da çökelme hızını etkiler. Türbülans çalkantıları, çevrilerin taneyi çökelirken döndürmesi ve tane üzerinde ayrılma noktasının değişmesi ile çökelme hızını etkiler. Bu etki genellikle çökelme hızını azaltıcı yönde ise de fazla önemli değildir (Bayazıt ve Avcı, 2010).

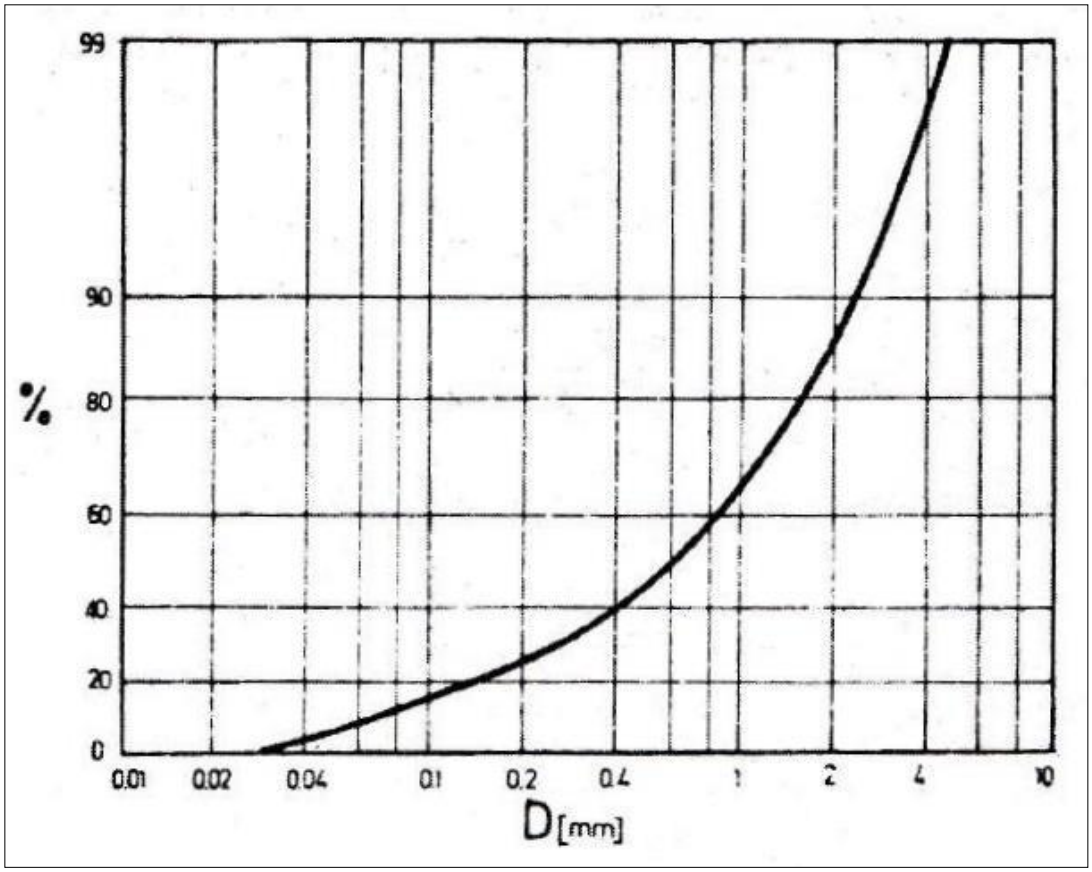
2.1.5 Sedimentin granülometrisi

Bir sediment örneğinde farklı büyüklüklerde taneler bir arada bulunduğundan, tane büyüklüklerinin dağılımını bilmek gerekir. Bu dağılım yani *Granülometri (size distribution),* tane çaplarının eklenik frekans eğrisi ile gösterilebilir. Bunun için yatay eksende tane büyüklüğü, düşey eksende belli bir çaptan küçük (ya da büyük) tanelerin yüzde olarak ağırlığı işaretlenir. Tane büyüklüğü için yatay eksende genelde logaritmik ölçek kullanılır. Düşey eksende ise normal dağılım kağıdının ölçeği kullanılabilir (Şekil 2.5 ve Şekil 2.6). Bu durumda granülometri eğrisi bir ya da daha çok doğru parçası ile gösterilebilir.

Bir karışımı sınıflara ayırarak incelerken D_i ve D_{i+1} çapları arasında kalan sınıfın ortalama çapı genellikle $(D_i \times D_{i+1})^{0.5}$ geometrik ortalama çapı şeklinde hesaplanır.



Şekil 2.5 : Granülometri eğrisine bir örnek (Bayazıt ve Avcı, 2010).



Şekil 2.6 : Granülometri eğrisinin yarı logaritmik normal olasılık kağıdında gösterilişi (Bayazıt ve Avcı, 2010).

Yatak malzemesinin granülometrisi genellikle sürüntü ve askı maddesinin granülometrisinden farklıdır. Akım içinde çok şiddetli bir hareket varsa ancak o zaman granülometriler aynı olur.

2.2 Havza ve Yatak/Taban Erozyonu Oluşum Mekanizması ve Baraj Rezervuarı Ekonomik Ömrü Üzerindeki Etkileri

2.2.1 Erozyon oluşum mekanizması

Türkiye yüzölçümünün %45.9'u yüksekliği 1000-2000 m. arasında değişen dağlık bölgedir. Yine yüzölçümünün %80.2'sinde eğim %15'ten fazladır (Korucu ve diğ., 1998).

Topoğrafyanın engebeli olması, bölgelerarası iklimin çok değişiklik göstermesi ve kolay ayrışabilen ana kayaya sahip olması nedeniyle Türkiye, dünyanın erozyona karşı en hassas bölgeleri içerisinde bulunmaktadır.

Yıllık ortalama sediment miktarı ölçüm sonuçlarına göre akarsularımızdan yılda $190x10^6$ ton askıda sediment taşınımı olmaktadır. Bu değere %25'lik yatak yükü miktarı da eklendiğinde, taşınan toplam sediment miktarı $238x10^6$ ton olmaktadır. Sedimentin ortalama birim ağırlığı 1.5 ton/m^3 alındığında, taşınan toplam sedimentin hacimsel değeri $158x10^6$ m^3/yıl olmaktadır. Sediment iletim oranının %18 kabul edildiği Türkiye'de erozyonla taşınan toprak miktarı $880x10^6$ m^3/yıl'a ulaşmaktadır. Göl ve barajların göl aynası alanları düşüldüğünde, bu değer yılda 1.1 mm toprağın erozyonla kaybolduğunu göstermektedir (Alışık ve Yalçın,1998).

Bir çalışmaya göre yağışlı bölgelerdeki toplam erozyonun sadece %10'u akarsu şevlerinden gelirken, % 90'ı havzalardan gelmektedir (Ağıralioğlu, 2004).

Türkiye'de birim alandan taşınan sediment miktarı Afrika'dan 22, Avrupa'dan 17 ve Kuzey Amerika'dan 6 kat daha fazladır (AGM, 2007).

Türkiye toplam arazisinden 1 yılda taşınan sediment miktarı tüm Avrupa kıtasından 1 yılda taşınandan daha fazladır (Holeman, 1968).

Türkiye'de 1 km^2 alandan taşınan askıdaki sediment miktarı yılda ortalama 600 ton civarında iken, bu miktar dünyada ortalama 142 tondur (AGM, 2007).

Havza sediment verimi:

Havzalardan aşınan malzemenin hepsi rezervuara ulaşmaz. Bir kısım malzeme havzalardaki doğal veya yapay hendeklerde birikir. Geriye kalan kısmı ise akarsu yatağı ve taşkın ovası içinde kalır. Sadece belli bir kısım akarsu üzerindeki kontrol noktasına ulaşır. Bu kontrol noktasına bir yılda, birim havza alanından kontrol noktasına gelen sediment miktarına *Sediment Verimi* denir ve ton/yıl/km^2 cinsinden ifade edilir. Dünyanın çeşitli yerlerinde bu oran 0 ile 10.000 ton/yıl/km^2 arasında değişir (Ağıralioğlu, 2004).

Havza bazında yapılacak sediment veriminin tahmini için; arazinin topoğrafyası, yağış ve sıcaklık gibi iklim verileri, jeolojisi, toprak özellikleri, arazi kullanım durumu, mevcut erozyon seviyesi bilgileri gereklidir. Sediment tahminine yönelik olarak yapılacak çalışmalar, akarsuların debilerine bağlı olarak, farklılık göstermektedir. Hidrolik kuvvetlere bağlı olarak, sediment parçacıklarından iri taneli olanların yatak yüzeyi ile temas halinde, ince taneli olanları ise türbülans hızının etkisiyle askıda hareket etmektedirler.

Taşınan sedimentin %50-%95'i askıdaki sedimenttir. Bu yüzden askıdaki sediment miktarı önemlidir. Yatak yükü miktarı askıdaki sediment yükünün %5-%25 arasında değişebilmektedir. Eğimin çok fazla olduğu dağlık arazilerde, bu oran %50'ye kadar ulaşabilmektedir (Yanmaz, 1997).

Dolayısıyla taşınan sedimentin miktarını belirlemek için askıdaki sediment konsantrasyonunun bilinmesine ihtiyaç vardır. Bunun için çalışma yapılan akarsudan belirli bir sıklıkta ve değişen su seviyelerinden alınan örneklerin laboratuvar ortamında analizi ile askıdaki madde miktarı tespit edilir. Farklı debi miktarlarına karşılık gelen sediment miktarı belirlenerek, o akarsu için sediment anahtar eğrisi oluşturulur. Sonra bu eğrilerden her akıma karşılık gelen askıdaki sediment miktarları tespit edilir (Demirkıran, 1997).

2.3 Erozyonun baraj rezervuarı ekonomik ömrü üzerindeki etkileri

Bir rezervuara taşınan sedimentin bütünü, ya havzalardaki tabaka erozyonundan ya da akarsu yatağındaki şev erozyonunun çeşitli şekillerinden kaynaklanır. Erozyona neden olan faktörler iki gruba ayrılır (Ağıralioğlu, 2004);

Aşındıran ve taşıyan kuvvetler: Suyun debisi, akımın türbülansı, katı cidarlarda ve çevrintilerin olduğu yerde akışkan kayma gerilmesi, akarsu taban eğimi, pürüzlülük katsayısı, sediment konsantrasyonu vb. bu gruba girer.

Direnç gösteren ve yığan kuvvetler: Yer çekimi, adhezyon (yapışma), bitki örtüsü, geçirimsizlik, türbülansın azalması ve tanelerin yumaklaşması ise bu gruba girer.

Doğada bir sediment tanesinin rüzgâr, su, yer çekimi ve don gibi etkilerle; yerinden aşınması (erozyon), harekete başlaması, taşınması, yığılması ve sıkışması şeklinde birbirini izleyen olaylar zincirinin tamamına sediment hareketi ya da *Sedimentasyon (sedimentation)* denir (Ağıralioğlu, 2004).

Bu sediment hareketinden ötürü ister küçük, ister büyük baraj olsun her haznede belli bir miktar sediment ile karşılaşılır. Bu yüzden baraj rezervuarı boyutlandırılırken, taşınan sediment miktarını ve zamanla değişimini belirleyip, bu değerleri göz önünde bulundurmak gerekir.

Genel olarak bir baraj akarsuyun akış rejimini ve sediment taşıma kapasitesini değiştirir, akarsudaki doğal dengeyi bozar. Yatağın bir kısmında oyulmalar, bir kısmında da yığılmalar meydana gelerek, uzun yıllar içinde yeni bir denge oluşur.

Baraj yapılan bir vadide sediment hareketi bakımından dört farklı bölge mevcuttur:

- Birinci bölge, aşınma ve oyulmaların olduğu havza kısmıdır. Bu bölge akarsu tarafından taşınan sedimentin ilk kaynağını oluşturur.
- İkinci bölge, taban yükselme ve alçalmaların olduğu akarsu kısmıdır. Doğal koşullar dışarıdan etkiyle değişene dek, bu kısım dinamik bir denge halindedir.
- Üçüncü bölge, yığılmaların meydana geldiği rezervuar kısmıdır.
- Dördüncü kısım ise, baraj mansabındaki akarsu yatağında oyulmaların olduğu bölgedir.

Akarsu üzerinde hazne oluşturmak maksatlı bir baraj inşa edilince, suyun akış hızı azalır. Hızın azalmasıyla akarsu ile taşınan sedimentin büyük bir çoğunluğu, suyun kabardığı akarsu kısımlarında ve rezervuarda yığılır. Bu yığılmalar rezervuar memba ucunda yatak seviyesini yükseltir ve bir delta (çatalağız) oluşur. Akarsu yatak seviyesinin yükselmesi önemli değerlere ulaşabilir ve suyun rezervuarın yukarısına doğru kabarmasına sebep olabilir. Yukarıdaki yan kol derelerinin tabanı da yükselir ve böylece taşkın seviyeleri de artar. Öte yandan rezervuarın mansabından su, daha az sediment miktarı ve daha büyük bir sürükleme gücü ile çıkar. Bu su, yeni bir denge oluşana kadar akarsu yatağını oyar, akarsu yatağı alçalır.

Rezervuarda sediment birikiminin baraj faydalı biriktirme hacmine, çıkış yapılarının ve dinlenme yerlerinin seçimine, boyutlandırılmasına ve hatta barajın işletilmesine önemli etkileri vardır. Rezervuarda sediment birikimi nehirdeki ulaşım, yapılacak iskeleler açısından da önemlidir. Taşkın yataklarının yükselmesiyle daha sık sel baskınlarıyla karşılaşılır ve verimli tarım alanları sediment yığınları altında kalır.

Türkiye dağlık bir ülke olduğu için akarsuların eğimi büyüktür. Birçok kesimde de bitki örtüsü yok denecek kadar azdır. Havza erozyonunun fazla olması nedeniyle akarsular çok miktarda sediment taşımaktadır. Bu taşınan sediment rezervuarları kısa zamanda doldurarak, rezervuarlar kapasitelerinin ve ekonomik ömürlerinin azalmasına neden olur.

Örneğin, Sakarya üzerinde 1956 yılında işletmeye açılan Sarıyar Barajı ile 1972 yılında işletmeye açılan Gökçekaya Barajı ve yan kollar üzerinde yapılan diğer barajlar, Aşağı Sakarya Nehri'nde önemli yatak oyulmalarına sebep olmuştur. Bununla birlikte Aşağı Sakarya Nehri'nde ortaya çıkan taban oyulmalarında, membadaki barajların yapımından başka, sedde yapımları ve yataktan ticari amaçla inşaat malzemesi olarak kum çekilmesi de önemli derecede etkili olmuştur (Ağıralioğlu, 2004).

Rezervuara taşınan sediment nedeniyle; Çubuk-I Barajı'nın 54 yılda %70, Seyhan Barajı'nın 37 yılda %40, Kartalkaya Barajı'nın 25 yılda %30, Altınapa Göleti'nin 18 yılda %30 ve Güvenç Göleti'nin rezervuarının 8 yılda %30 oranında sedimentle dolduğu yapılan araştırmalar sonucunda tespit edilmiştir (Akıncı, 2002).

2.4 Havzanın Erozyonu ve Sediment Taşınım Miktarının Tahmini, Hesabı ve Ölçülmesi

2.4.1 Tahmin yöntemleri

Sediment taşınımını etkileyen jeolojik, topoğrafik ve klimatolojik faktörlerin çok fazla ve bunların birbirleriyle olan ilişkilerinin karmaşık oluşu nedeniyle, herhangi bir akarsuyun taşıdığı sediment miktarının analitik olarak hesaplanabilmesi oldukça zordur. Bu amaçla geliştirilmiş birçok farklı tahmin yöntemleri bulunmakla birlikte, bu yöntemlerin sonuçlarının mümkün olduğu kadar uzun süreli ölçüm sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmesi daha güvenli bir yoldur (Miller, 1951).

Havzanın erozyonu ve sediment taşınım miktarının tahmini için bilgisayar simülasyon programları olan *WEPP Erozyon* ve *AGNPS Modeleri* kullanılabilir (Morris ve Fan, 1997).

2.4.2 Hesap (ampirik) yöntemleri

Baraj rezervuarı ölü hacminin belirlenmesinde, havzadan rezervuara gelecek olan sediment miktarının en doğru şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu miktarın belirlenmesinde yaygın olarak uygulanan yöntem, *Brüt Erozyon Oranı* hesap yöntemidir.

Dünyada yaygın olarak kullanılan diğer bir hesap yöntemi ise *USLE'*dir (*Universal soil-loss equation*, Evrensel toprak kayıp denklemi). Bu yöntemde toprak kayıpları havzadaki toprak tipi, bitki örtüsü, topoğrafya ve yağışın bir fonksiyonu olarak belirlenmektedir. Ancak bu yöntem için sediment iletim oranı gereklidir.

Diğer bir hesap yöntemi ise, USLE denkleminin modifiye edilmesi ile oluşturulan *RUSLE (Revised universal soil-loss equation)* yöntemidir. Bir havzanın sediment verimini belirlemede, yağış dışında bütün *USLE* parametreleri ile birlikte yüzey akış faktörünü dikkate alan *RUSLE* sediment iletim oranına ihtiyaç duymamaktadır.

USLE ve *RUSLE* gibi ampirik yöntemlere karşın, bir havzada sediment veriminin belirlenmesinde en doğru sonucu veren yerinde ölçüm yöntemidir (Demirkıran, 2002).

2.4.3 Ölçüm yöntemi ve uygulamaları

Askıdaki sediment ölçümü:

Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) Genel Müdürlüğü'nde süspanse sediment ölçümü yapılmakta ve bu ölçüm sonuçları değerlendirilerek yıllık olarak yayınlanmaktadır. Bu *Sediment Yıllığı*, Sediment Gözlem İstasyonları'nın (SGİ) sedimentolojik bilgilerini içermektedir.

Süspanse sediment ölçümü işlem sırası, aşağıdaki gibidir (EİE, 2011b):

- EİE tarafından, SGİ'nda seviye ve akım ölçümleri yanında nehrin değişik seviyelerinden, o andaki akarsu kesitinden geçen debiyi temsil edecek şekilde sediment örnekleri alınır ve bunun için derinlik entegrasyon yöntemi uygulanır.
- Alınan süspanse sediment örnekleri su+sediment analizleri için laboratuvara gönderilir. Laboratuvarda toplanan örneklere filtrasyon yöntemi uygulanarak içindeki sediment miktarları tespit edilir ve sediment konsantrasyonu ppm veya mg/l cinsinden bulunur.
- Laboratuvarda elde edilen net sedimente elek analizi yöntemi uygulanır. Bunun için net sediment 0.0625 mm çaplı eleklerden geçirilir. Eleğin üstünde kalan kısmın ağırlığı kum ağırlığı, alta geçen kısmın ağırlığı ise kil+silt ağırlığı olarak alınır.

- SGİ'larının ortalama süspanse sediment tane büyüklük dağılımları bulunurken, istasyondaki gözlem süresi boyunca bulunan bütün örneklerin analiz edilen kum ağırlıkları ve kil+silt ağırlıkları ayrı ayrı toplanır. Bulunan toplam kum ağırlığının, toplam net sediment kum+kil+silt ağırlığına göre yüzdesi alınır. Böylece örneklerin yüzde olarak kum, kil ve silt içerikleri belirlenir. Bulunan bu yüzdelerden, daha sonra rezervuarın işletme durumu da göz önüne alınarak, sediment birim hacim ağırlığı (ton/m³) elde edilir.
- Örneklerin alındığı anda ölçülen akım ile ton/gün olarak hesaplanan günlük sediment miktarları arasında logaritmik bir ilişki vardır. Bu ilişkinin genel denklemi aşağıdaki gibidir:

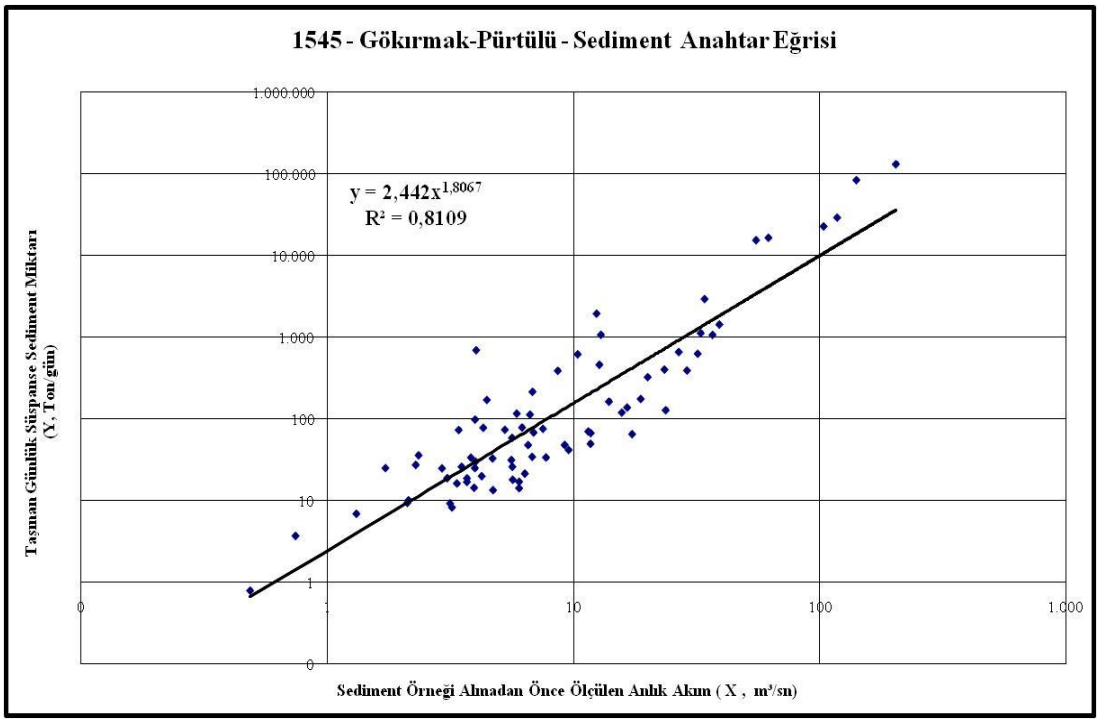
$$LogQ_S = a + bLogQ \quad ya\ da \quad Q_S = 10^a x Q^b \qquad (\mathbf{2.2})$$

Eşitlikte bulunan *a* ve *b*, akarsu istasyonunun özelliklerine göre değişen katsayılardır.

- Yıllığın hazırlanmasında her istasyon yeri için yukarıdaki ilişkiyi veren sediment anahtar eğrisi ve denklemi elde edilmiştir. Bu denklemin elde edilmesinde hesaplanan günlük sediment miktarları (ton/gün) ordinat (*y*) ekseninde bağımlı değişken olarak, örnek alındığı anda ölçülen akım (m³/sn) değerleri ise apsis (*x*) ekseninde bağımsız değişken olarak alınır. En uygun denklemin belirlenmesinde ise belirlilik *(determination)* katsayısının *(R^2)* en fazla olduğu durum göz önüne alınır (Şekil 2.7).

- Daha sonra sediment anahtar eğrisi elde edilen istasyon yerleri için akım yıllıklarında yayınlanmış olan günlük akımlar, sediment anahtar eğrisinde bulunan eşitlikte bağımsız değişken olarak *Q* yerine girilir. Böylece bu akımlara karşılık gelen tahmini günlük sediment miktarları Q_s (ton/gün) elde edilir.
- Bulunan bu günlük sediment miktarları kendi aralarında toplanarak aylık ve yıllık toplam sediment miktarları bulunur. Her yıl için ayrı ayrı bulunmuş olan sediment miktarları tekrar toplanmakta ve bu toplam değerlendirilen toplam yıl sayısına bölünür. Böylece o istasyon yeri için uzun yıllar yıllık ortalama süspanse sediment miktarı (ton/yıl) elde edilir.

- Elde edilen bu değerler daha sonra istasyonun net yağış alanına bölünerek, SGİ'nun bulunduğu havzanın birim alanından gelen ortalama sediment miktarı, başka bir deyişle istasyonun uzun yıllar yıllık ortalama sediment verimi (ton/yıl/km²) bulunur.



Şekil 2.7 : Gökırmak-Pürtülü sediment anahtar eğrisi (EİE, 2011b).

- Yıllıkta verilen sediment miktarları süspanse sediment miktarlarıdır. Toplam sediment miktarını bulmak için bu miktarlara yatak yükünü de ilave etmek gerekir. Uygulamada akarsuyun özelliklerine göre süspanse sediment miktarının %10-50'si arasındaki bir değer, yatak yükü olarak eklenir. Bu değer genellikle eğimin az olduğu düz arazilerde %25, eğimin fazla olduğu dağlık arazilerde %50 olarak alınır.
- Bulunan toplam sediment miktarı (ton/yıl), sediment hacim ağırlığına (ton/m³) bölünerek sedimentin rezervuarda kaplayacağı alan (m³) bulunur.

2.5 Akarsularda Sediment Taşınımı

Yağış, buzul ve rüzgâr gibi doğa olayları ile su akımı yer kabuğunu oluşturan kayaçları eritir, yerinden kopartır (*erozyon*). Koparılan bu taneler su akımı tarafından akarsu ağına sürüklenir. Akarsuda iki çeşit erozyon vardır.

Tabaka erozyonu: Akarsuyun taşıdığı taneler eğer akarsu havzasından sökülüp akarsuya taşınan tanelerse (Şekil 2.8), buna tabaka erozyonu denir ve akarsuyun taşıdığı *Yıkanma Malzemesi*'nin *(wash load)* temelini oluşturur.



Şekil 2.8 : Çoruh Nehri'nde şev erozyonu (Avcı ve diğ., 2009).

Kanal erozyonu: Akarsu kendi yatağından söktüğü taneleri taşıyorsa (Şekil 2.9), buna da kanal erozyonu denir ve akarsuyun taşıdığı *Yatak Malzemesi*'nin *(bed material load)* temelini oluşturur.



Şekil 2.9 : Kulekhani Barajı (Nepal), akarsu mansap kısmında kanal erozyonu nedeniyle sökülen iri taneli malzemeler (Galay, 1987).

Yıkanma malzemesi ve yatak malzemesi arasında hidrolik davranışları bakımından farklar bulunmaktadır. Akarsu yatağından alınan bir sediment örneğinde sadece yatak malzemesi olarak tanımlanan iri taneler bulunurken, daha ince taneli olan yıkanma malzemesi akarsu yatağı ile bir ilişkiye girmeden akarsu boyunca sürekli olarak taşınmaktadır.

Yıkanma malzemesi yükü akarsu havzasının büyüklük, zemin yapısı, topoğrafya, yağış şiddeti ve süresi, bitki örtüsü, rüzgâr ve tabaka akımı özelliklerine bağlıdır. Yatak malzemesi yükü ise akarsudaki akımın hidrolik koşullarına bağlıdır.

Yatak malzemesini oluşturan taneler devamlı olarak bir yandan yataktan sökülür, bir yandan tekrar yatağa dönerler. Belli bir zaman aralığında yataktan sökülen miktar yatağa dönen miktara eşitse, akarsu yatağında miktar olarak bir değişme olmaz; bu duruma *Dinamik Denge* (rejim) denir.

Yatak malzemesi hareketi yatağın stabilitesini etkiler. Bir akarsu yatağında sökülen malzeme yatağa geri dönen malzemeden fazla ise *Oyulma (degradation)* olur ve yatak yüzeyindeki malzeme irileşir.

Akarsu yatağında sökülen malzeme yatağa geri dönen malzemeden az ise *Yığılma* görülür ve yatak yüzeyindeki malzeme incelir.

Yıkanma malzemesinin taşınımında akarsuyun hidroliği doğrudan etkili olmadığı halde, akarsu debisinin artmasıyla yıkanma malzemesinin yükü yatak malzemesinde olduğu gibi artar. Çünkü havzaya düşen yağış miktarı sadece debiyi değil, havza erozyonunu ve dolayısıyla akarsuya taşınan yıkanma malzemesini de arttırır.

Bir akarsu için yıkanma ve yatak malzemesi yükü toplamını ifade eden Q_T toplam sediment debisi ile akarsuyun Q debisi arasında,

$$Q_T = a.Q^b \qquad (\mathbf{2.2})$$

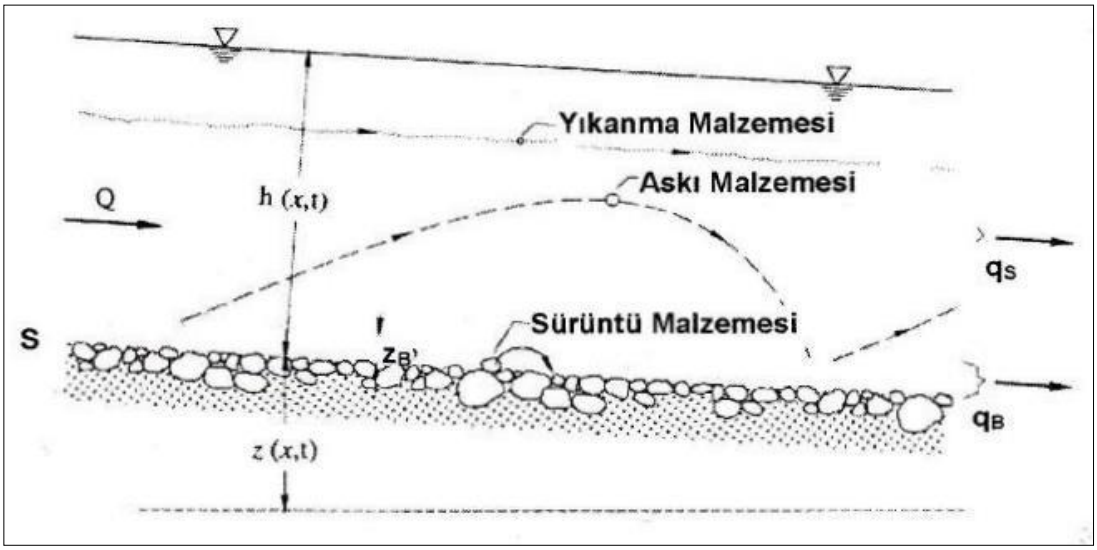
ampirik bir regresyon denklemi kurulabilir. a ve b katsayıları her akarsu için farklılık gösterir.

Birçok akarsuda sediment yükünün %80-95'i yıkanma malzemesidir. Haznelerde çökelen sedimentin büyük bir kısmı da yıkanma malzemesinden oluşur. Barajın ömrü boyunca havzadan gelmesi beklenen sedimenti tutacak ölü hacmin belirlenmesi için yıkanma malzemesi yükünün bilinmesi gereklidir (Bayazıt ve Avcı, 2010).

Yıkanma malzemesi yükünü baraj haznelerinde çökelen sediment hacmine dayanarak tahmin ederken; hazneye giren sedimentin bir kısmının çökelmeyip, dolusavak ve dipsavaktan atılabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

2.5.1 Sediment taşınım mekaniği

Akarsuda hareket sediment taneleri orijinlerine göre yatak ve yıkanma malzemesi olarak sınıflandırıldığı gibi taşınım şekillerine göre de sınıflandırılabilir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10: Sediment tanelerinin akarsularda taşınım şekilleri (Graf, 1998).

Akarsuda yatak kayma gerilmesinin (hız ve debi) artmasıyla birlikte yatakta bazı taneler kısa süreli olarak titremeye başlar. Akımın şiddeti biraz daha artarsa, akıma en çok temas eden taneler yerlerinden sökülürler. Buna *Yatakta Hareketin Başlaması* ya da *Kritik Durum (initiation of motion, incipient motion, treshold motion, critical stage)* adı verilir.

Akımın şiddeti artmaya devam ederse, yataktaki bazı taneler sürüklenerek ya da yuvarlanarak ilerlemeye başlar. Buna *Sürüntü Hareketi (bed load transport)* denir. Sürüntü halindeki taneler yatakla temas halinde oldukları için, ağırlıkları yatak tarafından taşınır ve taneler duraklayarak hareket ettiklerinden, ortalama hızları akıma göre oldukça küçüktür.

Akarsudaki akımın şiddeti arttıkça hareket halindeki tanenin üstündeki basınç düşer. Taneye etki eden kaldırma kuvvetinin tanenin su altındaki ağırlığını dengelemesi sonucu, taneyi etkileyen sürükleme kuvveti ve hareket eden diğer tanelerin çarpmasıyla birlikte tane yataktan kısa bir süre için ayrılır.

Tanenin akım doğrultusundaki hızı akımın o noktadaki hızına eşit olunca, yer çekimi ve suyun direnci nedeniyle tane yatağa geri döner. Bu duruma *Saltasyon (saltation)* denir. Suyun yoğunluğu nispeten büyük olduğu için, su akımında saltasyon hareketi yapan tanelerin sıçrama yükseklikleri, suyun direnci nedeniyle tane çapının ancak birkaç katı olabilir.

Akım koşulları daha da şiddetlenirse, bazı taneler yataktan söküldükten sonra yeterli büyüklükteki türbülans çevrilerinin bulunduğu bölgeye girerek, uzun bir süre su akımı içinde taşınırlar. Bu taşınma şekline *Askı Hareketi (suspension, suspended load transport)* denir.

Yıkanma malzemesi sınıfına giren taneler yatakla ilişkileri olmadığından, sadece askı hareketi yaparken yatak malzemesi sınıfında bulunan bir sediment bazen sürüntü, bazen de askı hareketi yapabilir.

Sürüntü malzemesi hareket enerjisini doğrudan akımın kinetik enerjisinden alırken, askı malzemesi akım içinde asılı olarak hareket edebilmek için gerekli enerjiyi türbülanstan alır.

2.5.2 Sediment taşınım olayında etkin parametreler

Hareketli bir yatak üzerindeki akım ve sediment taşınımını incelerken, akım ve sınır geometrisi büyüklüklerinin yanında sedimentin özelliklerini de göz önünde bulundurmak gerekir. Uniform akım halinde olayı etkileyen başlıca karakteristik değişkenler şunlardır;

Akışkanın özellikleri: Kinematik viskozite υ, özgül kütle ρ.

Katı tanelerin özellikleri: Tane çapı D, tane özgül kütlesi ρ_s (ya da bunların yerine tanenin çapını, özgül kütlesini ve biçimini karakterize eden W çökelme hızı) tane çapı dağılımının standart sapması σ_g.

Akımın özellikleri: Yatak/Taban kayma gerilmesi τ_o, akım derinliği h (ya da kesit şeklinin etkisini kısmen göz önüne almak için, hidrolik yarıçap R). Akımı belirlerken τ_o ile h yerine V ortalama hızı, S enerji çizgisi eğimi de göz önüne alınabilir.

Yer çekimi ivmesi: g (akarsularda akım serbest yüzeyli olduğu için).

Akarsularda kesit genişliği *B*, akım derinliğine oranla çok büyük olduğu için, akarsu kesitinin şevlerden uzakta olan orta kısmında *B*'nin etkisi yoktur. Akım iki boyutlu kabul edilebilir, bazen de akım derinliği yerine hidrolik yarıçap alınabilir.

Bir akarsuda akım ve sediment taşınımı ile ilgili olup, yukarıda sıralanmayan bütün büyüklükler (akarsuyun debisi, sediment yükü, akıma karşı direnç katsayısı) bağımlı değişkenler olup, yukarıda belirtilen bağımsız değişkenlerin fonksiyonları olarak ifade edilirler.

2.5.3 Sediment taşınım olayında boyutsuz değişkenler

D: Katı tane çapı

ρ_s : Katı tane özgül kütlesi

u_*:Yatak kayma gerilmesi hızı $\left[u_* = \sqrt{\tau_o/\rho} = \sqrt{ghS}\right]$

h: Akım derinliği

g: Yer çekimi ivmesi

υ: Akışkanın (suyun) viskozitesi

γ_{s*}: Tanenin su altındaki yoğunluğunun boyutsuz ifadesi $[\gamma_{s*} = (\gamma_{S-}\gamma)/\gamma]$

τ_0: Yatak kayma gerilmesi olmak üzere;

Tane Froude sayısı:

$$F_{r*} = \frac{u_*}{\sqrt{gD\gamma_{s*}}} \qquad (\mathbf{2.3})$$

Sediment hareketi ile ilgili en önemli boyutsuz değişkendir. Bu parametre bir taneyi etkileyen hareket ettirici kuvvetin tanenin su altındaki ağırlığına oranını gösterir.

Tane Froude sayısı büyüdükçe tanenin hareketliliği artar. F_{r*}'ın karesine *Shields Sayısı* (hareketlilik sayısı) denir.

$$\theta = F_{r*}^2 = \frac{u_*^2}{gD\gamma_{s*}} = \frac{\tau_0}{(\gamma_{S-}\gamma)D} \qquad (\mathbf{2.4})$$

Shields sayısı, hareketin başlaması probleminde çok kullanılır.

Tane Reynolds sayısı:

$$R_{e*} = \frac{Du_*}{\upsilon} \qquad (\mathbf{2.5})$$

Tane Reynolds sayısı, tanenin hareketine viskoz kuvvetlerin etkisini gösterir. Türbülanslı akımlarda bile yatak yakınında viskoz etkiler önemli olabilir.

R_{e*} sayısının küçük değerlerinde viskoziteyi de hesaba katmak gerekir.

Relatif tane çapı:

$$\frac{D}{h} \qquad (\mathbf{2.6})$$

Relatif tane çapının etkisi, özellikle yatak malzemesinin tane çapının akım derinliğine göre çok küçük olmadığı hallerde (dağ akarsularında) önem taşır.

Relatif yoğunluk:

$$\frac{\rho_s}{\rho} \qquad (\mathbf{2.7})$$

Relatif yoğunluğunun etkisi genellikle $\gamma_{s*} = (\rho_S/\rho)-1$ şeklinde tane Froude sayısına katılarak, yani tanenin su altındaki ağırlığını göz önüne alarak hesaba katılmış olur. Tek bir tanenin hareketi incelendiğinde $\rho_s/\rho' y$ı ayrıca göz önüne almak gerekir.

Çökelme hızı oranı:

$$\frac{W}{V} \text{ veya } \frac{W}{u_*} \qquad (\mathbf{2.8})$$

Sediment tanesinin özellikleri W çökelme hızı ile ifade edildiğinde, W/V ya da W/u_* boyutsuz parametreleri kullanılabilir; buna askı hareketinin incelenmesinde rastlanır.

Hareketli yatak üzerindeki akım ve sediment taşınım problemlerindeki bütün boyutsuz değişkenler, bahsedilen boyutsuz değişkenlerin fonksiyonu olarak ifade edilir.

2.5.4 Akarsu yatağında sediment hareketinin başlaması

2.5.4.1 Yatakta bulunan sedimente etkiyen kuvvetler

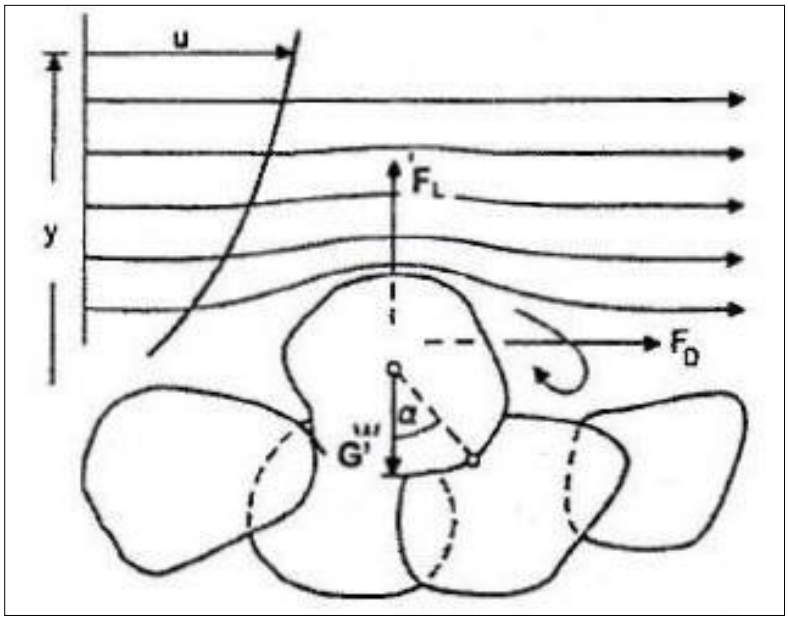
Yoğunlukları suyun yoğunluğundan büyük olan sediment tanelerinden oluşan bir yatak üzerinde yer alan akım sebebiyle, tanelere bazı kuvvetler etkir.

Bu hidrodinamik kuvvetlerin bileşkesinin, taneyi yerinde tutmaya çalışan kuvvetlerin bileşkesine eşit bir değere ulaşması durumuna *Kritik Durum* ya da *Hareketin Başlaması* adı verilir.

Hareketin başladığı koşulların belirlenmesi kararlı kesit hesabında, oyulma ve yığılmanın incelenmesinde ve sediment hareketi açısından önem taşır.

Yatağın akımla temas eden üst yüzeyindeki bir sediment tanesini etkileyen kuvvetler şunlardır (Şekil 2.11):

- Tanenin su altındaki ağırlığı (G')
- Hidrodinamik sürükleme kuvveti (F_D)
- Hidrodinamik kaldırma kuvveti (F_L)
- Taneyle temas halinde olan diğer tanelerin etkilediği reaksiyon kuvvetleri



Şekil 2.11 : Yatak yüzeyindeki bir taneye etkileyen kuvvetler (Bayazıt ve Avcı, 2010).

Yüksek Reynolds sayılarında tane viskoz alt tabakanın dışına çıkar, tane yakınında akım çizgileri yer değiştirir ve tanenin arkasında ayrılma oluşur. Ayrılma bölgesinin büyüklüğü sınır tabakasının ayrılma noktasına bağlı olup tanenin biçimi ve Reynolds sayısı ile ilgilidir.

Ayrılma sonunda tanenin önünde ve arkasında basıncın farklı değerler almasıyla, taneyi akım yönünde hareket ettirmeye çalışan bir kuvvet doğar. Bu kuvvete F_D *Sürükleme Kuvveti* denir.

Yatak yakınında akım laminer ise sürükleme kuvveti sadece viskoziteye bağlıdır. Viskoz alt tabaka taneyi tamamen örterse $(u_* D/\upsilon \leq 5)$ bu durum görülür, tanenin arkasında sınır tabakası ayrılmaz, sürükleme kuvveti tanenin akımla temas eden yüzeyindeki sürtünme kuvvetinden oluşur.

Böylece sürükleme kuvveti, yüzeysel direnç (sürtünme) ve biçim direnci (basınç) ve bileşenlerinden oluşur.

Tanenin altında su neredeyse hareketsiz olduğundan basınç hidrostatiktir. Tanenin üst tarafında akım çizgilerinin eğriliği ve hızın artmasıyla, basınç hidrostatik değerin altına düşer. Tanenin altı ve üstündeki basınç farkından dolayı, taneye yukarı yönelmiş F_L *Kaldırma Kuvveti* etki eder.

Sürükleme ve kaldırma kuvvetleri için şu ifadeler yazılabilir:

$$F_D = C_D \rho \frac{u^2}{2} A \qquad (\mathbf{2.9})$$

$$F_L = C_L \rho \frac{u^2}{2} A \qquad (\mathbf{2.10})$$

C_D: direnç katsayısı
C_L: kaldırma katsayısı
u: tanenin yakınında akım hızı
A: tanenin akıma dik izdüşümünün alanı

Taneyi etkileyen kuvvetlerden ağırlığın akım doğrultusuna dik bileşeni (genellikle akarsu eğimi küçük olduğundan ihmal edilebilir) taneyi yerinde tutmaya, sürükleme-kaldırma kuvvetleri ile ağırlığın akım doğrultusuna paralel bileşeni taneyi harekete geçirmeye çalışır. Düşey doğrultudaki bileşke kuvvetin sıfıra eşit olması ya da bir değme noktasına göre bileşke momentin sıfır olması halinde kritik duruma varılır.

Hareketin başlamasında sürükleme ve kaldırma kuvvetlerinin oynadıkları roller tanenin konumuna bağlıdır. Bazı durumlarda sürükleme, bazı durumlarda kaldırma kuvveti taneyi yerinden sökmek için etkili olur.

Bazı tanelerin yataktan sökülmesiyle yatak yakınındaki akım koşulları değişir, hareket etkisiyle yataktaki bir taneyi yukarıya kaldırmaya çalışan bir kuvvet oluşabilir ve tanelerin arasındaki çarpışmalarla dinamik etkiler ortaya çıkabilir. Farklı büyüklükte, biçimde, yoğunlukta ve konumdaki tanelerden oluşan bir yatak yakınında tanelerin akımla temas şekilleri de başka başkadır.
Akım türbülanslı olduğundan, bir taneyi etkileyen hidrodinamik kuvvetler hız çalkantıları ile sürekli olarak değişir. Bütün bu nedenlerle yatakta hareketin başlaması olayı çok karmaşıktır, kritik durumu kesin olarak belirlemek güçtür (Bayazıt ve Avcı, 2010).

2.5.4.2 Kritik yatak kayma gerilmesi

τ_o yatak kayma gerilmesinin τ_c kritik değeri, yataktaki bir tanenin harekete başladığı akım koşullarını ifade etmek için en çok kullanılan akım değişkenidir.

Yatak yüzeyindeki taneler aynı büyüklükte olsalar bile; biçimleri, konumları ve içsel sürtünme açıları farklı olduğu için hepsi aynı anda harekete geçemeyeceğinden, kritik durumu belirlemek güçtür.

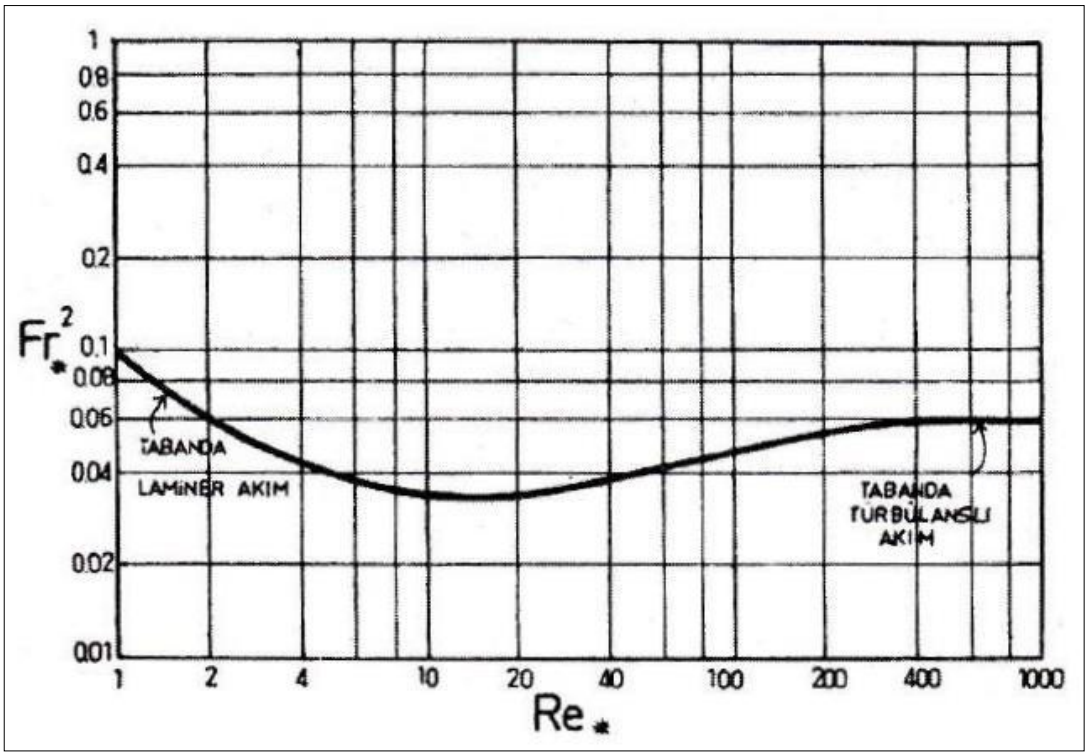
Hareketin başlaması olayındaki değişkenler için boyut analizi yapılırsa kritik durum için şu ifade yazılabilir:

$$\theta_c = {F_{r*}}_c^2 = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)D} = f\left(Re_*, \frac{D}{h}, \frac{\rho_s}{\rho}\right) \qquad (\mathbf{2.11})$$

Shields (1936) tarafından başlatılan ve günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından yürütülen çalışmalar, ρ_s/ρ değişkeninin Fr_*^2 içinde ele alınmasının yeterli olduğunu göstermiştir.

D/h relatif tane çapı ise olay yatak yakınında yer aldığı için, D'nin h akım derinliğine göre küçük olmadığı hallerde (büyük eğimli dağ akarsuları) önem taşır. Bunun için genellikle kritik durum genellikle Fr_*^2 ile Re_* arasındaki bir bağıntı ile belirlenir.

θ Shields parametresinin (tane Froude sayısı) θ_c kritik değeri ile $Re_{*c} = u_{*c}\, D/v$ arasındaki ilişki, Shields ve diğer araştırmacılar tarafından yapılan deneylerle belirlenmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 : Kritik kayma gerilmesini veren Shields Eğrisi (Yatağın alacağı çeşitli şekiller Fr_*^2 - Re_* düzleminde gösterilmiştir.) (Bayazıt ve Avcı, 2010).

Şekil 2.12'deki Shields eğrisinin üstünde kalan bölgede tane hareket halinde, altındaki bölgede ise hareketsizdir. Eğri boyunca kritik durum söz konusudur, yani tanenin hareket etme olasılığı %50'ye eşit olacaktır (Gessler, 1970).

2.5.4.3 Kritik hız

Yataktaki tanelerin harekete geçmesi yatak kayma gerilmesine bağlı olmakla birlikte; pratikte akımın ortalama hızını kullanmak daha kolay olduğundan, çeşitli araştırmacılar V_c kritik hızı için formüller vermişlerdir. Bu formüllerde D tane çapına ek olarak h/D (ya da R/D) oranının da bulunduğu görülür.

Kritik hızın h/D oranına bağlı olmasının nedeni; aynı V ortalama hızında, h derinliği arttıkça yatak yakınında hız azaldığı için derin akımlarda kritik hızın daha büyük olmasıdır.

Araştırmacıların V_c kritik hız için vermiş oldukları formüllerden bazıları şöyledir:

Mavis ve Laushey (1948) kritik hız için h >1m olan akımlarda,

$$V_c = 0.22D^{0.5} \qquad (\mathbf{2.12})$$

formülünü vermişlerdir. Burada V m/s, D ise mm cinsindendir. 0.5 mm'den iri kum taneleri için bu formül kullanılabilir.

Goncharov (1964)'e göre;

$$V_c = \sqrt{\frac{2g\gamma_{s*}D}{\alpha}}\, log\, \frac{8.8h}{D} \qquad (\mathbf{2.13})$$

Türbülans çalkantılarının en büyük değerlerinde bile yatakta hareket olmaması için α=3.5, hızın zamansal ortalama değerinde hareket olmaması için α=1.75 alınacaktır. Yataktaki tanelerin uniform olmaması halinde D_{95} değeri kullanılacaktır.

Levy kritik hız için şu formülleri vermiştir (Chien ve Wan, 1999):

$$V_C = \sqrt{gD}1.4log\frac{12R}{D_{90}} \;\rightarrow\; R/D_{90} > 60$$

$$V_C = \sqrt{gD}\left(1.04 + 0.87log\,\frac{10R}{D_{90}}\right) \;\rightarrow\; R/D_{90} = 10 - 40 \qquad (\mathbf{2.14})$$

Shamov tarafından verilen formül (Chien ve Wan, 1999):

$$V_C = \sqrt{gD}1.47\left(\frac{h}{D}\right)^{1/6} \qquad (\mathbf{2.15})$$

Yang (1973), yataktaki bir taneyi etkileyen kuvvetlerin denge denkleminde bazı katsayıları deney sonuçlarına göre belirleyerek, W çökelme hızını ve u_*D/υ tane Reynolds sayısını içeren formüller vermiştir.

$$V_c/W = \frac{2.5}{log\left(\frac{u_*D}{\upsilon}\right) - 0.06} + 0.66 \rightarrow 1.2 < \frac{u_*D}{\upsilon} < 70$$

$$V_c/W = 2.05 \;\rightarrow\; \frac{u_*D}{\upsilon} \geq 70 \qquad (\mathbf{2.16})$$

Tam türbülanslı bölgede (iri taneler), çeşitli formüllerin sonuçları arasında büyük farklar yoktur. Ancak bu formüller ince taneler (D <0.1 mm) için kullanılmamalıdır (Bridge ve Bennett, 1992, Nelson ve diğ., 1995).

Bu denklemler su derinliğinin büyük olmadığı laboratuvar deneylerine dayandığından, akarsularda iyi sonuç vermeyebilir (Chien ve Wan, 1999). Derin akarsularda V_c daha büyük değerler alabilir.

Yatakta hareketin başlaması V ortalama hızı ile değil yatak yakınındaki akım hızı ile ilişkili olduğu için, kritik hız formüllerine (özellikle h/D'yi içermeyen formüllere) ancak yaklaşık ifadeler olarak bakılabilir.

Yatak yakınındaki türbülans çalkantılarının şiddeti yatak pürüzlülüğüne bağlı olduğundan, yatak yakınındaki akım hızı da hareketin başlamasını belirlemek için τ_o kadar uygun bir parametre değildir (Chien ve Wan, 1999). $\tau_0 = \gamma RS$ yatak kayma gerilmesinin kullanılmasındaki güçlük, S eğiminin ölçülmesinde güvenirliğin az olmasından kaynaklanır.

Fortier ve Scobey'e (1926) göre sulama kanallarında çeşitli malzemelerin harekete geçmemesi için izin verilebilecek kritik hız değerleri Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 : Çeşitli yatak malzemelerin kritik akım hızı değerleri (Chow, 1959).

Yatak malzemesi	Temiz suda V_c (m/s)	Koloidal madde taşıyan suda V_c (m/s)	Koloidal olmayan madde taşıyan suda V_c (m/s)
İnce kum	0.45	0.75	0.45
Siltli lem	0.52	0.75	0.60
Allüviyal silt	0.60	0.90	0.60
Sıkı lem	0.60	1.05	0.60
Lav külü	0.75	1.05	0.68
Sıkı kil	0.75	1.05	1.12
Allüvyal silt, koloidli	1.12	1.50	0.90
İnce çakıl	1.12	1.50	1.50
Lem ve çakıl	0.75	1.50	0.90
Lem ve çakıl, kolloidli	1.20	1.65	1.50
İri çakıl	1.20	1.80	2.00
Kaba çakıl	1.50	1.65	2.00

Suda askı halinde taşınan koloidal malzeme bulunması halinde, daha yüksek hızlara izin verilebileceği görülmektedir. Akım derinliğinin büyük olması halinde de daha büyük hızlara izin verilebilir; kıvrıntılı kanallarda ise kritik hızı azaltmak gerekir.

Ortalama kayma gerilmesine ($-\rho\overline{u'v'}$) pozitif katkısı bulunan çalkantılar sık görülür. Bunlardan $u' > 0$, $v' < 0$ olanlar büyük kaldırma kuvvetleri yarattıklarından sediment hareketinde önemli rol oynarlar (u' ve v', çalkantının x ve y yönündeki hız bileşenleridir.). Yukarı yönelmiş $v' > 0$, $u' < 0$ olan patlamalar *(bursting)* ise daha çok ince tanelerin sökülmesine neden olur. Ortalama kayma gerilmesine negatif katkısı olan çalkantılar çok daha seyrek görülür. Bunlardan yukarı yönelmiş $v' > 0$, $u' > 0$ olanların sediment taşınımına katkısı, aşağı yönelmiş $v' < 0$, $u' < 0$ olanlarınkinden daha fazladır.

Yatakta kum dalgaları (*ripple*s) bulunması halinde τ_o'ın zamansal ortalama değeri kum dalgasının tepesinde en büyük değer alır, burada türbülans şiddeti azdır. Türbülansın büyük olduğu dalganın sırtında ise τ_o küçüktür (Raudkivi, 1990). Kum dalgası boyunca tanelerin harekete geçmesinde hem τ_o'ın ortalama değeri, hem de türbülans çalkantıları rol oynar.

2.5.5 Akarsu yatağında sürüntü hareketi

Yatak yüzeyinin hemen üzerinde (kalınlığı 1 cm mertebesinde olan bir tabakada) yataktan sürekli olarak ayrılmadan kayarak, yuvarlanarak ve küçük sıçramalar yaparak ilerleyen tanelerin debisini (akımın sürüntü maddesi taşıma kapasitesini) hesaplamak için, çok sayıda araştırmacı farklı formüller önermiştir.

Olay karmaşık, iki fazlı (sıvı ve katı) bir hareket problemi olduğu için incelenmesi zordur. Kurulan çeşitli modellerde göz önüne alınan fiziksel büyüklükler hemen hemen aynı olduğu halde, olayın mekanizması için farklı kabuller yapıldığından, sonuçta aynı veya benzer boyutsuz parametreler arasında farklı denklemlere varılır. Denklemlerdeki bazı sabitlerin değerlerinin ölçümlerle belirlenmesi gereklidir. Ölçümler genellikle laboratuvarlarda yapıldığı için, formüllerin akarsulara uygulanmasında başarısızlıklarla karşılaşılabilir.

q_B *birim sürüntü yükü* (kg/s-m*)* akarsuyun birim genişliğinden birim zamanda geçen sürüntü maddesinin (hacmi değil) ağırlığı olarak tanımlanır.

q_B sürüntü yükü aşağıdaki boyutsuz büyüklüklerin bir fonksiyonu olmalıdır:

$$q_B = f\left(F_{r*}, R_{e*}, \frac{D}{h}, \frac{\rho_S}{\rho}\right) \qquad (\mathbf{2.19})$$

Yukarıdaki denklemin sağ tarafındaki büyüklüklerden ilki olan Froude sayısı $F_{r*} = u_*/\sqrt{\gamma_{S*} g D}$ (ya da $\theta = F_{r*}^2$ Shields parametresi) olayı etkileyen en önemli büyüklüktür. Taneyi hareket ettirmeye çalışan kuvvetlerin taneyi yerinde tutmaya çalışan kuvvetlere oranını gösterdiği için tanenin hareketliliğinin bir ölçüsüdür.

Bu parametrenin değerinin artmasıyla sürüntü debisi de artar. Bu parametre sürüntü hareketi için önerilen bütün formüllerde bazen biraz değiştirilmiş bir şekilde olsa da daima bulunur.

R_{e*} tane Reynolds sayısının değeri yeterince büyük olduğu zaman, viskozitenin sürüntü hareketine etkisi ihmal edilebileceği için R_{e*} göz önüne alınmayabilir.

Sürüntü hareketi bütün taneler için toplu bir halde incelendiğinde, ρ_s/ρ relatif yoğunluğunu ayrıca göz önüne almak gerekmez, γ_{s*} şeklinde F_{r*}'a katılması yeterli olur.

Sürüntü hareketi yatak yakınında yer aldığından, h akım derinliğinden doğrudan doğruya etkilenmez. Bu nedenle D/h büyüklüğü, ancak derinliğin tane çapına göre fazla büyük olmadığı sığ akımlarda (dağ akarsularında) önemli olabilir.

Böylece (2.19) denklemi tane Froude sayısı ve tane Reynolds sayısına bağlı bir fonksiyon şekline indirgenmiş olur. Denklemlerdeki fonksiyonun şeklini teorik ve(ya) ampirik olarak belirlemek gerekir.

Sürüntü debisi formülleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Ampirik formüller,

*(*Meyer-Peter ve Müller yöntemi, Shields yöntemi, Rottner yöntemi ve Schoklitsch yöntemi örnek olarak verilebilir.)

- Kısmen fiziksel analize dayanan yarı teorik formüller,

(Bagnold yöntemi ve Yalin yöntemi örnek olarak verilebilir.)

- Olasılık kavramı ile mekanik ilkelere dayanan formüller.

Sürüntü debisi formülleri ayrıca formülde kullanılan akım büyüklüğüne göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Yatak kayma gerilmesine dayanan formüller,
- Akımın gücüne dayanan formüller.

2.5.6 Akarsu yatağında askı hareketi

Yüksek hızlı akımlarda yataktan sökülerek sürüntü hareketi yapmakta olan ince (çökelme hızı küçük) taneler, onları taşıyabilecek büyüklük ve şiddette türbülans çevrilerinin bulunduğu bölgeye girer ve uzun bir süre su ortamı içinde yatağa dönmeden taşınırlar.

Yatağa çökelen tanelerin yerini yataktan ayrılan başka taneler alır. Askı hareketi yapan tanelerin ağırlığını, onları çevreleyen akışkan yatağa iletir. Tanelerin ortalama hızı yukarıya doğru hareket sırasında akımın hızından biraz küçük olduğu için, arada bir fark olmakla birlikte, akımın o noktadaki hızına yakındır. Bu nedenle yüksek hızlı akımlarda askı debisi sürüntü debisinden çok daha büyüktür.

Askı hareketi yapan taneler sudan ağır olduklarından, W çökelme hızıyla aşağıya doğru hareket ederler. Denge halindeki askı hareketi için akımdaki türbülans çalkantıları, taneleri W'ye eşit bir hızla yukarıya doğru hareket ettirmelidir.

Türbülans çevrileri akım doğrultusuna paralel tabakalar arasında akışkan parçacıklarının ve momentumun alışverişine neden olduğu gibi askı halinde taşınan katı tanelerin de alışverişine yol açar.

Askı hareketi hem hidrolik cilalı hem de pürüzlü yataklar üzerindeki akımlarda görülür. Pürüzlü yatak halinde yatak yakınında askı hareketinin başladığı bölgenin kalınlığı daha fazla, taneleri kaldıran türbülans çalkantıları daha şiddetli ve tanelerin yükselme miktarları da daha büyüktür.

Akarsudaki askı maddesinin c konsantrasyonu, birim hacimdeki askı maddesinin hacmi (m^3/m^3) ya da ağırlığı (kg/m^3) olarak gösterilebilir (Bayazıt ve Avcı, 2010).

2.5.6.1 Askı hareketinde konsantrasyon dağılımı

Zamanla değişmeyen, iki boyutlu, uniform, serbest yüzeyli akımda askı hareketini tanımlarken; c askı maddesi konsantrasyonunun y doğrultusunda (düşeyde) değişiminin belirlenmesi gerekir.

Katı taneler sudan ağır olduğundan konsantrasyon yataktan su yüzeyine doğru azalacaktır. Konsantrasyon dağılımını etkileyen değişkenler tane büyüklüğünü, yoğunluğunu ve biçimini temsil eden W çökelme hızı, akımın h derinliği, u_* yatak kayma gerilmesi hızı ve yatak yakınında $y=a$'daki c_a referans konsantrasyonudur.

Buna göre yataktan y uzaklıktaki c konsantrasyonu için,

$$c = f(W, h, u_*, a, c_a, y) \qquad (\mathbf{2.20})$$

yazılabilir. Bu denklem boyutsuz parametrelerle yazılırsa,

$$\frac{c}{c_a} = f\left(\frac{W}{u_*}, \frac{a}{h}, \frac{y}{h}\right) \qquad (\mathbf{2.21})$$

elde edilir.

c/c_a, askı maddesi konsantrasyonu dağılımını elde etmek için *Difüzyon Modeli* ve *Yer çekimi (Enerji) Modeli* kullanılabilir.

2.5.6.2 Askı hareketi yapan tanelerin sınır çapı

Belli akım koşullarında ancak belli bir çaptan daha küçük olan taneler askı hareketi yapabilir. Sürüntü ve askı hareketi ile taşınan taneleri ayırmak için çeşitli ampirik yöntemler ileri sürülmüştür:

- u_* yatak kayma gerilmesi hızını, W tanenin çökelme hızını göstermek üzere

  $0.4 > u_*/W > 0.1$ için tanenin sürüntü hareketi,

  $u_*/W > 0.4\text{-}1$ için tanenin askı hareketi yapacağı söylenebilir (Graf, 1998).

- Raudkivi (1990)'a göre;

  $0.15 < u_*/W < 0.5$ için sürüntü hareketi,

  $0.5 < u_*/W < 1.5$ için saltasyon,

  $u_*/W > 1.2$ için askı hareketi söz konusudur.

- Yalin (1992)'ye göre, askı hareketi $u_* > 3u_{*c}$ olunca başlar.

u_{*c}: kritik duruma karşı gelen yatak kayma gerilmesi hızı.

- Kresser (1964), Avrupa akarsularında sürüntü ve askı hareketi yapan taneleri ayıran D çapı için şu formülü vermiştir:

$$\frac{V^2}{gD} = 360 \qquad (\mathbf{2.22})$$

Burada V akımın ortalama hızı, D tane çapı, g yer çekimi ivmesidir. V=1 m/s için D=0.2 mm'den ve V=4 m/s için D=4.5 mm'den küçük tanelerin askı halinde taşınabileceği sonucuna varılmaktadır.

Yukarıda verilen yaklaşım ve bağıntıların dışında yine birçok araştırmacı tarafından geliştirilen, önerilen yöntem ve ampirik bağıntılar da bulunmaktadır.

2.5.6.3 Askı maddesi debisinin belirlenmesi

Düşey boyunca c/c_a konsantrasyon dağılımı ve c_a belirlendikten sonra $c(y)$ ile $u(y)$ hızının çarpımını düşey boyunca integre ederek, birim genişlik için toplam askı maddesi debisi q_s hesaplanabilir:

$$q_s = \gamma_s \int_a^h c(y)u(y)\,dy \qquad (\mathbf{2.23})$$

Burada askı hareketi yapan tanelerin hızının akımın o noktadaki hızı ile aynı olduğu kabulünün doğru olması için, tane büyüklüğünün çevri çapına göre küçük olması gerekir.

Yatak yakınında çevri çapı yataktan olan uzaklıktan büyük olamaz. Ayrıca hız gradyanı büyük olduğundan tanenin altında ve üstündeki hızlar farklı olur.

Bu bölgede bir tane, ardışık anlarda çevriler tarafından taşınabilir. Bu nedenle yatak yakınında sürüntü hareketinin hâkim olduğu tabaka, askı hareketi hesaplarının dışında bırakılır ve yukarıdaki denklemde integral a'dan h'ye kadar alınır (Bayazıt ve Avcı, 2010).

3. REZERVUARLARIN YAPILIŞ AMAÇLARI, TİP VE ÖZELLİKLERİ

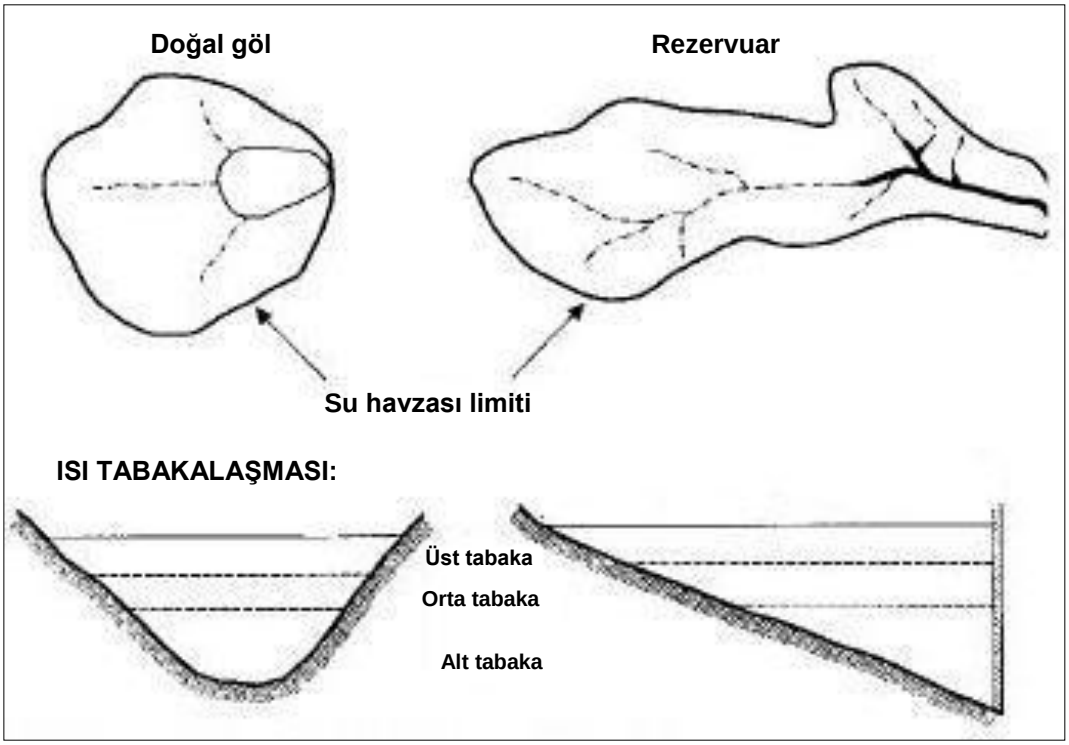
3.1 Rezervuar Kavramı

‘‘Rezervuar; su kaynaklarının depolanması, düzenlenmesi ve kontrolü amacıyla kullanılan doğal veya insanlar tarafından oluşturulmuş su kütlesidir (Hidroloji Sözlüğü).’’ (DSİ, 2011d).

Rezervuar, yüzeysel suların çeşitli amaçlarla kullanımı için toplanan yapay göl olarak tanımlanabilir ve akarsuların veya havzaya düşen yağmur suları ve taşkın gibi düzensiz su akışlarının bir bölgede toplanmasını sağlar. Yağışlı dönemin dışındaki zamanlar için suyun depolanmasını sağlayan rezervuarlar ayrıca, çeşitli kirletici atıkların ve sedimentin tutulması (sediment barajları) için de kullanılabilir.

Rezervuarlar genellikle akarsu vadi koridorunun uygun bir yerinden bent ile kapatılması ile oluşturulur. Bu tipte bir rezervuarın doğal göllerden farkları aşağıda sıralanmıştır (Hrbáček, 1984):

- Genellikle rezervuar tek bir akarsu girişi ile karakterize edilir. Fakat akarsuyun yanı sıra drenaj alanının karakteristik özelliklerinden de fazlaca etkilenir (Şekil 3.1).
- Göllerden çıkan akım daha çok yüzey akımı olmasına karşın, rezervuardan çıkan akım dolusavak veya dipsavak yardımıyla serbest yüzeyli veya basınçlı akım olarak mansaba bırakılır.
- Rezervuara giren debi ve rezervuar hacmi arasındaki oran, göllere nazaran küçüktür.
- Göllere kıyasla rezervuarlardaki biyolojik oluşumlar, akarsu ile taşınan malzemelerden ve akımdaki değişimlerden daha çok etkilenir.
- Ortalama derinlik göz önüne alınırsa, göller rezervuarlara göre daha derindir. Rezervuar genellikle dar akarsu vadisinin kapatılması ile oluştuğu için uzun kıyı hattına sahiptir ve en derin kısmı baraj gövdesine yakın bölgede olur.



Şekil 3.1 : Doğal göl ile rezervuarın karşılaştırılması (Morris ve Fan, 1997).

3.2 Rezervuar Yapılış Amaçları

Bir rezervuar ihtiyaçların karşılanması için rezervuardan sağlanacak faydanın, projenin maliyet ve risklerinden yüksek olması göz önüne alınarak planlanır ve aşağıda sıralanan işlevlerden bir veya birkaçını yerine getirir:

- Enerji üretimi,
- Taşkın kontrolü,
- Sulama, kullanma ve endüstri suyu temini,
- Nehirdeki akımın düzenlenmesi,
- Rekreasyon,
- Balıkçılık.

Rezervuarların işlevlerini sürekli ve verimli olarak yerine getirebilmesi için; havzaya giren ve çıkan akımların sağlıklı bir şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir. Kurak mevsim boyunca rezervuar işletilip, taşkın dönemi için yeterli depolama hacmi ayrılacak şekilde işletme yapılabilirse; rezervuarlarda sulama ve taşkın kontrolü amacı bir arada ele alınabilir.

3.3 Rezervuar Tip ve Özellikleri

Rezervuarlar yerine getirdikleri işlevler ve diğer karakteristikleri göz önüne alınarak birçok tipe ayrılırlar:

- Depolama ve biriktirme rezervuarları (nehrin ana akımı göz önüne alınarak, suyun geçici olarak depolandığı ve değişen su seviyelerine göre işletmenin yapıldığı rezervuarlar),
- Kabartma yapısı ile oluşturulan rezervuarlar,
- Taşkın kontrolü veya taşkın ötelemesi rezervuarları (pik akımda, mansaba bırakılacak olan debi miktarını azaltmak için),
- Mansaba belirli bir debiyi bırakarak akarsu akımını düzenlemek için oluşturulan rezervuarlar,
- Hidroelektrik enerji rezervuarları,
- Yukarı havza rezervuarları (nehrin memba bölgesinde bir kabartma yapısı ile oluşturulan rezervuarlar),
- Su temini rezervuarları (belirli bir bölgeye veya işletmeye; içme, kullanma ve endüstri suyu temini için kullanılan rezervuarlar),
- Doğrudan su temini rezervuarları (su, bir su kemeri veya su yolu ile doğrudan kullanıma yönlendirilir),
- Nehir rezervuarları (yıllık ortalama bir nehir akımına sahip olan rezervuarlar),
- Çökeltim rezervuarları (özel şekilleri olan sığ rezervuarlar, akım hızının aniden düştüğü bölgelerdir),
- Pompa depolaması rezervuarları (belirli bir su kaynağından pompalanan su ile doldurulan rezervuarlar),
- Çok amaçlı rezervuarlar.

Rezervuarlar ayrıca, sediment çökelmesinin etkisi göz önüne alınarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Borland ve Miller, 1958):

- Göl tipi rezervuarlar *(Lake type)*,
- Taşkın yatağı tipi rezervuarlar *(Flood-plain/foot-hill type)*,
- Tepe tipi rezervuarlar *(Hill type)*,
- Vadi tipi rezervuarlar *(Gorge type)*.

3.4 Rezervuarın Çevreye ve Su Niteliklerine Etkileri

Barajların büyüklüğüne göre rezervuarlarının uzunluğu değişkenlik göstermekle birlikte, bu rezervuarların uzunluğu bazen yüzlerce kilometreyi bulabilmektedir. Bazen bir akarsu üzerinde kademeli olarak birkaç baraj yapılabilir. Bu durumda baraj göllerinin oluşturduğu toplam uzunluk daha da büyümektedir.

Örneğin, Aşağı Fırat havzasında arka arkaya oluşan baraj rezervuarlarından (Keban, Karakaya, Atatürk) sadece Keban Barajı'nın göl uzunluğu 125 km, en yüksek su seviyesinde baraj gölü alanı 70 bin hektar ve baraj eksen yerinde su derinliği yaklaşık 150 m'yi bulmaktadır.

Rezervuarın çevreye etkileri:

Yan yana veya arka arkaya, irili ufaklı birçok gölün ortaya çıkmasının canlılara, meteorolojiye ve coğrafyaya birtakım etkileri bulunmaktadır.

Bu etkiler aşağıdaki gruplara ayrılabilir (Ağıralioğlu, 2004):

- Rezervuarda Sedimentin yığılması (Bu barajın ekonomik ömrüne olumsuz etki eder. Rezervuarın yukarısında bulunan düzlüklerde sediment arazilerin verimini arttırabilir. Ancak bu yığılmalar taşkın suyu seviyelerinin yükseltip, daha çok tarım alanının sular altında kalmasına sebep olabilir. Baraj gölünde oluşacak delta, balıkçılık ve gemicilik açısından istenmez.),
- Tarıma açık, verimli arazilerin su altında kalması,
- Su ve kara hayvanlarının beslenme alanları ve yuvalarının su altında kalması,
- Arkeolojik ve tarihi yerlerin su altında kalması,
- Maden yatakları girişinin su altında kalması,
- Şelale, pınar, jeotermal fışkırma, mağara vb. yapıların su altında kalması,
- Akarsu rejimi ve taşkın debilerinin değişmesi,
- Rezervuarlar bölgenin iklimine ve bitki örtüsüne etkisi.

Rezervuarın su niteliklerine etkileri:

Su niteliği kriteleri üç gruba ayrılır (Ağıralioğlu, 2004):

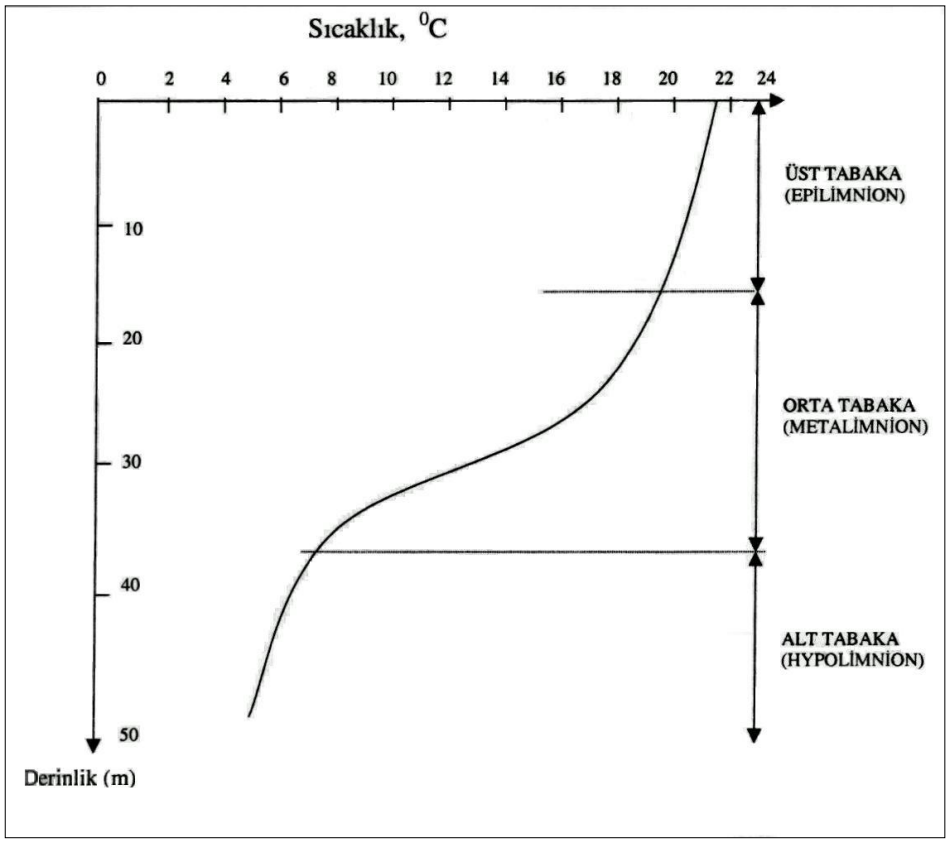
- Askıda sediment taneleri,
- Çözünmüş iyonlar,
- Gazlar (oksijen, azot, karbon dioksit, kükürt dioksit vb.).

Bahsedilen kriterler suya toprak ve kayalardan, atmosferden, organik maddelerin ayrışmasından veya insan faaliyetlerinden karışmış olabilir.

Serbestçe akan bir akarsuda suyun hızı fazla ve derinliği az olduğu halde aynı yerde bir baraj haznesi (rezervuar) oluşturulunca suyun hızı oldukça düşmekte, hemen hemen durgun hale gelmekte ve derin bir su tabakası oluşturmaktadır. Bundan başka, bir baraj gölünde belli bir su kütlesi uzun bir süre kalabilmektedir. Kısaca doğal bir akarsuyun bir kısmının baraj gölüne dönüşmesi, önemli değişikliklere yol açmaktadır. Bunların sonucu olarak başta oksijen dengesi olmak üzere suyun fiziksel, kimyasal ve biyolojik birçok özelliği değişebilmektedir.

Biriktirmenin su niteliği üzerindeki bazı etkileri aşağıda sıralanmıştır.

Sıcaklık: Rezervuarların üst kısmı, güneş ve rüzgâr etkisi ile hava şartlarına bağlı olarak ısınıp soğuyabilir. Genellikle sıcak olan üst tabakalarda su hafiftir ve devamlı üstte kalır. Suyun en yoğun olduğu sıcaklık 4 ^{o}C olduğundan derin baraj göllerinde, özellikle sıcak aylarda *ısı tabakalaşması* meydana gelir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : Sıcak aylarda, bir göldeki sıcaklığın derinlikle değişimi (Ağıralioğlu, 2004).

Şekil 3.2'de ılıman iklim bölgelerindeki göller için sıcak aylara ait tipik bir sıcaklık ve derinlik değişimi şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere, ısı tabakalaşması 3 gruba ayrılır. Bunlar *Üst Tabaka (Epilimnion), Orta Tabaka (Metalimnion* veya *Termoklion), Alt Tabaka (Hypolimnion)* olarak adlandırılır.

Örneğin, Keban Barajı'nda göl yüzeyindeki su sıcaklıkları temmuz ve ağustos aylarında 25-26 ^{o}C'ye çıkmaktadır. Dipteki su sıcaklığı ise 5-10 ^{o}C arasında değişmekte ve hiçbir zaman 10 ^{o}C'nin üstüne çıkmamaktadır. Kış aylarında bir ısı tabakalaşması oluşmamasına rağmen, yaz aylarında açıkça bir ısı tabakalaşması görülmektedir.

Barajlardan boşaltılan sular, normal akarsu sıcaklığına göre daha sıcak veya daha soğuk olabilir. Genellikle baraj çıkışları belli bir derinlikte olduğu için çıkan suyun sıcaklığı, akarsu sıcaklığından daha soğuk olur. Bu problem çeşitli seviyelerde boşaltma yapabilen çıkış yapıları yapılarak çözülebilir. Bu sistemle su mansaba verilirse, ısı tabakalaşmasından dolayı mansap bölgesi su kalitesi bozulmamış olur.

Bulanıklık: Normal bir akarsuda su az gelince temiz, çok gelince türbülans etkisiyle bulanık olur. Su rezervuarda depolanınca, askıdaki sediment tabana çökelir. Bununla birlikte, malzeme ne kadar ince olursa çökelme o kadar yavaş olur. Buna uymayan durumlar da vardır. Büyük taşkınlar sırasında su çok bulanık geldiğinden ve içindeki sedimentin çökelmesi uzun zaman aldığından, mansaba bırakılan su bulanık özellik taşır.

Yoğunluk akımları: Rezervuarlarda ayrıca yoğunluk akımları oluşur. Baraj gölündeki akım hızlı ve uniform değildir. Tabandaki su soğuk olduğu için yoğunluğu daha fazladır ve içinde daha çok askıda sediment vardır. Bu tabandaki su, sınır şartlarına göre göl boyunca akar ve çıkışa gelir. Daha sıcak ve daha az bulanık olan baraj gölünün öteki kısımlarındaki sular durgun halde kalır. Bulanıklığı önlemek için farklı seviyelerde boşaltma yapabilen çıkış yapıları kullanmak gerekir.

4. REZERVUARLARIN PLANLAMA VE TASARIM ESASLARI

Rezervuarlar, suyu biriktirerek ve su seviyesini yükselterek, barajın işlevini yerine getiren en önemli bölümüdür.

Akım bir rezervuara nehrin ana kolundan ve yan derelerden girer. Bunun yanı sıra rezervuarın çevresindeki eğimli arazi ve kıyılardan da yüzey akımı şeklinde rezervuara giriş olur. Bir rezervuar ayrıca atık sular, göl yüzeyine düşen yağış veya rezervuara pompalanan su ile beslenebilir. Rezervuarlardaki su hacmi ise suyun çeşitli şekillerde mansaba bırakılması, buharlaşma ve sızma kayıpları ile azalır.

4.1 Rezervuar Yükseklik-Hacim Bağıntısı

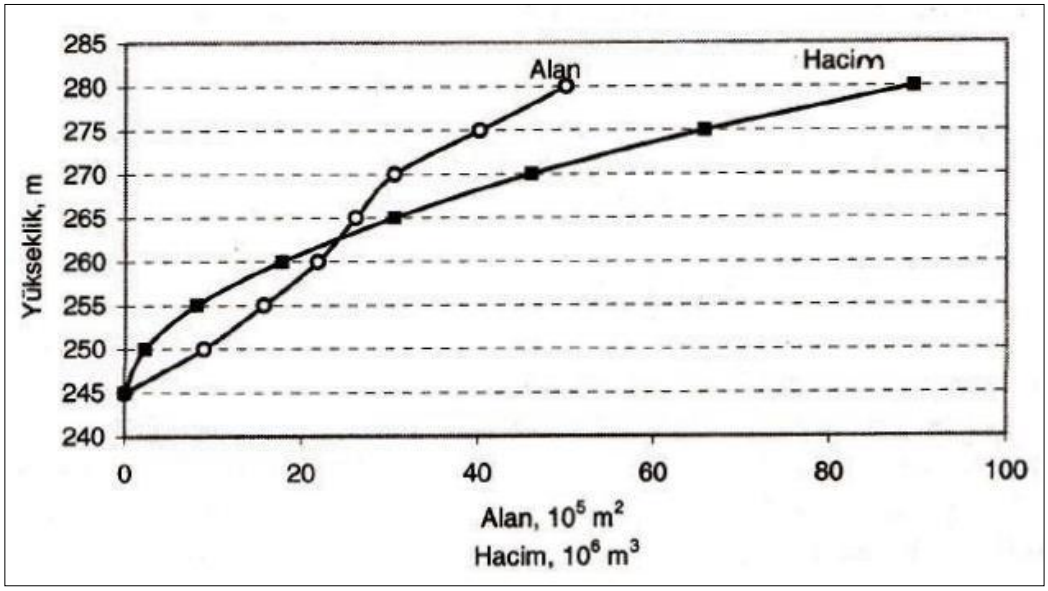
Rezervuarların gerek planlama ve tasarım aşamasında gerekse işletmesinde, baraj yüksekliği (h_b) ile hazne hacmi arasındaki bağıntı önemlidir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 : Sakarya Nehri üzerindeki Yenice Barajı için yükseklik-alan ve yükseklik-hacim değerleri (Ağıralioğlu, 2004).

Yükseklik h_b (m)	Alan A_b (10^5 m^2)	Hacim V_r (10^6 m^3)
245	0.00	0.00
250	8.90	2.25
255	15.70	8.05
260	21.80	17.75
265	26.10	30.50
270	30.50	46.00
275	40.20	65.70
280	50.00	89.50

Rezervuarlar düzgün geometriye sahip olmadıklarından, hacimleri bulundukları yerin eş yükselti eğrili haritaları yardımıyla bulunur. Baraj ekseni ile her bir eş yükselti arasında kalan alan haritadan planimetre ile ölçülür. Yatay eksende alan, düşey eksende baraj yeri tabanından yükseklik olmak üzere, *yükseklik-alan eğrisi* (h_b-A_b) bulunur. Bu eğri ile düşey eksen (h_b) arasındaki alan göl hacmini ifade eder.

Her bir yükseklik için bulunan hacimler kullanılarak *yükseklik-hacim eğrisi* (h_b -V_r) elde edilir. Yükseklik-alan ve yükseklik-hacim eğrileri aynı grafik üzerinde gösterilebilir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 : Yenice Barajı için yükseklik-alan ve yükseklik-hacim eğrileri (Ağıralioğlu, 2004).

4.2 Baraj Rezervuarının Bölümleri

Bir rezervuarda çeşitli su seviyeleri tanımlanabilir (Şekil 4.2).

Normal su seviyesi: Kapaksız dolusavak tepe kotuna karşı gelen bu seviyeye, *dolu hazne seviyesi* ya da *normal su seviyesi* denir. Kapaklı dolusavaklarda ise kapak durumuna göre proje seviyesi olarak belirlenir.

Maksimum su seviyesi: Taşkın sırasında su seviyesi dolusavak hacmi üzerine çıkar. Bu proje seviyesine, *maksimum su seviyesi* denir.

Minimum işletme seviyesi: Su alma ağzının en düşük kotta çalışabildiği seviyeye *minimum işletme seviyesi* denir.

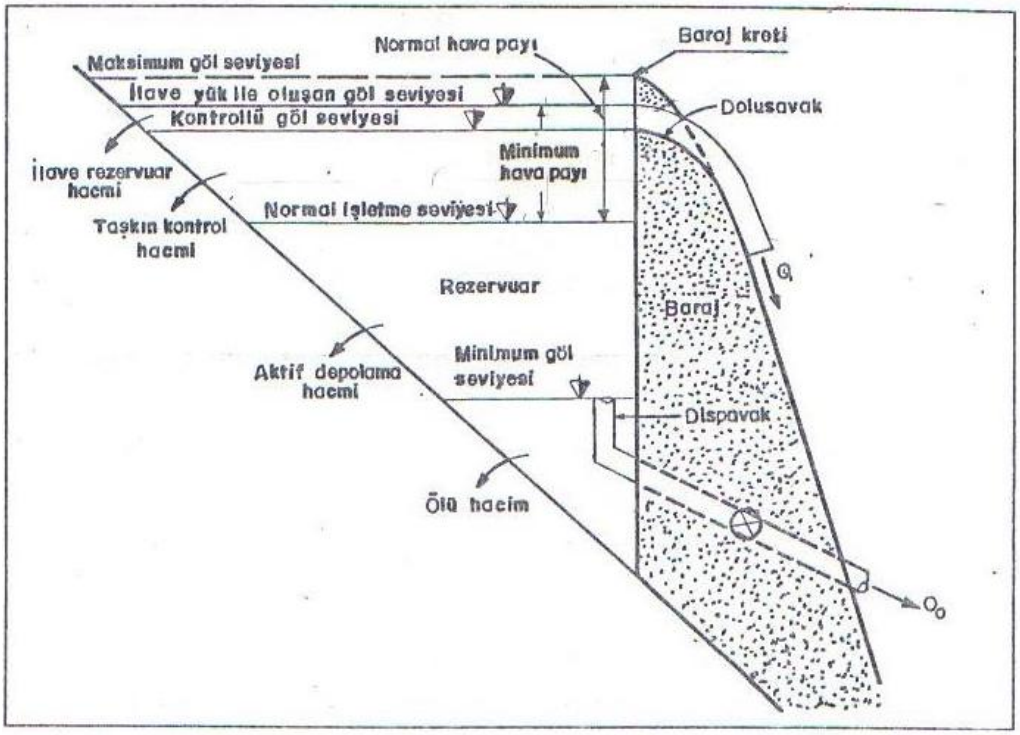
Rezervuardaki bu seviyelere bağlı olarak bir barajın membasında oluşan toplam hazne hacmi çeşitli bölümlere ayrılır.

Ölü hacim: Akarsu tabanı ile en düşük dipsavak tabanı arasında kalan ve yer çekimi etkisi ile hiçbir zaman boşaltılamayan hacimdir.

Canlı hacim: Normal su seviyesi altındaki hacimden ölü hacim çıkarılınca kalan hacimdir. Bu hacim, faydalı hacim ile kullanılmayan hacmin toplamıdır.

Aktif (faydalı) hacim: Taşkın kontrolü dışında kalan ve biriktirme amacı ile kullanılabilen hacimdir. Minimum işletme seviyesi ile taşkın kontrol hacmi arasındaki hacimdir.

Aktif olmayan (kullanılmayan) hacim: Faydalı hacmin alt kısmında oluşan ve kullanılmayan hacimdir.



Şekil 4.2 : Çok amaçlı bir rezervuarda depolama bölümleri (Yıldız ve Kaş, 2004).

Rezervuarların yamaçlarındaki toprak genellikle geçirimlidir. Bir rezervuar dolu iken su yamaçlardaki toprağın içine sızar. Su seviyesi alçalınca da daha önce toprağın boşluklarına giren su rezervuara doğru akar. Yamaçlarda biriken bu su miktarına *Yamaç Hacmi* denir. Bu hacim topraktaki jeolojik boşluklara bağlı olarak haznenin kapasitesini arttırır. Yükseklik-hacim eğrileri yamaç hacmini kapsamaz.

Baraj yapılmadan önce, akarsu yatağındaki suyun akışı sırasında suyun oluşturduğu bir *Vadi Hacmi* vardır. Baraj yapımından sonra ortaya çıkan net hacim artışı, toplam hacim ile vadi hacminin farkı alınarak bulunur. Bu durum biriktirme haznelerinde çok önemli değilse de taşkın öteleme söz konusuysa; etkili hacim, faydalı hacim ile taşkın kontrol hacmi toplamından vadi hacmi çıkarılarak bulunur.

Rezervuar zamanla sediment yığılmalarından etkilendiğinden, rezervuarın başlangıçtaki hacim eğrisi zamanla değişecektir. İşletme hesaplarında buna dikkate almak gerekir (Ağıralioğlu, 2004).

4.3 Rezervuar Ölü Hacminin Belirlenmesi

Bütün akarsularda az veya çok askı ve sürüntü maddesi şeklinde sediment taşınır. Taşınan maddelerin bir kısmı baraj gölünde yığılarak, baraj haznesinin giderek azalmasına sebep olur. Planlama ve tasarım sırasında baraj haznesinde, onun ekonomik ömrü içinde yığılabilecek sediment miktarının oluşturacağı bir ölü hacim belirlenir.

Bu ölü hacmin belirlenmesi için taşınan ve yığılan katı maddelerin özgül ağırlığı, haznenin bulunduğu akarsu kesitine gelen sediment miktarı, haznenin tuzaklama oranı ve haznenin ekonomik ömrü bilinmesi gerekir.

Haznede yığılan sediment hacmi V_k;

$$V_k = \alpha G A_h t \qquad (\mathbf{4.1})$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada α tuzaklama oranı (haznede tutulan sediment miktarının, hazneye gelen sediment miktarına oranı), G bir yılda 1 km^2 havzadan gelecek sediment miktarı (m^3/km^2/yıl, sediment verimi), A_h havza alanı (km^2), t yıl olarak geçen süredir.

Genellikle G sediment verimi ton/km^2/yıl cinsinden verilir. Bu değer havzadan havzaya, 20-1400 ton/km^2/yıl arasında değişir. Türkiye'de en yüksek sediment oranı Yeşilırmak üzerindeki Kelkit Çayı'nda 692 ton/km^2/yıl olarak belirlenmiştir. En düşük değerli akarsular ise Sakarya'nın yukarı kesimi, Meriç, Tunca ve Ergene ile Asi nehirleridir ve bunlarda sediment oranı 20-35 ton/km^2/yıl arasındadır.

G'nin birimini hacme yani m^3/km^2/yıl'a çevirmek için haznede yığılan sedimentin ortalama özgül ağırlığını bilmek gerekir. G değeri ölçümlerle veya diğer yöntemlerle belirlenmemişse,

$$G = 1421\ {A_h}^{-0.229} \qquad (\mathbf{4.2})$$

bağıntısından yaklaşık olarak bulunabilir. Burada G, m^3/km^2/yıl cinsinden sediment oranı, A_h ise km^2 biriminde havza alanıdır.

5. SEDİMENT TAŞINIMI VE BİRİKİMİ OLAYLARININ REZERVUAR HACMİ VE EKONOMİK ÖMRÜNÜN BELİRLENMESİNDE ÖNEMİ

5.1 Rezervuara Taşınan Sediment Miktarının Belirlenmesi

Bir yılda birim havza alanından belli bir kontrol noktasına ulaşan sediment miktarına *sediment verimi* denir.

Bir akarsu havzasının sediment verimini belirleyen etkenler:

- Yağışın şiddeti ve miktarı,
- Zemini türü ve jeolojik yapısı,
- Zeminin bitki örtüsü,
- Arazinin kullanılış şekli,
- Topoğrafya,
- Havza drenaj sistemlerinin özellikleri,
- Akış,
- Sediment özellikleri,
- Yatağın hidrolik özellikleri

ve bunların birbirleriyle karşılıklı etkileri olabilmektedir.

Havzalardan aşınan ve rezervuara giren sediment miktarı aşağıda gösterilen yöntemlerle belirlenebilir;

Sediment anahtar eğrisi - debi süreklilik eğrisi yöntemi: Su debisi ile sediment miktarı arasında ortalama bir bağıntı kurmak için, aynı anda ölçülmüş hem su debisi hem de sediment değerlerine ihtiyaç vardır. Aynı kesite ait bu değerlerde su debileri yatayda, sediment debileri düşeyde olmak üzere sediment anahtar eğrisi çizilir. Sonra bir istasyon için hazırlanmış debi süreklilik eğrileri yardımıyla, akarsuyun o kesitteki sediment süreklilik eğrileri bulunur. Bu eğri yardımıyla yıllık ortalama sediment miktarı belirlenir.

Sediment yığılmalarını ölçme yöntemi: Bu yöntem rezervuarda yığılan sediment hacminin ölçülmesi ile yapılır.

Bu yöntemde ölçülen hacimler ağırlığa çevrilir ve rezervuarın sediment tutma oranı göz önüne alınarak değerler düzeltilir. Sonra barajın işletmeye açıldığı yıla göre veya çalışma yapılan yıl aralıklarına göre belirlenen sediment miktarı bulunur.

Sediment verimi yöntemi: Bu yöntemde havzadan gelen sediment veriminin havzadaki toplam alanına oranı kullanılır. Bu oran ölçme çalışmalarında bulunan sediment verimleri ile belirlenir veya havza karşılaştırmalı olarak askı maddesi ölçme istasyonlarındaki ölçümlerden faydalanılır. Havzanın üst tarafındaki erozyon miktarları erozyon tahmin bağıntıları ile hesaplanır. Ayrıca küçük dereciklerde, hendeklerde ve akarsu yatağındaki erozyonlar çeşitli şekillerle hesaplanır.

Türkiye'de en çok kullanılan bu yöntemdir. Örneğin, Amasya ili sınırları içinde yapılan Sarayözü Barajı için yaklaşık 200 m^3/km^2/yıl sediment verimi esas alınmıştır.

Sediment formülleri: Bu yöntemde sediment miktarını hesaplamak için bir takım bağıntılar kullanılır. En çok kullanılanlar Einstein sürüntü maddesi bağıntısı, Toffaleti işlemi, Meyer-Peter ve Müller, Schoklitsch, Ackers ve White, Engelung ile Hansen'dir.

Baraj yeri için tahmin: Bu yöntemde havzadaki bazı incelemeler esas alınarak diğer bölge sediment miktarları ile karşılaştırılırlar.

5.2 Rezervuarda Biriken Sediment Miktarının Belirlenmesi

5.2.1 Biriken sediment miktarının belirlenme amacı

Bir rezervuarda birikecek olan sedimenti hesaplama yöntemi, bu miktarın belirlenme amacına göre değişiklik gösterebilir. Biriken sediment miktarının belirlenme amaçları şöyle sıralanabilir (Yıldız ve Kaş, 2007):

Planlama aşaması: Planlama aşamasında rezervuarın faydalı ömrünü tahmin etme çalışması, planlanan su yapısının ekonomik faydası açısından önemli olup, rezervuara girecek olan ortalama sediment miktarı ve bu miktarın rezervuarda çökelmesi beklenen bölümünü belirlemeye yönelikte bir çalışmadır. Sediment birikiminin rezervuardaki artışı ve dağılımına yönelik çalışmalar da planlamanın ilk aşamalarında gerekli olabilir.

Bazı durumlarda, planlanan su yapısının maliyet çalışması; rezervuara girecek olan sedimentin azaltılması için su havzası içerisinde yapılması gereken çalışmalar ve alınması gereken önlemleri de içerebilir.

Rezervuarda beklenen sediment birikiminin ön tahmini, alınması gereken önlemler ve yapılması gereken işletme çalışmalarının planlanmasına yardımcı olur. Bazı özel durumlarda barajın memba ve mansabındaki sediment birikimi proje ekonomisini ortadan kaldırabilmektedir. Bu nedenle bu etkiler önceden belirlenerek alınacak önlemlerin proje maliyeti içerisine dahil edilmesi gerekir.

Rezervuarlardaki sediment birikiminin yoğunluğu, belirli ölçülerde rezervuarın işletmesiyle de bağlantılıdır. Bu nedenle rezervuar işletmesi ile ilgili bir ön çalışma, planlama aşamasında sediment birikimi için yapılacak olan çalışmaların içerisinde yer almalıdır.

Proje aşaması: Proje aşamasında rezervuardaki sediment birikimini belirleme amaçları çok çeşitlidir. Öncelikle baraj ve yardımcı yapıları rezervuardaki sediment birikiminin etkileri göz önüne alınarak projelendirilmeli; dolusavak, dipsavak ve su alma yapılarının konum ve boyutları ona göre seçilmelidir.

Rezervuarlardaki sediment çökelmesini ve sedimentin kontrol edilmesi tekniklerini etkileyen rezervuar işletme kuralları, depolamanın amacı (içme suyu temini, hidroelektrik, sulama, taşkın kontrol) ve kullanıcıların ihtiyaçlarına göre belirlenir.

Bu aşamada daha detaylı hesaplara ihtiyaç duyulur. Rezervuarın hidrolik, matematik modellenmesi ve rezervuar boyunca sediment çökelme hesapları bu çalışmalardan bazılarıdır. Modele giriş verileri sağlamak için oldukça detaylı arazi gözlem ve incelemelerine ihtiyaç duyulur. Arazi ölçümleri ile elde edilen veriler daha önce hesapla bulunan değerlerle karşılaştırılarak sonuçlar analiz edilir.

Birçok durumda işletme kuralları sediment birikimi de göz önüne alınarak tespit edilir. Bu da projelendirmenin önemli bir boyutunu oluşturur. Rezervuarlardaki sediment birikiminin memba ve mansaptaki ikincil etkileri de projelendirme aşamasında analiz edilmelidir.

İşletme aşaması: İşletme aşamasındaki sediment çalışmaları birçok amaca yönelik olarak yapılabilir. Öncelikle projelendirme aşamasında yapılan sediment birikim hesapları, ölçüm ve gözlemlerden elde edilecek değerlerle karşılaştırılmalıdır.

Rezervuara çökelen sedimentin kontrol edilmesi için biriken sedimentin yıkanması ve yoğunluk akımlarının boşaltılması vb. gibi yöntemler uygulanır ya da barajdaki yardımcı yapıların (dipsavak, boşaltım kapakları) boyut veya sayılarının arttırılması, yeniden inşaatı, baraj havzasında sedimenti kontrol edecek ilave yapıların yapılması vb gibi önlemler de alınabilir.

5.2.2 Biriken sediment miktarını belirlemede kullanılan yöntemler

Baraj rezervuarında birikecek olan sedimentin hesabı, baraj planlamasında göz önüne alınan ölü hacmin belirlenmesi ile doğrudan ilgilidir. Baraj planlamasında, baraj yapısı ile ilgili boyutlandırmalar rezervuar hacmine göre yapılmaktadır.

Rezervuar toplam hacmi aktif ve ölü hacmin toplamından oluşmaktadır. Ölü hacim, üzerinde baraj inşa edilen akarsuyun sediment taşıma kapasitesine (akarsuyun sediment verimine) bağlı olarak akarsuyun baraj ömrü boyunca taşıyacağı düşünülen sediment hacmi olarak alınır. Bu sediment hacmi çeşitli yöntemler kullanılarak belirlenir (Yıldız ve Kaş, 2007).

Amprik yaklaşımlar: Üzerine baraj inşa edilen akarsu havzasının karakteristikleri kullanılarak elde edilen ampirik bağıntı ve grafikler yardımı ile ölü hacim (barajın ekonomik ömrü boyunca birikecek sediment miktarı) belirlenebilir.

Sediment bağıntıları: Akarsuyun ve akarsudaki akımın karakteristiklerinden yararlanarak, akarsuyun belli bir sürede taşıyacağı sediment miktarı belirlenebilir. Bu bağıntılarda akarsuyun geometrik ve akımın kinematik karakteristikleri ile taşınan sedimentin granülometrik yapısı kullanılır. Bu bağıntıların en çok kullanılanları Einstein, değiştirilmiş Einstein, Laursen, Colby, Goncharov, Egiazaroff ve Bagnold'dur.

Yerinde yapılan ölçümler: Belirli zaman aralıklarında yerinde yapılacak ölçümler ile rezervuarda biriken sediment miktarı belirlenebilir. Yerinde yapılan ölçümler daha çok, baraj yapısı inşa edildikten sonra rezervuarda sediment birikme hızının belirlenmesinde kullanılır. Çeşitli zamanlarda yapılan ölçümler ile elde edilen derinlik (*batimetrik*) haritaları karşılaştırılarak biriken sediment miktarı bulunabilir.

Stokastik yaklaşımlar: Akarsu üzerinde akım ve sediment ölçümü yapılan bir hidrometri istasyonuna ait uzun süreli gözlemler mevcut ise stokastik yaklaşımlar ile ölü hacim belirlenebilir.

Akarsu üzerindeki hidrometri istasyonunun sediment verilerinin sentetik üretimi veya bu verilerin uzun sürelere (örneğin 50 veya 100 yıla) uzatılması ile elde edilecek değerler, ölü hacmin belirlenmesinde kullanılabilir. Bu veriler kullanılarak akarsuyun (baraj yerinin) sediment anahtar eğrisi de çıkartılabilir.

Uzaktan algılama yöntemleri: Jeodezi ve fotogrametri mühendisliğinin uzmanlık alanına giren uzaktan algılama teknolojisi, uydulardan alınan görüntülerin işlenmesi esasına dayalı bir teknik olup, bu yöntem ile rezervuarda biriken sedimentin belirlenmesi mümkündür.

Rezervuarlara birikecek sedimentin hesabı için uygulamada daha çok aşağıda verilen yöntemler kullanılmaktadır:

- Tuzaklama verimliliği yöntemi *(trap efficiency method),*
- Alan arttırma yöntemi *(area increment method),*
- Ampirik alan-azaltma yöntemi *(emprical area reduction method),*
- Sediment birikimi kotu yöntemi *(elevation of sediment accumulation method)*
- Çeşitli amprik yöntemler.

Yukarıda sayılan bütün bu yöntemler birbirlerine benzemesine rağmen farklı karakteristiklere sahip rezervuarlar için farklı sonuçlar vermektedir.

5.2.2.1 Rezervuarların sediment tutma (tuzaklama) verimliliği

Rezervuara giren sedimentin hepsi rezervuarda kalmaz. Bir kısmı su ile birlikte barajdan çıkar. Bir haznede tutulan sediment miktarının hazneye gelen sediment miktarına oranına *Tuzaklama Oranı* (tutulma oranı) denir. Bu oran esas olarak sedimentin çökelme hızına, hazneden geçen su debisine bağlıdır.

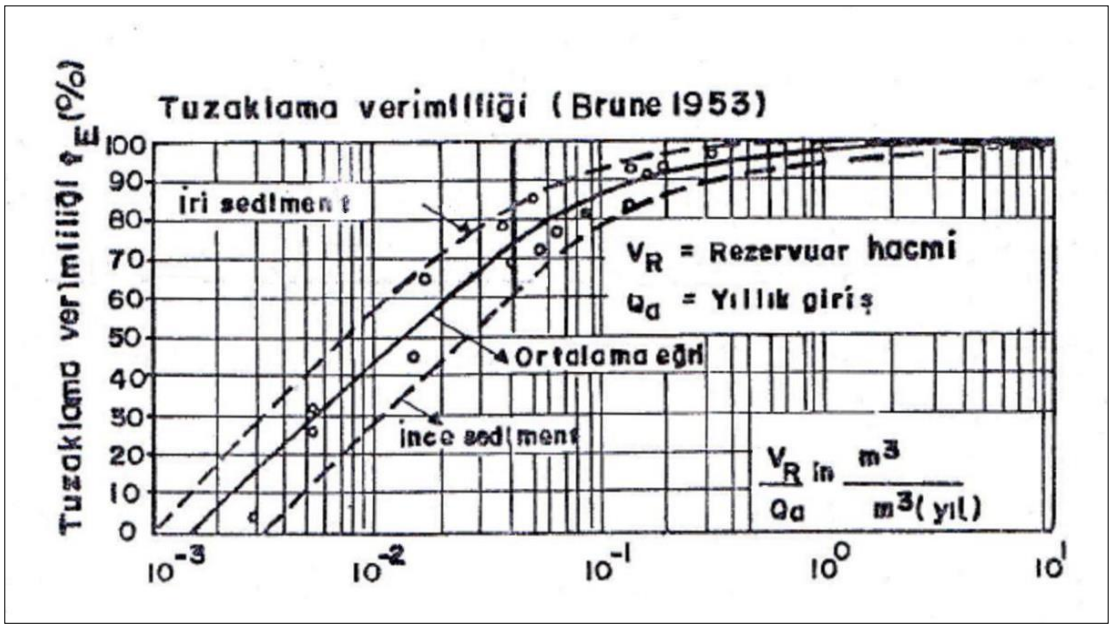
Sediment tanelerinin çökelme hızı ise sedimentin şekli ve büyüklüğü, suyun viskozitesi ve suyun kimyasal birleşimi ile değişir. Ayrıca rezervuarın büyüklüğü ve şekli, çıkış yapılarının türü ve hazne işletme şekli tuzaklama oranına etki eder.

Pratikte, 10 milyon m^3'ten büyük haznelerin gelen sedimentin hepsini tuttuğu ve tuzaklama oranının %100 olduğu kabul edilir. Küçük ve boş haznelerde, bazen sedimentin hepsi su ile çıkar. Bu durum büyük taşkınlarda hazne içinde hızlı bir akım olduğu zamanda da meydana gelebilir. Özellikle kil ve silt gibi askı malzemeleri barajdan (dolusavak ve dipsavaktan) akıp gidebilir.

Hazne tuzaklama oranı bilinirse haznelerde ayrılacak ölü hacim hesaplanabilir.

İşletme açısından uygun zamanlarda dipsavaktan boşaltım yapılarak tuzaklama oranı düşürülür ve haznede kalan yığılma miktarının azalması sağlanır.

Tuzaklama oranının hesabı için birçok ampirik yöntem geliştirilmiştir. Bunların bazıları *Churchill Yöntemi*, *Brune Yöntemi* ve *Brown Yöntemi* olarak sıralanabilir.

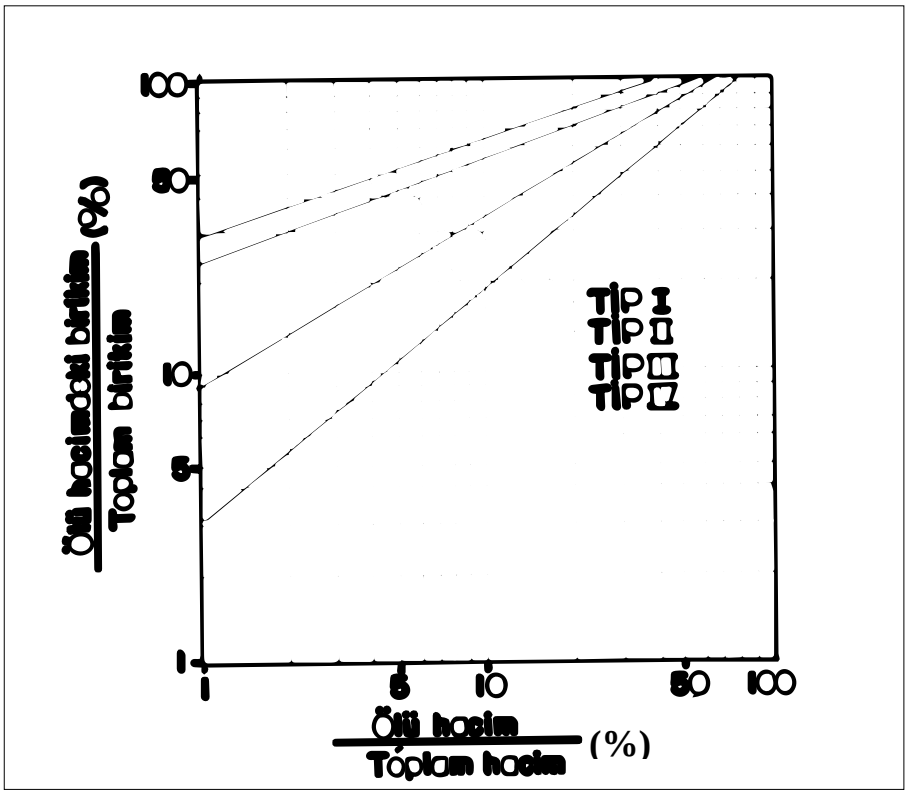


Şekil 5.1 : Brune tarafından geliştirilen tuzaklama verimliliği eğrisi (Borland, 1971).

Brune tarafından geliştirilen eğriden de görülebileceği gibi (Şekil 5.1), rezervuar hacmi/giren akım oranının 0.1'den büyük değerleri için tuzaklama verimliliği %70 ve %100'e ulaşmaktadır. Yukarıda açıklanan bu durum birçok rezervuarda doğrulanmıştır. Bu durum çok büyük rezervuarların, rezervuara giren bütün sedimenti tuttuğunu göstermektedir. Bu değerlendirme büyük rezervuarların planlama aşaması için önemli olup, çökelen sedimentin rezervuar içerisindeki dağılımı ile ilgili daha hassas hesaplar projelendirmenin diğer aşamalarında yapılabilir.

Rezervuar hacmi/giriş akımı oranının küçük değerleri için Brune tarafından önerilen yöntemin güvenilir olmadığı, bazı araştırmacılar tarafından kabul edilmektedir. Bunun nedeni küçük rezervuarlardaki hidrolik koşulların topoğrafyaya, hidrolojiye ve sedimentin özelliklerine bağlı olarak değişmesidir.

Şekil 5.2 ABD'de bulunan 51 adet rezervuarda yapılan, ölü hacim ve diğer bölgelerdeki sediment birikimi ölçüm sonuçlarına dayanmaktadır. Burada ölü hacim toplam hacmin %10'u ise, ölü hacimde biriken sediment çökelen toplam sedimentin %15-%70 arasında, rezervuar tipine göre değişmektedir.



Şekil 5.2 : Ölü hacimde biriken sedimentin toplam sediment birikimine oranı (Borland ve Miller, 1958).

Tip I: Göl tipi rezervuar, Tip II: Taşkın yatağı tipi rezervuar
Tip III: Tepe tipi rezervuar, Tip IV: Vadi tipi rezervuar

5.2.3 Biriken sediment hacminin hesaplanması

Bir baraj rezervuarında biriken sediment hacmi, başlangıçtaki hazne kapasitesi ile daha sonraki bir tarihte yapılan ölçmelerden veya hesaplamalardan bulunan kapasite arasındaki farktan elde edilebilir.

Başlangıçtaki rezervuar hacmi V_o ve belli bir süre sonraki hacmi V_1 olan bir barajda biriken sediment hacmi;

$$V_k = V_o - V_1 \qquad (\mathbf{5.1})$$

bağıntısından bulunur.

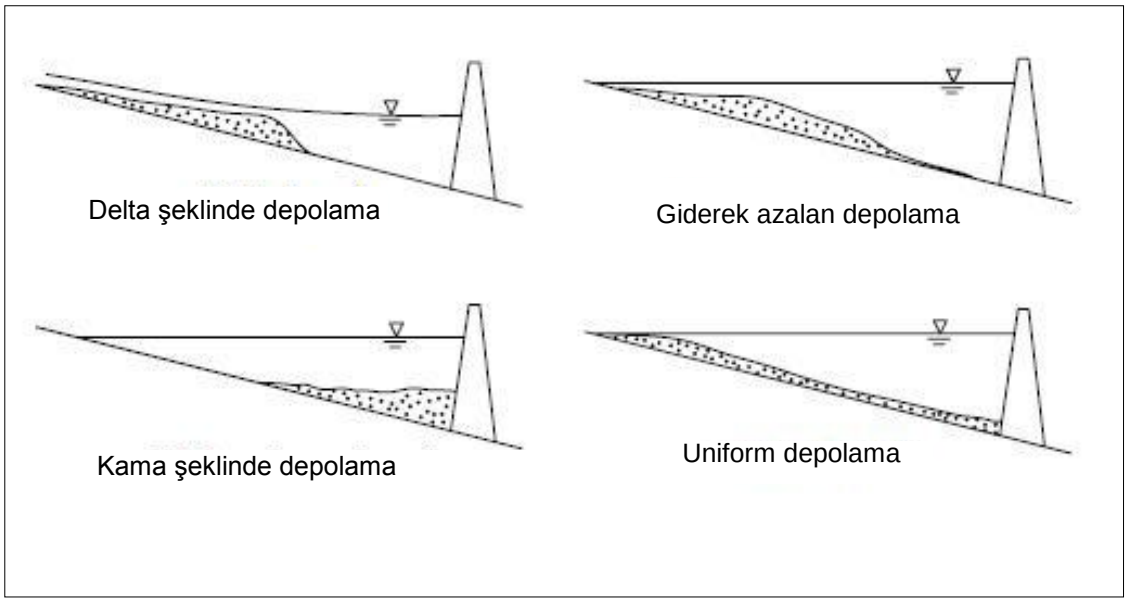
Sediment hacminin bulunmasında kullanılan diğer yöntemler şöyle sıralanabilir:

- Kot alan eğrisi yöntemi,
- Geliştirilmiş prizmoidal yöntemi,
- Ortalama sonlu alan yöntemi,
- Simpson yöntemi,
- Modern ölçüm yöntemleri (GPS kullanılarak yapılan hacim hesapları).

5.3 Rezervuarda Biriken Sedimentin Dağılımı

Rezervuarda biriken sedimentin rezervuar içindeki dağılım şekli; rezervuarın faydalı hacmi, dipsavak yüksekliği, dinlenme ve göle girme alanlarına etkilerinden dolayı önemlidir ve planlama çalışmalarında bu dağılımı doğru tahmin etmekte yarar vardır.

Morris ve Fan (1997), rezervuarda biriken sedimentin dağılımını 4 ana grupta toplamışlardır (Şekil 5.3):



Şekil 5.3 : Sedimentin rezervuarda birikme şekillerinin boykesitten görünüşleri (Morris ve Fan, 1997).

Rezervuarın yukarısında su kabarması görülen akarsu kısmında su hızı düştüğü için akarsuyun taşıdığı iri sediment taneleri önce çökelir. Daha ince malzeme olan kum, çakıl gibi malzemeler ise rezervuarın memba kısmında çökelir ve bu çökelmeler zamanla delta (çatalağız) oluşturur.

Kil ve silt gibi ince malzemeler de rezervuarda akmaya devam eder ve baraj gövdesine yakın yerde çökelir.

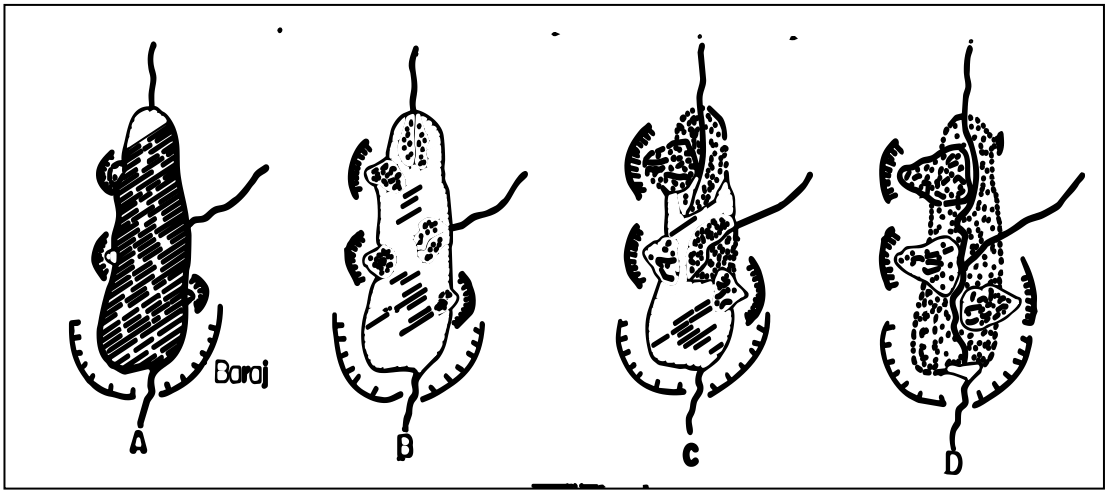
Bu durumda barajlarda üç çeşit yığılmadan bahsedebiliriz (Ağıralioğlu, 2004):

- Suyun kabardığı akarsu bölgesinde yığılmalar,
- Kum ve çakılın oluşturduğu deltalar,
- Kil ve siltin oluşturduğu taban yığılmaları.

5.3.1 Akarsu bölgesindeki yığılmalar

Akarsu bölgesindeki yığılmalar, baraj rezervuarının daha yükseğinde bulunan akarsu tabanındaki yığılmalardır. Bu bölgede yığılma hem baraj haznesine, hem de membaya doğru zamanla büyür. Yığılmalar arttıkça suyun kabarması da artar. Bu kabarmalar bazen 1-2 m'yi bulabilir. Ayrıca bu kabarmalar durgun gölcükler oluşturarak çevre problemlerine de sebep olabilir. Bazı yerlerde akışı engelleyecek kadar çok bitkiler meydana gelir. Bu da kabarmayı arttırıcı etki yapar.

Birçok rezervuarda, rezervuara boşalan yan derelerin giriş ağzı bölgelerinde deltalar oluşur. Böyle bir rezervuarda yığılmanın dağılımları Şekil 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.4 : Bir göl veya rezervuarın sediment ile dolması (Sly, 1978).

5.3.2 Delta oluşumları

Vanoni (1977) delta oluşum şeklini, dar ve geniş rezervuarlar için ayrı ayrı tanımlamıştır. Dar rezervuarlarda akım ve sediment, rezervuarın daha çok yan yüzeylerine yayılır ve dağılır (Şekil 5.5). Geniş rezervuarlarda ise akım rezervuara bir su jeti olarak girer.

Bu akım giriş hattı boyunca belirli bir uzaklığa kadar devam eder ve sediment, genellikle giriş bölgesinden daha geniş bir kesitte bir sırt formu oluşturacak şekilde yığılır. Oluşan bu sırt, bazen su yüzü seviyesine kadar ulaşabilir ve rezervuar içine doğru kilometrelerce uzayabilir.



Şekil 5.5 : Kulekhani Rezervuarı'nda (Nepal) delta birikiminin genel görünüşü (Galay, 1987).

Akarsuyun rezervuara girdiği bölgedeki delta parçası, hemen hemen bütün yatak yükünü *(bed load)* toplar. Bu bölümün mansabındaki bölgede *üst çökelti yatağı (topset bed)* oluşur. Bu bölümün eğimi yaklaşık olarak orijinal yatak eğiminin 1/2'si veya 2/3'ü kadar olup, delta oluşumu boyunca su yüzüne paralel olarak yükselip daha sonra sabit kalmaktadır (Şekil 5.6).

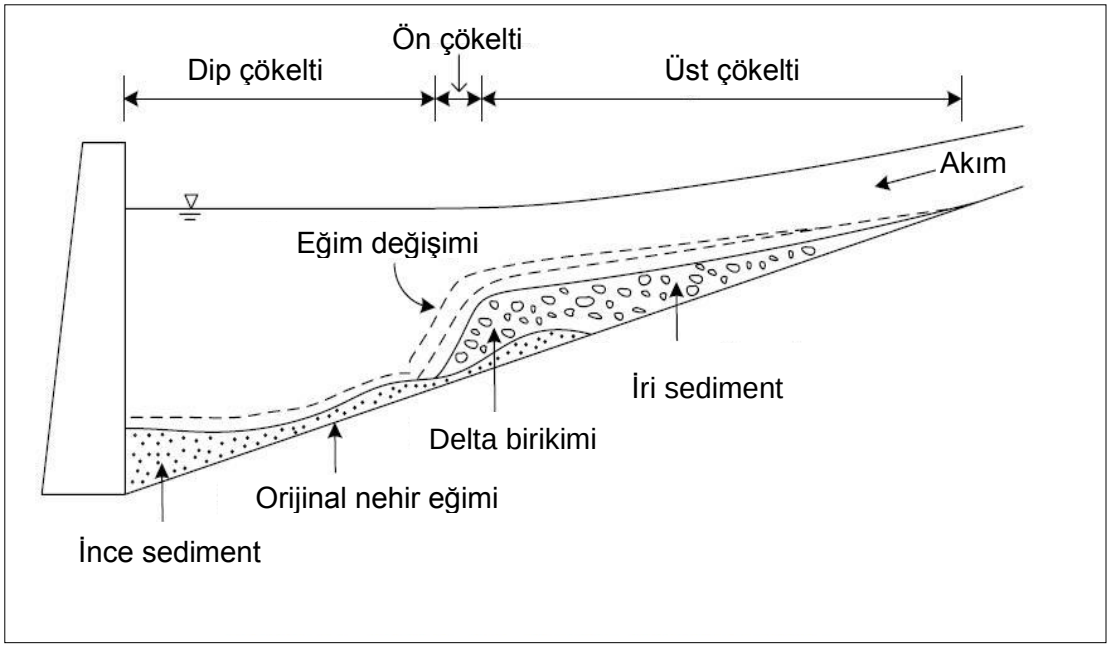
Üst çökelti yatağı bölgesinin eğimi, belirli bir mesafe sonra bu eğimin yaklaşık 6.5 katı olan *ön çökelti (frontset)* bölgesi eğimine dönüşür. Bu eğim akım koşullarının iri taneli sedimenti daha uzağa taşıyabilmesi halinde daha yumuşak olabilir.

Schälchli (1987) yaptığı deneyler sonunda, taban akımının olmadığı durumda ön çökelti bölümünün eğiminin belirli bir açıya ulaşana dek arttığını saptamıştır. Daha sonra bütün ön çökelti bölümünün, bir çamur kütlesi olarak aşağıya kaydığını belirlemiştir.

Düzensiz *(unstable)* akış koşulları da ince malzeme ve kum karışımından oluşan bir *delta* formu oluşturur. Bu durum delta bölgesinde sık aralıklarla oluşmuş ve tuzaklama havuzu işlevini gören birçok formasyon ortaya çıkarır. Bu tip deltalar genellikle bir bataklık, kumlu çöplük veya tiksotropik kütlelerdir. Zamana göre değişim gösteren bu tipteki deltaların oluşum ve gelişmesini önceden belirlemek oldukça zordur.

Diğer bir delta yapılanması ise delta bölgesinde tek bir kanal oluşumu şeklinde görülür. Rezervuar su seviyesinin düşmesi süresince kuru alanlar konsolide olup çatlarken, akarsu kendi biriktirdiği malzemeden oymaya başlar. Seviye yükselmeye başladığında yığılma oluşumu tekrar başlar. Çatlaklar ve oyulan bölgeler tekrar dolar. Bu durum kalın ve ince taneli malzemenin çok yoğun bir şekilde sıkışmış halde birikmesi sonucunu doğurur (Breusers ve diğ., 1982). Delta yığılmaları genellikle sedimentin tane çapındaki farklılıklara göre sınıflandırılır (Şekil 5.6).

Bir hidroelektrik enerji santralinde türbinlerden sürüntü malzemesi geçmesi halinde, belirli bir süre içinde türbin kanatçıklarında aşınmalar oluşur. Türbine girmesi istenmeyen maksimum tane çapı, Francis tipindeki türbinler için yaklaşık 0.3 mm'dir. Baraj gövdesi kenarındaki yığılmalar, bu malzemenin enerji tüneline ve türbinlere girişinin kontrol edilmesini de zorlaştırır.

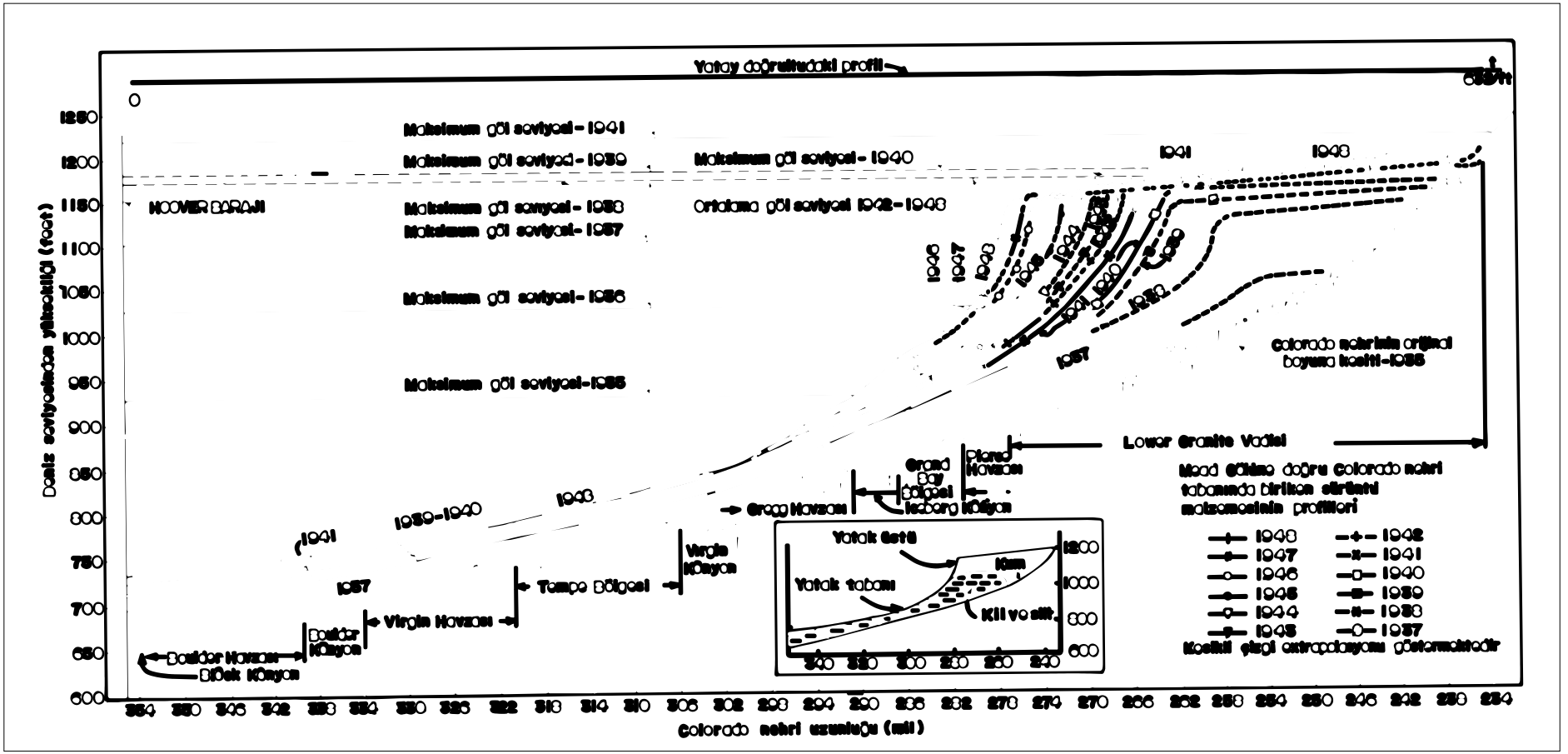


Şekil 5.6 : Bir rezervuarda tipik sediment birikimi görünüşü (Morris ve Fan, 1997).

En yüksek su seviyesi üzerinde kalan delta yüzeyi akımın sirkülasyonunu önleyen, terleme ve buharlaşmayı arttıran bir bitki örtüsü ile kaplanır.

Rezervuarlardaki su çevrimi aynı zamanda rüzgâr etkisi ile birlikte, güneş ısısı ile oluşan tabakalaşmadan da etkilenir. Bu çevrim dalgalar, yoğunluk farklılıkları uzun periyotlu kütle salınımları veya su yüzeyindeki rüzgâr kuvvetleri tarafından oluşturulabilir. Büyük rezervuarlarda bu dalgalar daha etkili olabilir, sığ bölgelerde ise (deltalarda ve kıyıda) ince taneli malzemeleri tekrar askıya geçirip taşıyabilirler.

Şekil 5.7'de, ABD'de bulunan Lake Mead gölündeki sediment birikimi gelişimi gösterilmiştir. 1937-1948 yıları arasında, gölde tipik bir delta oluşumu meydana gelmiş, bu birikime bağlı olarak taban seviyesi ve maksimum göl seviyesi oldukça yükselmiştir.



Şekil 5.7 : Mead gölünde delta oluşumu, ABD (Graf, 1971).

5.3.3 Taban akımları

Kil, silt büyüklüğündeki malzemeler deltanın aşağısına kadar taşınır ve tabanda yığılır. Çökelme hızı düşük olan bu ince malzemeler, kohezyonlu ve ince kohezyonsuz malzemelerden oluşur. Bunların yığılma şekilleri kil malzemesinin mineral karakteristiğine ve suyun hareket şekline bağlıdır. Bu taban malzemesine rezervuarın her yerinde rastlanır. Fakat en çok akım hızının düşük olduğu baraj gövdesine yakın ve su yüzünün salınım yaptığı yerlerde çökelirler.
Bu ince malzeme tam yığılıp tabakalaşmadan önce yoğunluk akımları ile hareket edebilir. Sedimentin yumuşaklaşmasından dolayı bu taban yığılmaları problemini tanımlamak karışık ve zordur (Ağıralioğlu, 2004).

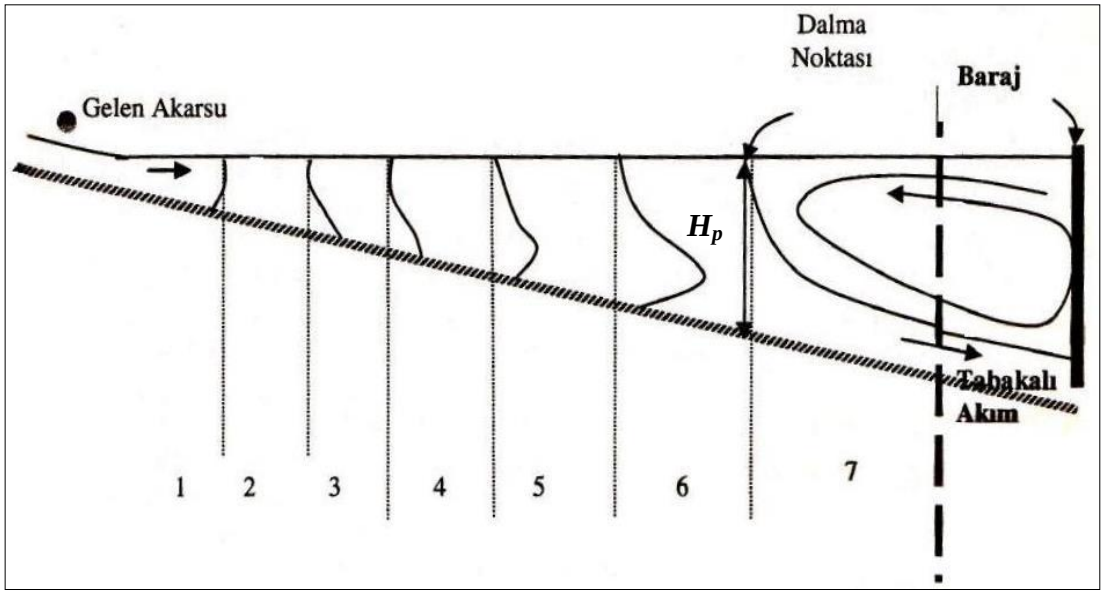
5.3.4 Yoğunluk akımı

Rezervuarlarda sıcaklık, tuzluluk ve bulanıklık farklılıklarından dolayı sık sık yoğunluk tabakalaşmaları (*density stratifications*) oluşur. Bu tabakalaşmalar su sürkülasyonu ve su kalitesi açısından önemlidir.

Bir göl veya hazneye gelen su, çok seyrek olarak hazne içindeki su ile aynı yoğunluğa sahiptir. Bu yoğunluk farklılığı sıcaklık farklarından, askı maddesi veya çözülmüş madde konsantrasyonundan kaynaklanabilir.

Gelen su haznedeki sudan daha yoğun olduğu zaman, gelen akım hazne suyunun altına dalar ve yoğunluk akımı olarak taban boyunca akar. Bu tip akımlar haznenin değişik kısımlarında farklı isimler alır.

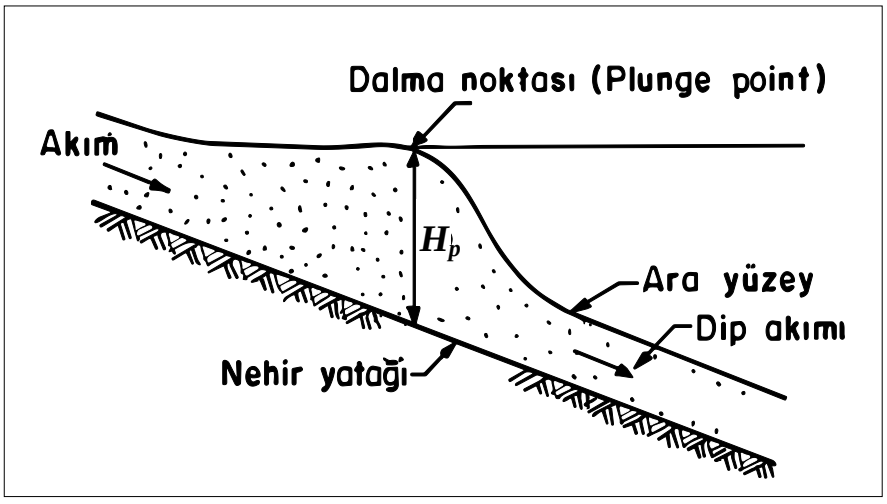
Hazneye giren akım, dalma bölgesinde *dalmış akım* veya genel bir isimle *yoğunluk akımı (density current)* olarak adlandırılır. Akımın dalmasının bittiği kısımdan sonra oluşan akıma ise *tabakalı akım* veya *taban akımı* adı verilir (Şekil 5.8). Akımın su yüzeyinde daldığı yere, *dalma noktası* (*plunge point*) veya *dalma çizgisi* denilir. Dalmış akımdan dolayı haznede ters akımlar (sirkülasyon akımları) meydana gelir (Şekil 5.8). Bu ters akımlardan dolayı, haznedeki yüzen cisimler belli bir bölgede toplanır. Dalma çizgisi pratikte, bu yüzen cisimlerin toplanmaya başladığı yer olarak tarif edilmektedir.



Şekil 5.8 : Baraj haznesinde yoğunluk akım bölgeleri (Ağıralioğlu, 2004).

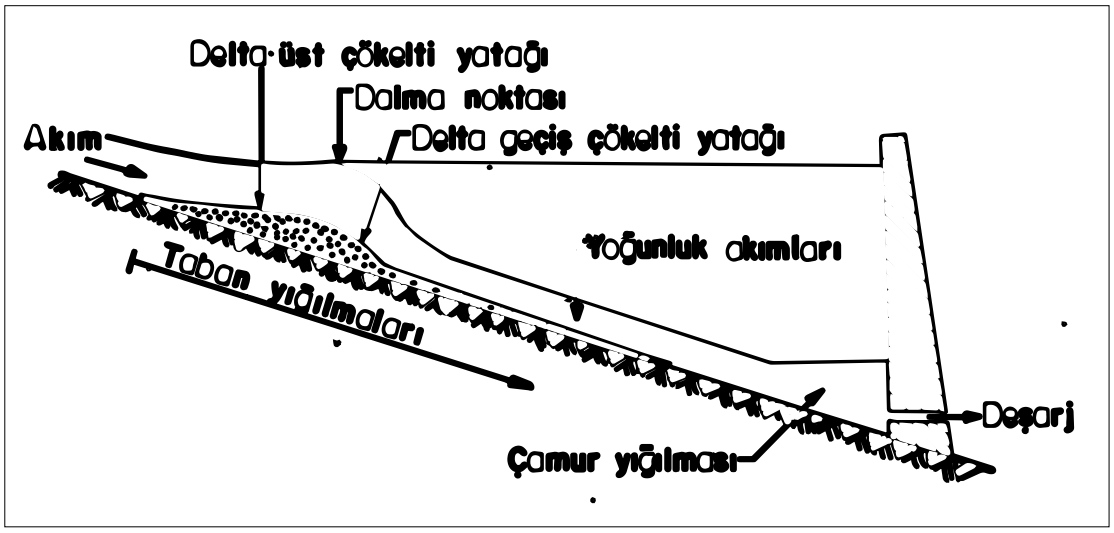
Dalmış akımın oluştuğu, taban akımı ve giren nehir akımı arasında kalan geçiş bölgesine *dalma bölgesi* denilir.

Bu bölgenin başlangıcı, dalma çizgisindeki *Hp* derinliği (dalma derinliği) (Şekil 5.9) veya dalma noktasının yeri (dalma noktasının hazne girişine mesafesi) şeklinde iki parametre ile ifade edilmektedir (Üneş ve Ağıralioğlu, 2004).



Şekil 5.9 : Dalma noktası (Yıldız ve Kaş, 2007).

Bir rezervuarda tipik bir yoğunluk akımının ilerleyişi ve dipsavak ile mansaptan deşarjı Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere yoğunluk akımını, içindeki sediment tanelerinin çökelmesine izin vermeden, mansaba aktarmak rezervuarda birikimi önlemek için etkili bir yöntemdir.



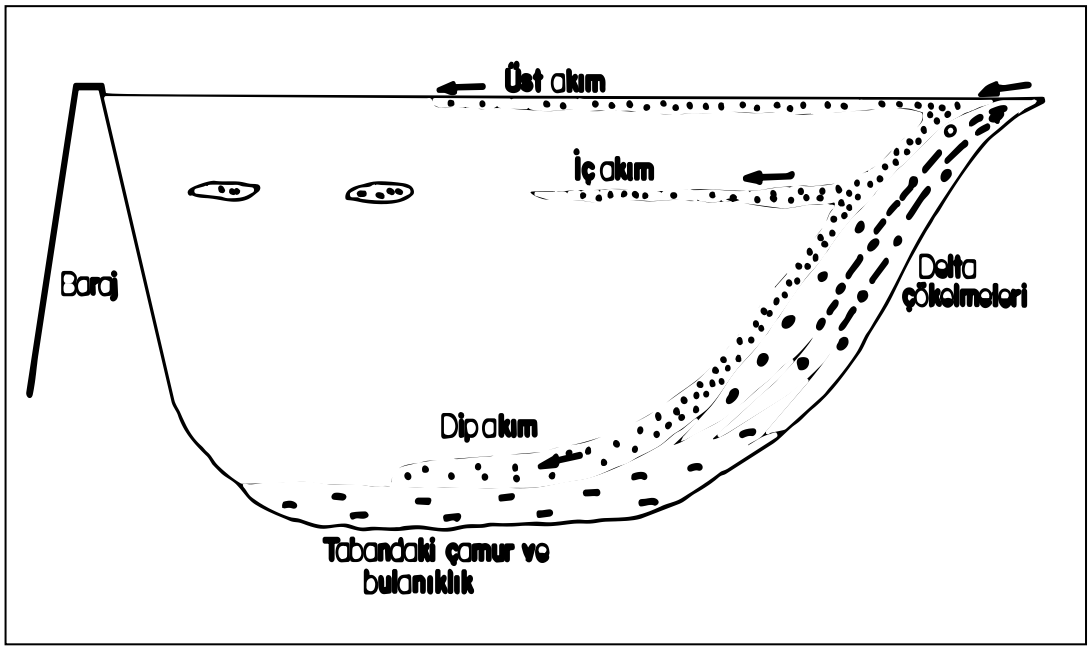
Şekil 5.10 : Rezervuarda yoğunluk akımlarının ilerleyişi (Yıldız ve Kaş, 2007).

Baraj haznesindeki dalmış akımların haznenin bir bütünü içerisinde belirlenmesi (Üneş ve Ağıralioğlu, 2004);

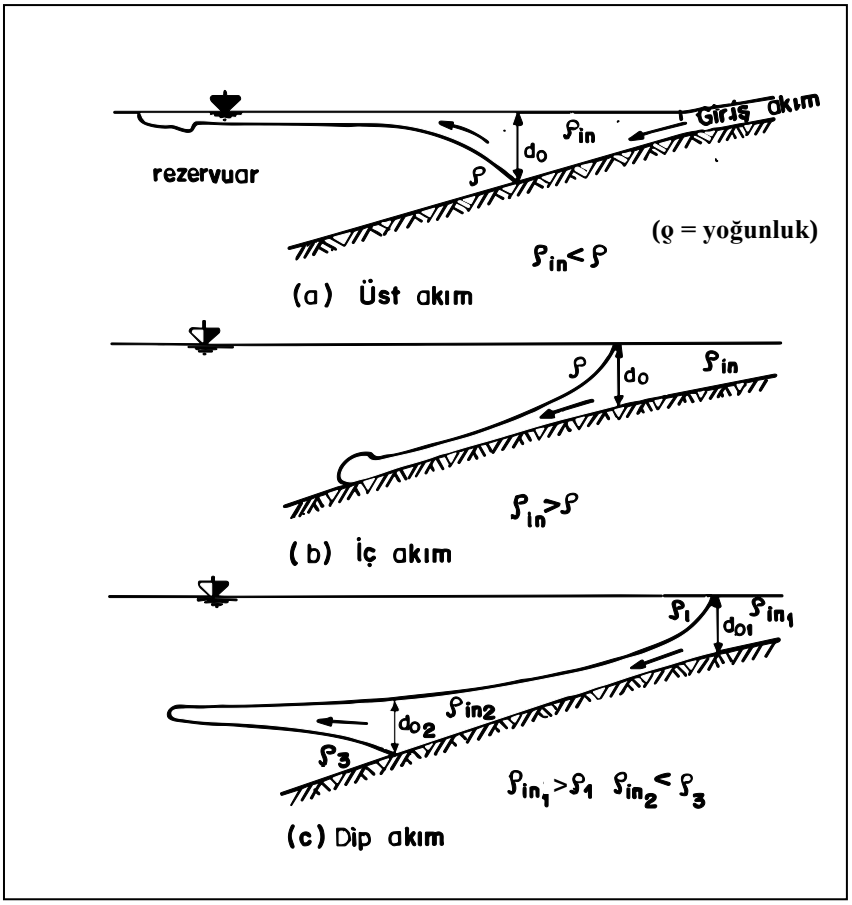
- Haznenin su kalitesinin modellenmesi,
- Haznedeki kumlanmanın belirlenmesi,
- Oluşturulan hazne simülasyonları ile haznenin her noktadaki özelliklerini veren parametrelerinin yaklaşık olarak belirlenmesi,
- Hazneye gelen akımın karışım etkilerinin incelenmesi,
- Haznedeki kirlenmenin belirlenmesi açısından önemlidir.

Yoğunluk farkı çok az olan durgun bir suya giren belirli bir yoğunluktaki akım, rezervuar boyunca genişleyen bir şekilde veya jet olarak ilerleyebilir. Yoğunluk akımları, kendilerini çevreleyen sıvının kaldırma etkisinin yer çekimi kuvvetini azaltması nedeni ile normal açık kanal akımlarından farklılık gösterir. Bu akımlar yoğunluk farklılıklarına göre *üst akımı* (*overflow*), *iç akımı* (*inter flow*) ve *dip akımı* (*underflow*) şeklinde oluşur.

Yukarıda bahsedilen farklı tipteki yoğunluk akımları, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'te gösterilmiştir.

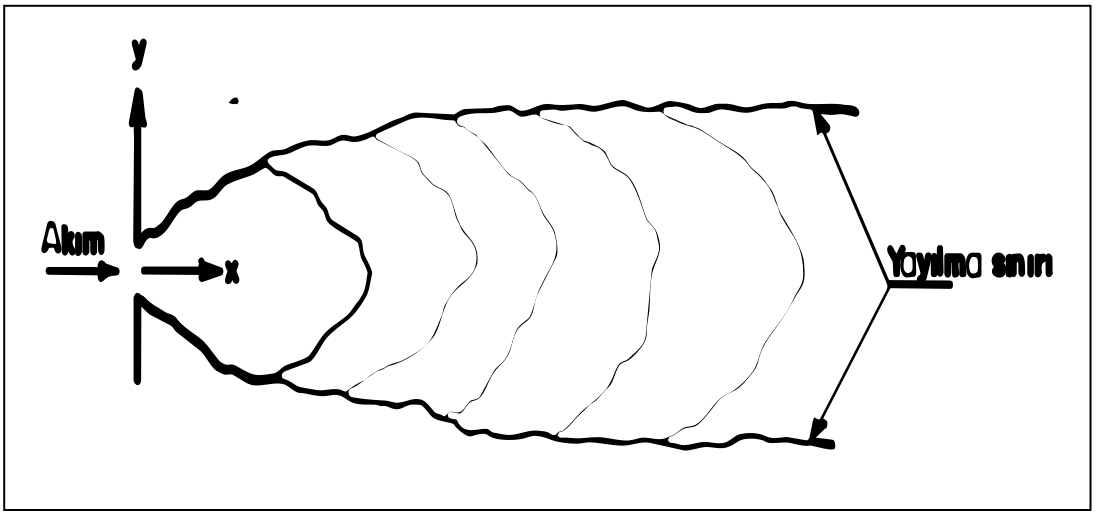


Şekil 5.11 : Kış dönemindeki su ve sediment hareketi (Bruk, 1985).



Şekil 5.12 : Üst, iç ve dip akım cinsinden yoğunluk akımları (Yıldız ve Kaş, 2007).

Yapılan çalışmalarda, sel rejimindeki yoğunluk akımlarında tabakalar arasında periyodik girişimler gözlenmiştir (Alavian, 1986 a,b). Bu durum düzensiz aralıklarla oluşan bir seri dalga hareketi ortaya çıkarır (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 : Seri dalga hareketiyle yayılan yoğunluk akımları (Alavian, 1986b).

Kaynaktan uzaklaştıkça yavaş ilerleyen dalgalar daha hızlı olanlar tarafından taşınır ve bir dalga sürekliliği oluşur. Daha mansap bölgelerde ise dalgalar kırılır ve etkili bir su karışımı meydana getirir (Hay ve diğ., 1982).

Rezervuar iç akımları oldukça düşük taşıma kapasitesine sahip ve büyük oranda kararsız akımlardır. Bunlardan sürüntü malzemesi taşıyan iç akımları ise sadece sediment konsantrasyonu çok düşük olan sularda görülür.

İri taneli malzemeler rezervuara girdikten kısa bir süre sonra çökeldiği için dip akımı sadece ince taneli malzemeleri içerir. Bu malzemelerin ortalama tane çapı 0.002-0.003 mm, D_{90} ise 0.01-0.1 mm arasındadır. Ancak akış boyunca akımdaki sediment içeriği değişir. Hızın azalması ile sediment çökelir. Hızın yatak geometrisi nedeniyle artması ise çökelen malzemeleri yeniden askı haline geçirir (Fan, 1960).

Çeşitli seviyelerde ve uygun bir şekilde inşa edilen dipsavakların işletilmesi ile bu akımların ve sedimentin mansaba deşarjı mümkün olmaktadır.

5.3.5 Bulanıklık akımı

Rezervuar içinde askı halinde taşınan ince killer suda bulanıklık akımları *(turbidity currents)* meydana getirebilir (Şekil 5.14).

Rezervuarlardaki sediment birikiminde, yoğunluk dip akımları (*density underflows*) ve özellikle bulanıklık akımları (*turbidity currents*) çok önemli rol oynar. Bulanıklık akımları veya bulanıklıkla oluşan yoğunluk alt akımları (*turbidity induced density underflows*), sediment içeren suyun temiz çevre suyuna katılması ile oluşur.



Şekil 5.14 : Bir rezervuara giren bulanıklık akımı (Morris ve Fan, 1998).

Bir bulanıklık akımı, eğimi büyük yataklarda kendi kendine oluşan çevrim ile sedimenti askıya geçirir, daha ağırlaşır, ivmelenir ve mevcut yatağı oyabilir.

Bununla birlikte genellikle bulanık dip akımı (*turbid underflow*), yığılmalar oluşturan bir akımdır.

Yığılmalar sonrasında bulanıklık akımının çevre suyu ile arasındaki yoğunluk farkı azalabilir. Daha sonra akım taşıma enerjisini kaybeder ve sonunda ortadan kaybolur (Duquennois, 1956).

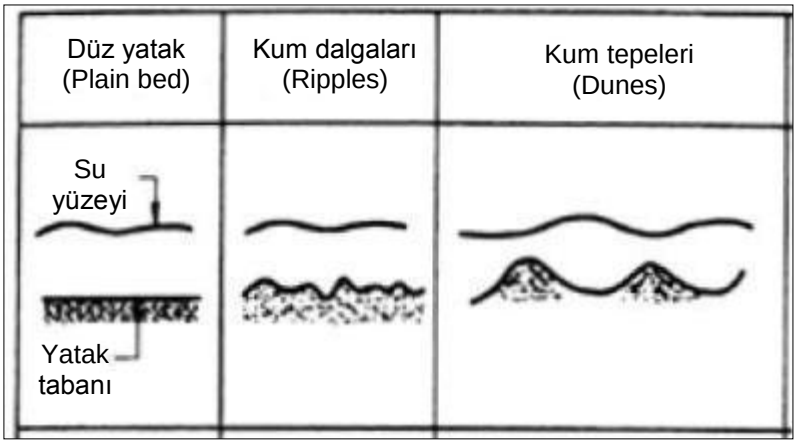
Bulanıklık akımlarının dinamiği karışık ve belirsiz olup; sediment girişi, askıdaki sediment, ortalama akım ile türbülans arasındaki dinamik ilişki konusunda birçok araştırma yapma ve model geliştirme süreci hâlâ devam etmektedir.

Bulanıklık akımı bir engel ile karşılaştığında, örneğin bir barajda, askıdaki malzemeler çamurlu bir gölcük oluşturacak şekilde çökelir. Oysa bir yoğunluk akımı baraja ulaştığında yükselir ve yansıyarak küçük çevrintiler oluşturur.

Bulanıklık akımları aynı zamanda su altındaki kayma ve oturmalardan, taşkın esnasında veya bir gemi geçişi ile oluşan dalgalardan ve akımların tekrar askıya geçirdiği malzemelerden etkilenir.

Graf (1971), bir bulanıklılık akımı içerisindeki sedimentin genellikle kohezyonlu malzeme olduğunu ve akım içinde çökelme, topaklaşma oluştuğunu ileri sürmüştür.

Bulanıklık akımları, yatak taban şekillerini (*ripples* ve *dunes*) (Şekil 5.15) oluşturacak yeterli hıza sahip olabilir. Sel rejimindeki bulanıklık akımları için yapılan deneylerde tam olarak gelişmiş kum dalgaları (*ripples*) görülmüştür (García, ve diğ., 1986). Eğimin azalması halinde sel rejiminden nehir rejimine geçiş olur (içsel hidrolik sıçrama) (Akiyama ve Stefen, 1986).



Şekil 5.15 : Düşük rejimde yatak şekilleri (Morris ve Fan, 1997).

6. REZERVUARLARIN NEHİR MORFOLOJİSİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

6.1 Nehir Yatakları Üzerindeki Etkileri

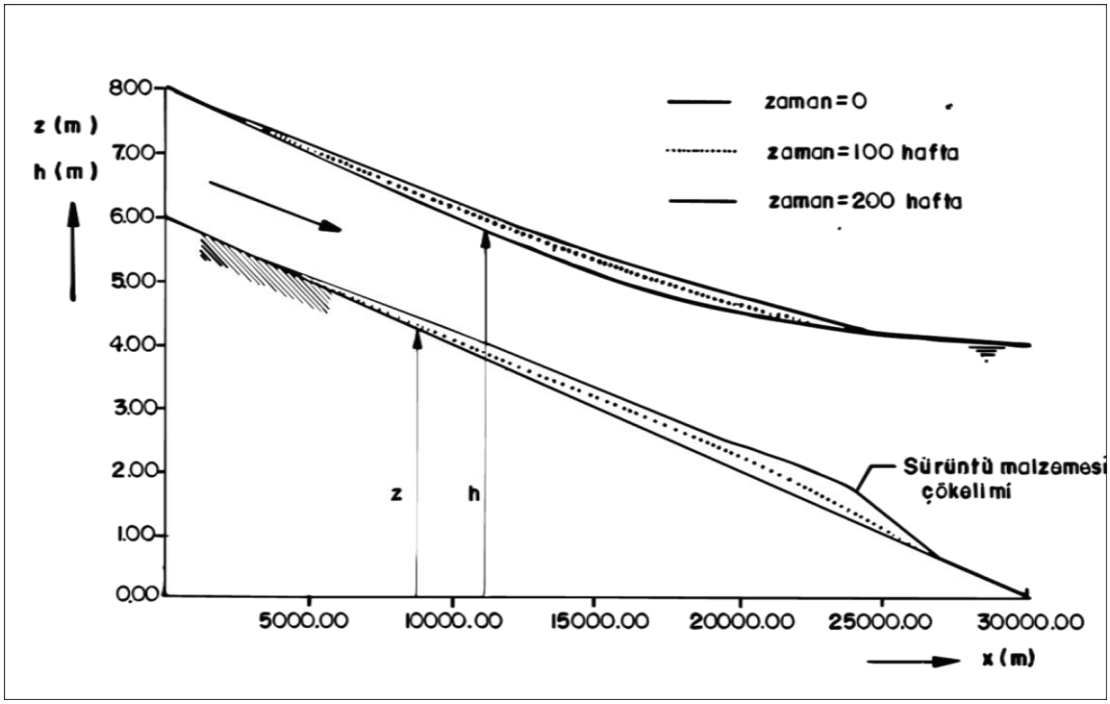
Bir rezervuar, nehrin doğal özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Rezervuar ile barajın mansabındaki akış düzenlenir, maksimum ve minimum debilerin frekansı azalır. Düzenlenen bu akış rejiminden dolayı membada, nehir yatağı için yeni bir denge koşulu oluşur. Buna ilave olarak, sediment yükünün önemli bir bölümü rezervuarda çökelir. Mansaba geçen sürüntü malzemesi miktarındaki azalma, mansaptaki erozyon oluşumunu arttırarak; nehir yatağının alçalmasına neden olur.

Nehrin taşıdığı iri taneli malzemelerin çoğu rezervuarda çökelir, ince taneli malzemelerin bir bölümü ise mansaba aktarılır. Böylece mansaptaki sürüntü malzemesi tane çapı dağılımında, geçmişe nazaran önemli bir farklılık oluşur. Rezervuarın memba kısmındaki yığılmalar (*backwater deposits*) rezervuara giriş bölgesinde taşkınların oluşması ve nehir ulaşımında zorlukların ortaya çıkması gibi problemler yaratabilir.

6.1.1 Memba nehir yataklarındaki etkileri

Nehrin rezervuara giriş bölgesinde oluşan çökelme ile yeni bir taban seviyesi oluşur. Oluşan bu tabaka, memba doğrultusunda yükselen bir kabarma eğrisi meydana getirir. Nehir rejiminde, debisi sabit bir akımın yer aldığı prizmatik uniform bir yatağın bir boyutlu morfolojik hesaplarının sonuçları ve kabarma eğrisi Şekil 6.1'de verilmiştir.

Nehrin rezervuar girişi bölgesinde yığılan malzeme zamanla membaya doğru ilerleyerek; taşkın problemleri, yeraltı suyu tablasının yükselmesi, akım derinliğinin azalmasıyla nehir ulaşımında oluşan problemlere ve eğer varsa, köprü altlarındaki açıklıkların azalmasına neden olur (Fan, 1985).



Şekil 6.1 : ODIRMO Bilgisayar programı ile elde edilen nehir yatağındaki değişmeler (Vermeer, 1985).

Kabarma eğrisi yığılmaları (*backwater deposits*) üzerine Vanoni (1977) tarafından yapılan çalışmalar, bu oluşumun nehrin yığılma bölgesinde menderesler yaparak optimum genişlik ve derinlikte bir nehir yatağı oluşturduğunu ve yatak tabanı sürtünme katsayısının değişimine neden olacağını ortaya koymuştur. Bu faktörlerin kombinasyonu, sediment yükünün giriş bölgesi boyunca taşınımı açısından etkili olur. Örneğin kollara ayrılmış bir nehir yatağı, tek bir yatak haline gelir ve böylece nehir ulaşımı için önemli olan kollar ortadan kalkabilir.

Araştırmacılardan Evrard (1985), nehir giriş ağzında oluşan kum eşiklerinin zararlı otlarla kaplanabileceğini ve bunun sediment yığılmasını arttıracağını ileri sürmüştür. Bazı bölgelerde oluşan yığılmalar üzerinde sedir ağacı ve benzeri bitki örtülerinin geliştiği gözlenmiştir.

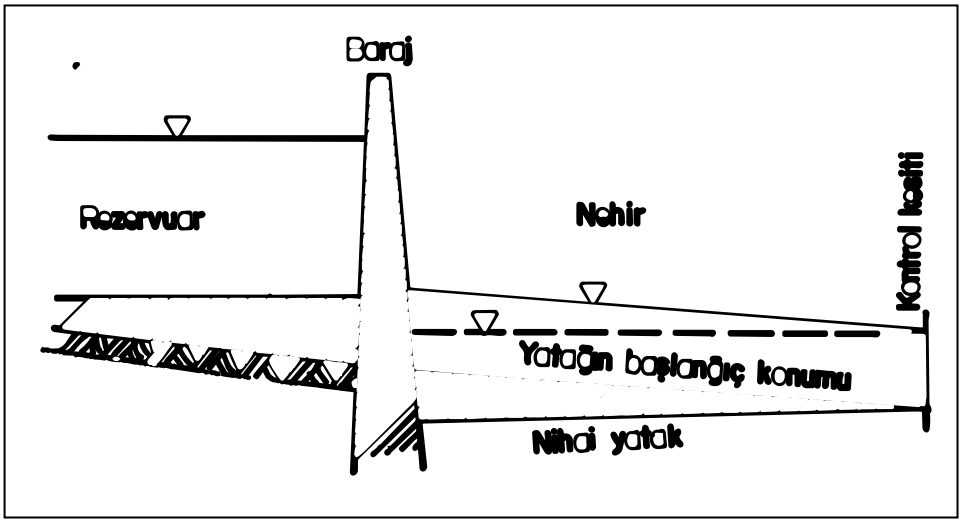
Kabarma eğrisi bölgesi boyunca yığılan malzeme, düşük rezervuar su seviyelerinde rezervuara doğru taşınır.

6.1.2 Mansap nehir yataklarındaki etkileri

Bir rezervuarın mansap nehir yatağındaki morfolojik değişim ve etkileri, çeşitli başlıklar altında toplanabilir (Yıldız ve Kaş, 2007).

***Yığılma ve yamaç erozyonu*:**

Bir rezervuardan taşıma kapasitesinden daha az sediment konsantrasyonuyla mansaba bırakılan akım; mansap bölgesinde aşınmalara, nehir yatağında ve şev topuklarında oyulmalara neden olur. Nehir yatağındaki oyulma, nehir yatağının direnci ile akımın taşıma kapasitesi arasında yeni bir denge durumu oluşana kadar devam eder (Şekil 6.2).



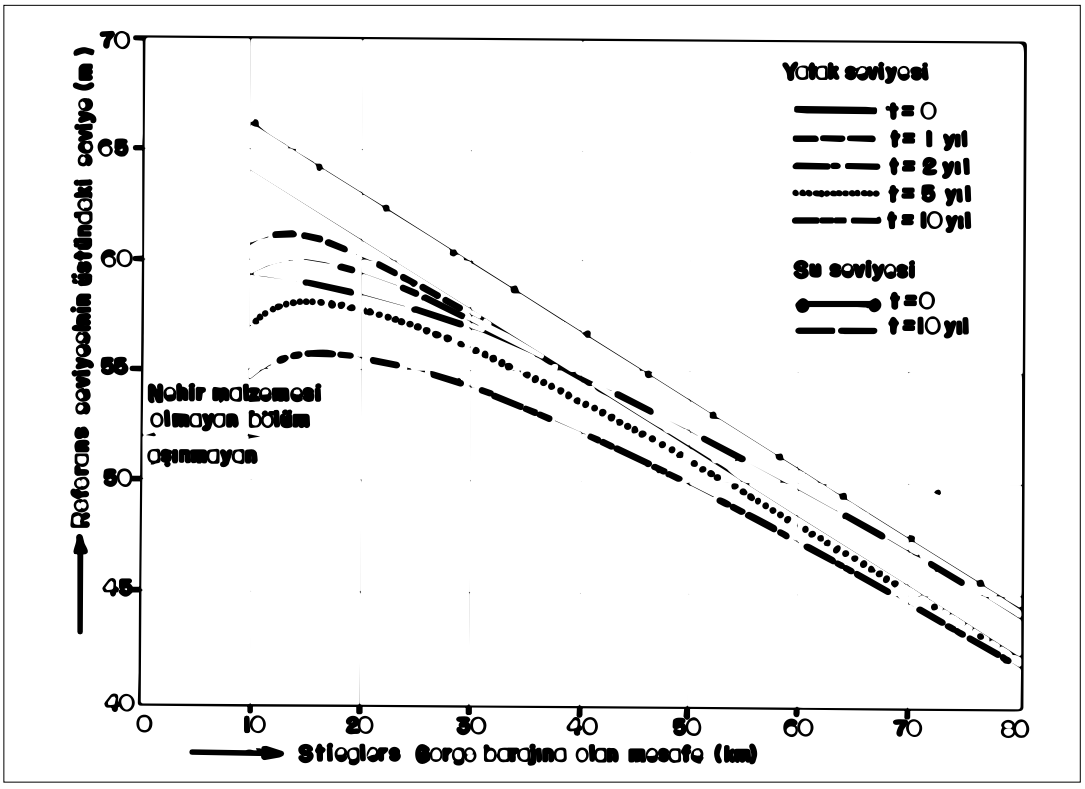
Şekil 6.2 : Baraj mansabı nehir yatağındaki taban alçalması (Bruk, 1985).

Nehir yatağı tabanında ve dolayısıyla su seviyesinde nehir yatağı boyunca oluşan bu alçalma, birçok olumsuz ikincil etkiler ortaya çıkarır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Nehir kollarında ve yan dereler boyunca membaya doğru ilerleyen bir aşınma oluşabilir (*backward erosion*).
- Cazibe ile çalışan su alma ağızlarında problemler meydana gelebilir.
- Yeraltı suyu seviyesinde düşüş olabilir.
- Taşkın yatağının taşkın zamanı işlevselliğinde azalma olabilir.
- Nehir yatağı içerisinde veya nehir kıyısı boyunca yer alan yapıların (su alma ağızları, pompa istasyonları, köprü ayakları, nehir ulaşım araçlarının kullandığı yapılar vb.) stabilitesinin bozulması ve etkili olarak çalışamamaları gibi problemler ortaya çıkabilir.

Çin'deki Danjiangkou Barajı rezervuarının mansabında Han ve Tong (1982) tarafından nehir yatağında yapılan ölçümler sonrasında; ana yatakta oyulma, eğimde azalma ve tabandaki pürüzlülükte artış gözlenirken, taşkın yatağında yığılma oluştuğu tespit edilmiştir. Mansapta yatak seviyesindeki alçalmanın (*degradation*), nehir yatağının 600 km'den uzun bir bölümüne kadar uzandığı belirlenmiştir.

Tanzanya'da Rufiji Nehri üzerinde bir barajın inşa edilmesinden sonra mansapta oluşan morfolojik değişmeler Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3 : Rufiji Nehri yatağında oluşan taban alçalmaları (Kerssens ve Zwaard,1980).

Rezervuarda biriken sedimentin yıkanması veya mansaba aktarılması durumunda, nehirlerdeki oyulma ve yatak seviyesindeki alçalmanın belirli bir oranda azaltılması mümkündür.

Bununla birlikte hangi hacimdeki suyun hangi periyotlarda mansaba bırakılacağının belirlenmesi oldukça zor ve mansaba bırakılan sediment ile yeni akım rejiminin dinamik denge koşullarının hesaplanması oldukça karmaşıktır.

Nehir yatağındaki oyulmanın kontrolü için yapılan setler, nehir yatağı içindeki batık savaklar ve eşikler; akımın enerji gradyanını ve böylece akımın hızını, sediment taşınımını azaltır.

Yapay bir bitki örtüsü ile oluşturulan eşikler de yatağın sürüklemeye karşı direncini arttırabilir.

Yatağa iri taneli yatak malzemeleri yerleştirmek de bir önlemdir ancak bu oldukça pahalı bir çözüm olup, mansapta nehir tabanının yükselmesine neden olabilir.

Diğer bir önlem ise nehir enkesitinin genişletilmesi ile akım hızlarının düşürülmesidir. Ancak bu durumda düşük debilerin geçtiği uzun bir periyotta, nehrin sığ kesimlerinde zararlı bitkilerin gelişmesi ile bazı problemler oluşabilir.

***Nehrin rejiminin düzenlenmesi*:**

Düzensiz bir rejime sahip nehirler üzerindeki rezervuarların düzenleme etkileri sonucunda, nehirlerin taşkın pikleri azalır ve mansaba daha kontrollü bir şekilde debi bırakılır. Nehir bu düzenlemeye yeni bir dinamik denge oluşumu ile karşılık verir.

Yan derelerin birleşme bölgelerinde oluşan iri sediment taneleri, akım tarafından kolayca taşınmaz. Bu nedenle bu bölgelerde nehrin kapanmasını ve akışın engellenmesini önlemek için erozyon kontrol önlemleri almak gerekir. Bu önlemler havzanın ağaçlandırılmasının yanı sıra, yan derelerde ve birleşim bölgelerinde kum kapanları ve mahmuz inşaatı şeklinde olabilir.

***Tane çapı dağılımındaki değişim*:**

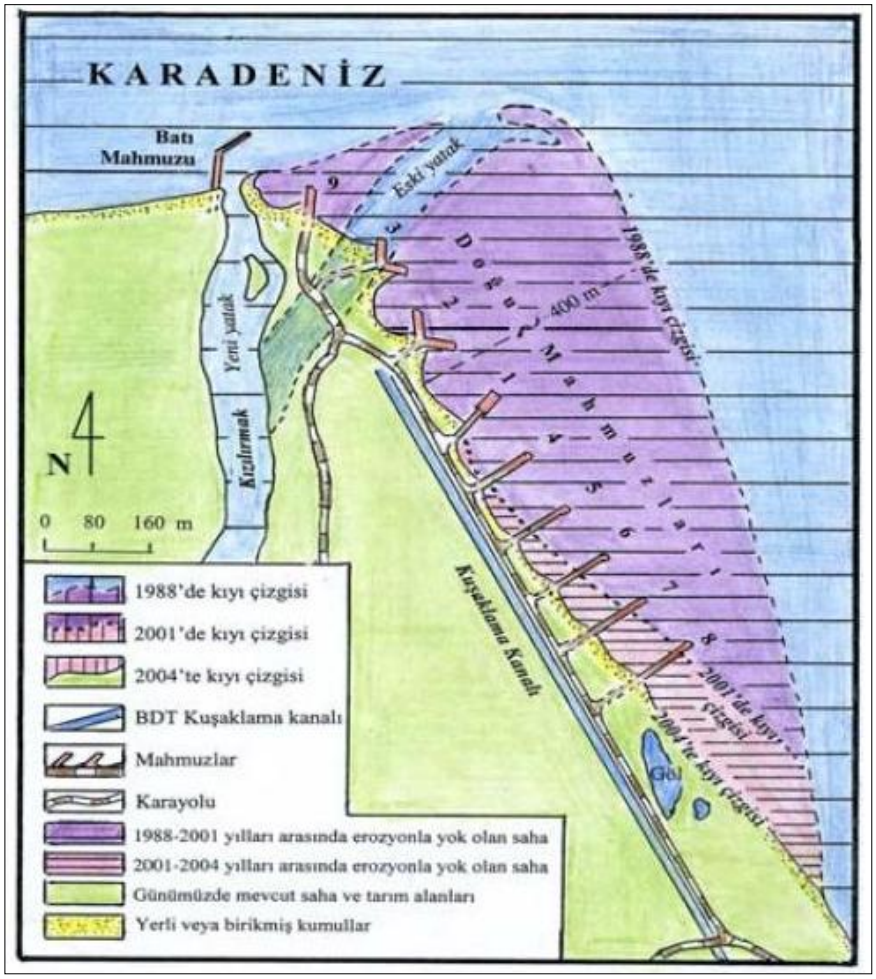
Nehirlerde taşınan yatak yükü rezervuarlarda çökelir, bu yüzden mansaba bırakılan sediment mansaptaki koşullara kıyasla daha ince malzeme özelliğini taşır.

Rezervuarda çökeldiği için mansaba geçen kil ve silt miktarı da azalır. Bu sebeple mansaptaki akım içerisindeki tarıma yararlı malzeme azalarak, taşkın yataklarının tarımsal verimliliğine olumsuz yönde etki eder. Aynı şekilde planktonun azalması, balık gibi su canlılarının beslenme alanlarını olumsuz etkiler.

6.2 Akarsuyun Boşaldığı Deniz ve Göl Kıyı Alanları Üzerindeki Etkileri

Kıyı bölgelerinde dalga hareketleri kıyı zonundaki kayaları aşındırarak kıyının karaya doğru oyulmasına, akarsu ise kıyıya sediment taşıyarak kıyıda sediment birikimine neden olur. Bu iki durumun birbiriyle etkileşimi kıyıda stabil bir profil oluşturmaktadır.

Büyük miktarda sediment taşıyan akarsu üzerine barajlar inşa etmek; denizlere taşınan sediment miktarını azaltmakta, kıyının stabil profilini bozmakta ve sonuç olarak kıyı alanları erozyona maruz kalmaktadır. Örneğin, Kızılırmak üzerinde 12 baraj vardır. Bu barajların zamanla devreye girmesi ile Karadeniz'e ulaşan sediment miktarı %98 azalmıştır. Bu barajlardan sadece Altınkaya Barajı'nın tuttuğu yıllık sediment miktarının 38.6 milyon m^3 olduğu hesaplanmıştır. Kızılırmak Deltası'nda kıyı erozyonu sonucu, kıyı şeridi 1988 yılından 2004 yılına kadar yaklaşık 400 m gerilemiştir (Şekil 6.4) (Asan ve diğ., 2002).



Şekil 6.4 : Kızılırmak Deltası'nda çeşitli yıllara ait kıyı profilleri (DSİ, 2004).

7. REZERVUARLARIN DEPOLAMA (AKTİF HACİM) KAPASİTELERİNİ KORUMA YÖNTEMLERİ

Rezervuarın depolama kapasitesini koruma yöntemlerinin geliştirilmesi uzun yıllar öncesine dayanmaktadır. Rezervuardaki sedimentin baraj mansabına akıtılması teknikleri ilk olarak 16. Yüzyılda, İspanya'da kullanılmıştır (Brown, 1943).

Araştırmacılardan Brown'ın (1943) bu yöntemlerin çeşitleriyle ilgili genel kabul gören sıralaması şöyledir:

- Sedimentin rezervuara girişini azaltan yöntemler (Bu yöntemlerde sediment daha rezervuara girmemiştir.).
- Rezervuarda oluşan sediment birikimini azaltmak için, akımın hidrolik karakteristiklerinden faydalanılan veya birikecek malzemenin taşınmasını sağlayacak koşulları açıklayan yöntemler (Bu yöntemlerde sediment rezervuara girmiş ama daha hepsi çökelmemiştir.).
- Birikmiş olan malzemenin rezervuardan taşınması için kullanılan hidrolik veya mekanik yöntemler (Bu yöntemlerde rezervuara giren sediment çökelmiş, birikmiştir.).

Rezervuar kapasitesini koruma yöntemleri üzerinde çalışan birçok araştırmacı; havzadan gelerek rezervuara giren sedimenti azaltmaya çalışmanın, koruma yöntemleri arasında en uygun yöntem olduğunu ileri sürmüştür (Brabben, 1988). Bu nedenle rezervuar bölgesinin dikkatli bir şekilde seçilmesi, sediment birikimini en aza indirmenin ilk adımı olarak ele alınmaktadır.

Rezervuarda sediment birikiminden dolayı elektrik enerjisi üretiminde, sulama amaçlı bir rezervuarın sulayacağı alanda ve tarımsal üretimdeki azalmaların sonuçları ekonomik açıdan değerlendirilerek, yapılabilirlik çalışması içerisinde rezervuarın kapasitesini koruma yöntemleri de göz önüne alınmalıdır (Yıldız ve Kaş, 2007).

7.1 Rezervuara Sediment Girişini Azaltma Yöntemleri

Havza erozyon ve heyelan önleme çalışmaları:

Rezervuara sediment girişini azaltmak için nehir yatağı havzasındaki erozyonu kontrol altına almak ve heyelanları önlemek, yapılan çalışmalar arasındadır (Şekil 7.1).

Ancak özellikle büyük havzalarda bu önlemlerin (yukarı havza çalışmaları) maliyeti genellikle çok yüksek olmakta ve sonuçları ise ancak belirli bir süre sonunda alınabilmektedir (Mahmood, 1987, Fan, 1985 ve Scheuerlein, 1987).



Şekil 7.1 : Isparta Uluborlu su havzasının, Ağaçlandırma ve Erozyon Kontrolü Genel Müdürlüğü tarafından ıslah ve rehabilitasyon çalışmaları yapılmadan önceki ve yapıldıktan sonraki hali (AGM, 2011).

Yan derelerden gelen sedimentin engellenmesi:

Brabben (1988), rezervuara açılan büyük yan derelerden gelen sedimentin önlenmesi için alınması gereken önlemleri üç grupta toplamıştır:

- Sedimentin kum kapanları, dinlendirme havuzları veya bitki örtüleri ile durdurulması,

- Nehirdeki kapalı biriktirme havzaları (sedimenti aktaracak sistemlerle birlikte ele alarak) yardımıyla veya sediment yoğunluklu akımın çevrilmesi ile (*bypass*) sediment girişinin önlenmesi,
- Hidrolik veya mekanik yöntemlerle sedimentin rezervuardan taşınması.

Rezervuarlarda sediment birikiminin önlenmesi için kum kapanları, dinlendirme havuzları ve akımın bir başka kanal ile çevrilmesinden elde edilebilecek kazanımlar bazı araştırmacılar tarafından şüpheyle karşılanmakta, işletmede yeni problemlerin ortaya çıkabileceği ileri sürülmektedir.

Sedimentin bitki örtüsüyle tuzaklanması:

Sedimentin rezervuara girişini önlemek amacıyla akımı dağıtıp, yayarak hızını azaltmak için yöresel bitki ile kaplanmış alanlar da kullanılmaktadır. Bu durumda sedimentin bir bölümünün tuzaklanabilmesi mümkün olmaktadır. Ancak bu yöntemin uygulanabilmesi için daha sonra sağlıksız bataklık haline gelmesi kabul edilen, uygun alanlar gereklidir.

Fan (1985) ve Brabben (1988), bitkiyle kaplanmış alanların akımı gerekenden daha fazla tutarak çökelen malzemenin yarattığı problemleri arttırdığını öne sürmüştür. Bu problemin önlenebilmesi için nehir havzasının üst bölümlerinde (yukarı havzada) iri taneli malzemeleri toplama havuzları inşa edilebilir.

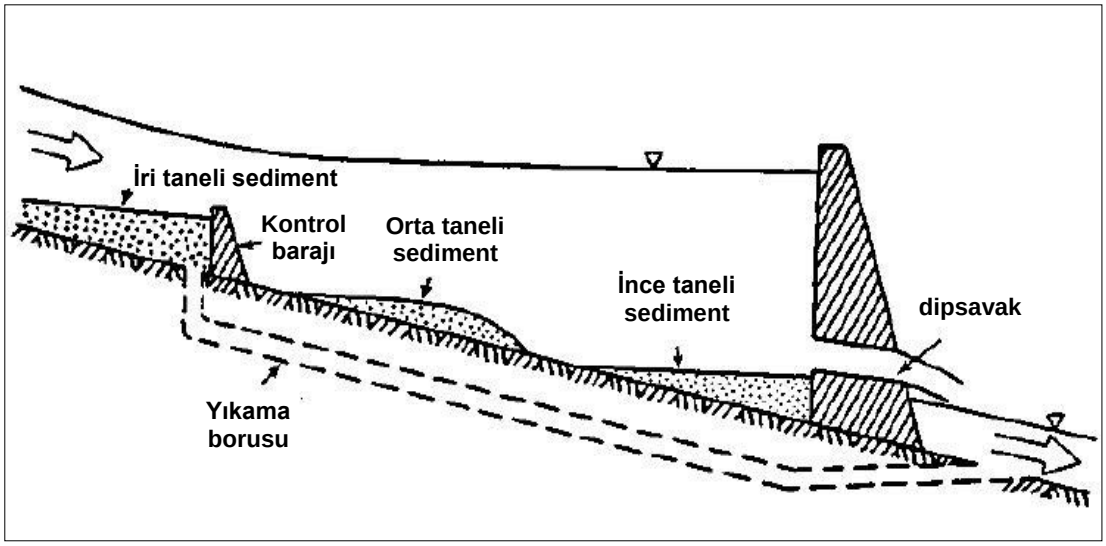
Kontrol barajları:

Başka bir öneri ise taşkınlar ile gelen sedimentin tutulduğu, düşük akım değerlerinde de bu sedimentin uzaklaştırıldığı *kontrol barajları (check dam, debris dam)* inşa edilmesidir (Şekil 7.2).

Kontrol barajlarının boyutları, normal baraj gövdesine göre daha küçüktür. Bu yapılar, akarsudaki sürüntü malzemesini ve iri taneli sedimenti tutmada başarılıdır fakat, taşkın zamanı gelen sediment bakımından yoğun akımlarda ve ince taneli sedimenti tutmada o kadar etkili olamamaktadır.

Bu yapıların inşa maliyetlerinin yüksek ve ekonomik ömürlerinin kısa olması diğer olumsuz yanlarıdır.

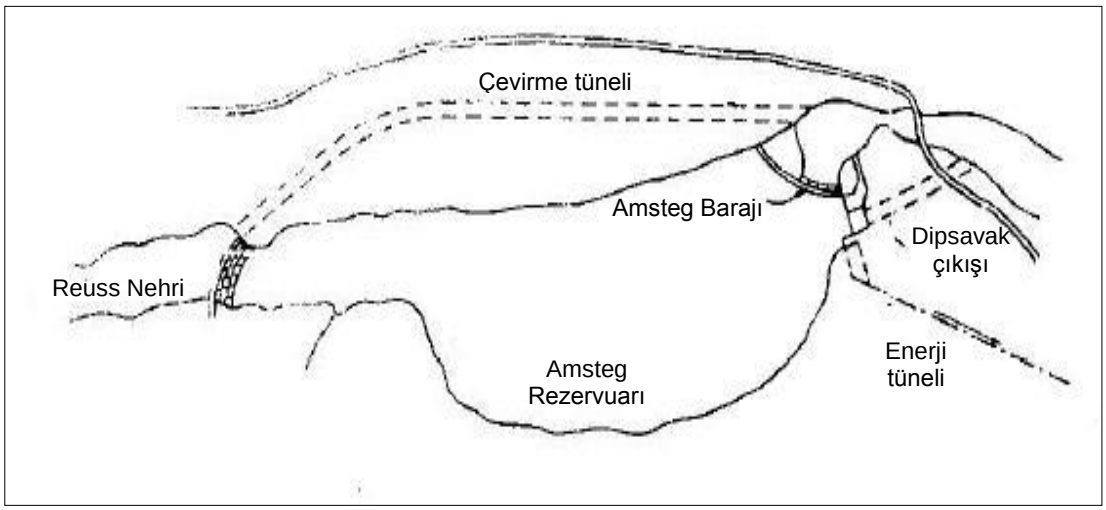
Kontrol barajı inşa etmek yerine barajın depolama kapasitesini arttırmak, genellikle daha ekonomik olmaktadır (Aras, 2009).



Şekil 7.2 : Kontrol barajı ile sediment birikimini kontrol etmenin şematik gösterimi (Durgunoğlu ve Singh, 1993).

Çevirme kanalları/tünelleri:

Literatürlerde önerilen diğer bir yöntem ise taşkın süresinde gelen yüksek sediment konsantrasyonlu akımın çevrilerek tekrar yatağa verilmesidir (Şekil 7.3). Fan (1985), bu *çevirme (bypass) kanalları* ve *tünellerinin* özellikle küçük rezervuarlar için uygun olduğunu çeşitli örnekler vererek açıklamıştır.



Şekil 7.3 : Amsteg Rezervuarı'nda bulunan çevirme tünelinin şematik gösterimi (Reed, 1931).

Çevirme yapılarının kullanıldığı rezervuarlara Gmünd Rezervuarı (Avusturya), Tedzen Rezervuarı (Türkmenistan), Amsteg ve Palagnedra Rezervuarları (İsviçre), Syiya, Yanshuigon ve Lushuihe Rezervuarları (Çin) örnek olarak verilebilir (Howard, 2000).

Rezervuarın bulunduğu arazinin topoğrafyası, taşınması düşünülen sedimentin tipi ve çökelen malzemenin miktarı, çevirme kanalları ile sediment taşıma yönteminin uygun olup olmadığı kararında önemli bir rol oynamaktadır.

Örneğin Gmünd Barajı rezervuarındaki yatak yükünün mansaba taşınımı için inşa edilen 2.1 m çapında ve 1.1 km uzunluğundaki betonarme kaplamalı tünel, zamanla büyük aşınmalara ve hasara uğramıştır. Bu tünelin bakım maliyeti, tünelin verimliliği ile kıyaslanamayacak düzeyde yüksek olmuştur (Rienössl ve Schnelle, 1982).

Taşkın sularının rezervuara ulaşmasında bir azalmanın istenmediği, su temini ve elektrik üretimi amaçlı projelerde bu tekniğin kullanılmasının uygun olmadığı kabul edilmektedir.

7.2 Rezervuara Giren veya Biriken/Çökelen Sedimentin Uzaklaştırılması

Rezervuara giren veya biriken/çökelen sedimentin uzaklaştırılması için birçok hidrolik veya mekanik yöntem geliştirilmiştir.

Bu yöntemlerden biri olan boşaltma yöntemi, yoğun sediment yüklü akımın (örneğin taşkın zamanı) rezervuarda biriktirilmeyip mansaba aktarılması, rezervuarın daha temiz bir akımla doldurulması olarak açıklanabilir. Bu yöntem ince taneli malzemenin yıkanmasında oldukça etkilidir.

Rezervuara giren sedimentli akımın çökelmesine izin verilmeden mansaba aktarılması yöntemine, yoğunluk akımlarının yıkanması yöntemi de örnek olarak verilebilir. Bu yöntemde baraj su seviyesi düşürülmediği için; özellikle enerji üretme amaçlı barajlarda, eğer rezervuarlarında yoğunluk akımları oluşuyorsa, bu yöntem tercih edilmektedir.

Rezervuara giren sediment birikmiş/çökelmiş ise uygulanacak yöntemlerden biri yıkama yöntemidir. Bu yöntemde rezervuarda biriken sediment, büyük kapasiteli dipsavaklar yardımıyla yıkama etkisiyle mansaba aktarılır. İri taneli malzemenin yıkanmasında yıkama yöntemi oldukça etkilidir.

Yıkama ve boşaltma teknikleri bugüne kadar birçok rezervuarda uygulanmış, birbirinden farklı sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçlar birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Bu yöntemler olayın fiziksel oluşumunun anlaşılmasından daha çok, uygulamadan elde edilen deneyimlere dayanılarak geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin planlanmasında ortaya çıkan en önemli problem, boşaltma ya da yıkama zamanı ve süresinin belirlenmesidir.

Rezervuarda birikmiş/çökelmiş sedimentin uzaklaştırılması için hidrolik ve mekanik taşıma yöntemleri de mevcut olup, bunlar birçok rezervuarda uygulanmıştır. Bu yöntemlerin maliyeti yüksek olduğu için genellikle küçük rezervuarlarda ya da büyük rezervuarların lokal bölgelerinde, sedimentin aktarılması için kullanılır. Hidrolik veya mekanik tarama ile sifonlama yöntemleri, birikmiş sedimentin uzaklaştırılmasında kullanılan yöntemlere örnek olarak verilebilir.

7.2.1 Boşaltma yöntemi ve uygulamaları

Boşaltma *(sluicing)* yöntemi, sediment yoğunluklu akımın sedimentin çökelmesine zaman tanımadan, mansaba bırakılması olarak açıklanabilir. Bu yöntem genel olarak dolusavak ve verimli işletilen düşük seviyedeki dipsavaklar ile uygulanmaktadır.

Askıdaki sediment konsantrasyonu yüksek olan akımın rezervuardan boşaltılması, rezervuarda çökelmiş olan sedimentin yıkama ile mansaba aktarılmasından daha etkili bir yöntem olduğu kabul edilmektedir (Scheuerlein, 1987).

Bhatgard Barajı:

1892 yılında Hindistan'da inşa edilen Bhatgard Barajı, 600 m^3/s kapasiteli dipsavaklara sahiptir (Brown, 1943). Maksimum proje debisi Q=1450 m^3/s olan barajın rezervuarına gelen yıllık sediment yükünün büyük bir bölümü, rezervuarda askı halinde iken mansaba boşaltılabilmiştir.

Old Aswan Barajı:

Boşaltma işlemine en başarılı örneklerden biri, Mısır'da Nil Nehri üzerindeki Old Aswan Barajı olmuştur (Mahmood, 1987). Bu barajdaki işletmede, taşkın debileri rezervuardaki su seviyesini yükseltmeden mansaba bırakılmıştır. Rezervuarın doldurulması ise taşkın dönemi dışında gelen temiz su ile yapılmıştır.

Roseires Barajı:

Old Aswan Barajı'nda uygulanan sediment boşaltma tekniğinin aynısı Sudan'daki Blue Nile Nehri üzerinde bulunan Roseires Barajı'na da uygulanmıştır.

Ancak Roseires Barajı'nın rezervuarının daha büyük olması ve taşkın süresince gelen sediment yükünün büyük bir bölümünün rezervuarın yan yüzeylerine birikmesi nedeniyle, sediment boşaltma işleminden daha az verim alınmıştır (Mahmood, 1987).

Biriken sedimentin boşaltılması için yapılacak çalışmalarda, termal ve tuzlu yoğunluk tabakalaşmalarının daha dikkatli izlenmesi ve incelenmesi gerekir.

7.2.1.1 Yoğunluk akımlarının boşaltması

En etkili sediment boşaltma tekniği, yüksek konsantrasyonlu sediment yoğunluk akımlarını mansaba bırakmaktır *(venting density currents).*

Emda Barajı:

Cezayir'deki Emda Barajı rezervuarında, yoğunluk akımlarının boşaltılması başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Barajın rezervuarına gelen sediment yükünün %45'i yoğunluk akımları ile mansaba aktarılmıştır (Duquennois, 1956).

Yoğunluk akımları ile boşaltımın verimliği dipsavak kotuna ve kapasitesine, boşaltım süresince mevcut su seviyesine ve yıkama debisine bağlıdır (Fan, 1985).

Yoğunluk akımları ile boşaltma yönteminin verimli sonuçlar verdiği rezervuarlar aşağıda sıralanmıştır:

- Büyük debilerin girdiği, küçük depolama kapasiteli rezervuarlar,
- Yüksek konsantrasyonlu yoğunluk akımlarının bulunduğu rezervuarlar,
- Düşük göl seviyesinde, büyük kapasitelere sahip olan rezervuarlar,
- Mansaba bırakılan debilerin büyük olduğu rezervuarlar.

Rezervuar içerisinde kalan nehir yatağı düzensiz bir yatak enkesitine sahip olabilir. Bu nedenle bu enkesitler boyunca çökelecek malzemenin mansaba boşaltılabilmesi için barajın çeşitli seviyelerde birçok dipsavağa sahip olması gerekir.

Qued Necker Barajı:

Yoğunluk akımlarının dipsavağa doğru yönlendirilmesi, yıkama verimliliğini arttırır. Bu nedenle Fas'taki Qued Necker rezervuarında yoğunluk akımlarını dipsavağa doğru yönlendirmek üzere tabana yönlendirici duvarlar yerleştirilmiştir.

Yoğunluk akımları ile etkili bir boşaltma işlemi, normal türbülans difüzyonunun olduğu koşullarda ve mansaba yeterli suyun bırakılması halinde yapılabilir.

7.2.2 Yıkama yöntemleri ve uygulamaları

Rezervuardaki sedimenti yıkama (*flushing*) tekniğinde, rezervuardaki sedimentin yıkanarak taşınımı sağlanmaktadır. Bu yöntem için barajlarda uygun olarak projelendirilmiş ve verimli işletilen düşük seviyedeki dipsavaklara ihtiyaç vardır.

Yıkama yönteminde, dipsavakların aniden açılmasıyla akım hızlanır. Akımın yarattığı kesme kuvveti birikmiş sedimenti yerinden kopartır, harekete geçirir ve askı haline getirir. Askıdaki sediment akımın etkisiyle dipsavaklarla mansaba bırakılır (Şekil 7.4).



Şekil 7.4 : Jiroft Barajı'nda (İran) taşkın zamanı sediment yüklü akımın dipsavak ve dolusavaklarla mansaba aktarılması (Anonim, 2011).

Taşkın önleme amacıyla inşa edilmiş rezervuarlarda dolum ve boşaltım işletmeleri, kontrolsüz bir yıkama işletmesi olarak da kabul edilebilir.

Çin'de bulunan barajlarda yapılan yıkama örneklerini derleyen Fan (1985), uygulamanın mümkün olduğunca az miktarda sediment içeren suyun depolanması şeklinde olduğunu belirtmektedir.

Rezervuarda biriken sedimentin yıkanmasıyla ilgili çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler açıklamalarıyla birlikte Çizelge 7.1'de özetlenmiştir.

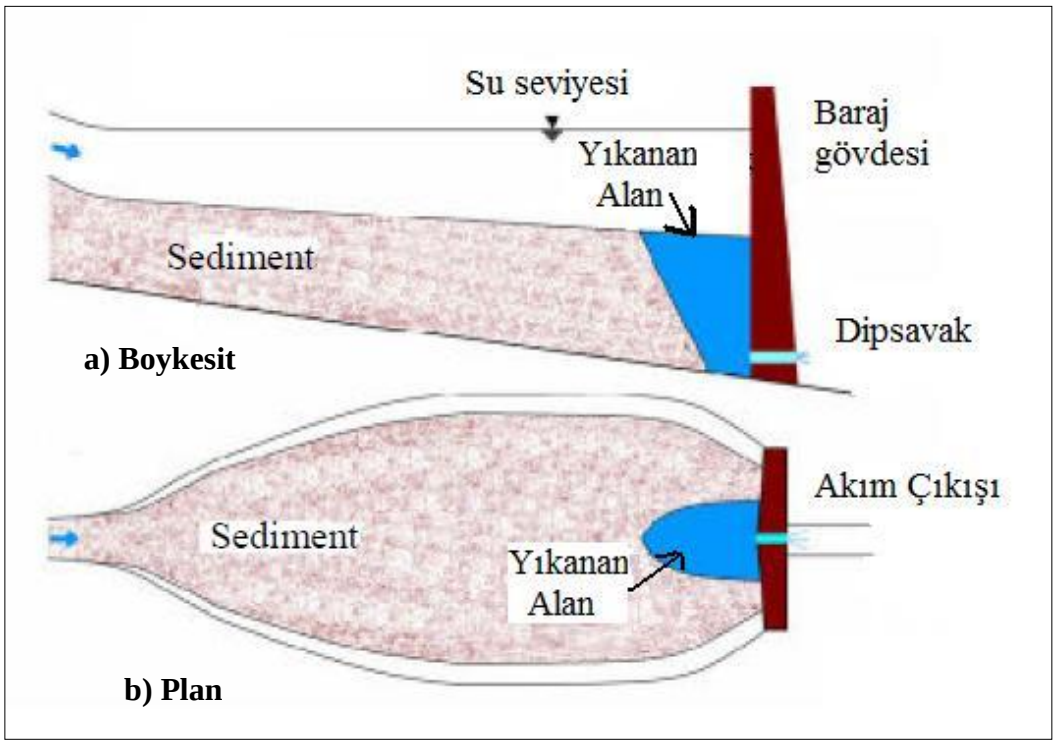
Çizelge 7.1 : Rezervuarları sediment birikiminden koruma yöntemlerinden biri olan yıkamanın çeşitleri (Yıldız ve Kaş, 2007).

Yıkama tipi	Sediment deşarjı	İşletme koşulu	Dipsavak koşulu	Oluşan koşul	Avantajları ve dezavantajları
Taşkın boyunca sedimentin ötelenmesi	**Deşarj < giriş akımı** Sediment girişi boyunca hidrolik alıkoyma zamanı çok azalırsa, sediment birikimi oranı da oldukça azalır.	Dipsavaklar en kısa sürede açılır veya taşkın süresince birikimi en aza düşürmek için rezervuar seviyesi mevsimsel olarak düşük tutulur.	Rezervuar su seviyesini çok alçak kotlara düşürebilmek için düşük seviyeli dipsavaklara ihtiyaç duyulur.	Alıkoyma zamanının en aza indirilmesi ile kil ve silt taneciklerinin çökelerek birikimine engel olunması sağlanır.	Birçok farklı projede sediment kontrolü için taşkınlar boyunca fazla su kullanabilir. Sedimentasyonu durduramaz.
Rezervuar su seviyesini alçaltarak yıkama *(Drawdown flushing)*	**Deşarj > giriş akımı** Uygun koşullar altında sediment birikimi önlenebilir.	Taşkın debisi artarken, rezervuar boyunca hızlı akım koşulu yaratmak için dipsavaklar en kısa sürede açılır.	Sediment yüklü taşkın akımını minimum mansap su seviyesi ile geçirebilme kapasitesine sahip dipsavaklar gereklidir.	Türbülanslı akım sedimenti askıda tutar ve daha önce çökelmiş sedimentin bir bölümünü tekrar harekete geçirebilir.	Çok uygun koşullarda sedimentasyonu önleyebilir.
Boşaltma ve yıkama *(Emptying and flushing)*	**Deşarj > giriş akımı** Uygun koşullar altında sediment birikimi önlenebilir ve kaybolan hacim, sediment erozyonu ile yeniden kazanılabilir.	Biriken sedimentin taşkın akımı ile mansaba taşınabilmesi için rezervuar taşkın dönemi boyunca boş tutulur.	Rezervuarı boşaltma kapasitesine sahip dipsavaklar. Bunların deşarj kapasitesi taşkın akımı değerinden daha düşük olabilir.	Türbülanslı akım sedimenti askıda tutar ve daha önce çökelen sedimentin bir bölümü mansaptan membaya doğru bir yıkama ile harekete geçebilir.	Tek amacı kaybolan hacmi yeniden kazanabilmektir. Ancak bu da belirli aralıklarla rezervuarın boşaltılmasını gerektirir.
Yoğunluk akımlarının boşaltılması *(Venting density current)*	**Deşarj < giriş akımı** Özel koşullar oluşturularak, çok ince taneli sedimentin çökelmesi önemli ölçüde azaltılır.	Yoğunluk akımları baraj bölgesine ulaştığında dipsavak vanaları açılır. Rezervuarın su seviyesinin düşürülmesi gerekli değildir.	Çamurlu akımın derinliğini en aza indirebilmek için, orta kapasiteli düşük seviyedeki dipsavaklara ihtiyaç vardır.	Kil ve silt taşıyan yoğunluk akımlarının bir bölümü mansaba bırakılır.	Rezervuardaki su seviyesinin alçaltılmasına gerek duyulmaz.

7.2.2.1 Basınçlı yıkama yöntemi

Yıkama işlemi su seviyesi sabit tutulup basınç altında gerçekleştirilirse, bu işleme *basınçlı yıkama* (*pressure flushing*) denir. Bu işlemde yıkamanın etkisi sadece dipsavağın çevresinde lokal bir alan olur.

Basınçlı yıkamadan sonra oluşan dipsavak çevresindeki yıkanmış alan *(flushing cone)* koni şeklindedir (Şekil 7.5). Bu yöntem küçük rezervuarlarda ya da büyük kapasiteli dipsavaklara sahip olan rezervuarlarda etkili olmaktadır (Qian, 1982).



Şekil 7.5 : Yıkanan alanın plan ve boykesitte görünüşü
(Meshkati Shahmirzadi ve diğ., 2010).

Literatürde basınçlı yıkama yaygın olarak incelenmiştir. Örneğin White ve Bettess (1984), ne kadar yıkamanın sediment yığınını harekete geçireceğini araştırmış ve (durgun suda) rezervuar derinliği, çıkış debisi ve yıkanmanın mesafesi arasındaki ilişkiyi gösteren bir diyagram çizmişlerdir.

Fang ve Cao (1996), araştırmalarında fiziksel model kullanmış ve büyük miktarlardaki sedimentin yıkamanın başında temizlendiğini göstermişlerdir. Bu tür yıkamanın etki alanının küçük olmasına rağmen, santral yapısına iri sedimentin geçişini engellemek gibi önemli bir role sahip olduğunu da belirtmişlerdir.

Basınçlı yıkama yönteminde dipsavağın hemen yakınındaki ince malzeme taşınır, vadilerin yan yüzeylerinde ve taşkın yataklarında biriken malzeme hareket etmez. Bu dipsavak işletmesinde genellikle koni şeklinde bir oyulma çukuru oluşur, şevlerinin eğimi doğal kayma açısına ulaşana dek çukur gelişir (Scheuerlein, 1987).

Scheuerlein ve diğ. (2004), yıkanan bölgenin 3 boyutlu ve ilgili parametrelerin çok olması nedeniyle, yıkanan bölgeyi analitik olarak açıklamanın çok zor olduğuna dikkat çekmişlerdir.

Şekil 7.6'de, İran'da bulunan Jiroft Barajı'nda basınçlı yıkama işlemi sırasında boşaltılan sedimentli akım görülmektedir.



Şekil 7.6 : Jiroft Barajı'nda basınçlı yıkama işlemi (Emamgholizadeh ve diğ., 2005).

Yıkama işlemi için kullanılacak dipsavak boyutlarının belirlenmesi için uzaklaştırılacak sediment hacminin ve yıkamadan sonra oluşacak koni şeklinde alanın ne kadar olacağının tahmin edilmesi gereklidir. Bu sebeple dipsavak boyutu ile yıkanan sediment hacmi arasındaki optimum ilişki iyi belirlenmelidir (Meshkati Shahmirzadi ve diğ., 2010).

Tasarım aşamasında dipsavak boyutlarına karar verilirken, dipsavak maliyeti ile yıkamadan sonra artan rezervuar hacminden elde edilecek fayda optimize edilerek değerlendirmeye katılmalıdır.

Literatürde ve uygulamada yıkanma işlemi için kullanılan dipsavaklar, *sediment savağı* ya da *sediment yıkama savağı* olarak da adlandırılmaktadır.

Dipsavak (sediment savağı) boyutlarının yıkanma alanına (konisine) etkisi:

Yıkanma konisinin hacmi ($V_{yıkanma}$) aşağıdaki değişkenlerin bir fonksiyonu olarak yazılabilir:

$$V_{yıkanma} = f\left(U_{çıkış}, A_{çıkış}, H_w, H_s, B_r, D_{50}, \rho_s, \rho, g, \upsilon\right) \qquad (\mathbf{7.1})$$

Burada kullanılan değişkenlerin tanımları aşağıda verilmiştir;

$U_{çıkış}$: dipsavak girişinde akımın hızı,

$A_{çıkış}$: dipsavağın kesit alanı,

H_w : dipsavağın ekseninden itibaren barajdaki su yüksekliği,

H_s : dipsavağın ekseninden itibaren birikmiş sedimentin yüksekliği,

B_r : rezervuarın genişliği,

D_{50} : sedimentin ortalama tane çapı,

ρ_s : sedimentin yoğunluğu,

ρ : suyun yoğunluğu,

g : yer çekimi ivmesi,

υ : kinematik viskozitedir.

Buckingham teoremine göre ρ, H_w ve $U_{çıkış}$ tekrarlanan değişkenler olarak alınırsa, aşağıda belirtilen boyutsuz parametreler elde edilir:

$$\pi_1 = \frac{V_{yıkanma}}{H_w^3}, \pi_2 = \frac{A_{çıkış}}{H_w^2}, \pi_3 = \frac{H_s}{H_w}, \pi_4 = \frac{B_r}{H_w}, \pi_5 = \frac{D_{50}}{H_w},$$

$$\pi_6 = \frac{\rho_s}{\rho}, \pi_7 = \frac{U_{çıkış}}{\sqrt{gH_w}} = Fr_{çıkış}, \pi_8 = \frac{\upsilon}{H_w\, U_{çıkış}} \qquad (\mathbf{7.2})$$

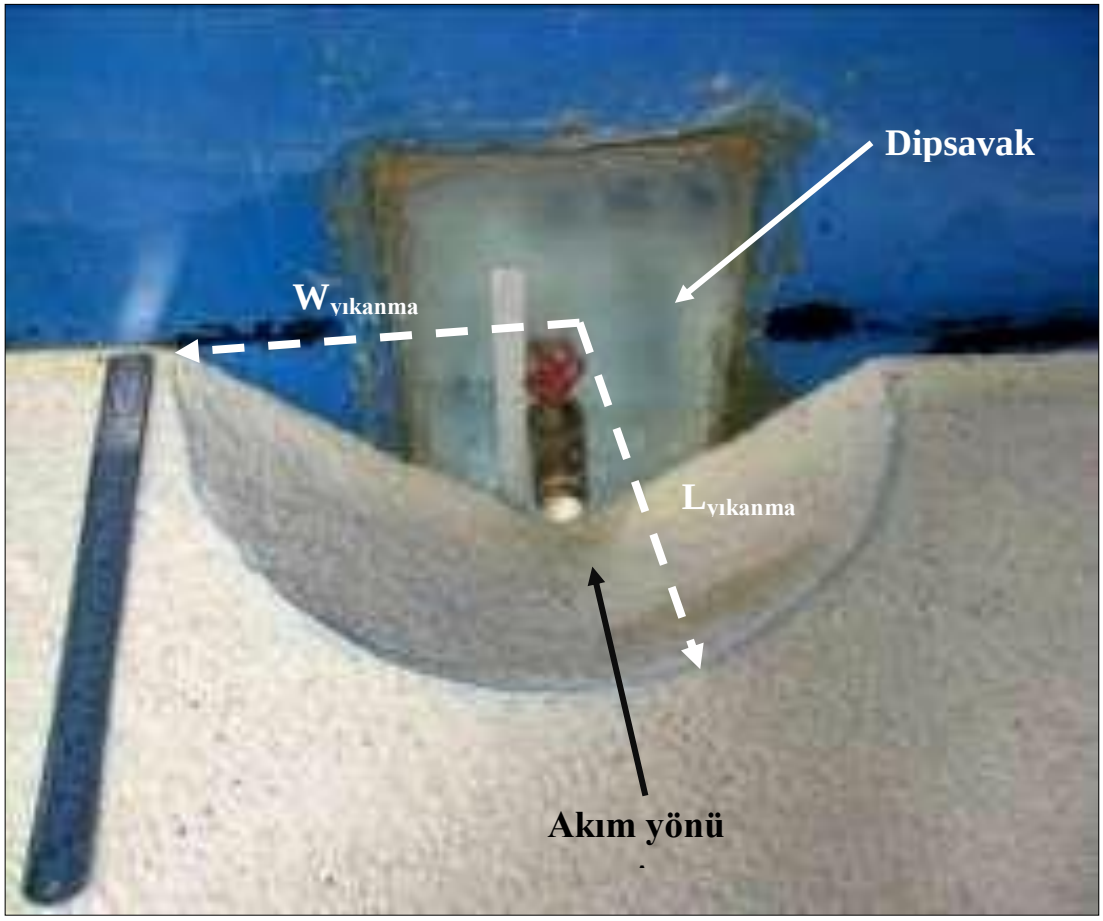
Burada ele alınan belirli bir baraj için H_s , B_r, D_{50} , ρ_s , ρ ve g sabittir. Ele alınan baraj için sabit değerler çıkartılırsa, boyutsuz değişkenler dört adet parametreye indirgenebilir:

$$\frac{V_{yıkanma}}{H_w^3} = f(\frac{A_{çıkış}}{H_w^2}, \frac{H_s}{H_w}, \frac{\overbrace{U_{çıkış}}^{Fr_{çıkış}}}{\sqrt{gxH_w}}) \qquad (7.3)$$

Aynı yaklaşım uygulanarak, $L_{yıkanma}$ (oluşan koninin en uzak noktasının dipsavak merkezine kadar uzaklığı) ve $W_{yıkanma}$ (dipsavak girişindeki yıkanma konisinin dipsavak eksenine olan uzaklığı) (Şekil 7.7) için de boyutsuz değişkenler yazılabilir:

$$\frac{L_{yıkanma}}{H_w} = f\left(\frac{A_{çıkış}}{H_w^2}, \frac{H_s}{H_w}, Fr_{çıkış}\right) \qquad (7.4)$$

$$\frac{W_{yıkanma}}{H_w} = f\left(\frac{A_{çıkış}}{H_w^2}, \frac{H_s}{H_w}, Fr_{çıkış}\right) \qquad (7.5)$$



Şekil 7.7 : Dipsavak çevresinde, yıkanma sonrası oluşan yarım koni şeklindeki bölge (Meshkati Shahmirzadi ve diğ., 2010).

Meshkati Shahmirzadi ve diğ.'nin (2010) Gorgan Üniversitesi (İran) Hidrolik Laboratuvarı'nda gerçekleştirdikleri küçük ölçekli deney sonucu ve boyutsuz analizler doğrultusunda; yıkanma sonrası oluşan koninin hacmi ($V_{yıkanma}$), genişliği ($W_{yıkanma}$) ve uzunluğu ($L_{yıkanma}$) için formüller geliştirmişlerdir:

$$\frac{V_{yıkanma}}{H_w^3} = 0.042(Fr)^{0.149}\left(\frac{H_s}{H_w}\right)^{3.082}\left(\frac{A_{çıkış}}{H_w^2}\right)^{0.174} \quad (\mathbf{7.6})$$

$$\frac{W_{yıkanm\ a}}{H_w} = 0.031(Fr)^{0.104}\left(\frac{H_s}{H_w}\right)^{0.733}\left(\frac{A_{çıkış}}{H_w^2}\right)^{0.146} \quad (\mathbf{7.7})$$

$$\frac{L_{yıkanma}}{H_w} = 0.031(Fr)^{0.104}\left(\frac{H_s}{H_w}\right)^{0.733}\left(\frac{A_{çıkış}}{H_w^2}\right)^{0.146} \quad (\mathbf{7.8})$$

Deney sonuçları, oluşan yıkanma konisinin boyutlarını etkileyen en önemli parametrenin dipsavağın kesit alanı ($A_{çıkış}$) olduğunu göstermiştir.

Literatürde yıkama işlemi sonrası oluşan koninin boyutlarına ilişkin olarak, prototipten gelen veya gerçek ölçüm sonuçlarına dayanan formüllere rastlanmamıştır.

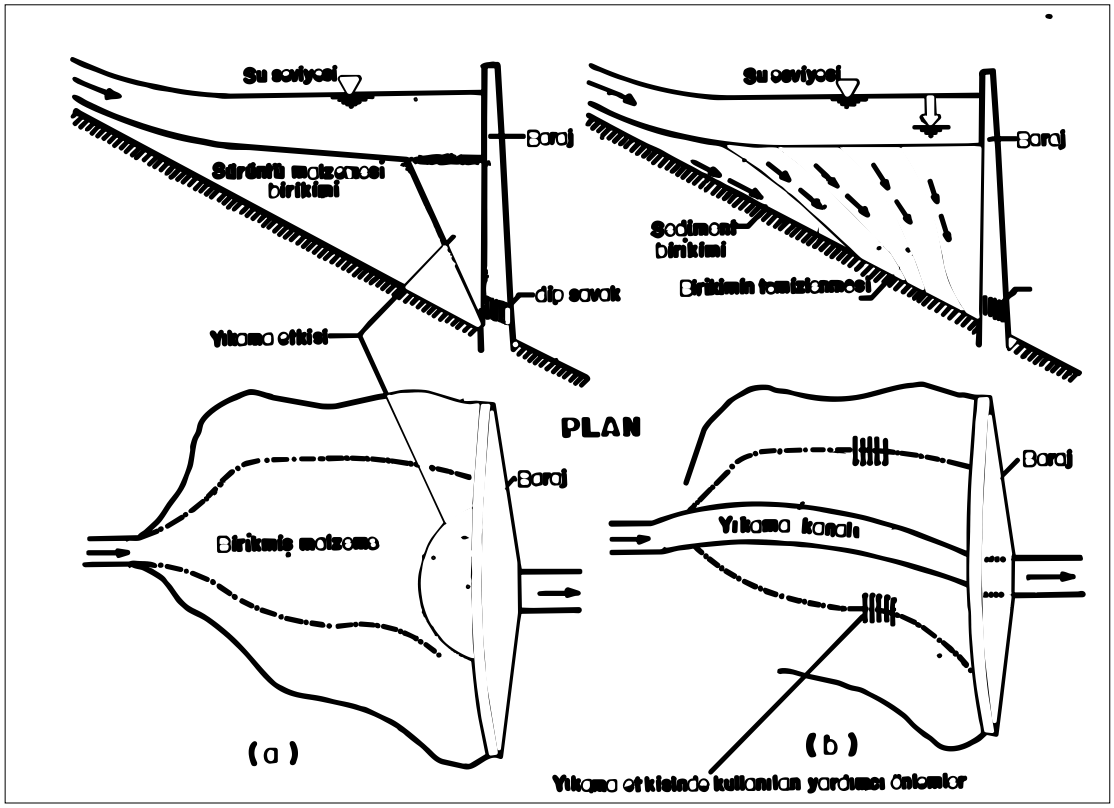
Sınırlı bir laboratuvar ortamında ve küçük ölçekli model deney sonuçlarından elde edilen formüller de yukarıda tanımlanan formüllere yakınlık göstermektedir.

Deney sonuçlarını prototipte veya gerçekte yapılan yıkama çalışmalarından elde edilecek parametreler ve ölçüm değerleri ile birlikte değerlendirip, sonuçları gerçek değerlere yakın yeni formüller geliştirmek gereklidir. Bu hem uygulamada çalışanların amaç ve ihtiyaçlarına daha doğru ve pratik çözümler sunmak için hem de literatür açısından anlamlı olacaktır.

7.2.2.2 Rezervuar su seviyesini alçaltarak yıkama

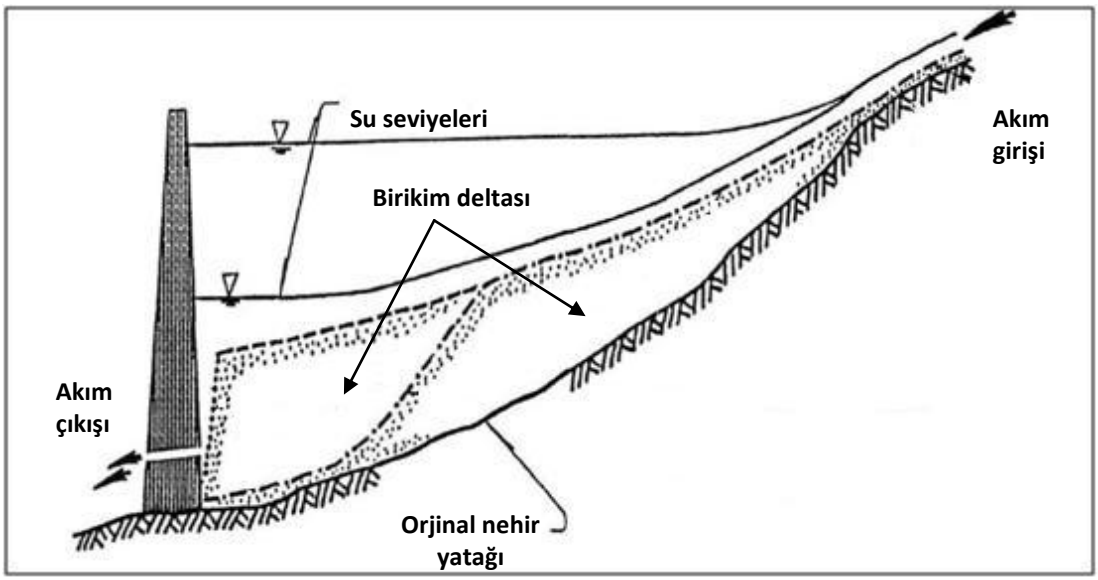
White ve Bettess (1984), yıkama işlemi için çıkış debisi sabit iken rezervuardaki su seviyesini düşürmenin (*drawdown flushing*), yıkama etkisini arttırdığını ve yıkanma konisinin membaya doğru genişlediğini göstermişlerdir.

Rezervuardaki su seviyesini düşürerek yıkama sırasında yıkama akımları, biriken malzeme içerisinde kendilerine derin bir kanal oluşturur. Başlangıçta dar olan bu kanal, periyodik olarak devam eden yıkama işlemlerinden sonra genişler (Şekil 7.8).



Şekil 7.8 : a) Su seviyesi düşürülmeden birikimin yıkama etkisiyle temizlenmesi
b) Su seviyesi düşürülerek birikimin yıkama etkisiyle temizlenmesi
(Wen Shen, 1999).

Fan (1985) yıkama işlemi için, taşkın mevsimi boyunca rezervuar seviyesinin nehrin ortalama akım seviyesine kadar düşürülmesini önermiştir. Bu durum, birikim deltasının iki ucundan başlayarak yıkanması sonucunu yaratır (Şekil 7.9).

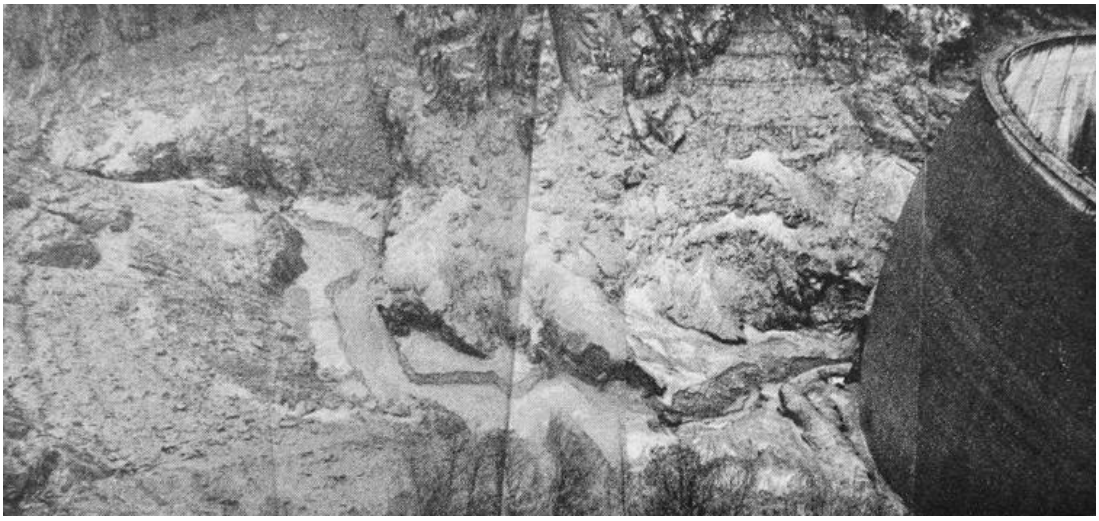


Şekil 7.9 : Birikim deltasının boykesitden görünüşü (Wen Shen, 1999).

Eğer akım sel rejiminde ise yıkama süresince, membaya doğru gelişen (negatif) bir eşik ve mansaba doğru ilerleyen (pozitif) bir eşik oluşur. Bu iki taban oluşumu birbirleriyle birleştiğinde yıkama işlemi tamamlanmış olarak kabul edilir. Bu işlem uzun bir rezervuarda, birkaç ay boyunca rezervuar su seviyesinin oldukça düşük kotlarda tutulması anlamına gelir. Çünkü yataktaki süreksizliklerin ilerleme hızı oldukça düşüktür (De Vries, 1976).

Gebidem Barajı:

1968 yılında, İsviçre'de Massa Nehri üzerinde kurulan Gebidem Barajı rezervuarında yapılan yıkama işlemleri Dawans ve diğ. (1982) tarafından incelenmiştir. Bu barajda rezervuar kapasitesi/giriş akımı oranı 0.02 olup dipsavağın ortalama yıkama debisi ise 115 m^3/s'dir. Yapılan incelemeler dipsavağın bir yılda en az 15 kez işletmeye alınması halinde, gelen sediment yükünün tamamen yıkanabileceğini göstermiştir. Rezervuarın yer aldığı vadi tabanının dar olması, yıkama verimliliğini attıran bir etkendir (Şekil 7.10).



Şekil 7.10 : 1968-1995 yılları arasında düzenli olarak yapılan yıllık yıkama işlemlerinden sonra Gebidem rezervuarının membasının genel görünüşü (Morris, 1996).

Gebidem Barajı'nın dipsavaklarının verimliliğini tespit etmek için yapılan model çalışmalarında, rezervuarın su seviyesi düşürülerek sediment yıkanması yapılmıştır. Bu işletme şekli aşağıdaki gibidir (Fan, 1985):

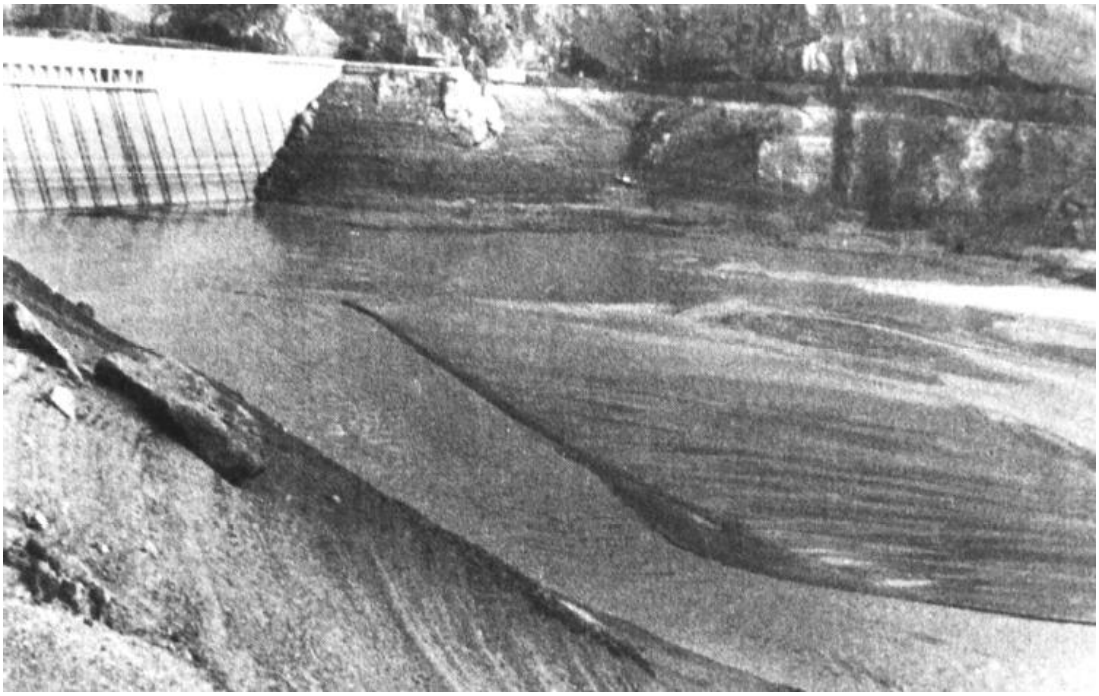
Orifis akımı: Rezervuardaki su seviyesi, elektrik üretimini etkilememesi için minimum su seviyesinden bir miktar yüksekte tutulmuştur. Orifis akımıyla yapılan yıkamada büyük debiler kısa sürelerle ve sık sık mansaba bırakılmıştır.

Serbest yüzeyli akım: Enerji üretiminin tümüyle kesilmesi durumu kabul edilerek bu yıkama işlemi yapılmıştır. Rezervuar minimum su seviyesine kadar boşaltılmıştır.

Sözü edilen yıkama teknikleri ile ilgili olarak Willi (1965), Hotchkiss ve Parker (1990), Schälchli (1987) tarafından laboratuvar çalışmaları yapılmıştır.

Sefidrud Barajı:

Cavor ve Slavic (1983), İran'daki Sefidrud rezervuarı için yaptıkları yıkama işlemini şöyle açıklamışlardır. Yıkama işlemi rezervuar su seviyesinin uygun olan en düşük seviyeye indirilmesine kadar sürekli olarak devam etmiş, daha sonra dipsavak tespit edilen minimum debiyi geçirecek şekilde ayarlanmıştır. Kararsız akım koşulları nedeni ile askıdaki malzeme miktarı artmış ve bu akım koşulları, yüksek sediment konsantrasyonunu baraj gövdesi yanına kadar getirmiştir. Daha sonra rezervuar su seviyesi yükseltilmiş ve yıkama işlemi tekrar edilmiştir (Şekil 7.11).



Şekil 7.11 : 1981-1982 yılları arasında, su seviyesi alçaltarak yapılan yıkama işlemi sırasında baraj membasından bir görünüş (Tolouie, 1989).

Santo Domingo Barajı:

Biriken sedimentin yıkanması için diğer bir yöntem ise Venezuella'daki Santo Domingo Barajı rezervuarına uygulanmıştır (Krumdieck ve Chamot, 1979).

Bu rezervuarda belirli aralıklarla serbest yüzeyli akım yıkaması ve basınçlı akım yıkaması yapılmıştır. Basınçlı akım ile 10 dakikalık periyotlarla yapılan yıkama sonunda baraj gövdesine yakın bölgede biriken sedimentin bir bölümü yıkanmış ve dipsavak önündeki çökelen malzeme ise borulanma etkisiyle temizlenmiştir.

Santo Domingo Barajı'nın sadece pik enerji ihtiyaçları için işletmeye alınması nedeniyle, rezervuardaki suyun tamamının yıkama için kullanılması sorun yaratmamıştır.

Rezervuarlarda bazen delta bölgesinden baraj gövdesi önündeki ölü hacim bölgesine sediment taşınımı olur. Ancak bu taşınımın aktif depolama kapasitesini ve rezervuarın işlevini doğrudan etkilemediği kabul edilmektedir.

Zuni Barajı:

New Mexico'daki Zuni Barajı rezervuarının %80'i sediment ile dolunca, sonradan inşa edilen 1.2x2 m boyutlarındaki düşey kapak kullanılarak 3 ayda 0.6 milyon m^3 sediment yıkanmıştır (Brown, 1943).

Sanmen Gorge Barajı:

Çin'de Sarı Nehir mansabında yer alan, 100 m yüksekliğindeki Sanmen Gorge Barajı 1960 yılında tamamlanmıştır.

Barajın işletmeye alındığı ilk iki yılda, nehrin 1 yılda taşıdığı sediment yükünün %90'ı olan $2.1x10^9$ ton sediment rezervuara çökelmiştir.

Bu barajda bir derivasyon tüneli ve yıkama işlemi için düzenlenen bazı dipsavaklar yardımıyla sedimentin yıkanmasına 1965 yılında başlanmıştır. 1970 yılında ise baraja başka derivasyon tünelleri ilave edilmiştir. Bu işletmeler nedeniyle barajdan üretilen enerji, planlanan enerjinin üçte biri olmuş ancak rezervuarda çökelen malzeme gelen malzemenin %90'ından %20'sine indirilmiştir (Robinson, 1981).

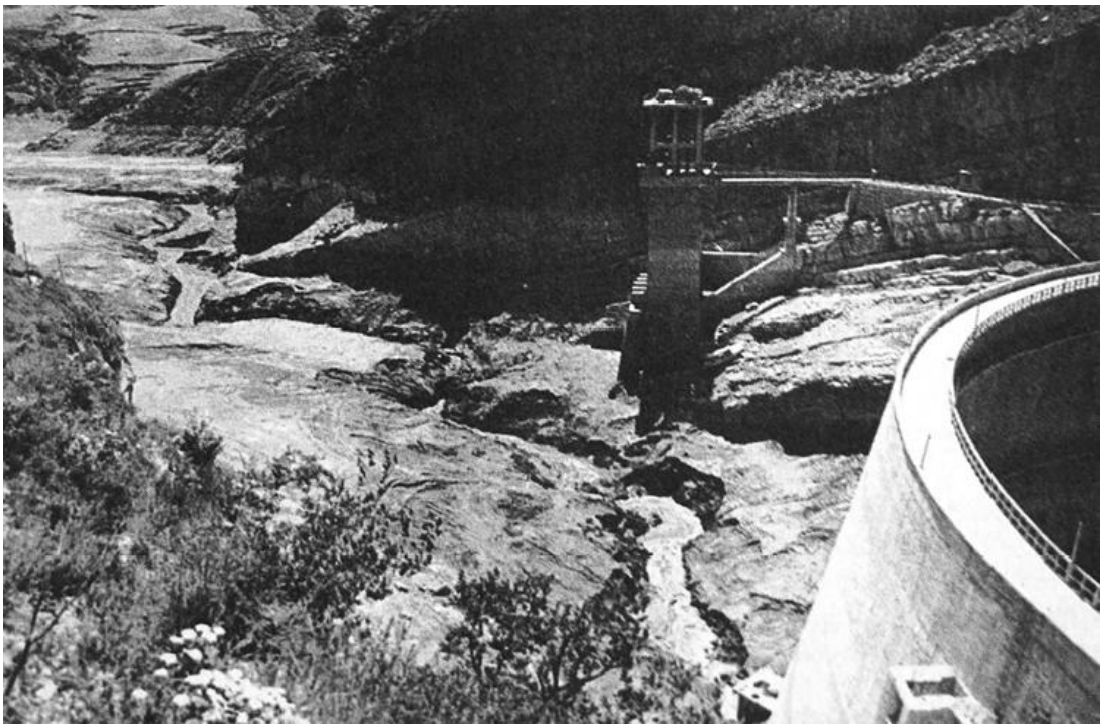
7.2.2.3 Boşaltma ve yıkama yöntemi

Rezervuarların boşaltılması işlemi daha çok depolama kapasitesi azalarak kullanım dışı kalan küçük rezervuarlarda uygulanmaktadır. Bu barajlarda küçük olan faydalı hacmin büyük bir bölümü, hemen baraj gövdesi yanında olduğu için dipsavak kapaklarının belirli bir süre açık bırakılması halinde, çökelen sedimentin bir bölümü akım tarafından yıkanabilmektedir (Yıldız ve Kaş, 2007).

Rezervuardaki boşaltma ve yıkama yöntemi, genellikle taşkın zamanında yapılan yıkamalar ile sediment birikiminin önlenemediği rezervuarlarda tercih edilmektedir.

Hengshan Barajı:

Çin'de yer alan Hengshan Barajı'na boşaltma ve yıkama yöntemi uygulanmıştır (Şekil 7.12). Taşkın koruma ve sulama amacıyla inşa edilmiş, küçük vadi tipinde olan rezervuarın uzunluğu 1 km, depolama kapasitesi ise $13.3x10^6$ $m^{3'}$tür.



Şekil 7.12 : Hengshan Barajı membasında biriken siltli malzeme içinde oluşmuş yıkama kanalı (Morris ve Fan, 1998).

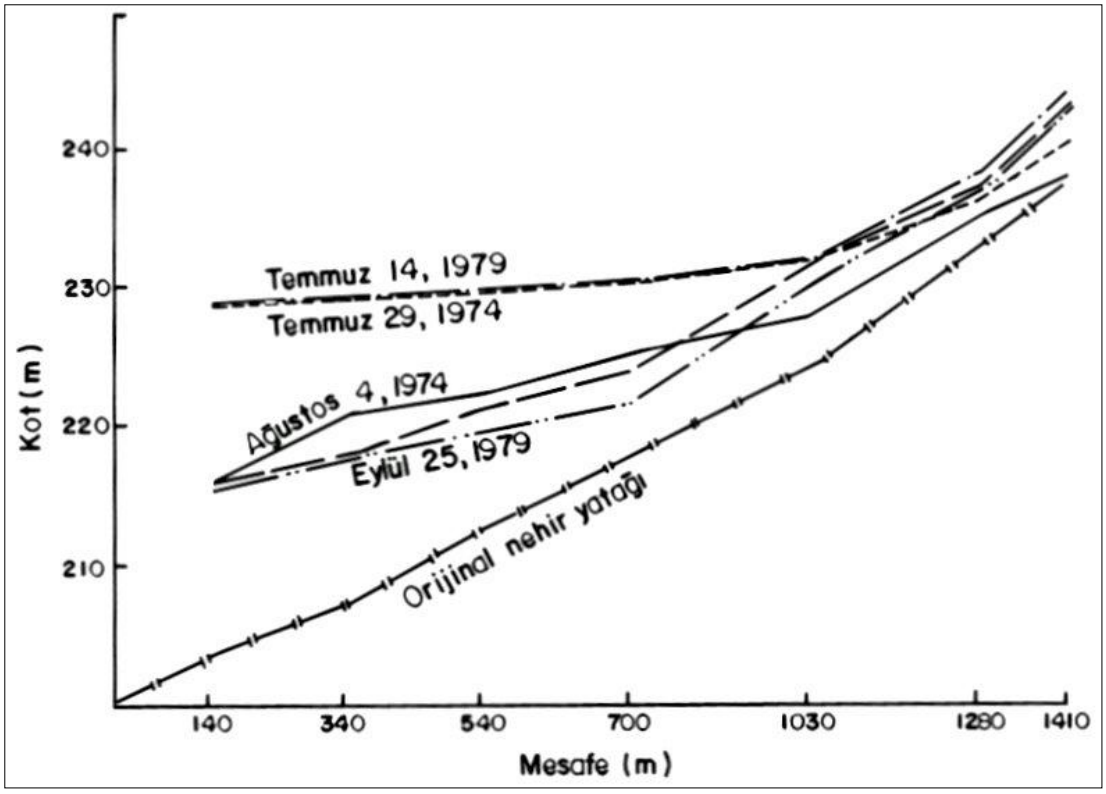
Yüksekliği 69 m olan Hengshan Barajı'nda orijinal nehir yatağından 2.6 m yukarıya yerleştirilmiş, 17 m^3/s'lik küçük bir dipsavak bulunmaktadır. Mansaba suyu bırakacak olan, barajın ana dip savağı 1260 m^3/s'lik deşarj kapasitesine sahiptir ve nehir yatağından 14.5 m yüksekliğe yerleştirilmiştir.

1966-1973 yılları arasındaki ilk sekiz yıllık işletme periyodunda, baraj rezervuarında $3.19x10^6$ m^3 sediment birikmiş ve barajın hemen membasında sediment yüksekliği 27 m'ye ulaşmıştır. Bu nedenle rezervuar 1974 yılında, 37 gün içinde boşaltılarak yıkanmış ve 0.8 $x10^6$ m^3 kadar depolama kapasitesi yeniden kazanılmıştır.

Bu yıkama işletmesinden sonra rezervuarda, 1979 Haziran ayına kadar yeniden su tutulmuş ancak bu süre içerisinde, tamamı yıkanmış olan ana nehir yatağı yeniden ve tamamen dolmuştur.

Hengshan Barajı rezervuarı ikinci kez, 1979 yılındaki taşkın döneminde 52 gün boyunca tekrar boşaltılarak yıkanmıştır. Bu işletmeden sonra $1.03x10^6$ $m^{3'}$lük rezervuar hacmi yeniden geri kazanılmış ve rezervuara çökelmiş olan sediment hacmi $2.62x10^6$ $m^{3'}$e düşmüştür.

Baraj rezervuarının boşaltılıp yıkanması öncesi ve sonrasında elde edilen boyuna kesitler Şekil 7.13'da verilmiştir.



Şekil 7.13 : Hengshan Barajı rezervuarı boşaltma ve yıkama işletmeleri önce ve sonrasında elde edilen boyuna nehir yatağı profilleri (Bruk, 1985).

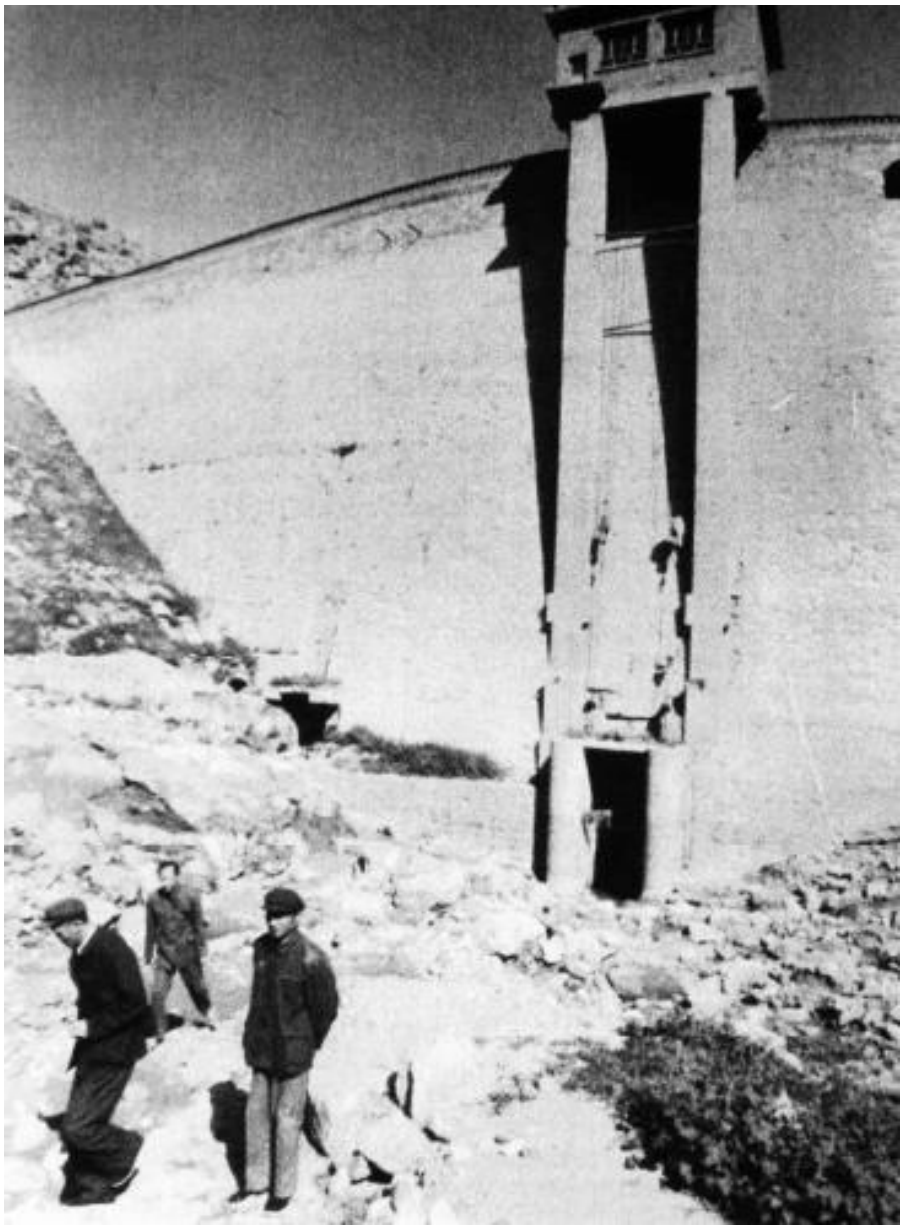
Hengshan Barajı'nın boşaltılmış rezervuarda yapılan yıkama işlemi etkili bir taşınım yaratmış ve mansaptaki sediment konsantrasyonu 1300 kg/m^3'e kadar ulaşmıştır.

Rezervuarın boşaltılması ve yıkanması işletmesinde, taşkın yatağına biriken sediment içerisinde oluşan yeni yatak daha sonra derinleşmiş ve membaya doğru uzanmıştır.

Boşaltma ve yıkamaya başlama zamanı ile yıkamanın sıklığı ve periyodunun belirlenmesi, rezervuar işletmesindeki en önemli problemlerdir.

Hengshan Barajı rezervuarında yapılan gözlemler, yıkama işlemi yapıldıktan sonraki 4-5 yıl içinde sediment birikimi olan ana kanaldaki sedimentin yıkama verimliliğinin çok yüksek olduğu ortaya koymuştur.

Taşkın debisinin rezervuara ulaşmasından önce boşaltılmış olan rezervuarlarda bu debiler, yüksek sürükleme gücü ile tam konsolide olmamış zeminleri harekete geçirip etkili bir şekilde mansaba taşımaktadırlar (Şekil 7.14).

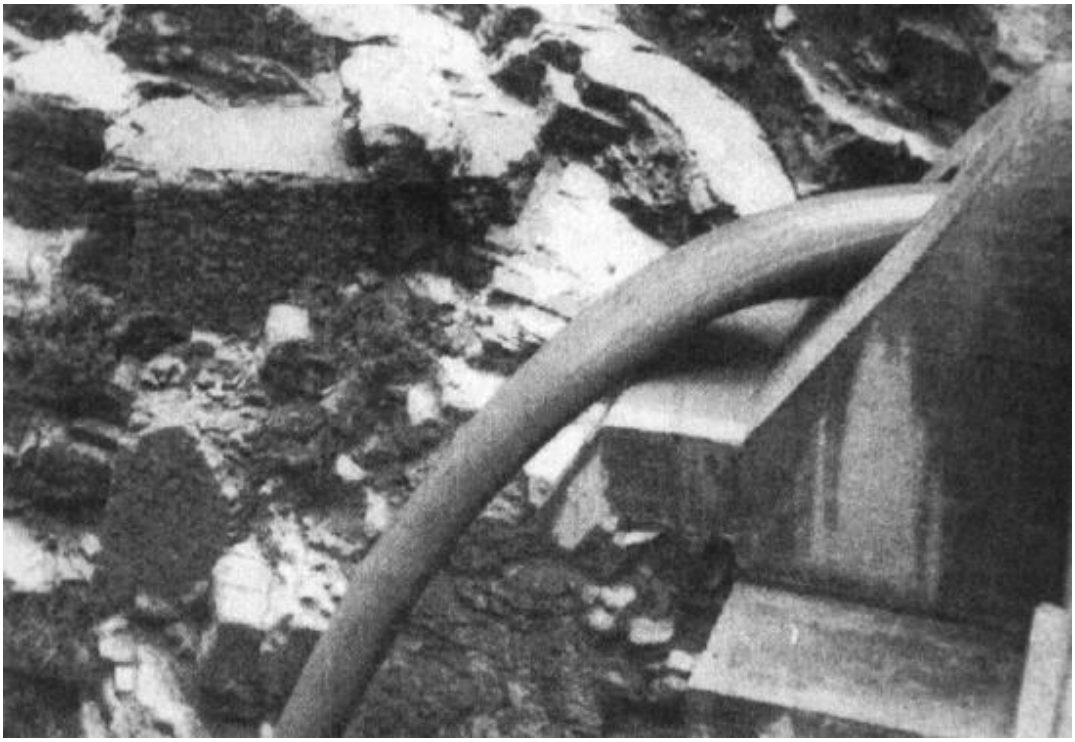


Şekil 7.14 : Dashikau Sulama Barajı'nın (Çin), biriken sedimentin yıkanması için taşkın sezonu öncesi boşaltılan rezervuarı (Morris ve Fan, 1998).

Rezervuarların yıkama periyodunun taşkın periyodu olarak belirlenmesi durumunda, yıkamadan sonraki dönemde rezervuarda çok ciddi bir sediment birikimi oluşmamaktadır (Yıldız ve Kaş, 2007).

7.2.2.4 Yoğunluk akımlarının yıkanması

Yoğunluk akımlarının mansaba aktarılması *(density current flushing)*, özellikle depolama amaçlı rezervuarlardaki sediment birikimini önleyen etkili bir yöntem olarak bilinmektedir (Şekil 7.15).



Şekil 7.15 : Steeg Barajı'nda (Cezayir) küçük çaplı ve düşük seviyedeki dipsavaktan yoğunluk akımının mansaba bırakılması (Morris ve Fan, 1998).

Yoğunluk akımları konusunda bazı laboratuvar çalışmaları yapılmış olup, bu çalışmalarda yoğunluk akımlarının oluşturulmasında tuzlu su ve bulanıklık akımları kullanılmıştır (Schoklitsch, 1929).

Guanting Barajı:

Çin'deki Guanting Barajı rezervuarında su seviyeleri, 1955 yılı ağustos ayından önce geniş bir aralıkta değişim göstermiştir. Rezervuar bu süre içerisinde birçok kez boşaltılmıştır.

Bu barajda taşkın debilerinin geçtiği sürede, dipsavak kapakları kısmi açık olarak işletilmiş, rezervuarda su tutulması süresince de kapalı tutulmuştur. Taşkın debilerinin ötelenerek mansaba bırakıldığı dönemde, kapaklar kısa sürelerle açılıp rezervuar su seviyesinin düşürülmesi şeklinde bir işletme uygulanmıştır.

Bu işletme koşullarında 1953-1957 yılları arasında rezervuarda $268.3x10^6$ ton sediment birikmiştir. Bu miktar rezervuara giren toplam sedimentin %63.4'üne karşılık gelmektedir.

Rezervuarda biriken sediment, rezervuarın boşaltılarak yıkanması ve yoğunluk akımlarının mansaba bırakılması yöntemleri ile mansaba aktarılmaya çalışılmıştır. Rezervuar 1956-1957 yılları arasında doldurulurken, yoğunluk akımlarının mansaba bırakılması ile rezervuara giren toplam sedimentin %8.3'ü mansaba aktarılmıştır.

Rezervuara giren silt ile mansaba bırakılan silt oranı yoğunluk akımları ile yıkama verimliliği olarak ele alınırsa, bu oranın %8 ile %60 arasında değiştiği görülmüştür.

Fengjiashan Barajı:

Kuzeybatı Çin'de yer alan ve $398x10^6$ m^3 depolama kapasitesine sahip Fengjiashan Barajı, Sarı Nehir Havzası içinde bulunan Wei Ho Nehri üzerine 1974 yılında inşa edilmiştir.

Bu rezervuarda yapılan araştırmalar, giren debinin 50 m^3/s'den ve sediment konsantrasyonunun da 30 kg/m^3'den daha büyük olması halinde, bütün rezervuar boyunca baraj gövdesine doğru hareket eden yoğunluk akımlarının oluşabileceğini ortaya koymuştur.

Fengjiashan Barajı projelendirilirken, rezervuarın korunabilmesi için yoğunluk akımlarının mansaba bırakılması düşünülmüştür. Rezervuara gelen taşkınları ve yoğunluk akımlarını mansaba bırakmak ve rezervuarı boşaltmak için nehrin sağ ve sol kıyılarına açılan tünel ve dipsavaklar kullanılmıştır.

Barajın üzerinde bulunduğu nehrin yıllık akışı $485x10^6$ m^3 olup bunun %44'ü taşkın sırasında oluşmaktadır. Rezervuara giren $4.96x10^6$ ton sedimentin %84'ünün taşkın debileri ile geldiği belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde maksimum sediment konsantrasyonu 604 kg/m^3, ortalama konsantrasyon 9 kg/m^3 olarak tespit edilmiştir.

Fenjiashan Barajı rezervuarında 1976-1980 yılları arasında, yaklaşık 14 kez yoğunluk akımları ölçülmüş ve yoğunluk akımlarındaki maksimum sediment konsantrasyonu 676 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. Her bir taşkın döneminde rezervuardan boşaltılan sedimentin rezervuara giren sedimente oranı; taşkının özelliklerine, rezervuarın uzunluğuna ve giren sedimentin karakteristiklerine bağlı olarak %23 ile %65 arasında değişmiştir.

Fengjiashan Baraj gövdesinde, nehir yatağının hemen üstünde ve daha üst kotlarda deşarj kapasitesi yüksek dipsavaklar yer almaktadır.

Fengjiashan Barajı rezervuarının topoğrafik özellikleri ve barajdaki dipsavaklar, yoğunluk akımlarının etkili bir şekilde yıkanmasına olanak tanımıştır. Fengjiashan rezervuarının bulunduğu nehir yatağının eğimi oldukça yüksek olup, su toplama havzasında çok ince taneli malzeme yer almaktadır.

Barajın rezervuarında yapılan işletme çalışmaları ve incelemeler, dipsavakların daha uygun bir şekilde işletilmesiyle daha fazla sedimentin mansaba aktarılabileceğini ortaya koymuştur.

Nebeur Barajı:

Nebeur Barajı, Kuzeybatı Tunus'ta Mellegue Wadi Nehri'nin üzerinde yer almaktadır. 65 m yüksekliğindeki barajın su toplama havzası 10300 km^2 olup, havzanın %46'sı çıplak ve erozyona açık bir yapıdadır. Nehrin yıllık akış miktarı ise $180x10^6$ m^3'tür (Abid 1980).

Sulama ve enerji amaçlı inşa edilen baraj 40000 ha'lık bir alanı sulamakta, yılda $17x10^6$ KWh enerji üretmektedir. Barajda 2 adet 12.5 m^3/s'lik ve 1 adet 1 $m^{3/}$s'lik vana bulunmaktadır.

Yoğunluk akımının yoğunluğu yaklaşık 1.08 kg/m^3 olduğunda, akım 1 m^3/s'lik vana ile mansaba bırakılmakta; yoğunluğun bu değeri aşması halinde diğer 2 büyük vana devreye sokulmaktadır. Akımın yoğunluğunun 1.02 kg/m^3 değerinin altına düşmesi halinde işletme durdurulmaktadır. Bu işletme ile 1954-1980 yılları arasında $90.7x10^6$ ton sediment mansaba aktarılmıştır. Bu dönemde rezervuara giren sedimentin mansaba bırakılan sedimente oranı yaklaşık %60 olmuştur.

Yoğunluk akımlarının rezervuardaki hareketi:

Fan ve diğ. (1962), yoğunluk akımlarının rezervuardaki davranışlarını incelenmiş, Lake Mead ve Guanting rezervuarlarından elde ettiği verilerle bu konuda yaklaşık sonuçlar veren bir yöntem geliştirmiştir.

Bu yönteme göre, rezervuarlardan yoğunluk akımları ile mansaba bırakılan sediment konsantrasyonu:

- Rezervuarın topoğrafyasına,
- Rezervuara giren debi miktarına,
- Rezervuara giren sediment miktarı ve özelliklerine,
- Dipsavağın rezervuar tabanından olan yüksekliğine,
- Dipsavak deşarj kapasitesine,
- Yıkama debisine,
- Rezervuarın uzunluğuna,
- Mansaba boşaltım esnasındaki rezervuar su kotuna bağlıdır.

Yoğunluk akımları, barajın ilk işletme döneminde rezervuardaki orijinal nehir yatağı boyunca ilerler; orijinal nehir yatağının sediment ile dolmasından sonra, daha geniş bir rezervuar tabanı üzerinde hareket eder. Bu durumda yoğunluk akımı birim debisi ilk işletme dönemine nazaran azalır.

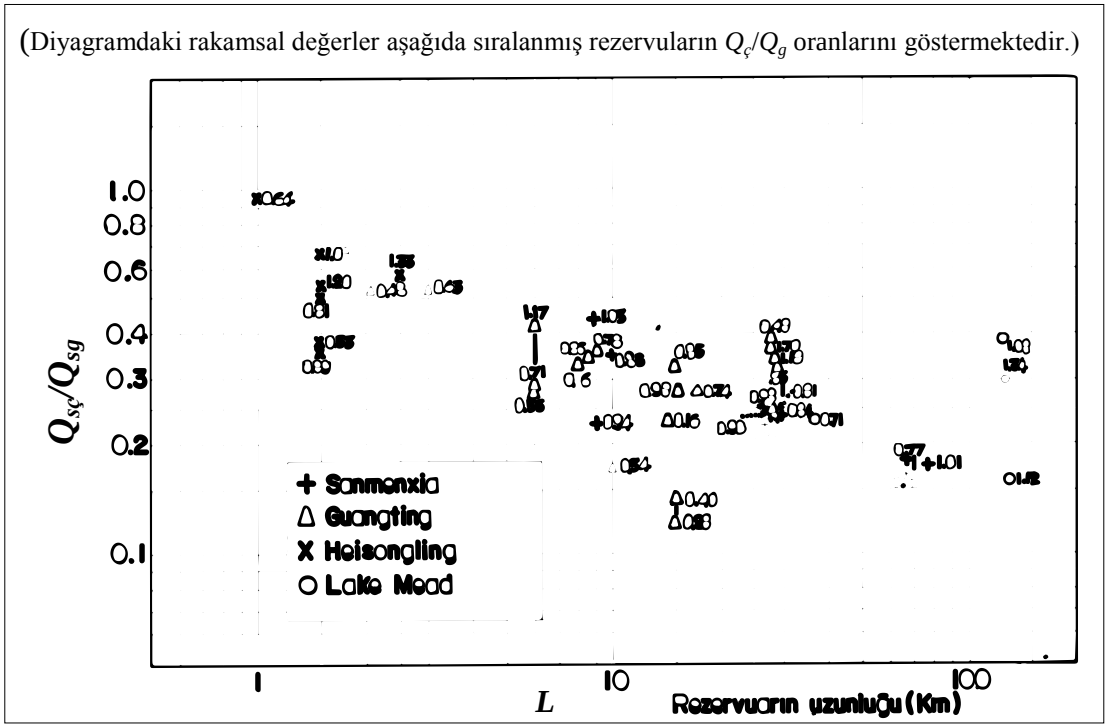
Küçük rezervuarlara giren büyük debilerle, düşük seviyede ve büyük çaplı dipsavaklarla ve büyük debi çıkışlarıyla daha etkili bir sediment boşaltımı yapılabilmektedir.

Bir taşkın döneminde yoğunluk akımları ile mansaba bırakılan sediment miktarının ($Q_{sç}$), rezervuara giren sediment miktarına (Q_{sg}) oranıyla ilgili bazı sonuçlar Çizelge 7.2'de verilmiştir.

$Q_{sç}$ rezervuardan çıkan sediment miktarını, Q_{sg} yoğunluk akımı ile rezervuara giren sediment miktarını, L rezervuar uzunluğunu, Q_g rezervuara giren taşkın debisini, $Q_ç$ rezervuaradan çıkan debiyi göstermek üzere; $Q_ç/Q_g$'ye karşı, $Q_{sç}/Q_{sg}$ ile L arasındaki ilişkiyi gösteren diyagram Şekil 7.16'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.2 : Taşkın döneminde bazı rezervuarlardan yoğunluk akımları ile mansaba bırakılan sedimentin rezervuara giren sediment miktarına oranları (Bruk, 1985).

Barajın Adı	Rezervuarın Uzunluğu (km)	$Q_{sç}/Q_{sg}$
Heisonlin	2	0.16 - 0.59
Fengjiashan	12 - 14	0.23 - 0.65
Guanting	10.1 - 16.8	0.20 - 0.29
Guanting	4.8 - 8.5	0.19 - 0.34
Sanmenxia	80 (1961)	0.18 - 0.21
Lake Mead	128	0.18 - 0.39



Şekil 7.16 : Taşkın zamanı, $Q_ç/Q_g$ oranına karşı $Q_{sç}/Q_{sg}$ oranının rezervuarın uzunluğu ile ilişkisi (Fan ve Jiang, 1980).

Şekil 7.16'da görüldüğü üzere rezervuar uzunluğu *(L)* kısaldıkça, rezervuardan çıkan sediment ile rezervuara giren sediment arasındaki oran ($Q_{sç}/Q_{sg}$) artmaktadır.

Aynı durum sedimetin akım ile ilişkisi için de geçerlidir. Rezervuardan çıkan debi ile rezervuara giren debi arasındaki oran ($Q_ç/Q_g$) arttıkça, rezervuardan çıkan sediment ile rezervuara giren sediment arasındaki oran ($Q_{sç}/Q_{sg}$) da artmaktadır.

7.2.2.5 Yıkama yöntemlerinin etkinliği ve kriterleri

Yıkama yöntemlerinin etkinliği konusunda birçok görüş vardır. Bu konudaki araştırmacılardan Breusers ve diğ. (1982), genel olarak hidrolik yıkama yöntemlerinin çok etkili olmadığını ileri sürmüştür. Bunun nedeni olarak, büyük debilerle yıkama yapılsa bile sadece dipsavağa yakın bölgedeki malzemenin harekete geçirilip yıkanabildiğini göstermiştir. Ancak rezervuar su seviyesinin alçaltılması ile yapılan yıkama işlemlerinin çoğu zaman başarılı sonuçlar verdiği de bilinmektedir.

Yoğun sediment birikimi beklenen rezervuarların projelendirme aşamasında, projenin yıkama etkinliği göz önüne alınarak incelenmesi gerekli ve önemlidir. Yıkama etkinliği, yıkama için kullanılan su ve yıkanan sediment hacmi ilişkisi veya fayda-maliyet analizi göz önüne alınarak tanımlanabilir (Mahmood, 1987).

Rezervuardaki yıkamaların verimliliği doğal koşullardan (iklim, topoğrafya vb), proje kriterlerinden ve rezervuarın işletilmesinden etkilenir. Doğal koşulların oldukça değişken olması nedeniyle, diğerleri ihtiyaca göre belirlenip uygulamaya konulabilir. Örneğin bir rezervuarın boyutları o bölgenin topoğrafyası ile belirlenir. Ancak dipsavak boyutları ihtiyaca göre değiştirilebilen boyutlardır.

Yıkamanın etkinliği ve yıkama kriterleri aşağıda sıralanmıştır (Yıldız ve Kaş, 2007):

- Yıkama işleminin başlatılması için en uygun koşul, taşkın debisi gelmeden önce konsolide olmamış biriken malzeme ile çok düşük su seviyesinin bulunduğu veya boş bir rezervuar koşuludur.
- Rezervuara giren katı atıkların dipsavak girişini kapatmasını engellemek için, rezervuar doldurulmadan bu maddelerin temizlenmesi gereklidir.
- Malzemenin yığılma oluşumu *(armouring processes)* ve oluşan kil tabakaları yıkama verimliliğini büyük oranda azaltabilir.
- Yıkama işlemi yılda en az bir kere yapılmalıdır.
- Yıkama işlemi dar vadi tipindeki rezervuarlarda çok daha etkilidir (daha geniş rezervuarların taşkın yataklarına biriken malzeme yıkanamamaktadır).
- Qian (1982), rezervuar su seviyesinin yüksek olduğu koşullarda su seviyesini düşürmeden yapılan yıkamanın, sadece giren debi/rezervuar kapasitesi oranının küçük olduğu rezervuarlarda ve büyük debilerin deşarjı halinde etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Bunun yanı sıra rezervuar su seviyesinin düşürülmesi ile yapılan yıkamanın *(drawdown flushing)*, sadece yıllık su girişleri kesin olarak bilinen rezervuarlar için uygun olduğu kabul edilmektedir.

- Rezervuardaki yıkama işleminin diğer yöntemlerle (mekanik yöntemler) birlikte uygulanması, yıkama için kullanılan su tüketimini azaltmaktadır.
- Scheuerlein (1987) su seviyesi düşürülerek yapılan yıkamanın, yıkanan kanalın yan yüzeylerindeki sedimenti mekanik olarak harekete geçirecek çalışmalarla desteklenmesi halinde, daha etkili olacağını belirtmiştir.
- Yıkama tekniğinin uygulamasının düşünüldüğü barajlarda, proje aşamasında alternatifli işletme kurallarından, yeterli sayıda düşük seviyeli dipsavağın projelendirilmesine kadar birçok konunun ele alındığı dikkatli bir çalışmanın yapılmasına ihtiyaç vardır.
- Araştırmacılar tarafından yapılan gözlemler, rezervuardaki su seviyesinin baraj yüksekliğinin yaklaşık olarak yarısından az olduğu durumda ve rezervuara giren debinin ortalama debinin en az iki katına çıkması halinde etkili bir yıkamanın mümkün olduğunu ortaya koymuştur.

  Bunun yanı sıra küçük kapasiteli dipsavakların bazen yoğunluk akımlarının deşarjında etkili olduğu, ancak genellikle bölgesel bir alanın yıkanması açısından yarar sağladığı ileri sürülmüştür.
- Ackers ve Thompson (1987), rezervuarın aktif depolama hacminin rezervuara giren yıllık ortalama akıma oranının 0.5'den düşük olduğu veya aktif depolama kapasitesinin yarıya indiği sürenin 100 yıldan daha az olduğu ortalama büyüklükteki rezervuarlar için yıkamanın etkili olabildiğini öne sürmüştür. Bu durumda aktif depolama kapasitesinin yarıya indiği sürenin 20 yıldan az olduğu rezervuarlarda boşaltma ve yıkama önlemlerinin alınması bir zorunluluktur.
- Küçük veya geçici rezervuarlardaki yıkamalar, çok büyük su kaybına neden olduklarından genellikle uygulanmazlar.
- Paul ve Dhillon (1988), yıkama işleminin daha etkili olarak yapılabilmesi için aşağıdaki koşulları önermişlerdir:
  - Dipsavak üzerinde alçak su seviyesi,
  - Mümkün olan en yüksek debi,
  - Geniş düşey kapaklar (*wider sluice*),

- Dipsavakların derine yerleştirilmesi,
- Yıkama süresinin arttırılması,
- Taban eğiminin yüksek olması,
- Yıkamaya, biriken malzemenin baraj gövdesine uzaklığı 100 ile 200 m'den daha fazla iken başlanması,
- Yıkama işleminin kesintili olarak yapılması,
- Rezervuar su seviyesinin hızlı bir şekilde düşürülmesi ve yıkamanın mümkün olduğunca hızlı bir şekilde yapılması (*Rapidly drawdown*).

- Yıkama işleminde kullanılacak dipsavakların optimum boyutları için elde edilen projelendirme eğrileri Paul ve Dhillon (1988) tarafından çizilmiştir. Bu eğrilerde dipsavak yüksekliği arttıkça, yıkanan sediment hacminin azaldığı görülmektedir. Dipsavak çapının optimum boyut olarak kabul edilen 1.5-2.5 m'den daha büyük olması durumunda, boşaltma işlemi daha etkili sonuç vermektedir.
- Breusers ve diğ. (1982) yıkamanın bazı istenmeyen etkilerini göz önüne alarak, deltada biriken malzemeyi yıkamak yerine alçak su seviyelerinde iş makineleri ile taşınmanın daha uygun olduğunu ileri sürmüştür.

Yıkama yöntemlerinin etkinliğini tartışırken, yıkama işlemi boyunca büyük debilerin ve sediment yüklerinin nehir morfolojisini bozan, yapıları tahrip eden etkiler oluşturabileceği de göz ardı edilmemelidir.

Yapılacak bir yıkamanın baraj mansap bölgesine olası etkileri, aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- Membadan gelen sediment miktarı, mansaptaki akımın taşıma kapasitesinden fazla ise mansapta aşınma meydana gelir.
- Sadece ince taneli sedimentin yıkanması halinde, mansapta daha düşük su seviyeleri oluşur.
- Debinin nehir yatağı kapasitesini aşması halinde, yıkanan ince taneli sediment genellikle taşkın yataklarında çökelir.
- Yıkanan sediment miktarının büyük olması halinde; nehir tabanında seviye yükselmesi olur, nehir yatağının taşkın debi değerlerini geçirebilmesi güçleşir.
- Dipsavaklar membadan taşınan sediment ile tıkanabilir (Şekil 7.17) veya dipsavaklarda kavitasyon veya aşınma hasarları oluşabilir.



Şekil 7.17 : Çubuk I Barajı dipsavağı önünde sediment birikimi (Yıldız ve Kaş, 2007).

- Sediment yoğunluklu akımın aniden boşaltılması sonrasında, barajın hemen mansabında nehir yatağı tabanında geçici olarak yükselmeler oluşur. Bu durum nehir yatağı kesitini daraltır, hatta kapatarak taşkınlara neden olabilir. Balıkların yumurta bıraktıkları bölgelerde de bozulmalar oluşur.
- Aniden bırakılan yüksek debiler, baraj topuğu bölgesinde ilave oyulmalar yaratarak baraj stabilitesini tehlikeye sokabilir (McManus, 1985).
- İçinde çevresel kirlilik yaratabilecek bazı maddelerin bulunduğu sedimentin yıkanması su kalitesini ve ekolojiyi bozar.
- Dipsavakların ani açılması ve kapanması, özellikle küçük rezervuarlarda ve nehir yatağında kütlesel salınımlar yaratabilir. Bu durum kanal kaplamalarında hasarlara neden olabileceği gibi nehir ulaşımı açısından da sorunlar yaratabilir.
- Rezervuar su seviyesinin aniden düşürülmesi, vadi yamaçlarının stabilitesini tehlikeye sokabilir. Bu nedenle yamaçlarda kaymalara ve hatta heyelan oluşumuna karşı dikkatli olunmalıdır.
- Yıkama işlemleri genellikle uzun süre aldığından rezervuardaki su seviyesinin düşürülmesi, rekreasyon amaçlı rezervuarda ulaşım açısından istenmeyen koşullar ortaya çıkarabilir.

7.2.3 Sedimentin taranarak uzaklaştırılması ve uygulamaları

Sedimentin taranarak uzaklaştırılması, rezervuar kapasitesinin korunabilmesi için uygulanan mekanik taşıma yöntemleri arasında yer almaktadır.

Fan (1985), aşağıdaki sıralanan durumlar için rezervuarda tarama (*dredging*) işleminin uygulanabileceğini dile getirmiştir:

- Yıkama işleminin başarılı olmadığı, yıkama için yeterli suyun bulunmadığı veya yıkama işlemi için büyük bir enerji tüketiminin gerektiği (kohezyonlu sedimentin bulunduğu rezervuarlar, geçici nehir yatakları veya enerji amaçlı küçük rezervuarlar),
- Çevirme kanallarının yapımının fiziksel ve ekonomik olarak mümkün olmadığı,
- Su ihtiyacı nedeniyle rezervuar kotunun düşürülmesine izin verilmediği,
- Baraj kret kotunun yükseltilerek rezervuar hacminin arttırılabilmesinin mümkün olmadığı,
- Rezervuar seviyesini düşürerek veya rezervuarı boşaltarak yapılan yıkamanın oluşturacağı enerji kaybından dolayı, rezervuardaki sediment birikimini azaltma işleminin ekonomik olmaması gibi durumlarda tarama işlemi yapılabilir.

Rerzervuarlarda tarama işleminin verimliliği (taşınan malzemenin hacminin daha fazla, kaybedilen suyun daha az olması açısından), yıkamanın verimliliğinden çok daha yüksek olmaktadır.

Tarama işlemiyle rezervuarın yan yüzeyleri veya deltanın oluştuğu bölgedeki birikimler taşınabilmekte, membada su yüzü kabarma bölgesinde oluşan yığılmalar (*backwater deposits*) da temizlenebilmektedir.

Bu işlemdeki minimum su kaybı avantajına karşın işlem süresince çökeltme kapasitesinin (*limited desilting capacity*) azalması, karıştırma ile askı haline geçen malzemenin oluşturduğu kirlilik gibi olumsuz etkileri vardır (Yıldız ve Kaş, 2007).

Tarama işleminin yüksek maliyetli olması sebebiyle, daha çok hidrolik olarak yıkama işlemi tercih edilmektedir.

Rooseboom (1985) tarama işleminin, küçük rezervuarlarda ya da büyük rezervuarların lokal bölgelerinde uygulanabilecek bir yöntem olduğunu ileri sürmüştür.

Rezervuardaki sedimentin taşınımı için kullanılan çeşitli tarama teknikleri ve mekanik kazı aletleri, Scheuerlein (1987) tarafından açıklanmıştır.

Rezervuarlardaki iri taneli malzeme birikiminin taşınması için mekanik yöntemlerin en uygun yöntemler olduğu kabul edilmektedir.

Bu konuda incelemeler yapan Clark (1983), tarama ve kazı ekipmanının karada da hareket etme yeteneğine sahip olması gerektiğini; böylece bu ekipmanın başka projelerde kullanılarak, yapılan işlemin ilk yatırım ve ekipman maliyetinin azaltılabileceğini ileri sürmüştür (Şekil 7.18).

Genellikle rezervuardan çıkartılan iri malzeme inşaat malzemesi olarak, ince malzeme ise yapı malzemesi üretiminde kullanılmaktadır.



Şekil 7.18 : Cogswell Barajı'nda sedimentin ekskavatörlerle taşınması ve bu işlem için boşaltılmış olan rezervuarı (Morris ve Fan, 1998).

Rezervuarlarda tarama işleminin uygulandığı koşullar, uygulama örnekleriyle birlikte aşağıda sıralanmıştır:

- Küçük hacimli rezervuarların, küçük su depolama haznelerinin ve iri malzeme tutma haznelerinin (kontrol barajları) azalan depolama kapasitelerini yeniden kazanmak veya orta büyüklükteki rezervuarların azalan biriktirme hacimlerinin sadece belirli bir bölümünü kazanmak için tarama işlemi uygulanabilir.

Hamiz Barajı:

Cezayir'de bulunan Hamiz Barajı rezervuarında biriken malzeme taranarak çıkartılmıştır. Tarama işlemi dönen bir tarayıcı başlığı ve vakumlu emme sistemi yardımıyla gerçekleştirilmiştir (Çizelge 7.3).

Çizelge 7.3 : 1957-1968 yılları arasında, dönen bir tarayıcı başlığı ve vakumlu emme sistemi ile tarama işlemi yapılan barajlar (Yıldız ve Kaş, 2007).

Yıl	Baraj adı	Taranan silt hacmi (10^6 m^3)
1958-1961	Cheurfus	10
1962-1964	Sig	1
1965-1966	Fergoug	3
1967-1968	Hamiz	1.2

Tarama sistemi teorik olarak, 1.6 ton/m^3 yoğunluğundaki 1 m^3 siltin taranması için yaklaşık 5 m^3 temiz suya ihtiyaç duymuştur. Her ay taranan silt hacmi yaklaşık $3.4x10^5$ m^3 olarak tahmin edilmiştir. Vakum sisteminde ve borularda bir tıkanma olması halinde ise 1 birim siltin taranması için, 9 birim suya gereksinim olmuştur (Bellouni, 1980 ve Belbachir, 1980).

Hamiz Barajı rezervuarındaki 5.5 aylık tarama işlemi boyunca, 2300 saatlik pompalama işlemi gerçekleştirilmiş ve 730 saatlik bir sürede de pompalar çalıştırılamamıştır. Pompaların çalıştırılamamasının ana nedenleri;

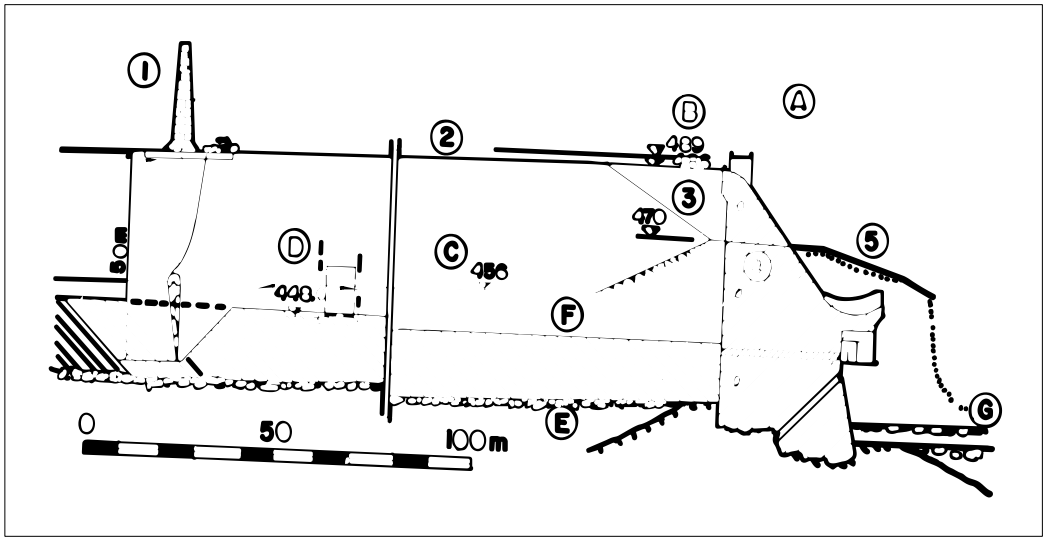
- Mekanik ve boru hatlarındaki arızalar,
- Boruların malzemeyle dolup tıkanması,
- Tarama yerinin değiştirilme süresi,
- Rezervuarda yüzen boru sisteminin uzatılıp kısaltılması işlemi olarak belirtilmiştir.

Boruların tıkanması nedeniyle pompaların işletme dışı kalmasının süresi, toplam devre dışı kalma süresinin dörtte birini oluşturmuştur. Bunun yanı sıra silt topakları, ağaç dalları vb. parçalar, emme borularını tıkayarak pompa işletmesinin ve tarama işleminin aksamasına neden olmuştur. Emme borularını temizlemek için sistemde temiz suyla yavaşça geri yıkamalar yapılmıştır. Sistemdeki diğer borularda kil topaklarının su içerisinde çözülmemesinden kaynaklanan tıkanmalar oluşmuştur.

Cezayir'deki rezervuarların taranarak temizlenmesi işlemi genellikle; çökelen malzeme içerisinde mansaptan membaya doğru bir kanal açarak, yoğunluk akımlarını dipsavaklara doğru hareket etmesini sağlamak şeklindedir.

Plagnedra Barajı:

İsviçre'deki Plagnedra rezervuarında, 50 m derinliğe kadar inebilen yüzen bir tarayıcı ile su alma ağzı bölgesinde biriken çok ince silt malzeme taranmıştır (Şekil 7.19) (Liechti ve Haeberli, 1970).

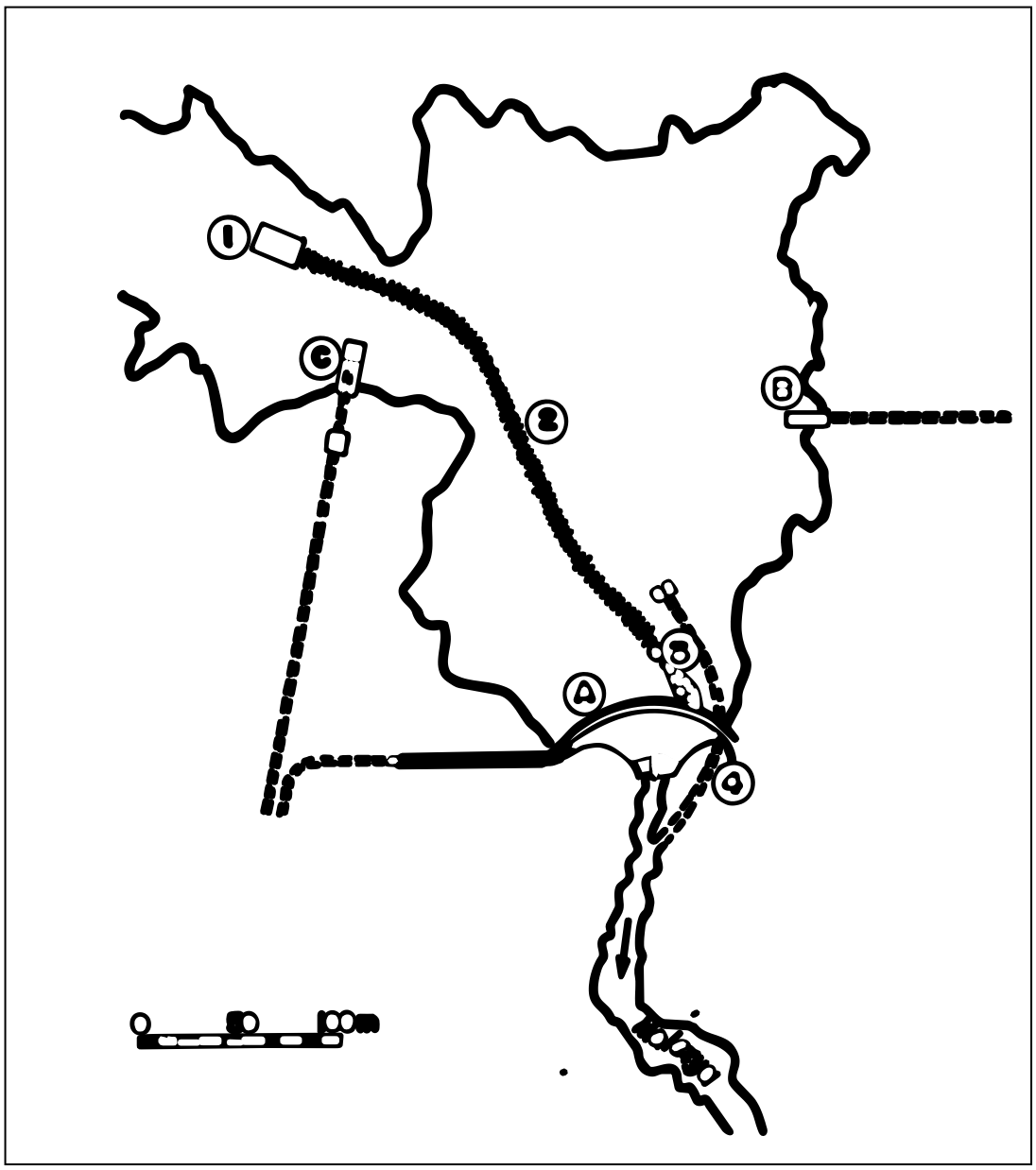


Şekil 7.19 : Rezervuarın boyuna kesiti ve yüzer tarayıcı sistem (Liechti ve Haeberli, 1970).

1. Maksimum çalışma derinliği 50 m olan yüzer tarayıcı
2. 350 mm çapında 280-350 m uzunluğundaki yüzen boru
3. Tarama sisteminin 32 m uzunluğunda ve baraj gövdesine bağlantılı olarak hareket edebilen bölümü
4. Baraj gövdesinden geçen 0.5 m çapında ve 20.5 m uzunluğundaki galeri
5. Emniyet vanaları ve dipsavak deşarj borusu

A. Baraj gövdesi
B. Rezervuarın maksimum işletme seviyesi (468 m)
C. Rezervuarın minimum işletme seviyesi (456 m)
D. Verbana basınçlı tünelinin su alma ağzı (eşik kotu 448 m)
E. Orijinal nehir yatağı
F. Haziran 1967 tarihindeki sediment birikimi seviyesi
G. Malezza Nehri'nin mansap talveg kotu (yaklaşık 426 m)

Rezervuarın membasından çekilen malzeme, önce yüzen bir boru hattı ile baraj bölgesine doğru iletilmiş ve daha sonra barajın mansabına aktarılmıştır (Şekil 7.20).



Şekil 7.20 : Plagnedra rezervuarını yüzen tarayıcı ile tarama işlemi (Liechti ve Haeberli, 1970).

A. Baraj
B. Tünel girişi
C. Su alma yapısı ve basınçlı tünel

1. Yüzen tarayıcı
2. Yüzen boru hattı
3. Baraj gövdesine bağlı olarak hareket edebilen bölüm
4. Baraj gövdesi içerisinden geçen boru hattı

- Santrallerin önünde kabarma eğrisi boyunca biriken sedimentin temizlenmesi ve rezervuarın kabarma eğrisi bölümündeki birikimin temizlenerek su yolu ulaşımı için gerekli derinliğin elde edilmesi için de tarama işlemi kullanılabilir.

Ybbs-Persenbeug Santrali:

Avusturya'da Tuna Nehri üzerindeki ilk enerji santrali olan Ybbs-Persenbeug Santrali, 1957 yılında işletmeye alınmıştır. Toplam kapasitesi $76x10^6$ m^3 olan rezervuarın aktif depolama kapasitesi $44x10^6$ m^3 olup, ortalama düşü yüksekliği 11 m'dir. Baraj işletmeye girdikten sonra kabarma eğrisinin memba ucundaki bölümünde biriken sediment, nehir enkesitini daraltmış ve nehir tabanını yükseltmiştir.

Nehir akışına ve nehir ulaşımına olumsuz etkisi olan bu durum taşkın riskinin artmasına neden olmuştur. Barajın işletmeye alınışından itibaren ilk 4 yılda, rezervuarda $8x10^6$ m^3'lük iri taneli malzemenin biriktiği tespit edilmiştir. Bu birikim tarama işlemi ile periyodik olarak taşınmıştır.

Wallsee-Mitterkirchen Barajı:

Ybbs-Persenbeug Barajı'nın memba kısmında yer alan Wallsee-Mitterkirchen Barajı'nın inşaatı 1968 yılında tamamlanmış ve işletmeye açılmasından itibaren Ybbs-Persenbeug rezervuarına sediment taşınımını önemli ölçüde azaltmıştır.

Wallsee-Mitterkirchen Barajı yaklaşık 11 m yüksekliğindeki kabartma yapısına sahiptir. Toplam rezervuar kapasitesi $54x10^6$ m^3, aktif depolama kapasitesi ise $29x10^6$ m^3'tür. Bu rezervuarına taşkın dönemlerinde 1970 yılında $3x10^5$ m^3, 1975 yılında ise $4x10^5$ m^3 sediment birikmiştir.

Rezervuarın taşkın depolama kapasitesini arttırmak ve su yolu ulaşımı için gereken net 8 m'lik derinliği sağlayabilmek için biriken sediment taranarak dışarıya alınmıştır. Bu tarama işlemi maliyetinin ekonomik açıdan uygun olduğu ileri sürülmüştür (Kobilka ve Hauck, 1982) Bu değerlendirmede işlemin enerji üretimi artışına olan etkisi ve çıkartılan sedimentin bir başka yerde inşaat malzemesi olarak kullanılması gibi faydaları göz önüne alınmıştır.

- Rezervuarda biriken sedimentin çakıl özelliğinde olması durumunda, taranarak çıkartılan bu malzemenin beton imalatında agrega olarak kullanılması mümkün olmaktadır. Japonya'daki Akiba, Sakuma, ve Miwa Barajları rezervuarlarının taranması sonrasında çıkartılan sedimentin büyük bir bölümü inşaat malzemesi kullanılmıştır.

Akiba Barajı:

Japonya'da Tenryu Nehri üzerinde inşa edilen, 84 m yüksekliğindeki Akiba Barajı 1958 yılında tamamlanmıştır. Toplam depolama kapasitesi $34x10^6$ m^3 olan barajın drenaj havzası 4490 km^2'dir. Rezervuarın orijinal seviyesinin korunabilmesi için her yıl yaklaşık $4x10^5$ m^3 sedimentin boşaltılması gerektiği tespit edilmiştir.

Barajın membasına 4.5 km geride biriken, ince kil ve siltten oluşan $1.5x10^5$ m^3'lük sediment her yıl taranarak baraj gövdesi yakınlarına aktarılmış ve buradan da taşkın debileriyle mansaba boşaltılmıştır.

Barajın membasında 4.5-8.5 km arasındaki bölümde biriken iri taneli sedimentin beton imalatında agrega olarak kullanılmaya uygun olduğu tespit edilmiş ve bu bölgeden her yıl $2x10^5$ m^3'lük sediment boşaltılmıştır. Barajın 8.2 km membasından daha yukarıdaki bölgeye her yıl biriken $5x10^4$ m^3'lük iri malzemenin bir bölümü de beton agregası olarak kullanılmıştır.

Sakuma Barajı:

Japonya'da Tenryu Nehri üzerindeki Sakuma Barajı 155 m yüksekliğinde, elektrik enerjisi üretimi amacı ile inşa edilmiş olup, toplam depolama kapasitesi $330x10^6$ m^3 olan bir rezervuara sahiptir.

1956 yılında işletmeye alınan Sakuma Barajı rezervuarında, 1980 yılına kadar geçen 24 yıllık süre içerisinde $73x10^6$ m^3'lük bir sediment birikimi olmuştur ve rezervuarın depolama kapasitesinin %23'ü kaybedilmiştir. Rezervuarına biriken yıllık sediment hacminin $3x10^6$ m^3 olduğu tespit edilmiştir.

Sakuma Barajı rezervuardan her yıl $1x10^6$ m^3 hacminde sediment çıkartılmıştır. Rezervuarın memba bölgelerinden taranarak çıkartılan sedimentin büyük bir bölümünün beton agregası olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. Rezervuar membasında kabarma eğrisi bölgesindeki sediment birikiminin en aza indirilebilmesi için baraj uzun bir süre düşük su seviyeleri ile işletilmiştir.

Miwa Barajı:

Japonya'da Miwa Gawa Brook Nehri üzerinde 1959 yılında inşa edilen baraj 69 m yüksekliğinde olup; sulama, enerji ve taşkın koruma amaçlıdır.

Toplam depolama kapasitesi $37x10^6$ m^3, aktif depolama kapasitesi ise $25x10^6$ m^3 olan baraj rezervuarı projelendirilirken; 40 yılda $6.5x10^6$ m^3 sedimentin birikeceği hesaplanmıştır.

Ancak 1959 ve 1972 arasındaki 12 senelik dönemde, rezervuarda $9.5x10^6$ m^3 sedimentin biriktiği tespit edilmiştir. 1965 yılında rezervuardaki sedimentin taranarak çıkartılmasına başlanmış ve 1974 yılına kadar $2.3x10^6$ m^3 sediment çıkartılarak beton imalatında agrega olarak kullanılmıştır.

Ekim 1973 tarihinde $1.5x10^5$ m^3 kapasiteli bir pompalı tarama sistemi işletmeye alınarak, rezervuarın aktif depolama kapasitesini arttıracak 10 yıllık bir program uygulamaya konulmuştur.

7.2.3.1 Taramada kullanılan sistemler

Rezervuarlardaki sedimentin taranarak çıkartılması için genellikle hidrolik ve mekanik tarayıcılar kullanılır (Çizelge 7.4).

Çizelge 7.4 : Çeşitli tarama yöntemleri ve tarama derinlikleri (Bozkurt ve Çultu, 1989).

Tarama yöntemi	Tarama derinliği (m)
Hidrolik tarayıcılar	
Emici tarayıcı	30
Kesici-emici tarayıcı	30
Mekanik tarayıcılar	
Kepçeli tarayıcı	20
Tarak dubası	30
Derin tarayıcı (küçük kollu kurtarma kancalı)	150
Hava emülsiyonlu pompa	80
Batık pompalar	150

Hidrolik tarayıcılar:

Hidrolik tarayıcılar (kesip emen tarayıcı) (Şekil 7.21), katılaşmış yığınları çözecek olan kesicilere takılmış santrifüj pompalara sahiptir. Sınırlı bir tarama derinliğine sahip olan bu tarayıcılar sedimentin çıkartılması ve taşınması için çok fazla su kullanır. Tipik bir kesici-emici tarayıcının ihtiyaç duyduğu birim su/sediment oranı 4/1 olarak verilmektedir.



Şekil 7.21 : Hidrolik tarama sistemi (Aras, 2009).

***Mekanik tarayıcılar*:**

Mekanik tarayıcılar (kararlı tarama makinesi) (Şekil 7.22), tarama derinliği yönünden sınırlı sistemlerdir.

Bu sistemin en büyük dezavantajı; tarama işlemi sırasında sedimenti harekete geçirerek, bulanıklık ve su kirliliğine neden olması olarak belirtilmektedir.

Tarama işleminde kullanılan venturi pompası, pnömatik pompa ve hava emülsiyonlu pompalar derin bölgelerde çalışırken enerji ve su sarfiyatını çok arttırırlar.

Birikmiş malzemenin kohezyonu arttıkça bu sistemlerin verimliliği azaldığı için kohezyonlu zeminlerde genellikle tercih edilmezler. Bu sistemle yapılan bazı çalışmalarda, 30 m derinlikteki silte dik olarak yerleştirilen pompaların kohezyonlu silti yana doğru hareket ettiremediği görülmüştür.

Çok derin bölgelerde uzaktan kumandalı çok kollu kurtarma aracı, taramada en az problem yaratan araç olarak bilinmektedir.



Şekil 7.22 : Mekanik tarayıcı sistemlerine bir örnek, kepçeli tarayıcı (Aras, 2009).

Derin Tarayıcılar:

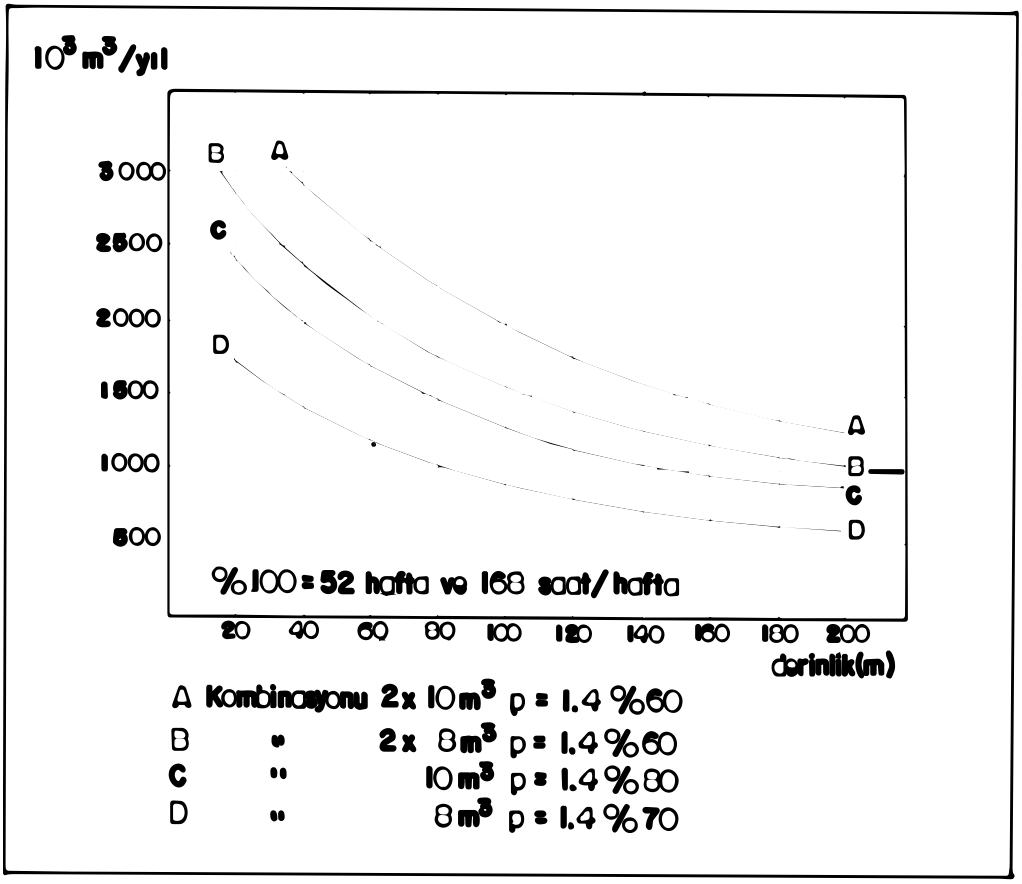
Rezervuardaki sedimenti temizleme işlemi için tek bir sistem önerebilmek zordur. Her özel duruma göre bir çalışma yapılmalıdır. Fakat genelleme yapmak gerekirse; sedimentin çıkarılmasına en uygun yöntem, uzaktan kontrollü derin tarayıcıların kullanılması olduğu görülmektedir (Yıldız ve Kaş, 2007).

Uzaktan kontrollü derin tarayıcıların özellikleri şöyledir:

- Tarama derinliği en fazla 150 m'dir.
- Sistem silt, çakıl, kaya ve birikintilerini temizleyebilir.
- Sediment su ile karışmadan toplandığı için, su kullanımı çok azdır.
- Sistem kıyıdan elektrik enerjisi ile çalıştığından, yakıta bağlı kirlilik olmaz ve tarama sırasında su bulanıp kirlenmez.
- Sistem parçalanabildiği için taşınması ve kurulması kolaydır.
- Sistemde tarama işlemi bilgisayarla kontrol edilir.
- Tarama süresince rezervuar çalışmasının durması gerekmez.

TIJL-3 adıyla geliştirilen ve Belçika'da çok kullanılan derin tarayıcının rezervuarlardan sediment çıkarılmasında oldukça etkili olduğu ileri sürülmektedir. Bu derin tarayıcının üretim hızları Şekil 7.23'te verilmiş olup, üretim hızını arttırabilmek için sistemde çeşitli kombinasyonlar uygulanabilmektedir.

Tamamı sökülebilir bir dubanın üzerinde bulunan sistem elektrikli-hidrolik bir makine ile çalıştırılıp, üzerindeki bir birim ile kontrol edilmektedir.



Şekil 7.23 : Derin tarayıcı *TIJL-3*'ün üretim hızları (Bozkurt ve Çultu, 1989).

Sistem, tarama işlemini optimize etmek için yüksek hızlarda çalışmaktadır. Sistemin vinç hızı 90 m/dak (5.4 km/sa), alçalma hızı ise 135 m/dak (8.1 km/sa) olmaktadır.

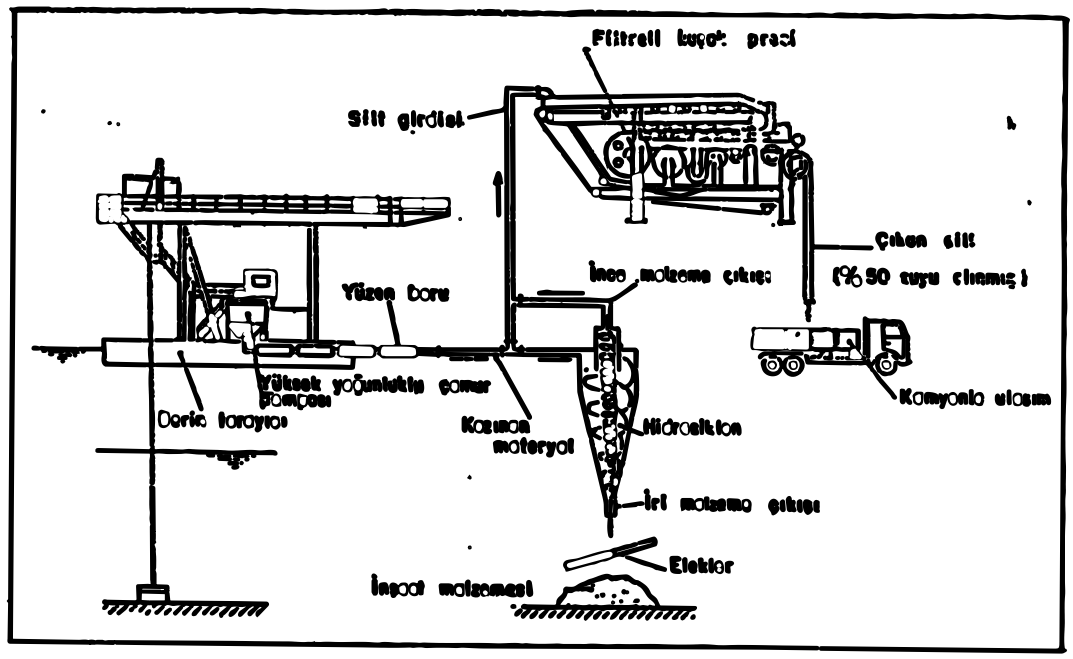
Tarama aleti sürekli olarak su seviyesini ölçen bir sisteme bağlıdır. Böylece belirlenen tarama seviyesi ayarlanabilmektedir. Bütün işlemler merkez işletme odasından kontrol edilebildiğinden, sistem az sayıda insanla çalışabilmektedir. Sistemin hareket alanının geniş oluşu nedeniyle santral girişi, dipsavak gibi bölgelerde temizlik yapılmasına da olanak tanımaktadır.

7.2.3.2 Taranan malzemenin uzaklaştırılması

Rezervuardaki sedimentin taranarak çıkarılmasının en önemli noktası, taranan malzemenin tahliyesi ve taşıma maliyetidir. Yakınında tahliye sahası olmayan rezervuarlar için taşıma maliyeti çok yüksek olabilir. Çıkartılan malzemenin tahliyesi, çevreye etkisi yönünden de problemlere sebep olabilir.

Klasik tarama tekniklerinde (hidrolik/mekanik tarayıcılar, pompa sistemleri) su/sediment oranı yüksektir. Bununla birlikte geniş geçici depolama alanlarında, uzun süren sudan arıtma veya drenaj maliyeti yüksektir.

Klasik tarama tekniğine alternatif olarak geliştirilen başka bir yöntemde, sediment önce derin tarayıcı ile çıkarılmaktadır. Çıkarılan malzemenin tahliyesi büyük kayık, kamyon, taşıma kemerleri (kuşakları) veya yüksek yoğunluklu çamur pompaları ile yapılabilir. Eğer taşıma maliyeti yine yüksekse, taranan malzemedeki suyu süzerek hacmi azaltan kuşaklı filtreli sıkıcılar kullanılabilir. Böylece malzeme serbest suyunun %50'sini kaybedecektir.



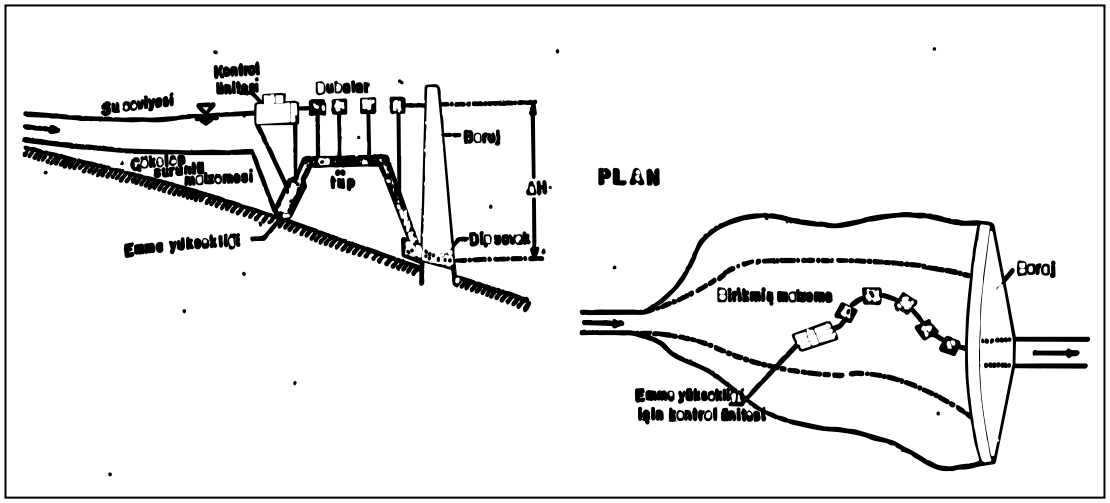
Şekil 7.24 : Taranan sedimentin işlenmesi (Bozkurt ve Çultu, 1989).

Bazı rezervuarlardan taranan ince silt gibi malzemenin 20-100 km uzaklığa taşınması sırasındaki işlemler şöyle sıralanabilir (Şekil 7.24):

- Taranan malzeme derin tarayıcıdaki yüksek yoğunluklu çamur pompasına dökülür ve kıyıya doğru pompalanır.
- Filtreli kuşak presi ve su emici hortum ile taranan malzemenin suyu alınarak hacmi azaltılır ve kamyonlara yüklenir.
- İşlenmiş taralı malzeme kamyonlarla bir tahliye sahasına veya işlenme yerine iletilir. Tahliye sahaları; eski taş ocakları veya maden yatağı gibi doldurulması gereken alanlar veya ıslah alanları olabilir.

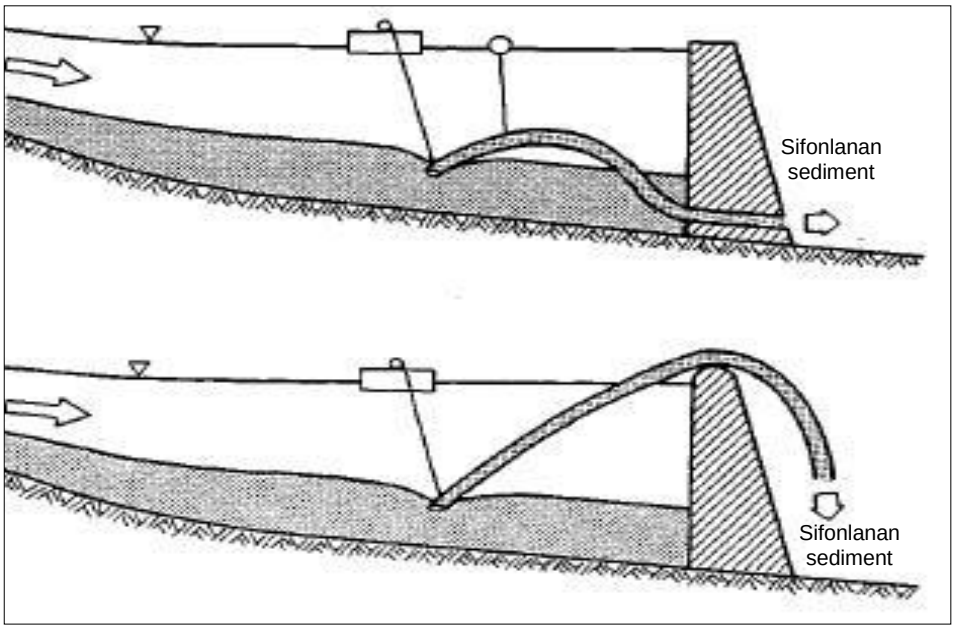
7.2.4 Sedimentin sifonlama yöntemiyle uzaklaştırılması ve uygulamaları

Hidrolik bir yöntem olan sifonlama sisteminde *(syphon dredging)*, klasik emme taraması (*suction dredging*) yöntemindeki gibi dışarıdan bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulmamaktadır. Sedimentin boşaltılması için gereken enerji, barajın memba ve mansap su seviyeleri arasındaki kot farkından elde edilen potansiyel enerjiden sağlanır (Şekil 7.25) (Bruk, 1985).



Şekil 7.25 : Sifonlama yönteminde uygulanan sistem (Scheuerlein, 1987).

Sifonlama sisteminde sedimentli akımı taşıyan mansap borusu, sistemin etkili çalışmasını sağlayacak şekilde, baraj kreti üstünden veya dipsavak kotundan baraj mansabına sediment aktarımı yapmaktadır (Şekil 7.26).

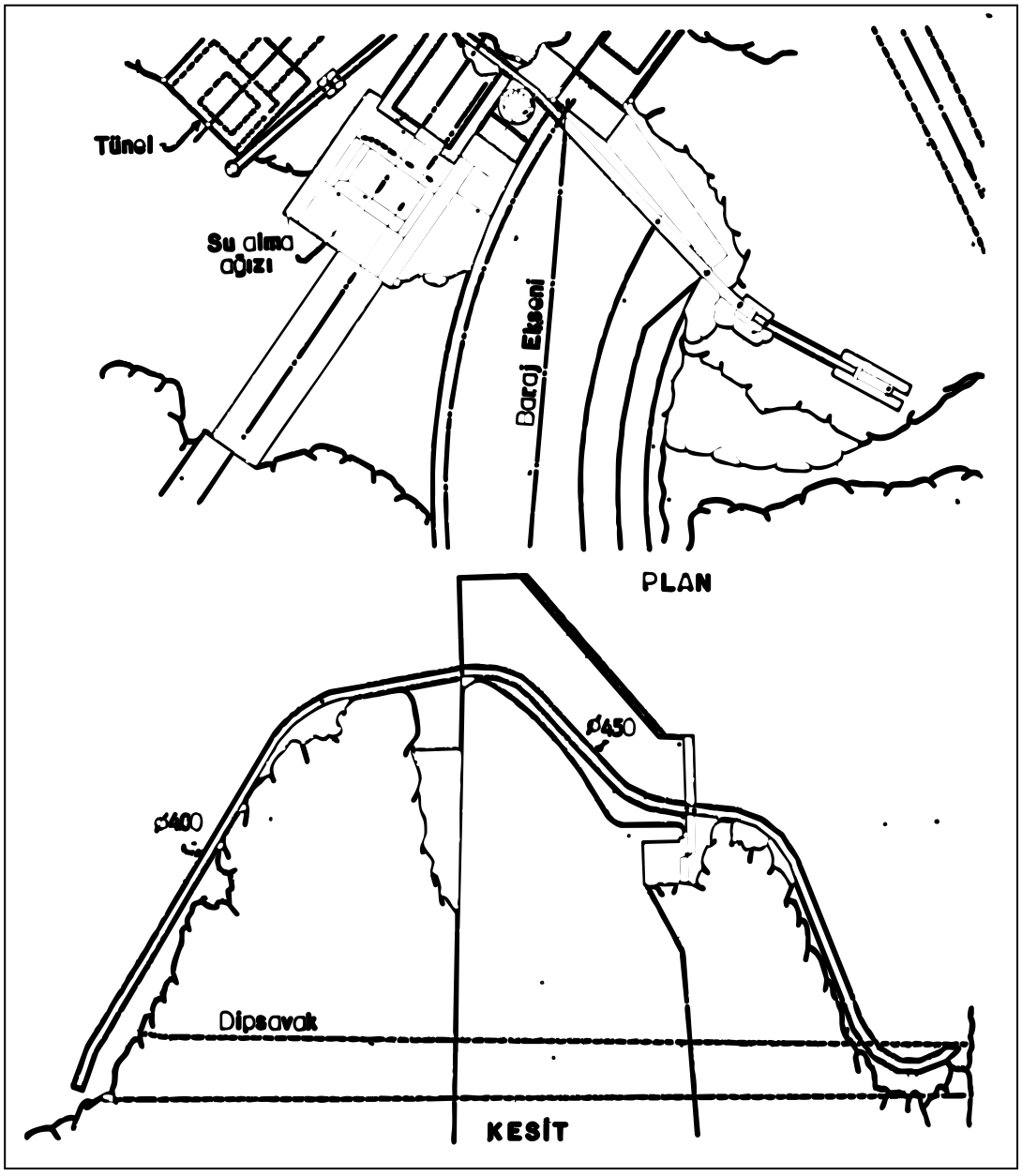


Şekil 7.26 : Sifonlama sistemi mansap borusu konumu (Durgunoğlu ve Singh, 1993).

Rioumajou Barajı:

Sifonlama için en basit ve başarılı tip Fransa'da 21 m yüksekliğinde, beton kemer baraj olan Rioumajou Barajı'nda (Şeki 7.27) yapılmıştır (Evrard, 1980).

Barajın rezervuarına biriken sediment, dipsavak işletmesini engelleyecek şekilde birikmiş ve 14 m yukarıdaki su alma yapısını da tehdit etmiştir. Su alma yapısından sedimenti temizlemek için kullanılan hidrolik sifon sistemi, su alma ağzı ve dipsavak arasındaki bir kota yerleştirilmiştir.



Şekil 7.27 : Rioumajou Barajı'ndaki hidrolik sifon sistemi (Evrard, 1980).

Bu rezervuara yerleştirilen sifon sistemi, dolusavak çalışmaya başladığında otomatik olarak işletmeye girebilmektedir.

Sifonun memba bölümünde; 400 mm çapında, 20 m uzunluğunda, dipsavak yanında bir nozula sahip boru vardır. Mansap bölümünde ise 450 mm çapında, 24 m uzunluğunda olan bir boru mevcuttur. Sifon 1 m^3/s'lik debi ile 15 kg'lık sedimenti mansaba deşarj edebilmektedir.

Rioumajou Barajındaki sifon yapısı oldukça verimli bir şekilde çalışmış ve bir yıl içinde kendisini amorti etmiştir.

Tianjiawan Barajı:

Sifonlama sistemi Çin'de birçok küçük rezervuarda kullanılmaktadır. Bu sistemin kullanıldığı barajlardan birisi olan Tianjiawan Barajı, 1960 yılında Sarı Nehir havzasındaki Fenghe Nehri üzerine inşa edilmiştir ve $9.42x10^6$ m^3 depolama kapasitesine sahiptir.

Yıllık akışı $3.92x10^6$ m^3 olan Fenghe Nehri, bu rezervuara yılda yaklaşık $2.5x10^5$ m^3 sediment taşımaktadır. 1960-1973 yılları arasındaki dönemde, rezervuarda yaklaşık $4x10^6$ m^3 sediment birikmiştir.

Barajın 500 m membasında biriken sedimentin ortalama tane çapı 0.006 ile 0.008 mm arasındadır. Biriken malzemenin %40-%48'i 0.005 mm'den daha incedir. Malzemenin %44-%58'i ise 0.05 ile 0.005 mm arasında bir tane çapı dağılımına sahiptir.

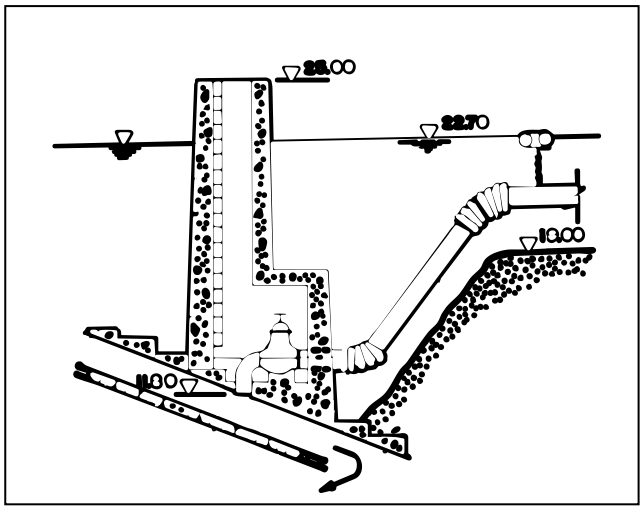
Tianjiawan Barajı projesindeki toplam su yükü 17.7 m olmasına rağmen, etkili su yükü ise sadece 7.9 m civarında bulunmaktadır.

Bu rezervuarda uygulanan hidrolik sifon tarama sisteminin bölümleri aşağıda sıralanmıştır:

- Sistemin işletme bölümü 8mx5.5mx1.1m boyutlarında, 16.8 ton ağırlığında, 6 çelik dubadan ibarettir. Bu dubalarda vinçler için 31 KW'lık enerji ünitesi yer almaktadır.
- 229 m uzunluğundaki boru sistemi 550 mm çapındaki çelik borulardan ibaret olup, bağlantı bölümlerinde elastik malzeme kullanılmıştır.

Bu borunun ağzında dönen bir kesici bulunmakta ve sistemin emme yükü dubalar vasıtası ile sağlanmaktadır.

- Boru su altındaki bir vana odası ile dipsavağa bağlıdır (Şekil 7.28).



Şekil 7.28 : Tianjiawan rezervuarındaki tarama borusu sistemi krokisi (Bruk, 1985).

Tianjiawan rezervuarındaki hidrolik sifonlu tarama sisteminin avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Tarama maliyeti düşüktür.
- İşletme sırasında boşa akıtılan su olmamaktadır.
- Sifonlama işleminden elde edilmiş su-sediment karışımı, sulama suyu olarak kullanılabilir.
- Sifon tarama sisteminin işletmesi kolay ve hareket kabiliyeti yüksektir.

Sifonla tarama sisteminin bazı olumsuz etkileri de vardır. Sistemin boru birleşim yerlerindeki esnekliği sağlayabilmek için lastik bağlantı malzemesinin kullanılması inşaat açısından basit, maliyet açısından da ucuzdur. Fakat bu malzemenin akıma karşı yüksek direnç oluşturur. Taşınan malzemenin hacim olarak konsantrasyonu %1-%11 arasında olduğunda, lastik birleşim yerlerinin sürtünme katsayısının çelik borunun sürtünme katsayısından 17-20 kat daha fazla olduğu ileri sürülmektedir.

Sediment konsantrasyonu belirli bir limit değerin üzerine çıkarsa borular tıkanabilmekte, boru içerisinde anormal basınç dağılımı oluşabilmekte veya taşınan karışımın hızı kritik çökelme hızının altına düşmektedir.

Bu teknik uygulanırken kazı yapılacak bölgenin sınırları; dipsavak ile bağlantılı olan, esnek, uzatılabilen bir boru hattı ve memba ucu ile bağlantılı bir emme bölümü (sifon tarağı veya hidro-aspiratör, yarıcı) kullanılarak genişletilebilmektedir.

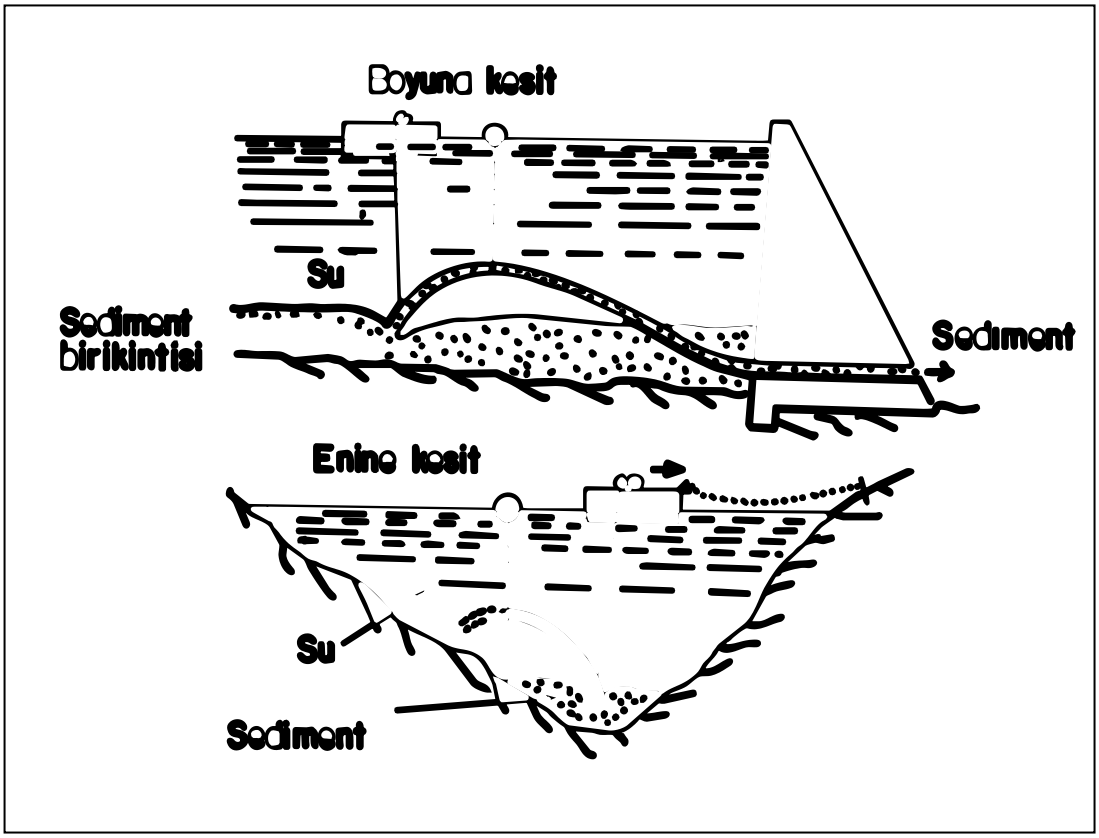
Maliyeti düşük olan bu sistemin (*syphon-dredging system*) Çin'deki küçük rezervuarlarda uygulanmasını, Dai Jilan ve diğ. (1980) ile Eftekhorzadeh ve Laursen (1989) yayınlarında geniş olarak açıklamışlardır.

Eftekharzadeh ve Laursen (1989), sistemin ve boru hattının performansının taşınacak sedimentin tane çapının, boru uzunluğunun ve boru çapının bir fonksiyonu olduğunu ortaya koymuştur. Aynı araştırmacılar sistemin projelendirilmesi için kullanılacak optimum boyutlar ve işletme talimatı üzerine de çalışmalar yapmışlardır.

7.2.4.1 Jandin yöntemi

Rezervuara biriken sedimentin sifonlama ile barajın mansabına aktarılması ilk olarak geçen yüzyılda Jandin tarafından önerilmiştir (Brown 1943).

Jandin bu yöntemi 1892-1894 yılları arasında, Cezayir'deki Djidiouia Barajı rezervuarında geliştirmiş ve uygulamıştır (Şekil 7.29).



Şekil 7.29 : Jandin'in sifonlama sistemi (Hannoyer, 1974).

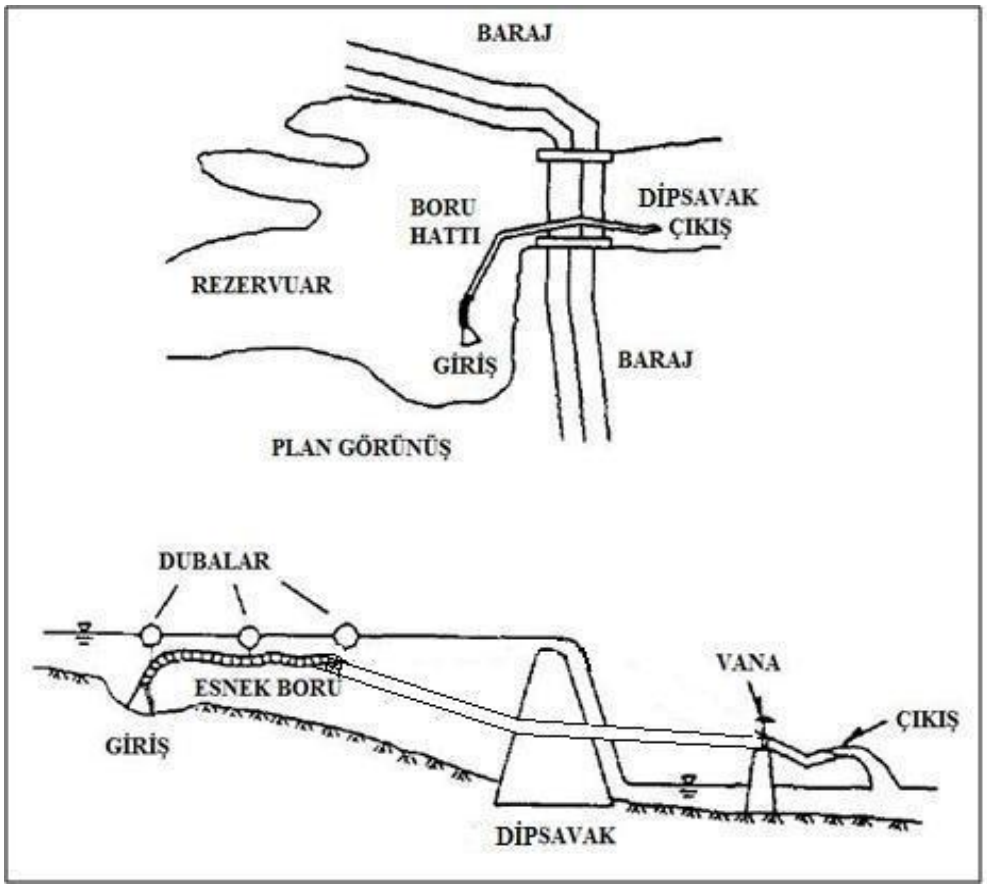
3 yıl içinde $1.4x10^6$ m^3 kil ve silt rezervuardan taşınmıştır. Bu miktarın $4,98x10^5$ m^3'ün önceden birikmiş sediment, kalanının ise işletme sürecinde rezervuara giren sediment olduğu tahmin edilmektedir.

1873-1875 yılları arasında su temini amacı ile inşa edilen bu rezervuarın orijiinal depolama kapasitesi $2.49x10^6$ $m^{3'}$tür. Rezervuara giren akımın ortalama sediment konsantrasyonu %3 olup, bu değer taşkın dönemlerinde %7'ye çıkmaktadır.

Baraj gövdesinde 1.15 m çapında 2 tane dipsavak mevcut olmasına rağmen, büyük bir olasılıkla yanlış işletilmelerinden dolayı, rezervuarın hızlı bir şekilde dolması önlenememiştir.

Jandin tarafından geliştirilen sistem; normal işletme koşullarında 1.53 m^3/s'lik debiyi deşarj edebilen, 61 cm çapında esnek bir borudan oluşmaktadır. Bu boru baraj gövdesi altındaki bir galeriden geçerek atmosfere açılmaktadır. Demir dubalar bu boruya yaklaşık 1.6 km çapındaki bir alanda hareket kabiliyeti sağlamaktadır

7.2.4.2 Hydroaspirator yöntemi



Şekil 7.30 : Hydroaspirator sistemi (Hotchkiss ve Huang, 1995).

1974 yılında Hannoyer tarafından geliştirilen ve *hydroaspirator* olarak adlandırılan sistem, dipsavağa bağlantılı esnek bir boru hattından oluşmaktadır (Şekil 7.30).

Sifonlama borusunun baş bölümünün hareketli olması nedeniyle; sediment birikimi herhangi bir pompaya ihtiyaç duyulmadan, çıkış seviyesi üzerindeki su yükü yardımı ile sifonlanabilmektedir.

Bu sistemde askıdaki boru hattı uzunluğunun 2 km'den fazla olabileceği ileri sürülmektedir.

Sifon tarama yöntemi, 1970 yılında Seine Nehri üzerindeki Bongival Barajı rezervuarında uygulanmıştır.

Sifonlama yöntemi ile çıkartılan sedimentin nasıl uzaklaştırılacağı veya değerlendirileceği planlama aşamasında karar verilmesi gerekir.

Sifonlama yöntemiyle çıkarılan malzemeler:

- Özel dolgu alanlarına veya nehirlerin mansabına,
- Rezervuarın kenar yüzlerine,
- Ölü hacimler içerisine (eğer rezervuar çok büyükse),
- Yan derelerin vadilerinin yan yüzeylerine yığılabilir.

Çamurlu suyu mansaba aktarıp (Şekil 7.31) içindeki ince taneli sedimenti taşırma *(warping)* yöntemi ile ekim yapılan arazilerin üzerine çökelterek su ve toprağın kaybını engellemek de diğer bir yöntem olarak uygulanabilir.

İnce taneli sedimentin (kil) ortadan kaldırılması çok küçük çökelme hızları nedeni ile genellikle çok geniş depolama alanları gerektirir. Diğer taraftan çıkartılan iri taneli sedimentin de inşaat malzemesi olarak kullanılabilmesi mümkündür.



Şekil 7.31 : Sifonlanan sedimentli akımın uzaklaştırılması (Aras, 2009).

8. TÜRKİYE'DEKİ BARAJ REZERVUARLARINDA SEDİMENT BİRİKİMİ VE UZAKLAŞTIRMA UYGULAMALARI

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) uygulamasında, rezervuar planlamalarında ekonomik ömür 50 sene olarak kabul edilmektedir. Bu değer ABD'de bulunan barajlar için, USBR (*United States Bureau of Reclamation*) tarafından en fazla 100 sene olarak belirlenmektedir.

DSİ'nin Etüt ve Plan Daire Başkanlığı Harita Şube Müdürlüğü'nce yürütülmekte olan hidrografik etütler ile sediment birikiminden dolayı rezervuar topoğrafyasında oluşan değişim gözlenmekte ve böylece rezervuar içinde biriken sediment miktarı tespit edilmektedir.

Doğal göller hariç olmak üzere 58 adet baraj rezervuarında (Şekil 8.1), DSİ tarafından hidrografik etütler yapılmaktadır. Rezervuarlardaki su derinlikleri 1970'li yıllara kadar *İskandil usulü* ile ölçülmüş, daha sonraki yıllarda ise *echo sounder* aleti kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalarda rezervuarın büyüklüğüne göre hidrografik haritalar 1/2000, 1/5000, 1/25000 ölçekli olarak alınmaktadır. Daha sonra İşletme ve Bakım Dairesi Hidroloji Şube Müdürlüğü'nce bu haritalardan yararlanılarak yeni hacim satıh eğrileri hazırlanmaktadır.

8.1 Bazı Barajların Sediment Birikimi Miktarları

DSİ'nin incelediği işletme halinde bulunan barajlardan 18 tanesi, yukarıdaki çalışmalardan yararlanılarak rezervuar sedimentasyonu açısından incelenmiştir.

Çizelge 8.1'de bu barajların bazı karakteristik değerleri (Baraj tipi, drenaj alanı, kret kotu, temelden yüksekliği, normal su seviyesi, rezervuar hacmi vb.) verilmiştir.

Çizelge 8.2'de ise bu barajların ölü, aktif ve toplam hacimlerinin dolma oranları ve bu hacimlerdeki sediment birikim yüzdeleri bakımından incelenmiştir.



Şekil 8.1 : Türkiye'deki barajlar ve hidroelektrik santraller (Yıldız ve Kaş, 2007).

Çizelge 8.1 : DSİ'nin sediment birikimi bakımından incelediği barajlardan 18 tanesinin bazı karakteristik değerleri (Yıldız ve Kaş, 2007).

No	Barajın adı	Drenaj alanı adı	Barajın bulunduğu il	Drenaj alanı (km^2)	İşletme açılış yılı	Baraj tipi	Kret kotu	Temelden yüksekliği (m)	Nehir tabanından yüksekliği (m)	Normal su seviyesi (m)	NSS'de rezervuar hacmi (10^6 m^3)	Amaç
1	ALTINAPA	KON. KAPALI	KONYA	589	1967	K	1256	32	31	1247	15	S+TK+İ
2	BAYINDIR	SAKARYA	ANKARA	70	1965	T	990	31	30	985	7	İ
3	BULDAN	GEDİZ	MANİSA	180	1967	T+K	505	64	59	498	46	S
4	ÇAYGÖREN	SUSURLUK	BALIKESİR	1510	1971	T	274	54	53	287	130	S+TK+İ
5	CİP	FIRAT	ELAZIĞ	285	1955	T	1008	24	23	1005	7	S
6	ÇUBUK-I	SAKARYA	ANKARA	840	1936	B	909	58	25	907	13	İ+TK
7	ÇUBUK-II	SAKARYA	ANKARA	-	1962	T	1117	69	61	1113	25	İ
8	DEMİRKÖPRÜ	GEDİZ	MANİSA	5590	1960	T	252	77	74	244	1320	S+TK+E
9	HİRFANLI	KIZILIRMAK	KIRŞEHİR	26170	1959	K	880	83	78	551	6980	E+TK
10	KARAMANLI	BUR. GÖLLE	BURDUR	164	1973	T	1188	47	40	1183	14	S
11	KARTALKAYA	CEYHAN	K.MARAŞ	1130	1972	T	722	57	55	716	195	S+İ
12	KEMER	B.MENDERES	AYDIN	3100	1993	B	299	114	109	292	544	S+TK+E
13	KESİKKÖPRÜ	KIZILIRMAK	ANKARA	380	1966	T+K	793	53	49	790	95	S+E
14	SELEVİR	AKARÇAY	AFYON	722	1965	T	1096	32	31	1093	70	S
15	SEYHAN	SEYHAN	ADANA	14254	1956	T	73	77	51	67	1200	S+TK+E
16	SİLLE	SİLLE	KONYA	-	1960	K	1370	40	39	1367	3	S+TK
17	SÜRGÜ	FIRAT	MALATYA	275	1959	T	1318	57	55	1310	71	S
18	YALVAÇ	ANTALYA	ISPARTA	133	1973	T	1139	46	36	1180	9	S

Amaçlar; E: Enerji, B: Beton, İ: İçme Suyu, K: Kaya Dolgu, T: Toprak Dolgu, TK: Taşkın Kontrolü, S: Sulama

NSS: Normal su seviyesi

Çizelge 8.2 : İşletme halindeki barajlardan 18 tanesinin rezervuar dolma oranları ve sediment birikim yüzdeleri (Göğüş ve Adıgüzel, 1991).

No	Barajın adı	Rezervuar tipi	Periyot	Ölü hacim dolma oranı (%)	Aktif hacim dolma oranı (%)	Toplam hacim dolma oranı (%)	Toplam hacim yıllık dolma oranı (%)	NSS üzerinde sediment birikim yüzdesi (%)	Aktif hacimde sediment birikim yüzdesi (%)	Ölü hacimde sediment birikim yüzdesi (%)
1	ALTINAPA	III	1965-1977	63.7	17.5	28.7	2.4	14.5	38.8	46.3
2	BAYINDIR	III	1964-1980	57.9	14.8	21.2	1.3	9.9	53.7	36.4
3	BULDAN	II	1976-1986	40.1	17.1	19.6	1	6.1	87.9	6.1
4	ÇAYGÖREN	III	1969-1983	17.9	7.3	8.7	0.6	3.5	71.8	24.8
5	CİP	II	1965-1976	27.3	11.2	14.7	1.4	11	53.4	35.7
6	ÇUBUK-I	I	1967-1983	37.1	64	63.9	1.3	27.6	68.8	3.7
7	DEMİRKÖPRÜ	II	1957-1977	49.4	8.4	13.9	0.7	9.6	92.2	28.2
8	HİRFANLI	III	1972-1977	22.7	1	4.1	0.2	-	45.2	54.8
9	KARAMANLI	III	1972-1977	39	7	11.6	2.3	11.5	45.8	42.8
10	KARTALKAYA	III	1974-1989	100	20	26.2	1.4	2.8	73	24.2
11	KEMER	II	1957-1979	100	17	18.9	0.9	-	82	17.9
12	KESİKKÖPRÜ	III	1968-1979	17.8	4.4	9.6	0.6	0.03	28	72.2
13	SELEVİR	III	1963-1977	52.6	13.5	18.7	1.3	0.05	63	37.4
14	SEYHAN	III	1971-1986	46.8	24	29.6	0.9	-	58.81	41.19
15	SÜRGÜ	II	1967-1975	22.6	8.2	10.3	1.3	-	67.58	32.42
16	YALVAÇ	I	1971-1979	30	7	10.4	1.3	42.3	30.95	26.80
17	SİLLE	III	1960-1978	-	-	29	-	-	-	-
18	ÇUBUK-II	I	1964-1983	-	-	9	-	-	-	-

Rezervuar tipi; Tip I: Göl (sediment birikimi üste yakın), Tip II: Yayvan (sediment birikimi ortanın üstü civarında), Tip III: Yamaç (sediment birikimi ortanın altı civarında)

NSS: Normal su seviyesi

Çizelge 8.2'de, 16 adet barajın ölü hacim, aktif hacim ve normal su seviyesine karşılık gelen toplam hacimlerin dolma oranları verilmiştir. Diğer iki barajın maksimum su seviyesine kadar hacim-satıh değerlerinin olmaması nedeniyle, normal su seviyesi üzerindeki hacimlerin dolma oranları belirlenememiştir.

Çizelge 8.2 incelendiğinde, Kartalkaya ve Kemer Barajları'nın ölü hacimlerinin tamamen doldukları görülmektedir. Aktif hacmi en çok dolmuş olan baraj ise en eski baraj olan Çubuk I Barajı'dır. Daha sonra Seyhan ve Kartalkaya Barajları gelmektedir.

Barajların sedimentasyon periyotlarının farklı olması nedeniyle, dolma oranları arasında bir kıyaslama yapmak doğru değildir. Çünkü eski barajlara ait dolma oranları doğal olarak, yenilere göre daha fazla olacaktır.

Bu nedenle Göğüş ve Adıgüzel (1991) yaptıkları bir çalışmada, normal su seviyesindeki toplam hacmin dolma oranlarını sedimentasyon periyoduna bölerek, yıl başına indirgemişlerdir. Hesapladıkları yıllık hacim azalma oranlarını rezervuar hacimleriyle kıyaslayarak, yeni bir sınıflandırma yapmışlardır (Çizelge 8.3):

Çizelge 8.3 : DSİ'nin incelediği bazı barajların toplam hacimlerindeki yıllık azalma oranı (Göğüş ve Adıgüzel, 1991).

Baraj sınıfı	Toplam hacimdeki yıllık azalma oranı (%)
Büyük Barajlarda (Kapasite $\geq 500x10^6$ m^3)	0.7
Orta büyüklükteki barajlarda ($100x10^6$ $m^3 \leq$ Kapasite $< 500x10^6$ m^3)	1.0
Küçük barajlarda (Kapasite $< 100x10^6$ m^3)	1.5

Rezervuar toplam kapasitesine göre belirlenen bu oranların kullanılması, bir barajın normal su seviyesine karşılık gelen toplam hacminin yüzde kaçının ne kadar zamanda dolacağı hususunda yaklaşık olarak bir fikir verebilmektedir.

Çizelge 8.2 bu bakımdan incelendiğinde, elde edilen en yüksek yıllık hacim dolma değeri Altınapa Barajı'na aittir ve bu değer %2.4'tür.

ABD'de yapılmış olan benzer bir çalışma neticesinde; büyük barajlar için %0.25, orta büyüklükteki barajlarda %0.5 ve küçük barajlarda %3 gibi yıllık hacimsel azalma değerleri elde edilmiştir.

Ele alınan 16 barajın boyutlandırılmasında kullanılmış olan, orijinal sediment verimi oranları ile ölü hacme karşı gelen sediment verim oranları Çizelge 8.4'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 8.4 : Rezervuar sedimentasyonu açısından incelenen 16 adet baraja ait fiili durumdaki sediment verimi oranlarının orjinal değerlerle kıyaslanması (Göğüş ve Adıgüzel,1991).

No	Barajın adı	Orjinal (Proje) sediment verimi oranı ($m^3/y/ km^2$)	Ölü hacme tekabül eden sediment verimi oranı ($m^3/y/ km^2$)	Toplam sediment verimi oranı ($m^3/y/ km^2$)	
1	ALTINAPA	136	349	752	679(*)
2	BAYINDIR	250	533	1464	1429
3	BULDAN	556	331	5167	
4	ÇAYGÖREN	199	144	583	662
5	CİP	110	132	370	
6	ÇUBUK - I	1	2	303	139
7	DEMİRKÖPRÜ	501	619	2193	
8	HİRFANLI	673	2059	3760	1055
9	KARAMANLI	250	989	2311	
10	KARTALKAYA	266	334	1379	836
11	KEMER	380	218	1865	1710
12	KESİKKÖPRÜ	2106	1708	2364	
13	SELEVİR	275	515	1379	1801
14	SEYHAN	312	214	519	623
15	SÜRGÜ	727	1098	3388	6545
16	YALVAÇ	241	455	1697	1504

* DSİ Etüt ve Plan Dairesi'nden elde edilen çizelgeden alınan değerler

Bu çizelge incelendiğinde Buldan, Çaygören, Kemer, Kesikköprü ve Seyhan Barajları haricinde, diğer barajlara ait orijinal sediment verimi değerlerinin oluşan duruma nazaran yeterli olmadığı görülmektedir.

Ancak genel olarak planlamada kabul edilen sediment verim oranları tahminlerinin, gerçek değerlerle mertebe olarak uyum içinde oldukları görülmektedir.

Yukarıda sözü edilen barajlardan elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda, bu barajların rezervuarlarındaki kapasite kaybının değişebildiği ancak bazı baraj rezervuarlarının, tahmin edilenin ötesinde debi ve sediment taşınımı ile beklenenden daha kısa bir sürede kapasite kaybına uğrayacağı ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 8.4'te gösterilen ölü hacimdeki sediment verimi oranları ile toplam sediment verimi oranları arasındaki fark, rezervuara giren sedimentin yalnızca ölü hacim içinde değil, aktif hacim ve aktif hacim üzerinde maksimum su seviyesine kadar olan bölgelerde de biriktiğini göstermektedir.

Rezervuarlara birikecek sedimenint hesapları, sadece ölü hacim üst kotunun tespiti açısından önemli değildir. Yukarıda sözü edildiği gibi aktif hacimde oluşacak azalma, barajdan ekonomik ömrü içerisinde beklenen faydanın da azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple baraj planlama aşamasında, işletme çalışmaları yapılırken bu durumun da göz önüne alınması gereklidir.

DSİ Etüt ve Plan Dairesi Başkanlığı'ndan elde edilen işletmeye açılmış barajlardan bir kısmına ait sediment durumu, Çizelge 8.5. ve Çizelge 8.6'te verilmiştir. Bu çizelgelerde verilen toplam sediment verim oranlarının, Göğüş ve Adıgüzel (1991) tarafından verilenlerle (Sürgü, Hirfanlı, Çubuk I Barajları hariç) uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Ülkemizde akarsu ve rezervuar sediment ölçümlerine dayanarak yapılan çalışmalar, değerlendirmeye alınan barajların rezervuarlarında hızlı bir kapasite kaybını ortaya koymaktadır.

Gözlenen eğimlere göre 50 yıllık bir işletme süresinde birçok baraj gölünün kapasitesinin en az %50'sini kaybedebileceği ve hızlı kapasite kaybına bağlı olarak sediment tutma yüzdesinin bu süre içinde %10'a kadar düşebileceği tespit edilmiştir.

Bulgular ülkemizdeki baraj rezervuarlarına tahmin edilenin ötesinde bir sediment taşınımının söz konusu olduğunu göstermektedir (Yıldız ve Kaş, 2007).

Çizelge 8.5 : Türkiye'de işletmeye açılmış bazı barajların, DSİ Etüt ve Plan Dairesi Başkanlığı'nın yapmış olduğu durum analizi (Yıldız ve Kaş, 2007).

Baraj adı	İşletmeye açıldığı yıl	Su alma kotu altındaki hacim (hm^3)	Drenaj alanı (km^2)	Normal su seviyesi (m)	Normal su seviyesinde göl hacmi (hm^3)	Sediment verimi ($m^3/km^2/yıl$)	Su alma kotu altındaki hacmin dolacağı süre (yıl)
1	2	3	4	5	6	7	8=3/4x7
ÇUBUK I	1936	2.5	720	907.6	9.60	139	47
SEYHAN	1956	353	19254	67.50	1240	623	30
SARIYAR	1956	860	41770	475	1900	345	60
KEMER	1958	148	3100	291.5	549	1710	28
HİRFANLI	1960	4200	26170	851	6220	1055	152
ÇUBUK II	1964	2	190	1113	25	526	20
BAYINDIR	1965	1	70	986.5	8	1429	10
SELEVİR	1966	7.1	722	1092.5	74.7	1801	7
ALTINAPA	1967	4	589	1250	24	679	10
KARTALKAYA	1971	14	1076	717.7	193.1	836	16
ÇAYGÖREN	1971	15	1510	271.5	171.8	662	15
YALVAÇ	1974	1.8	133	1180.3	9.60	1504	9
KEBAN	1974	14200	64100	845	31001.6	350	634
HASAN UĞURLU	1979	382.3	36000	190	1018.4	900	12
KARAKAYA	1987	3918	16446	693	9242	350	683
ATATÜRK	-	29000	11800	542	48700	350	7022

Not: Membada yeni rezervuarlar devreye girdikçe barajların ömrü artacaktır.

Çizelge 8.6 : Türkiye'de işletmeye açılmış bazı barajların, DSİ Etüt ve Plan Dairesi Başkanlığı tarafından yapılan sediment durum analizi (Yıldız ve Kaş, 2007).

Baraj adı	İşletmeye açıldığı yıl	Ölü hacim (hm^3)	Drenaj alanı (km^2)	Normal su kotu (m)	Normal su kotunda işletmeye açıldığı yıldaki hacim (hm^3)	Rezervuarın hidrografik değerleri			Hacim farkı (hm^3)	Toplam dolma miktarı (hm^3)	Dolma süresi (yıl)	Yıllık dolma miktarı (hm^3)	Sediment verimi* (m^3/km^2/yıl)
						Ölçüm yılı	Ölçüm kotu (m)	Hacim (hm^3)					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10=6-9	11	12	13	14=11/4
ÇUBUK I	1936	2.5	720	907.61	9.6	1983	907.61	5.6	4	4	47	0.1	139
SEYHAN	1956	300	19254	67.5	1240	1986	67.5	878.9	361.1	361.1	30	12	623
SARIYAR	1956	400	41770	475	1900	1970	475	1699	201	201	14	14.4	345
KEMER	1958	12	3100	291.5	549	1979	291.5	437	112	112	21	5.3	1710
HİRFANLI	1960	880	26170	851	6220	1977	851	5750	470	470	17	27.6	1055
ÇUBUK II	1964	2	190	1113	25	1983	1113	22.4	2.6	2.6	19	0.1	526
BAYINDIR	1965	1	70	986.5	8	1980	986.5	6.6	1.4	1.4	15	0.1	1429
SELEVİR	1966	7.1	722	1092.5	74.7	1977	1092.5	60.7	14	14	11	1,3	1801
ALTINARA	1967	4	589	1250	24	1979	1253.9	18.9	5.1	5.1	12	0.4	679
KARTALKAYA	1971	14	1076	717.7	193.1	1985	717.7	180.2	12.9	12.9	14	0.9	836
ÇAYGÖREN	1971	15	1510	271.5	171.8	1983	271.5	159.5	12.3	12.3	12	1	662
SÜRGÜ	1971	10	275	1308	67	1975	1308	59.8	7.2	7.2	4	1.8	6545
YALVAÇ	1974	1.8	133	1180.25	9.6	1979	1180.25	8.6	1	1	5	0.2	1504

*Sediment verimi; bir havzadan belirli bir zaman diliminde geçen toplam sediment miktarının, drenaj alanına oranı olarak ifade edilebilir.

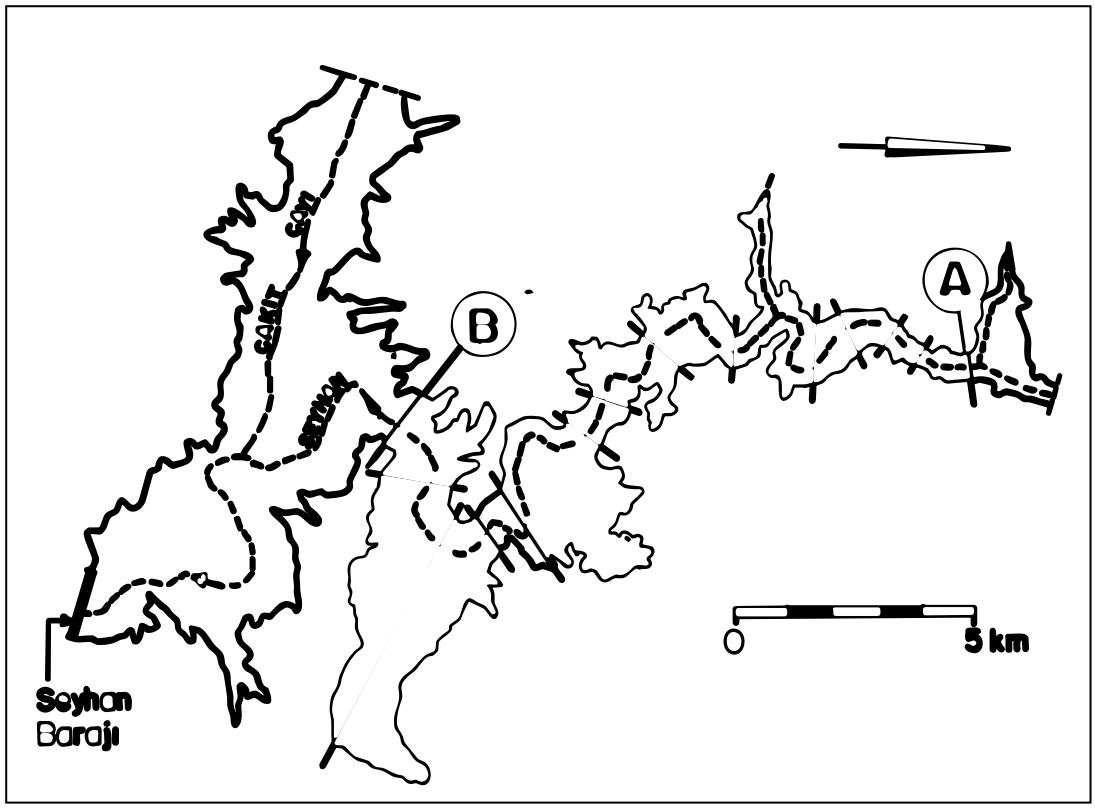
8.2 Seyhan Barajı'nda Sediment Birikimi

Akarsularımızdaki debi ölçümleri DSİ ve EİE tarafından işletilmekte olan ölçüm istasyonlarında yapılmakta ve bulgular akım yıllıkları halinde düzenli şekilde yayınlanmaktadır.

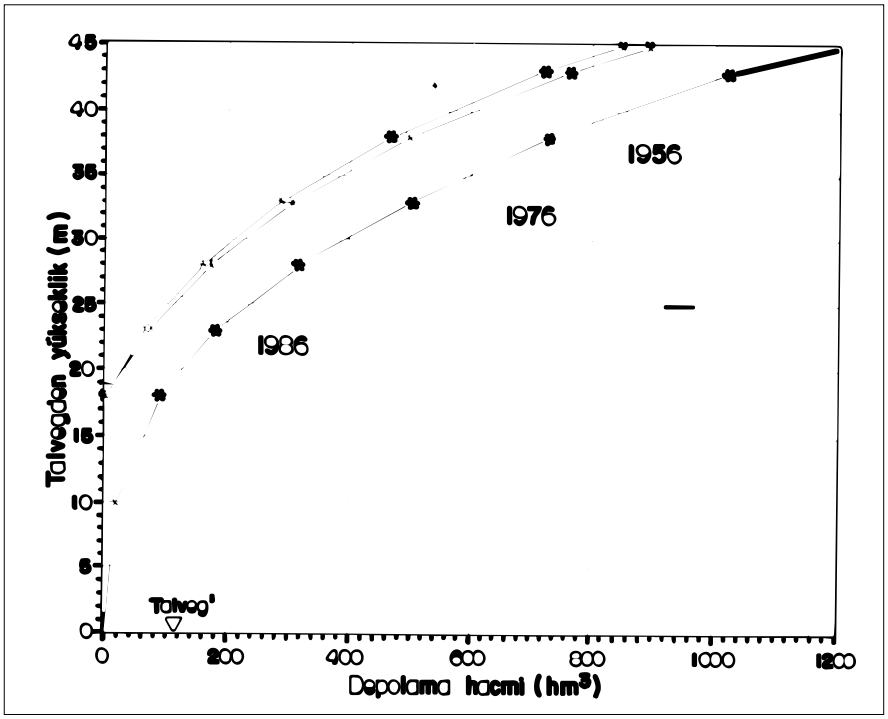
EİE tarafından işletilen bazı istasyonlarda, akarsulardaki debi değerlerinin yanı sıra, taşınan sediment miktarı da ölçülmekte ve elde edilen bilgiler zamanla güncelleştirilmektedir.

Sediment birikimi ve baraj haznelerindeki kapasite değişmelerini izlemek amacıyla DSİ Genel Müdürlüğü de; belirli aralıklarla rezervuar hacmi için ölçümler yapmakta ve ölçüm sonuçlarını yükseklik-hacim ilişkisine dönüştürmektedir.

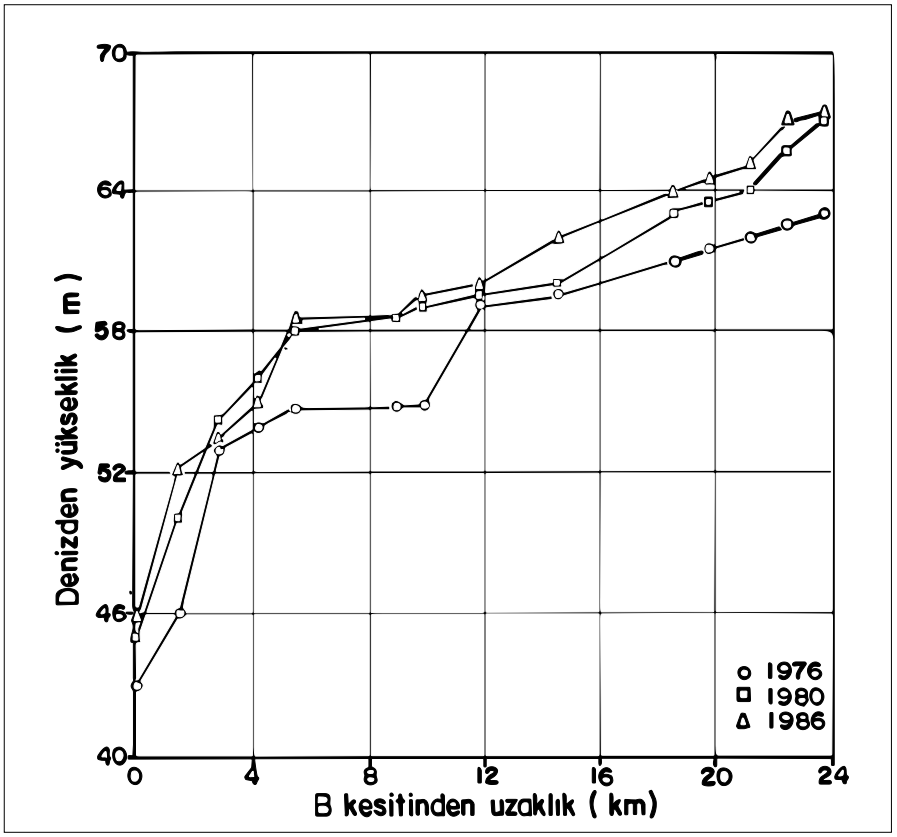
Şekil 8.2'de Seyhan Barajı rezervuarı ve ölçüm yapılan kesitler gösterilmektedir. Bu kesitlerdeki ölçümlerden elde edilen, yükseklik-depolama hacmi eğrileri ise Şekil 8.3'te gösterilmiştir. 1976, 1980 ve 1986 yıllarında kesitlerde yapılan ölçümler ile elde edilen taban profilleri ise Şekil 8.4'te verilmiştir.



Şekil 8.2 : Seyhan Barajı haznesi ve ölçüm yapılan kesitler (Özcan ve Kırkgöz, 1994).



Şekil 8.3 : Seyhan Barajı haznesinde yükseklik-depolama hacmi eğrileri (Özcan ve Kırkgöz, 1994).



Şekil 8.4 : Seyhan Barajı'nda ölçülen taban profilleri (Özcan ve Kırkgöz, 1994).

8.3 Medik Barajı'nda Sediment Birikimi

Malatya sınırları içinde Tohma Çayı üzerinde, 1975 yılında inşaatı tamamlanan Medik Barajı; kil çekirdekli zonlu toprak kaya dolgu baraj tipinde olup, talvegden yüksekliği 42 m'dir. Normal su kotunda göl hacmi 22 hm^3 olan bu baraj ile 6800 hektar arazinin cazibe ile sulanması sağlanmıştır. Proje taşkın piki 1800 m^3/s olan Medik Barajı yandan alışlı bir dolusavağa sahiptir (Şekil 8.5).



Şekil 8.5 : Medik Barajı ve rezervuarının görünüşü (1980) (Yıldız ve Kaş, 2007).

Malatya Yazıhan sulamasını besleyen Medik Barajı rezervuarı suyunu Tohma Çayı'ndan almaktadır. Tohma Çayı Sivas ili Gürün ilçesinden doğmakta, geçtiği meskûn sahaların evsel atıklarını da aldığı gibi, topoğrafik yapı itibariyle yağmur ve sulama sularını da tahliye etmektedir.

Bu sebeple yoğun bir sürüntü malzemesi konsantrasyonu ile rezervuara giren akım, baraj rezervuarını büyük oranda sürüntü malzemesi ile doldurmuştur (Şekil 8.6 ve Şekil 8.7). Sedimentle dolan ve bitki örtüsüyle kaplanan rezervuarda, doğal olarak yeni akım kanalları meydana gelmiştir (Şekil 8.8).



Şekil 8.6 : Medik Barajı'nın sedimentle dolan ve bitki örtüsüyle kaplanan rezervuarının görünüşü (Mayıs 1996) (Yıldız ve Kaş, 2007).



Şekil 8.7 : Medik Barajı'nın sedimentle dolan ve bitki örtüsüyle kaplanan su alma yapısının görünüşü (Eylül 1996) (Yıldız ve Kaş, 2007).



Şekil 8.8 : Sedimentle dolan Medik Barajı rezervuarında doğal olarak oluşan kanallar (Eylül 1996) (Yıldız ve Kaş, 2007).

Medik Barajı rezervuarın bu denli dolması sonucu, akım hem su alma yapısına hem de dolusavağa, rezervuar içerisinde doğal olarak oluşmuş kanallardan ulaşmaktadır.

Bu durum yoğun bir sediment konsantrasyonu içeren suyun sulama kanallarına verilmesi sonucunu doğurmakta ve sulama kanalları ile sistem üzerindeki tünel ve sifonlarda, yılda 2-3 kere temizlenmesini gerektirecek şekilde, sürüntü malzemesi birikimine neden olmaktadır.

Ekonomik bir sulama yapılması, toprak yapısının bozulmasının önlenmesi, tesisin kullanılabilirlik süresinin artması için sürüntü malzemesinin kanala girmesinin en aza indirilebilmesi amacıyla çalışmalar sürmektedir.

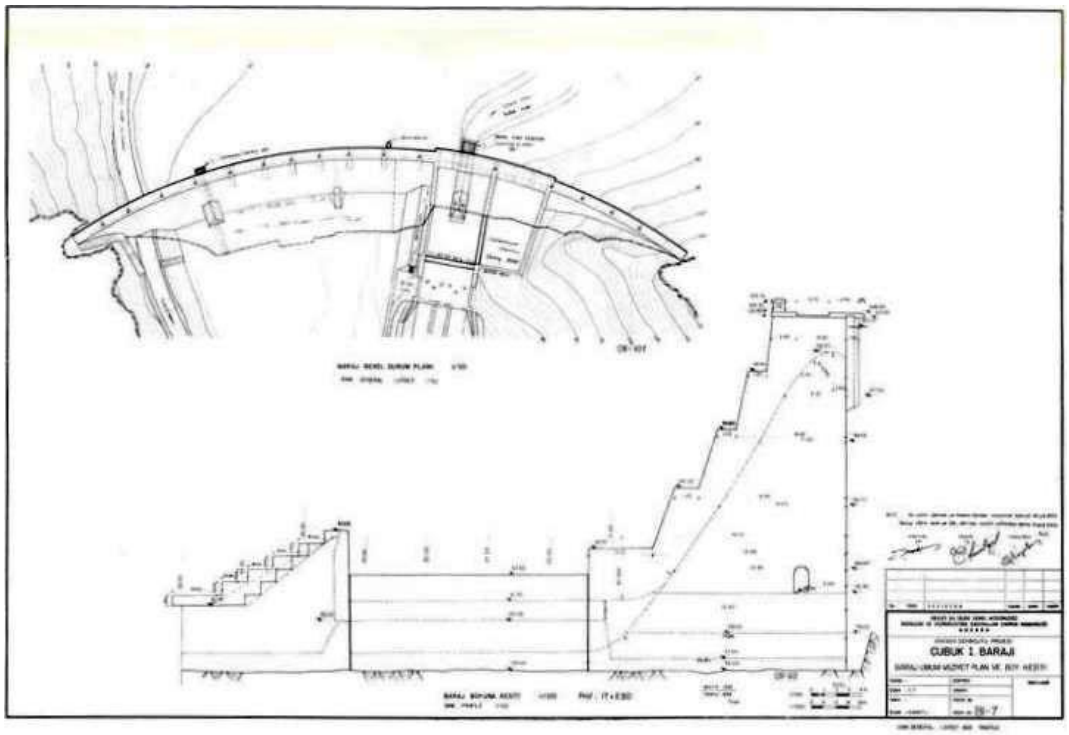
8.4 Çubuk I Barajı'nda Sediment Birikimi

Çubuk I Barajı Ankara ilinin 12 km kuzeyinde bulunan Çubuk Çayı üzerinde, 1929-1936 yılları arasında; içme, kullanma, sanayi suyu temini ve taşkın kontrolü amaçlı olarak inşa edilmiştir (Şekil 8.9).

Gövde dolgu tipi beton ağırlık olan bu barajın (Şekil 8.10) gövde hacmi 0.12 hm^3, akarsu yatağından yüksekliği 25 m'dir. Normal su kotunda göl hacmi 5.6 hm^3, normal su kotunda göl alanı 1.2 km^2'dir.



Şekil 8.9 : Çubuk I Barajı genel görünümü (DSİ, 2011e).



Şekil 8.10 : Çubuk I Barajı plan ve kesitleri (Yıldız ve Kaş, 2007).

Günümüzde, Çubuk I Barajı sadece rekreasyon amaçlı kullanılmaktadır. 1994 yılından itibaren barajdan su alımı durdurulmuştur. Bunun sebebi Çubuk Çayı'na çevre ilçelerin kanalizasyonlarının dökülmesinin yarattığı kirlilik sonucu, barajın zamanla işlevini yitirmesidir.

8.4.1 Çubuk I Barajı'nın boşaltılması

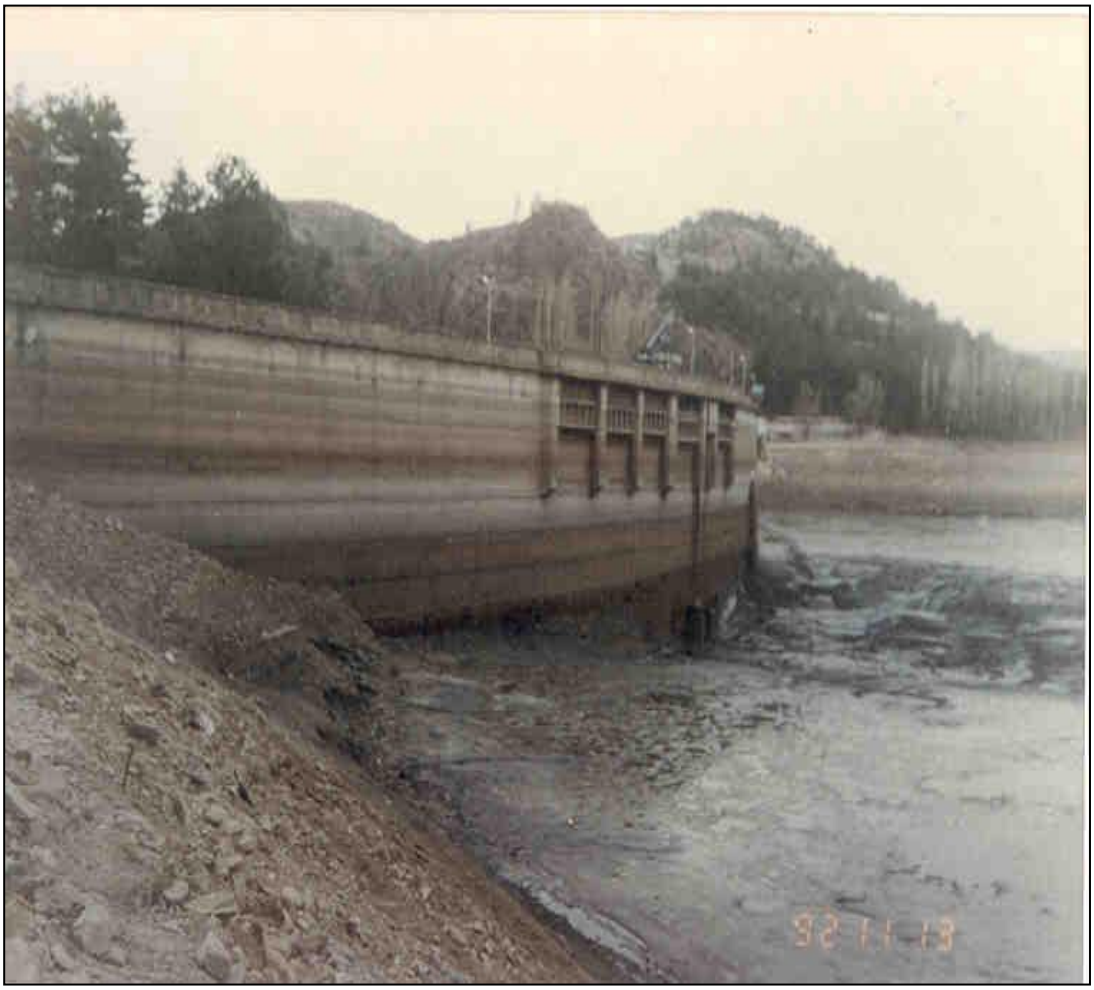
Çubuk I Barajı'nın iki dipsavak cebri borusundan çapı 1.60 m olanın emniyet kapağı, 1992 yılında arıza yapmıştır. Bu arızanın giderilebilmesi için 13 Kasım 1992 tarihinde, baraj gölündeki $1x10^6$ m^3 suyun tamamı ani şekilde boşaltılmıştır (*rapid drawdown*).

Boşaltım sırasında; dipsavak giriş ağzına yakın bölgede, belirli miktarda sürüntü malzemesi de suyla beraber baraj mansabına geçmiştir.

Boşaltım sonrası yapılan incelemelerde, rezervuarda 893.90 m kotuna kadar sediment biriktiği belirlenmiştir (Şekil 8.11).

Rezervuarın topoğrafik yapısı nedeniyle sediment birikiminin rezervuar alanı boyunca uniform olarak yayıldığı, belirgin lokal birikim bölgelerinin bulunmadığı görülmüştür.

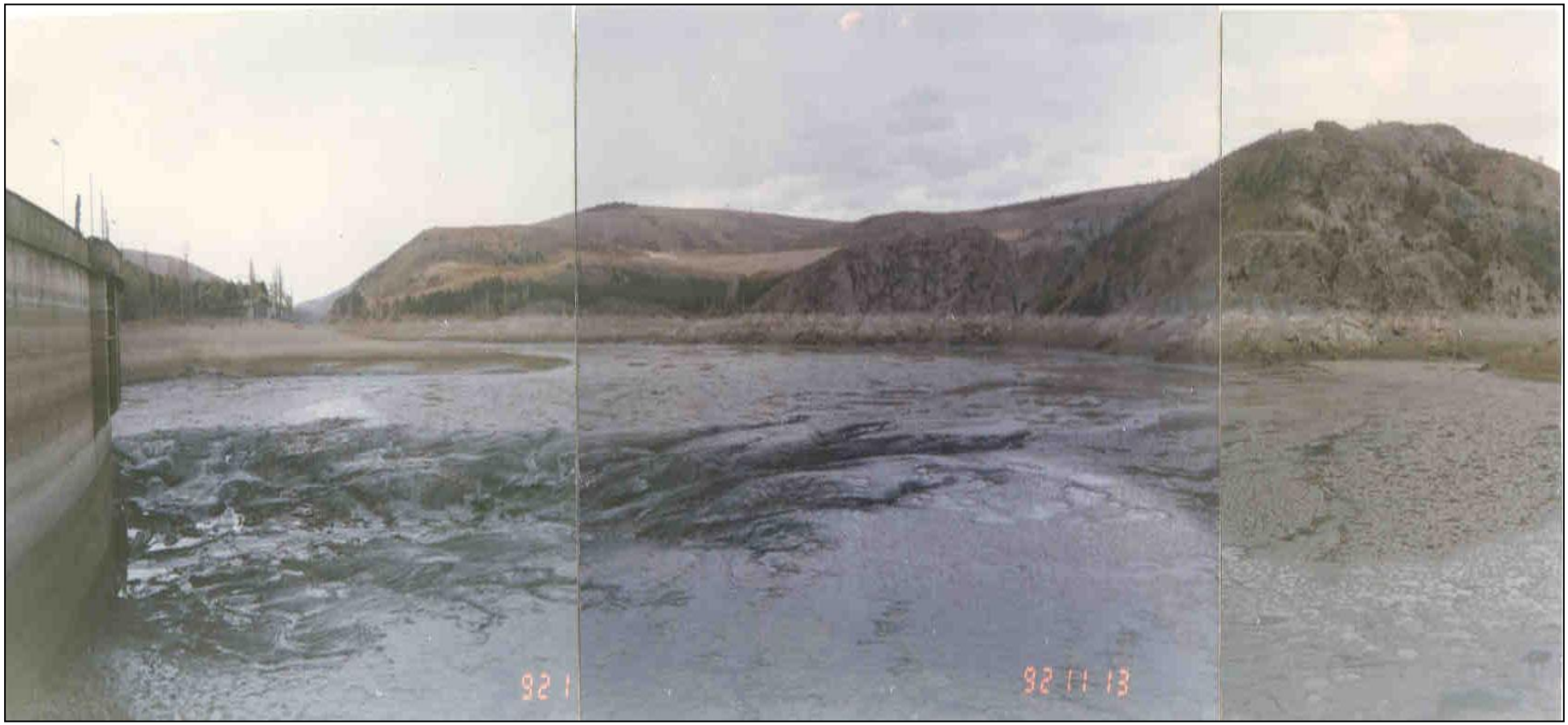
Rezervuarda üst kotlara biriken malzemenin, daha çok evsel ve endüstriyel atıkların çökelmesiyle oluşan tabakalar olduğu tespit edilmiştir (Yıldız ve Kaş, 2007).



Şekil 8.11 : Çubuk I Barajı rezervuarının boşaltıldıktan sonraki durumu (13 Kasım1992) (Yıldız ve Kaş, 2007).

Baraj rezervuarının boşaltılmasından sonra, dipsavaklar giriş ağzı merkez olmak üzere yaklaşık 20 m yarıçaplı yarım daire şeklinde ve 6-7 m derinliğe ulaşan yıkanmış bölge (yıkanma konisi) oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 8.12).

Baraj mansabına suyla beraber geçen sürüntü malzemesi, dipsavak çıkışındaki enerji kırıcı havuzu tamamen doldurmuştur. Enerji kırıcı havuzun dolması vana odasında suyun yükselmesine neden olmuş, vana odasında biriken su pompalarla dışarı atılmıştır. Yıkanan sürüntü malzemesi dipsavak enerji kırıcı havuzundan sonraki mansap kanalında da etkili bir çevre kirliliği yaratarak çökelmiştir (Şekil 8.13).



Şekil 8.12 : Çubuk I Barajı rezervuarının dipsavaklar ile boşaltılmasından sonra gölde biriken malzemenin genel görünüşü (13 Kasım 1992) (Yıldız ve Kaş, 2007).



Şekil 8.13 : Çubuk I Barajı'ndaki yıkamadan sonra mansap kanalına çökelen malzemenin görünüşü (Yıldız ve Kaş, 2007).

8.5 Güllübağ Barajı ve Sediment Savağı

Çoruh havzası:

Türkiye'de, Bayburt ilinde doğan ve toplam uzunluğu 431 km olan Çoruh Nehri'nin son 20 km'si Gürcistan sınırları içerisinde olup; bu ülke sınırları içinde Karadeniz'e dökülmektedir.

Çoruh Nehri yılda 5.8×10^6 m^3 sediment taşımaktadır. Çoruh Havzası bu özelliğiyle erozyona en fazla maruz kalan havzalarımızdan biridir (Sucu ve Dinç, 2008).

Önümüzdeki yıllarda Çoruh Nehri ana kolu üzerinde membadan mansaba doğru; Laleli, İspir, Güllübağ, Aksu, Argun, Yusufeli, Artvin, Deriner, Borçka ve Muratlı Baraj ve HES'leri olacaktır. Şimdilik bu HES'lerden bazıları, bunlara Güllübağ da dahil, ya inşaat halinde ya da proje aşamasındadır.

Güllübağ Barajı ve HES:

İspir Barajı ve HES'in mansabında yapılması planlanan ve Yukarı Çoruh Havzası'nın üçüncü barajı olan Güllübağ Barajı ve HES; Erzurum ili, İspir ilçesinin 5.60 km mansabında yer almaktadır.

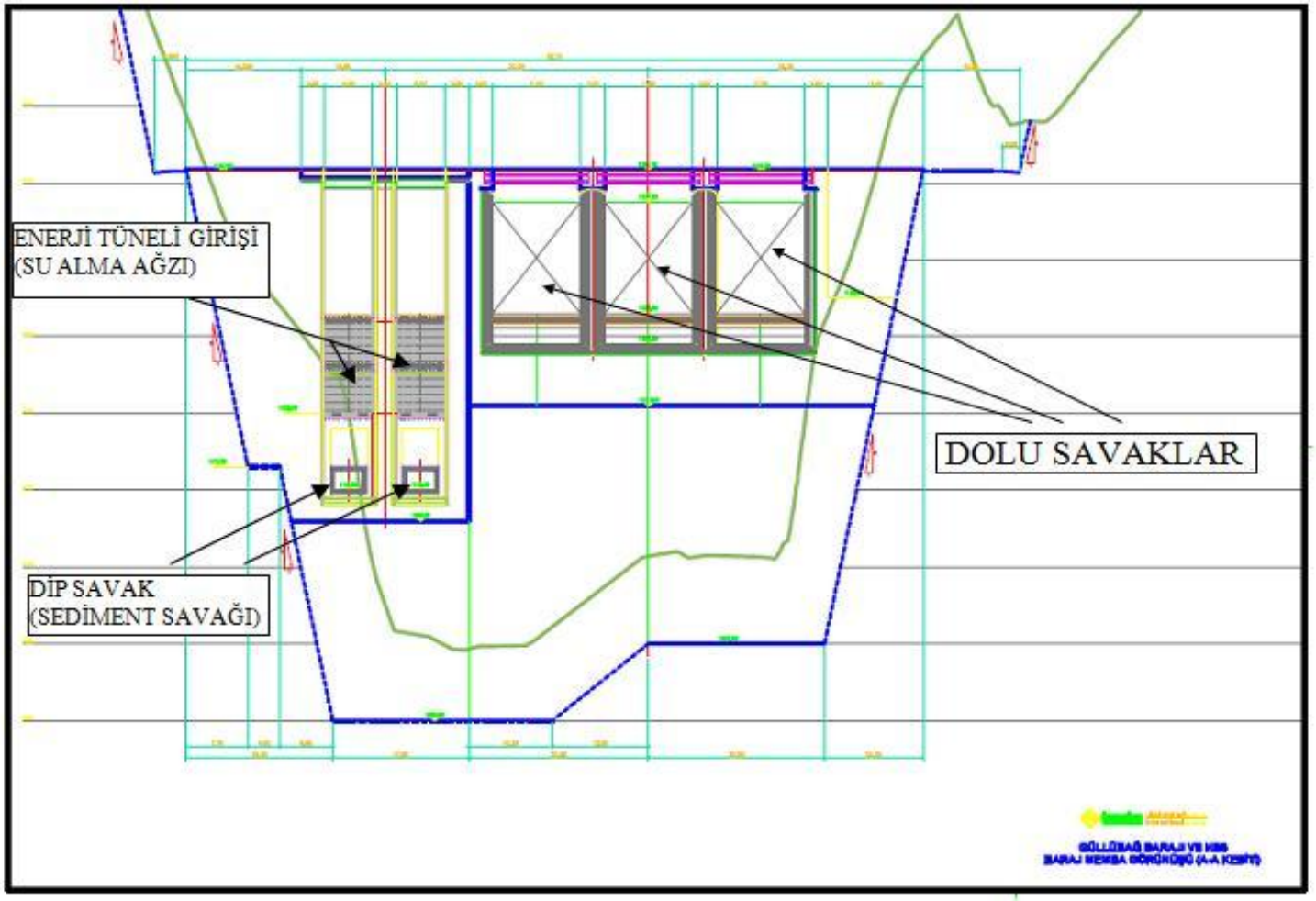
Güllübağ Barajı'nın kurulu gücü 84 MW olup,105 m brüt düşü ile yıllık toplam 284.50 GWh enerji üretilmesi planlanmaktadır. Barajın toplam rezervuar hacmi 20.75 hm^3, aktif hacmi ise 11.33 hm^3'tür (Sucu ve Dinç, 2008).

Güllübağ Barajı ve HES inşaat çalışmaları başlamış olup, projenin 2011 yılı sonunda tamamlanması planlanmaktadır (Şekil 8.14).

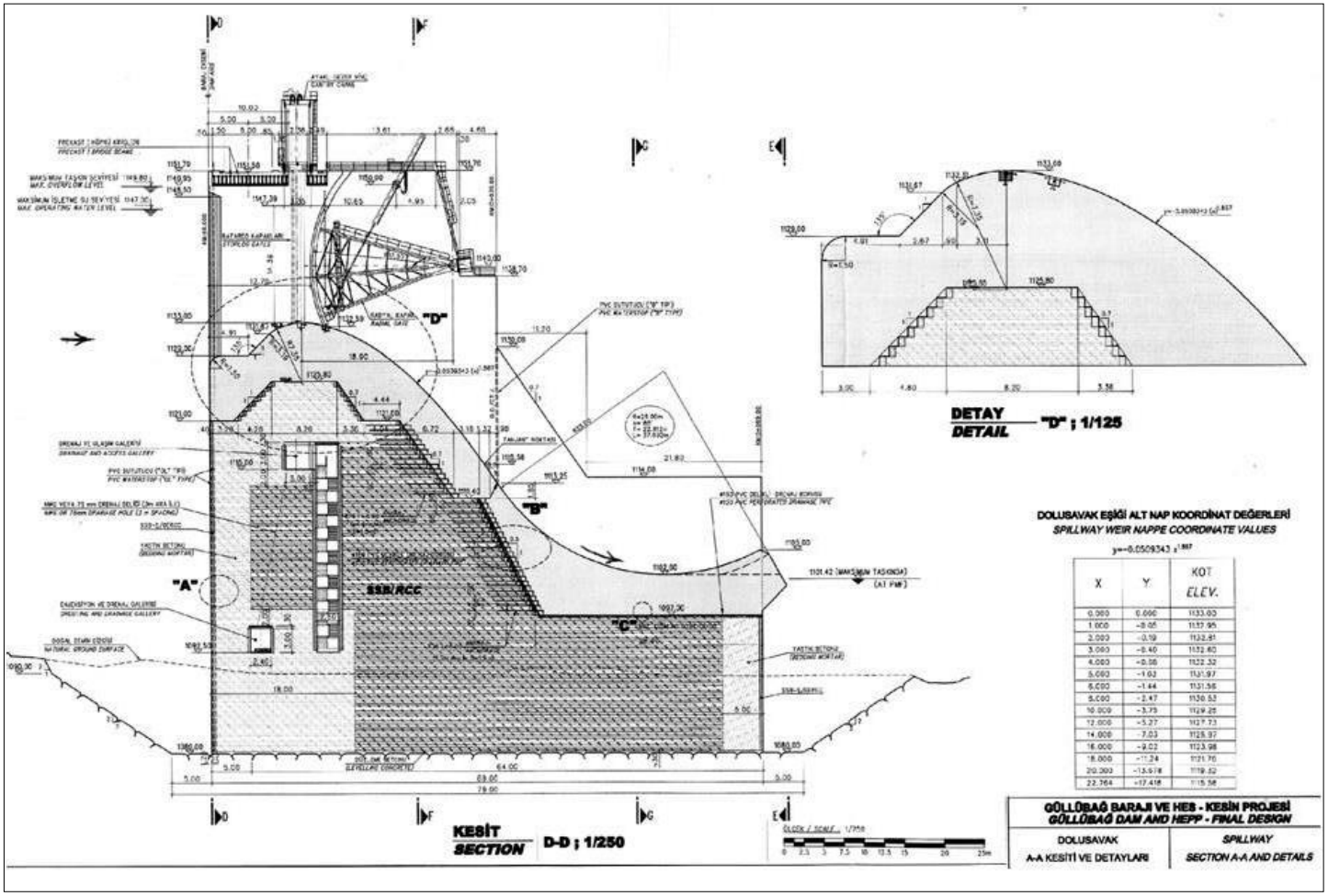


Şekil 8.14 : Çoruh Nehri ve Güllübağ Barajı aksı (Avcı ve diğ., 2009).

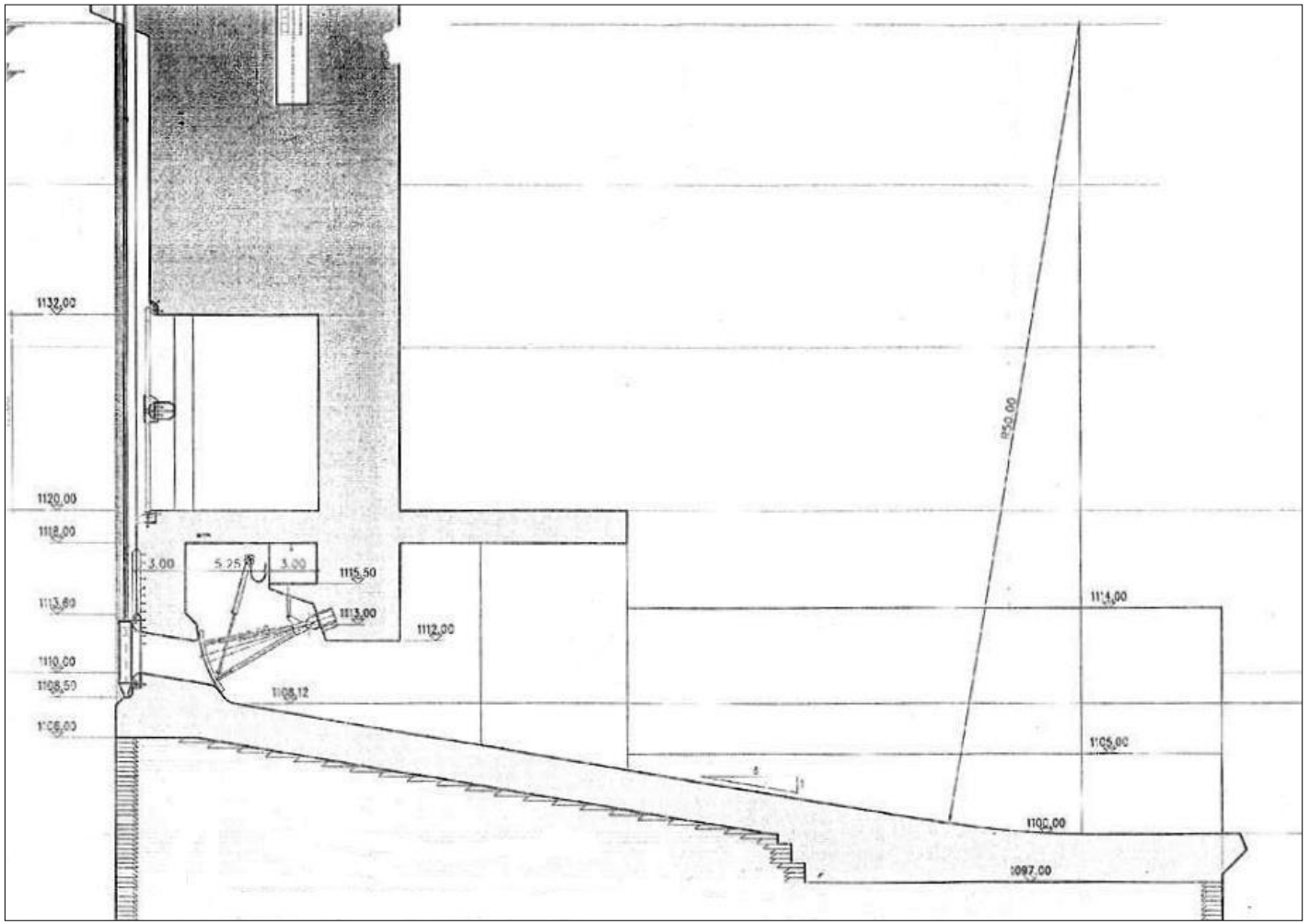
Güllübağ Barajı'nın gövdesi, silindirle sıkıştırılmış beton *(SSB, RCC)* baraj gövdesi tipindedir. Baraj gövdesi üzerinde 3 adet kapaklı dolusavak, 1 adet enerji tüneli su alma yapısı ve 2 adet kapaklı dipsavak şeklinde olan *sediment yıkama savağı* vardır. (Şekil 8.15, Şekil 8.16 ve Şekil 8.17)



Şekil 8.15 : Güllübağ Barajı membadan görünüşü (Avcı ve diğ., 2009).



Şekil 8.16 : Güllübağ Barajı kesin projesi, dolusavak boy kesiti ve detayı (Avcı ve diğ., 2009).



Şekil 8.17 : Güllübağ Barajı kesin projesi, dipsavak (sediment savağı) boy kesiti (Avcı ve diğ., 2009).

Sediment savağı ve işlevi:

Güllübağ Barajı'nın membasında yer alan Laleli ve İspir Barajları inşa edilinceye kadar havzadan gelecek sediment miktarı, 15 milyon m^3 gibi esasen küçük bir hacme sahip olan Güllübağ Barajı'nın ölü hacmini, bir yıl gibi kısa sürede dolduracağı öngörülmüştür.

50 yıllık ekonomik ömür süresince barajın, Laleli ve İspir HES kuyruk sularına endeksli bir doğal akışlı HES şeklinde üretimini sürdürülebilmesi gerekmektedir. Bu sebeple enerji tüneli giriş ağzı yakınında birikecek sedimentin yıkanarak mansaba atılması işlemini gerçekleştirmek üzere (Şekil 8.15 ve Şekil 8.17), tünel giriş ağzının altında iki adet büyük kapasiteli kapaklı *sediment savağı* projelendirilmiştir (Avcı ve diğ., 2009).

8.5.1 Güllübağ Barajı sediment savağı deneyi

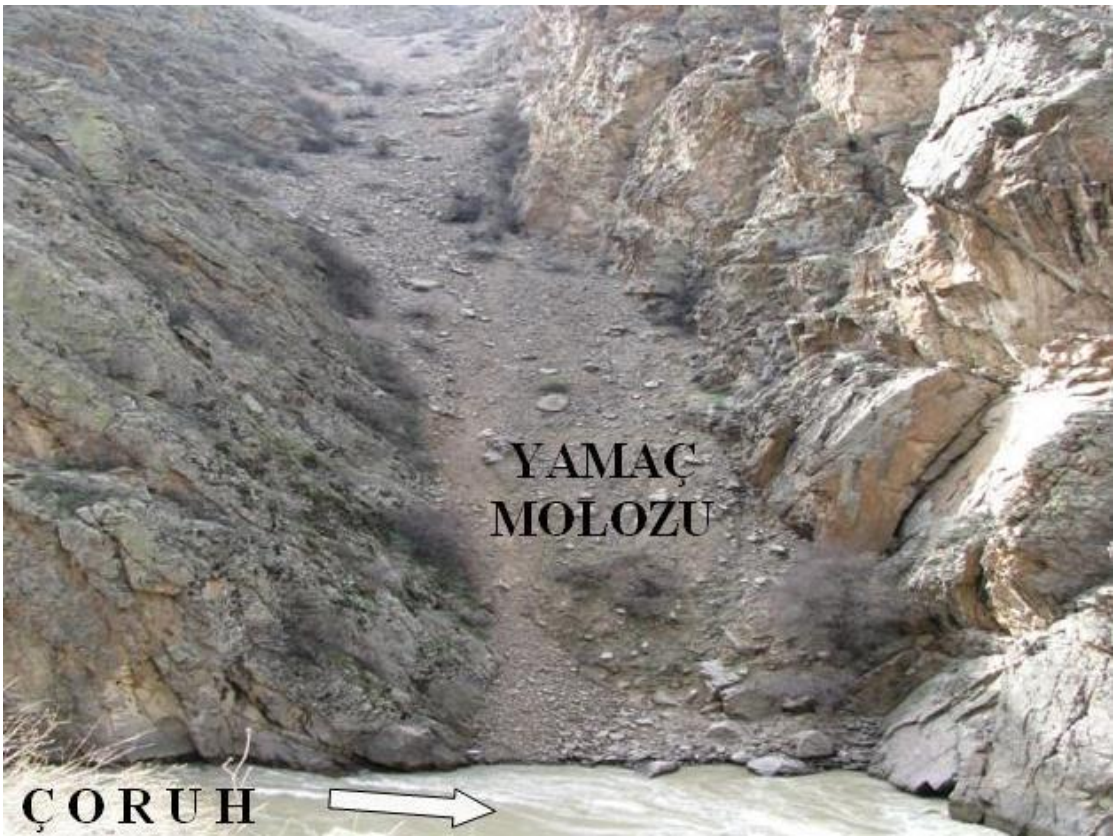
Proje müellifi TEMELSU firması, ön tasarımlarını tamamladığı dolusavaklar ve sediment savağı için hidrolik model deneyleri yapılarak bazı incelemelerin yapılmasını ve kesin proje kriterlerinin belirlenmesini istemiştir.

Bu doğrultuda Senerji, İTÜ İnşaat Fakültesi Dekanlığı'na 03.08.2008 tarihinde başvuruda bulunmuştur. Bu talep üzerine İTÜ Hidrolik Laboratuvarı'nda dolusavakla sediment savağı model deneyleri gerçekleştirilmiş, proje alanında ve proje üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır.

Proje alanında inceleme:

Çok büyük bir taban eğimine ve akım hızına sahip olan Çoruh Nehri'nin sağ ve sol sahil yamaçları çok dik, bitki örtüsü zayıf ve yüzeyi ayrışmış çatlak kayalık bir yapıya sahiptir.

Bu topoğrafik ve jeolojik yapının sonucu olarak, sağ ve sol sahil yamaçlarından ve havzadan sürekli bir kütlesel yamaç molozu ve yüzey erozyonu hareketi olmaktadır (Şekil 8.18). Hareket eden bu malzeme doğrudan veya yan kollardaki dereler vasıtasıyla Çoruh Nehri ana yatağına ulaşmaktadır.



Şekil 8.18 : Güllübağ Barajı proje alanındaki yamaç molozu (Avcı ve diğ., 2009).

Güllübağ Barajı aksının hemen memba tarafında, sol sahilde çok dik eğimli, bir yan dere yer almaktadır. Bu dere havzasından ve tabanından gelen erozyon malzemesi doğrudan barajın sediment savağı ve su alma yapısına yakın bir alana gelmektedir.

Bahsedilen iki sediment kaynağı, membadaki Laleli ve İspir Baraj inşaatlarının gecikmeleri nedeniyle Güllübağ Barajı'na havzadan gelecek olan ve 11 yıl gibi kısa süre içinde baraj aktif hacmini de doldurmasından endişe duyulan sediment yükünden çok daha önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Baraj hidrolik havzasından gelecek olan yüzey ve taban erozyon malzemesi, baraj rezervuarının memba tarafında iri malzemeyi, baraj aksına doğru da ince sürüntü ve askıdaki malzemeyi bırakacaktır.

Baraj aksına yakın konumdaki yan dere ile dik sahil yamaçlarından gelecek kütlesel yamaç molozları doğrudan sediment/dipsavak ve su alma ağzı önünde birikerek, su alma ağzından enerji tüneline sediment girmesi riski yaratabilecektir. Bu nedenle *sediment savağı*, projede ayrı bir önem taşımaktadır (Avcı ve diğ., 2009).

Sediment savağı ve savak boşaltım kanalında yapılan deneyler:

Bu tür rezervuarlardaki sediment birikiminin fiziği ve mekaniğine uygun olarak, membadan/akarsudan gelen çok büyük boyutlu sediment taneleri en membada (rezervuar giriş kesitinde) birikirken, buradan itibaren baraj gövdesine doğru çökelen/biriken sediment çapları gittikçe küçülerek devam eder.

Akış kesitinin (derinlik ve genişliğin) iyice büyüdüğü ve akım hızlarının küçüldüğü baraj gövdesine yakın bölgelerde ise askıda gelen silt (veya ince kum) karakterindeki tanelerin zaman içinde tabana çökelmesi sonucu oluşan, çamur niteliğindeki bir sediment birikimi ortaya çıkar.

Bu kadar ince malzemenin sulama ağzından içeri girerek, santrale gitmesinde hiçbir sakınca olmamasına karşın, zamanla rezervuardaki aktif su hacminde yaratacağı azalma nedeniyle bir olumsuzluk olarak değerlendirilmektedir (Avcı ve diğ., 2009).

Güllübağ HES'in mevcut 100 m düzeyindeki düşüm yüksekliği dikkate alındığında, sualma ağzından tünele ve buradan da santrale/türbinlere 0.5~0.6 mm'den daha büyük tanelerin girmemesi gerekmektedir.

Bu kriter esas alınarak uzun dönem içinde, Güllübağ Barajı memba yüzüne (sualma ağzı önüne) kadar gelip, burada birikecek olan 0.6 mm'den daha büyük tanelerin planlanan sediment savağı yardımıyla yıkanabilirliğinin belirlenmesi için, doğada ortalama çapı 2.5 mm'lik kuvars tanelerine karşı gelen, özgül ağırlığı 1.04 gr/cm^3 olan polisteren malzeme kullanılarak deneyler yapılmıştır.

Yaklaşık 1 m^3'lük polisteren kullanılarak, baraj memba yüzünden itibaren mansaba doğru 2 m uzaklığa ve sediment savağı ile tünel giriş kesiti taban seviyesi arasındaki bir seviyeye kadar dolgu yapılmıştır (Şekil 8.19)

Dolgu ve tesviye işleminden sonra, iki farklı su seviyesi ve işletme koşulu için sediment savağının etki alanı ve yıkama verimliliği ile ilgili deneyler yapılmıştır.

Birinci seri deneylerde baraj su seviyesi 1147 m'de (maksimum işletme seviyesi) tutularak dolusavak kapakları, tünel kapakları ve sediment savağı kapakları tam açık halde iken sediment yıkama deneyleri yapılarak, sediment savaklarının tabanda biriken malzeme üzerindeki yıkama etki ve verimliliği incelenmiştir.



Şekil 8.19 : Deney başlamadan önce dolgunun görünüşü (Avcı ve diğ., 2009).

İkinci deney serisinde ise baraj su seviyesi 1133 m'de (dolusavak kret seviyesi) tutularak, sadece tünel ve sediment savak kapakları tam açık iken benzer deneyler yapılmıştır (Şekil 8.20).

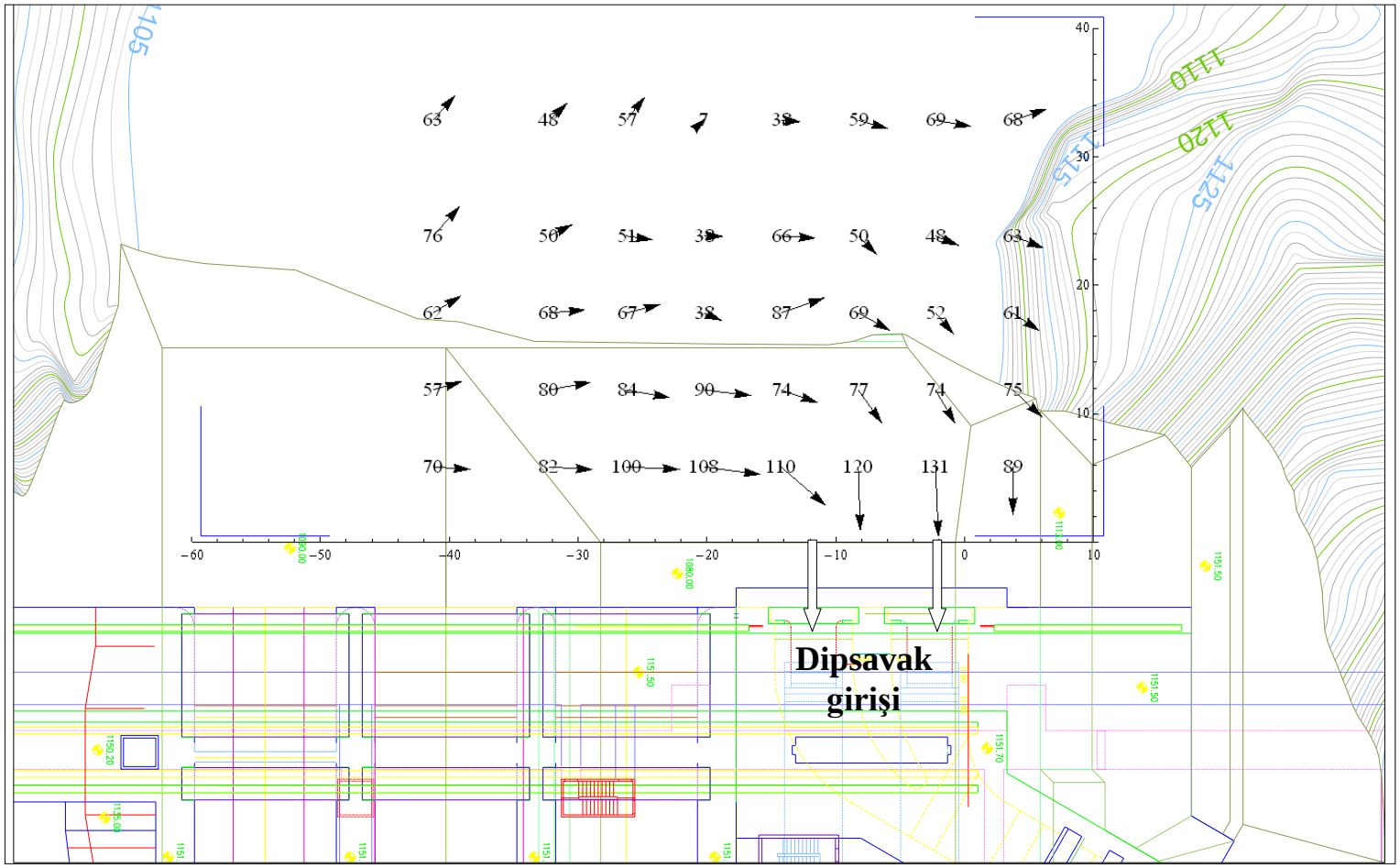
Sediment savağı kapakları tam açık halde iken yapılan deneylerde, baraj memba yüzünden itibaren membaya doğru 1.00 m (prototipte/doğada 30 m) uzaklığa kadar olan alanda yatay ve düşey enkesitler içinde akım hızları ölçülerek; dolusavak, tünel ve sediment savağı akımlarından kaynaklanan hız alanları ve hız dağılımları belirlenmiştir (Şekil 8.21 ve Şekil 8.22).

Her iki akım ve işletme koşulu (dolusavak + tünel + sediment savağı ile tünel + sediment savağı tam kapasitede işletmede olduğu işletme koşulları) için de sediment savağı ve tünel giriş ağzına yakın bölgede, rezervuar tabanındaki akım hızlarında gerek şiddet ve gerekse doğrultu olarak önemli bir farklılığın olmadığı tespit edilmiştir.

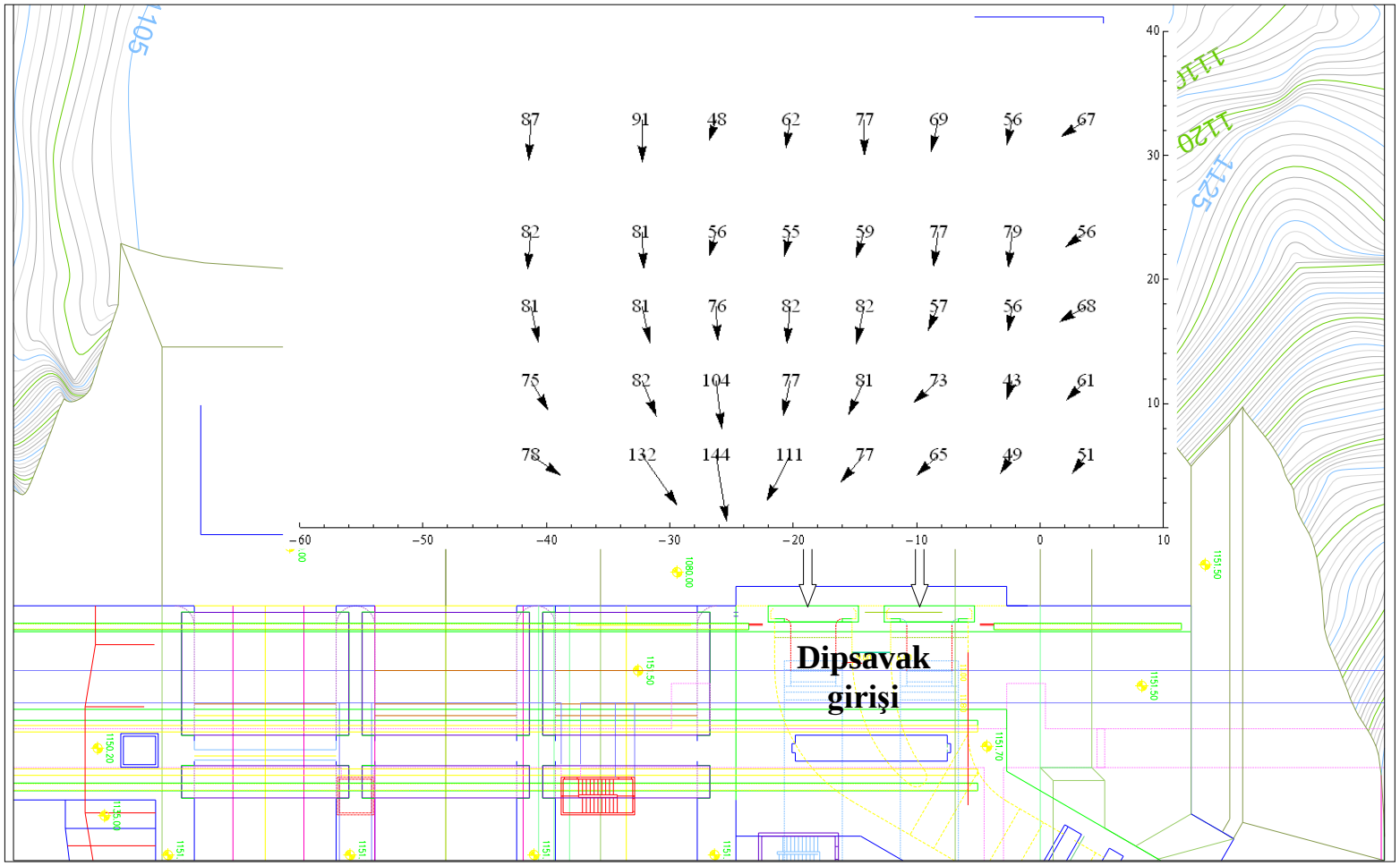
Beklenildiği gibi sediment savağı önünde 1.00 m/sn değerini aşan akım hızları, membaya doğru uzaklaştıkça hızla azalmaktadır.



Şekil 8.20 : İkinci deney serisi sırasında dipsavak ve akımın sol sahilden görünüşü (Avcı ve diğ., 2009).



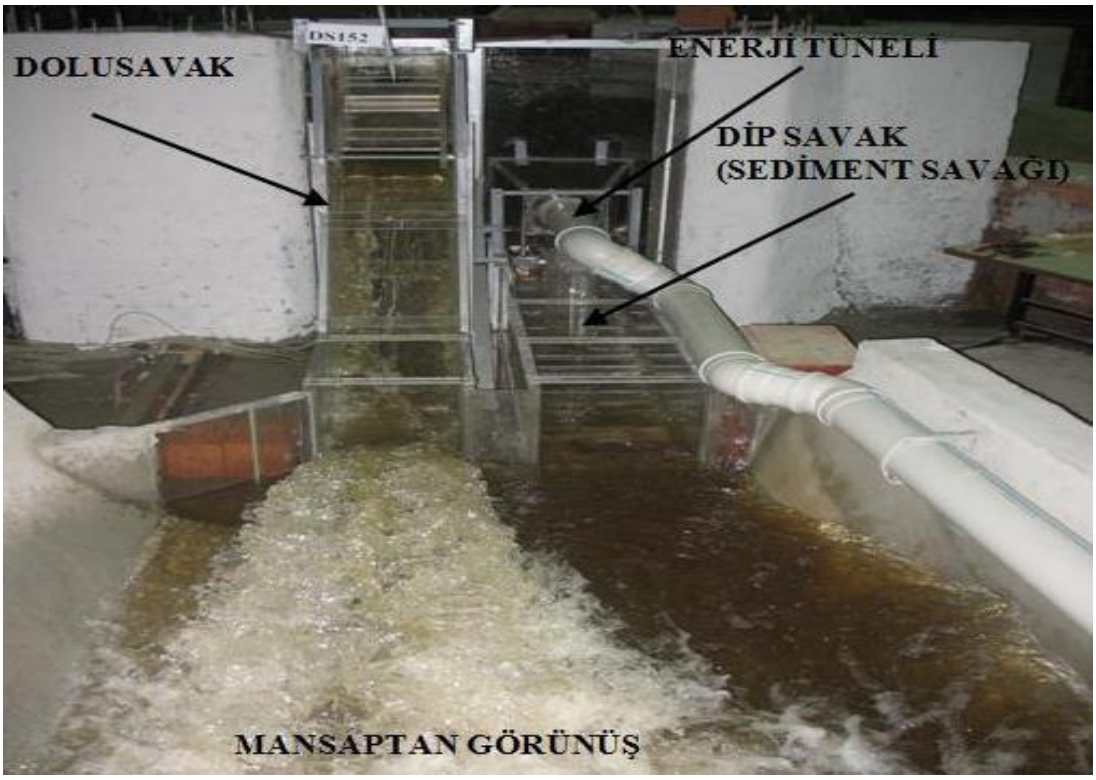
Şekil 8.21 : Dipsavak giriş ağzı seviyesinin 2 m altındaki (1108 m kotu) derinlikten geçen düzlemdeki hız alanı (baraj gölü maks. işletme seviyesinde, dipsavak ve enerji tünel kapakları tam açık) (hızlar cm/s) (Avcı ve diğ., 2009).



Şekil 8.22 : Dipsavak girişinde 1118 m kotundaki yaklaşım hızı dağılımı (baraj gölü maks. işletme seviyesinde, dipsavak ve enerji tünel kapakları tam açık) (hızlar cm/s) (Avcı ve diğ., 2009).

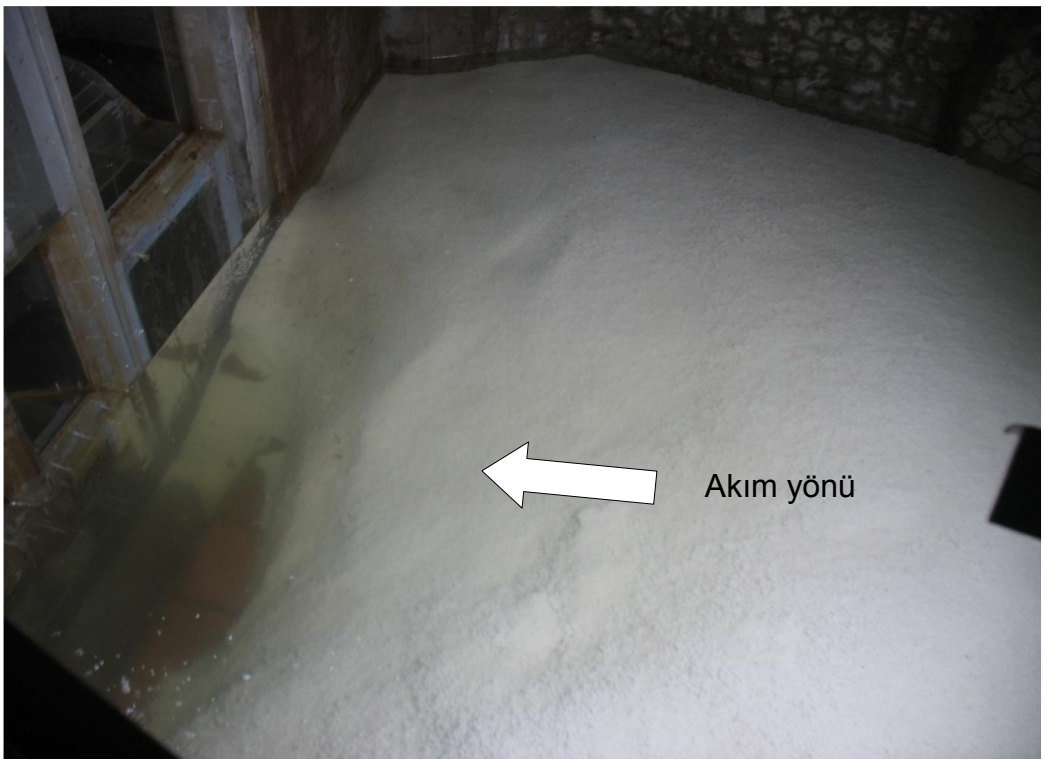
Deney sonuçlarının değerlendirilmesi:

Yapılan deney gözlem ve inceleme sonuçlarına ilişkin değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir (Şekil 8.23):



Şekil 8.23 : Deney modelinin mansaptan görünüşü (Avcı ve diğ., 2009).

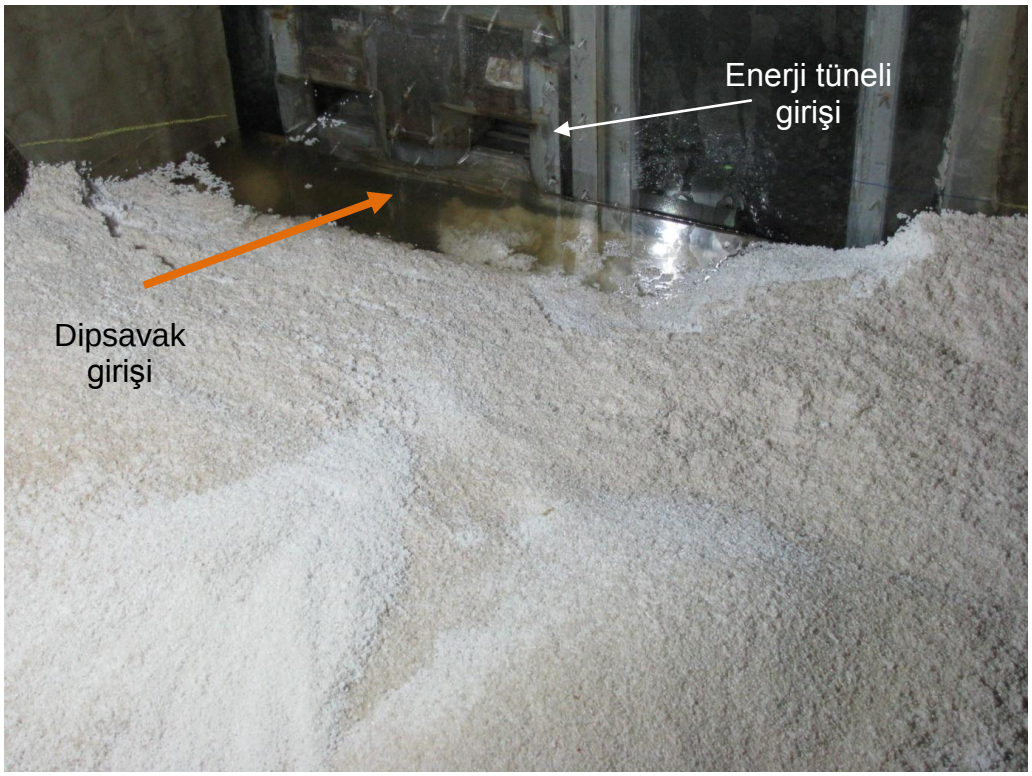
- Sediment savağı giriş ağzı ve yakın çevresinde tabanda hızlı bir sediment hareketi ve yıkanma gerçekleşirken, membaya doğru bu değerler azalmakta ve deneyde kullanılan polisteren malzemesi (doğada 2.5 mm çaplı kuvars kumu) için yaklaşık 30 m'den (doğadaki değer) sonra rezervuar tabanında herhangi bir hareket olmamaktadır. Sediment savağının yıkama etki alanının, sağ sahile doğru birinci dolusavak giriş kesiti aksına kadar uzandığı belirlenmiştir. Bu durum sediment savağı yardımıyla yapılacak yıkama işlemiyle tünel giriş kesiti önünde, yeterince geniş bir alanın sürekli temiz tutulabileceğini ve zararlı olabilecek sediment tanelerinin tünele girişinin önlenebileceğini göstermektedir (Şekil 8.24, Şekil 8.25 ve Şekil 8.26).
- Sediment savağının yıkama etki alanının, tabanda çökelen sediment çapı modelde kullanılan sedimentin doğadaki boyutuna karşı gelen 2.5 mm'den daha küçük olması durumunda daha büyüyeceği, sediment çapı 2.5 mm'den daha büyük olması halinde ise azalacağı tabiidir.



Şekil 8.24 : Deney düzeneğinin sediment deneyi sırasında sol sahilden görünüşü (Avcı ve diğ., 2009).



Şekil 8.25 : Deney düzeneğinin sediment deneyi sırasında üstten görünüşü (Avcı ve diğ., 2009).



Şekil 8.26 : Deney sonrasında düzeneğin sağ sahilden görünüşü (Avcı ve diğ., 2009).

- Barajın ekonomik ömrü içinde veya membadaki Laleli ve İspir Barajları tamamlanıncaya kadar, Çoruh Nehri üzerinden gelip Güllübağ Barajı rezervuarında çökelerek, baraj memba yüzüne (tünel ve sediment savağı giriş ağzı) yakın bölgede birikecek sediment çapının 2.5 mm'yi geçmemesi beklenmektedir. Burada birikecek sedimentin kaynağı özellikle taşkın dönemlerinde askıda gelip, zaman içinde çökelecek olan silt ve ince kum taneleri olacaktır. Dolayısıyla Çoruh Nehri'nden ve rezervuar boyunca membadan gelerek baraj önünde birikecek olan çamur kıvamındaki ince malzemenin, sediment savağı yardımıyla tünel giriş ağzı ve yakın çevresinden yıkanarak temizlenmesinde bir sorun yoktur. Mevcut sediment savağının boyutları ve tünel giriş ağzına göre konumu, santral için tehlikeli olacak boyutlardaki sedimentin yıkanması açısından yeterli güvenceyi vermektedir.

- Barajlarda son yıllarda uygulanmaya başlanan, kapasitesi arttırılmış dipsavaklar ve sediment savakları yardımıyla; ancak sualma ağzı önündeki sınırlı bir alanda biriken ve zamanla konsolide olmamış, ince malzeme birikiminin yıkanarak temizlenmesi mümkündür. Ancak baraj rezervuarında birikecek olan malzemenin temizlenerek aktif hacmin sürekli olarak korunması beklenemez.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, sediment birikiminin oluşum nedenleri, sedimentin rezervuarda hareketi ve dağılımı, bu sediment birikiminin rezervuar ekonomik ömrü üzerindeki etkisi ve rezervuardan uzaklaştırma yöntemleri, dünyadaki barajlardan örnekler verilerek anlatılmıştır. Ülkemizde bazı baraj rezervuarlarındaki sediment birikiminden ve bu birikimin uzaklaştırma yöntemlerinden de bahsedilmiştir.

Tez kapsamında ele alınan konuların özet sonuçları aşağıda sıralanmıştır:

Rezervuarlarda biriken sediment nedeniyle oluşan depolama kapasite kaybı, barajlarda meydana gelen en ciddi problemlerden biridir. Yüksek inşa maliyeti, zorlu çevre koşulları, baraj için uygun alanların kısıtlılığı nedeniyle; yeni bir baraj inşa etmek yerine, barajın kaybolan depolama kapasitesini kazanmak daha tercih edilmektedir (Meshkati Shahmirzadi ve diğ., 2010).

Baraj rezervuarı planlama aşamasında, cevaplarının çok iyi analiz edilmesi gereken sorular aşağıda sıralanmıştır (Rooseboom, 1985).

- Baraj rezervuarına yılda ne kadar sediment gelecek?
- Baraj rezervuarına gelen sedimentin ne kadarı baraj rezervuarında tutulacak?
- Sediment birikiminden dolayı, baraj depolama kapasitesindeki kayıp ne kadar olacak?
- Rezervuarda biriken sedimentin şekli ve bu birikimin taşkın zamanı rezervuara ve nehir membasına etkisi nasıl olacak?
- Bir rezervuarda ne kadar sedimentasyona izin verilebilir?
- Rezervuarın nehrin mansap kısmına ve bölgeye etkileri neler olacaktır?

Sedimentin rezervuar ekonomik ömrü üzerindeki etkisi:

- Baraj rezervuarları sedimentin ölü hacimde birikeceği varsayılarak projelendirilir. Oysa aktif hacim bölgesi de biriken sedimentten etkilenebilmekte, bu da rezervuarın ekonomik ömrünü kısaltmaktadır.

- Depolama kapasitesindeki azalma, rezervuar işletmesinin verimini düşürebilir. Bu durumda baraj işletme programına, biriken sedimentin uzaklaştırılması da dahil edilmelidir.

Memba ve mansap bölgelerinde nehir morfolojindeki değişimler:

- Nehrin debisinde ve sedimentin tane çapı dağılımındaki farklılıklar ve rezervuarda tutulması gibi etkiler, mansapta nehir yatağı morfolojisinde önemli değişmelere neden olur. Bu değişimler yatak seviyesinde alçalma, yatak yan yüzeylerinde aşınma ve eşik oluşumları şeklinde ortaya çıkar.
- Rezervuar taban seviyesindeki yükselme ile membaya doğru oluşan su yüzü profili, bu bölgede malzeme birikimi problemi yaratır.
- Sedimentin rezervuarlarda tutulması; nehrin denize, göle boşaldığı kıyı profilinde gerilemeler, oyulma ve erozyon oluşmasına neden olabilir.

Rezervuarda sediment birikiminin modellenmesi:

Rezervuarlardaki sediment birikimi konusunda birçok hidrolojik ve morfolojik koşul ve karakteristikler mevcut olup, bunların birbiriyle ilişkileri oldukça karmaşık ve hatta birçok açıdan belirsizlikler içermektedir. Çeşitli araştırmacıların geliştirdiği modellemeler mevcut olsa da bunların verimi ve kullanılabilirliği, her rezervuarın kendine has morfolojik ve hidrolojik özellikleri nedeniyle değişkenlik göstermektedir. Bir rezervuara uygulanan bir sistem başka bir rezervuarda etkili olmayabilir. Bu sebeple her rezervuar için ayrı ölçüm ve modelleme yapılmalı, mevcut modeller kullanılacaksa da bunlar her rezervuar için modifiye edilmelidir.

Rezervuarda delta oluşumları:

- Delta oluşumları bir rezervuarın aktif depolamasını doğrudan etkiler. Bir delta dağıtıcı kanalların oluşumu ile ortaya çıkar ve bir bataklık arazi şeklini alabilir. Bu üç boyutlu olay, en gelişmiş modelleme teknikleri kullanılarak dahi kesin olarak açıklanamamaktadır.
- Sediment dağılımı için kullanılan matematik modeller ampirik yöntemlerden daha uygun sonuçlar vermektedir.
- Askıdaki malzemenin yan yüzeyler üzerindeki fiziksel davranışı hâlâ tam olarak bilinmemektedir.

- Akım ve sediment arasındaki ilişkide bilinmeyenlerin artması halinde, fiziksel oluşumun daha iyi anlaşılabilmesi açısından çalışmanın önce laboratuvarda yapılması önerilmektedir.

Yoğunluk ve bulanıklık akımları:

- Durgun rezervuarlarda sıcaklık ve tuz konsantrasyonu etkili bir ara yüzey oluşturur. Böyle bir ara yüzey tabakalar arasında su ve sediment geçişine engel olabilir.
- Sedimentle oluşan yoğunluk akımları, genellikle dik eğimli yataklar ile rezervuara giren silt konsantrasyonu yüksek taşkınlar tarafından meydana getirilir. Silt ve kil gibi ince taneli malzemeler, rezervuarda baraj gövdesine kadar uzun bir mesafe boyunca taşınır.
- Bulanıklık akımları birçok rezervuarda sık sık görülmekte olup, sedimentin çökelme miktarında önemli bir etken olarak değerlendirilmektedir.
- Bulanıklık akımları ile ilgili matematik modelleme teknikleri hala geliştirilmekte, türbülansı içeren modeller kullanılarak sağlıklı sonuçlar elde edilmektedir.
- Eğimli bir yatakta akımın üç boyutlu olarak gelişimi, dalma oluşumları, mendereslenmenin etkisi, yatak ve ara yüzeylerdeki karışım hâlâ tam olarak açıklanmamıştır. Bu özellikler sadece ampirik bağıntılar yardımı ile hesaba katılabilmektedir.

Kohezyonlu sediment birikimi ve rezervuara doğru kütlesel kaymalar:

- Rezervuarlara taşınan sedimentin büyük bir bölümü kohezyonlu sedimenttir.
- Akımda kohezyonlu sediment konsantrasyonu veya suyun tuz içeriği yüksek olduğu durumlarda flakülasyon oluşur ve kohezyonlu sedimentin çökelme hızı artar. Aksi durumda ince malzemeler oldukça uzun bir süre askı halinde kalır.
- Rezervuara çökelen kohezyonlu sediment zamanla konsolide olur, taşınımı güç bir hale gelir.
- Kohezyonlu sediment karakteristikleri, rezervuarlardaki birikimin hesabı için geliştirilen matematik modeller içerisinde yer almalıdır.

- Sedimentin iri taneli kısmının rezervuarda kalması ve sadece ince taneli malzemelerin mansaba bırakılması, mansapta yatak tabanının alçalmasına neden olur.
- Rezervuara doğru oluşan kütlesel kaymalar büyük kütlesel salınım ve dalgalar yaratarak, barajda ve kıyının karşı yüzlerinde hasarlara neden olabilir. Rezervuara kayan kütlenin hacmi rezervuarın depolama kapasitesini önemli ölçüde azaltabilir.

Rezervuarlarda sediment birikimin önlenmesi yöntemleri:

Rezervuarlarda sedimentasyonu yönetmek için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemleri üç ana grupta toplamak mümkündür (White, 2001):

1. Rezervuara sediment girişinin azaltılması

- Havzada sediment verimini en aza indirmek için arazi kullanım uygulamaları, tarım yöntemleri, ağaçlandırma gibi erozyon kontrol önlemleri bu kategoride bulunuyor.
- Rezervuara doğru giden sedimentin önünü kesmek için kontrol barajları inşa etmek veya o bölgeyi bitki örtüsüyle kaplayıp sedimentin rezervuara varmadan çökelmesini sağlamak bu kategoridedir.
- Çevirme kanalları ve tüneller yardımıyla, sediment konsantrasyonu yüksek akımı rezervuara girmeden, direkt mansaba aktarmak da bu gruba girer. Buradaki amaç, rezervuarı sediment konsantrasyonu düşük akımla doldurmaktır.

2. Rezervuarda depolanacak sedimentin azaltılması

Sedimentin rezervuara çökelmeden uzaklaştırılmasının iki önemli yolu vardır.

- *Boşaltma:* Taşkın zamanı sediment yüklü akım mansaba bırakılarak, sedimentin baraj rezervuarında çökelmesine fırsat tanınmadan uzaklaştırılması sağlanır. Bu yöntem ile çok ince tanelerin (kil, silt) mansaba aktarılması mümkün olmaktadır.
- *Yoğunluk akımlarının yıkanması*: Her rezervuarda yoğunluk akımları oluşmaz. Fakat oluştuğu durumda yoğunluk akımlarının dipsavaklar yardımıyla mansaba aktarılması, baraj su seviyesi düşürülmeden gerçekleştiği için verimli ve tercih edilen bir yöntemdir.

3. Rezervuarda depolanmış sedimentin uzaklaştırılması

Rezervuarlarda birikmiş sedimentin kaldırılması için hidrolik ve mekanik yöntemler mevcuttur.

- *Yıkama*: Rezervuarda biriken sedimentin büyük kapasiteli dipsavaklar yardımıyla, yıkama etkisiyle mansaba aktarılması yöntemidir. İri taneli malzemenin yıkanmasında etkilidir. Yıkama sırasında rezervuar su seviyesinin düşürülmesi, yıkamanın etkinliğini arttırır. Yoğunluk akımlarının dipsavaklar yardımıyla mansaba aktarılması da etkili bir yıkama yöntemidir.
- *Tarama veya mekanik yöntemler*: Bu yöntemlerin uygulanabilmesi için rezervuardaki suyun düşük seviyede olması gerekir. Genellikle küçük rezervuarların temizliğinde ya da büyük rezervuarların lokal bölgelerinin sedimentten temizlenmesi için kullanılır. Pahalı yöntemlerdir fakat sedimentin bazı işlemlerden geçirilerek değerlendirilmesi sonucu, bu maliyet biraz düşürülebilir.
- *Sifonlama yöntemi*: Hidrolik bir sistem olan sifonlama yöntemi, tarama ve diğer mekanik yöntemler gibi dışarıdan bir enerji kaynağına ihtiyaç duymamaktadır. Biriken sedimentin aktarılması için gereken enerji, barajın memba ve mansap su seviyeleri arasındaki kot farkından elde edilen potansiyel enerjidir.
- Bu yöntemlerin hidrolik mühendisliği açısından en önemlileri boşaltma, yıkama ve sifonlama yöntemleridir.
- Yıkama ve boşaltma işlemlerinin mansap bölgesinde oluşturacağı etkiler, işlem öncesinde mutlaka göz önüne alınmalıdır.

***Ülkemizdeki barajlarda sediment birikimi*:**

Ülkemizde bazı barajlardan elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda, bazı baraj rezervuarlarının tahmin edilenin ötesinde bir debi ve sediment taşınımı ile beklenenden daha kısa bir sürede kapasite kaybına uğrayacağı ortaya çıkmaktadır.

Bu durumda 50 yıllık bir işletme süresinde birçok baraj haznesinin kapasitesinin en az %50'sini kaybedebileceği, hızlı kapasite kaybına bağlı olarak sediment tutma yüzdesinin bu süre içinde %10'a kadar düşebileceği tespit edilmiştir.

Bu nedenle gerek yeni planlanacak/projelendirilecek baraj yapısı ve rezervuarlar için gerekse halen işletmede olan barajların öngörülenin üzerindeki sediment birikimlerinin önlenmesi veya boşaltılması/temizlenmesi bakımından, bu ve buna benzer yöntem ve tekniklerin uygulanmaya geçilmesi çok büyük önem taşımaktadır.

Bu tez kapsamında yapılmış olan literatür araştırması, sentez ve değerlendirme sonuçlarının bu konuda araştırma yapanlar ve uygulamacı mühendisler için yararlı olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Abid, A. (1980): ‘‘Transported Sediments and Drawing off at The Nebeur Dam on The Mellegue Wadi During The Period 1 May 1954 To 30 April 1980’’, *International Seminar of Experts on Reservoir Desiltation*, Tunis, Com.**3**

Ackers, P., Thompson, G. (1987): ‘‘Reservoir Sedimentation and Infiluence of Flushing’’, In: Thorne C.R., Bathurst, J.C. and Hey, R.D. (eds.), *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, Wiley, Chichester, UK, p.845-868.

AGM (2007): Erozyon Kontrolü, <*http://www.agm.gov.tr/*faaliyetler8.asp>, alındığı tarih belirsiz

AGM (2011): Su Havzalarında Islah ve Rehabilitasyon Faaliyetleri, <http://www.agm.gov.tr/AGM/AnaSayfa/faliyetler/Havza/Fotograflar/suhavzalarindacalismalar.aspx?sflang=tr>, alındığı tarih 02.05.2011

Ağıralioğlu, N. (2004): *‘‘Baraj Planlama ve Tasarımı-Cilt **1**’’* Kitap, Su Vakfı Yayınları, İstanbul’04

Akıncı, M. (2002): ‘‘Su Toplama Havzalarında Sedimantasyon Sorunu’’, *KHGM Yayınları*, Ankara’02.

Akiyama, J. ve Stefan, H.G. (1986): ‘‘Prediction of Turbidity Currents In Reservoirs and Coastal Regions’’, In: Wang, S.Y., Shen, H.W. and Ding, L.Z. (ed.), *River Sedimentation Vol. **III***, Proc. of The Third Int. Symp. on River Sedimentation, Univ. of Mississippi, Mississippi, USA, p.1295-1305.

Alavian, V. (1986a): ‘‘Behaviour of Density Currents on An Incline’’, *J. Hydr. Engrg*., ASCE, Vol.**1** 12, No. 1, p.27-42.

Alavian, V. (1986b): ‘‘Entrainment and Mixing in Inclined Dense Plumes’’, In: Stefan, H.G. et al. (ed.) *Advancements in Aerodynamics, Fluid Mechanics, and Hydraulics*, Proc. Conf. ASCE, Minneapolis, Minnesota, p.555-561.

Alışık, A., Yalçın, E. (1998): ‘‘Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü’nde Sediment Etütleri Çalışmaları’’, *II. Ulusal Hidroloji Kongresi*, 22–24 Haziran.

Anonim (2011): Jiroft Barajı (İran), <http://mhec-ac-omran.blogfa.com/author-sanaz.aspx>, alındığı tarih 27.04.2011

Aras, T. (2009): ‘‘Cost Analysis of Sediment Removal Techniques From Reservoir’’, A Thesis Submitted to The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Mayıs’09

Asan, T., Erden, Y.K., Özoral, E. (2002): "Bafra Ovası Deltası Kızılırmak Nehri-Karadeniz Birleşimindeki Kıyı Erozyonunda Alınan Önlemler", *IV: Kıyı Mühendisliği Ulusal Semp., Bildiriler Kitabı*, *Cilt: **I***, Antalya, 189-199.

ASCE (1962): ''Sediment Transportation Mechanics: Introduction and Properties of Sediment'', *J. Hyd. Div.*, ASCE, **88**, 77-108.

Avcı, İ., Çokgör, Ş., Durmuş, Ö. (2009): ''Güllübağ Barajı Dolusavak ve Sediment Savağı Model Deneyleri'', SENERJİ Enerji Üretim A.Ş için hazırlanmış Teknik Rapor, İTÜ İnşaat Fakültesi, Aralık 2009.

Bayazıt, M. (1971).: *''Hareketli Tabanlı Akımların Hidroliği'',* İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası.

Bayazıt, M., Avcı, İ. (2010): *''Akarsularda Akım ve Sediment Taşınımı''*, Kitap, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul, 2010, Birsen Yayınevi.

Belbachir, K. (1980): *''Desilting of Hamiz Dam, International Seminar of Experts on Reservoir Desiltation''*, Tunis, 1980, Com **8**.

Bellouni, M. (1980): ''I. Main Courses of Action Undertaken by Algeria for The Desilting of Dams in Operation, II. Study of The Hamiz Dam Dredging. III. The Lucien Demay Dredger and The Desilting of The Hamiz Dam. Intern'', *Seminar of Experts on Reservoir Desiltation*, Tunia, 1980, Com.**13**.

Borland, W.M. (1971): *''Reservoir Sedimentation''*, River Mechanics, Water Resources Publication, Fort Collins, USA.

Borland, W.M., Miller, C.R. (1958): ''Distribution of Sediment in Large Reservoirs'', *J. Hydraul. Div*., ASCE, HY2.

Bozkurt, S., Çultu, L. (1989): ''Rezervuar Sedimentinin Çıkartılması, İşlenmesi ve Kullanımı'', *DSİ Bülteni,* DSİ, Ankara, Kasım 1989

Brabben, T.E. (1988): ''Reservoir Desilting Methods'', *Hydraulics Research*, Wallingford, Tech. Note OD/TN 32, January'88.

Breusers, H.N.C., Klaassen, G.J., Brakel, J. ve van Roode, F.C. (1982): ''Environmental Impact and Control of Reservoir Sedimentation'', 14th Congress on Large Dams, ICOLD, Rio de Janeiro, Q54, R23, p.353-372.

Bridge, J.S., Bennet, S.J. (1992): ''A Model for The Entrainment and Transport of Sediment Grains of Mixed Sizes, Shapes and Densities'', Water Resour. Res., **28**, 337-363.

Brown, C.B. (1943): *''The Control of Reservoir Silting''*, U.S. Department of Agriculture, Miss. Publ., No.**521**, Aug.'43.

Bruk, S. (1985): ''Methods of Computing Sedimentation In Lakes and Reservoirs'', UNESCO, Paris, France, Feb. 1985.

Cavor, R., Slavic, M. (1983): ''Mathematical Model of Reservoir Flushing'', In: *Num. Methods in Laminar and Turbulent Flow*, Proc. Third Int. Conf., Seattle, USA, Section 11, Paper 85, p.986-995.

Chien, N., Wan, Z. (1999): *''Mechanics of Sediment Transport'',* ASCE Press.

Chow, V.T. (1959): *''Open-Channel Hydraulics''*, New York: McGraw-Hill Book Company, 679 p.

Clark, G.R. (1983): ''Survey of Portable Hydraulic Dredges''. US Army Engineer Waterways Experiment Station Hydraulics Lab., Vicksburg, USA, Tech. Rep. HL-83-4, March 1983.

Dai Jilan, Chen Wukui, Zhon Bin (1980): ''A Preliminary Study on Sediment Evacuation From A Reservoir with Siphon Devices'', *Proc. Intern. Symp. River Sed. Beijing*, March 1980, paper D5.

Dawans, Ph., Charpie, J., Giezendanner, W., Rufenacht, H.P. (1982): ''Le Degravement de La Retenue de Gebidem. Essais sur Modele et Experieces sur Prototype'', *Proc. 14th Congress on Large Dams*, ICOLD, Rio de Janeiro, Q38, R29.

Demirkıran, O. (2002): ''Sediment Verimi Tahmininde Batimetrik Çalışmalar Ölçüm ve Değerlendirilmesi'', K. H. Ankara Araştırma Enstitüsü.

Demirkıran, O. (1997): *''Tarım ve Mühendislik''*, TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası, Sayı **54**, S:45-46.

De Vries, M. (1976): ''Morphological Computations'', Delft University of Technology.

DSİ (2011a): Su Kaynakları, <http://www2.dsi.gov.tr/topraksu.htm>, alındığı tarih 27.04.2011

DSİ (2011b): DSİ Hidroloji Sözlüğü, <http://www2.dsi.gov.tr/sozlukler/hidrosozluk/index.cfm?SozcukID=1073>, alındığı tarih 27.04.2011

DSİ (2011c): DSİ Hidroloji Sözlüğü, <http://www2.dsi.gov.tr/sozlukler/hidrosozluk/index.cfm?SozcukID=1074>, alındığı tarih 27.04.2011

DSİ (2011d): DSİ Hidroloji Sözlüğü, <http://www2.dsi.gov.tr/sozlukler/hidrosozluk/index.cfm?SozcukID=1011>,alındığı tarih 27.04.2011

DSİ (2011e): Çubuk 1 Barajı, <http://www2.dsi.gov.tr/bolge/dsi5/ankara.htm#cubuk1>, alındığı tarih 27.04.2011

DSİ (2004): ''Bafra Ovası Sulaması 1. Kısım İnşaatı'', DSİ Bafra Ovası Sulaması Proje Md., Samsun.

Duquennois, H. (1956): ''New Methods of Sediment Control in Reservoirs'', Water Power, May, p.174-180.

Durgunoğlu, A., Singh, K.P. (1993): ''The Economics of Using Sediment-Entrapment Reduction Measures in Lake and Reservoir Design'',*WRC Research Report No. **216***, Water Resources Center University of Illinois at Urbana-Champaign, May 1993.

Eftekharzadeh, S., Laursen, E.M. (1989): ‘‘Sediment Evacuation System For Impounded Rivers’’, In: Eberhardt, A.J. (ed.) Waterpower’89, p.174-183.

EİE (2011a): Barajlar ve Hidroelektrik Santrallerin Dizaynı, <http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/HES/proje/HESProje05_istik.html >, alındığı tarih 27.04.2011

EİE (2011b): Sediment ve Su Kalitesi Çalışmaları, <http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/HES/hidroloji/sedim.html>, alındığı tarih 27.04.2011

Emamgholizadeh, S., Samadi, H., Bina, M. (2005): ‘‘The Flushing of The Sediment Near The Power Intakes in The Dez Reservoir’’, *River Basin Managemen,* Italy.

Evrard, J. (1985): ‘‘Technical and Economic Impact of Reservoir Sedimentation’’, In: Bruk, S. (ed.) *Methods of Computing Sedimentation in Lakes and Reservoirs*, Unesco, Paris, p.1-10.

Evrard, J. (1980): ‘‘Considerations on Sedimentation in The Hydraulic Installations of The Electricite De France (French Electricity Authority)’’, *Intern. Seminar of Experts on Reservoir Desiltation*, Com. 7.

Fan, J. (1985): ‘‘Methods of Preserving Reservoir Capacity’’, pp. 65-164. In S. Bruk (editor), *Methods of Computing Sedimentation in Lakes and Reservoir,* UNESCO, Paris.

Fan, J. (1960): ‘‘Experimental Studies on Density Currents’’, Scientia Sinica, Vol. **IX**, No. 2.

Fan, J. ve diğ. (1962): ‘‘An Approximate Method for Calculating The Density Currents in Reservoirs (in Russian)’’, Scientia Sinica, v. **11**. p. 707-722.

Fan J., Jiang R. (1980):‘‘On Methods for the Desiltation of Reservoirs’’, Intern. Seminar of Experts on Reservoir Desiltation, Corn. 14.

Fang, D., Cao, S. (1996): ‘‘An Experimental Study on Scour Funnel in front of A Sediment Flushing Outlet of A Reservoir’’, *Proceedings of the 6th Federal Interagency Sedimentation Conference*, Las Vegas, March 10-14 1996, pp. I.78-I.84.

Fortier, S., Scobey, F.C. (1926): ‘‘Permissible Canal Velocities”, *Transactions, American Society of Civil Engineers,* Vol **89**, Paper No. 1588, pp 940-984.

Galay, V. (1987): *‘‘Erosion and Sedimentation in the Nepal Himalaya’’,* Water and Energy Commission Secretariat, Kathmandu.

García, M.H., Yu, W., Parker, G. (1986): ‘‘Experimental Study of Turbidity Currents’’, Proceedings of The Advancements in Aerodynamics, Fluid Mechanics, and Hydraulics, ASCE, Minneapolis, Minnesota, pp. 120-127, 1986.

Gessler, J. (1970): ‘‘Self Stabilization Tendencies of Alluvial Channels’’, *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, ASCE, **99**, 235-249.

Goncharov, V.N. (1964): ‘‘Dynamics of Channel Flow’’, Israel Program For Scientific Translation, Moscow, 185, 1964.

Göğüş, M., Adıgüzel, F. (1991): ‘‘Türkiye'de Bulunan Rezervuarların Sedimantasyonu’’, *Türkiye İnşaat Mühendisliği XI. Teknik Kongresi*, Bildiriler Kitabı, Cilt-**1**, İMO, Ekim’91, İstanbul, Türkiye.

Graf, W.H. (1998): *‘‘Fluvial Hydraulics’’*, Chichester, UK: John Willey & Sons.

Graf, W.H. (1971): *‘‘Hydraulics of Sediment Transport’’*, MeGraw-Hill Book Company, Inc., New York.

Han, Q., Tong, Z.J. (1982): ‘‘The Impact of Danjiangkon Reservoir on The Downstream River Channel and The Environment’’, *l4th Int. Congress on Large Dams*, ICOLD, Rio de Janeiro, Brasil, Vol **III**, Q54, R13, p.189-200.

Hannoyer, J. (1974): ‘‘Nouvalle Methode de Devasement des Barrages-Reservoirs’’, Annales de L'Institute Technique du Batiment et des Travaux Puohes, No. **314**, Fev. 1974, p. 146-153.

Hay, A.E, Burling, R.W., Murray, J.W. (1982): ‘‘Remote Acoustic Detection of A Turbidity Current Surge’’, Science, 217, p.833-835.

Holeman, J.N. (l968): ‘‘The Sediment Yield of Major Rivers of The World’’, Water Resources Res. **4**, 737-747.

Hotchkiss, R., Huang, Xi (1995): ‘‘Hydrosuction Sediment–Removel Systems (HSRS): Principles and Field Test’’, *Journal of Hydraulic Research*, pp. 479-489, June 1995.

Hotchkiss, R., Parker, G. (1990): ‘‘Laboratory Modelling of Reservoir Sedimentation and Sluicing: Scale Considerations’’, *International Conference on Physical Modelling of Transport and Suspension*, ASCE, pp. 14B.25-14B.30.

Howard, C.D.D. (2000): ‘‘Operations, Monitoring and Decommissioning of Dams’’, Thematic Review IV.5, prepared for the World Commission of Dams, Cape Town, March 2000.

Hrbáček, J. (1984): ‘‘Ecosystems of European Man-Made Lakes’’, In: Taub, B.F. (Ed.), *Lakes and Reservoirs*, Elsevier Sci. Publ., Amsterdam: 267-290.

Kerssens, P.J. M., Zwaard, J.J. van der (1980): ‘‘Hydraulic and Morphological Impacts of Dam Construction’’, Delft Hydraulics, Publ. No.238, The Netherlands.

ICOLD (1988): *‘‘Guidelines on Sedimentation of Reservoirs’’,* International Commission on Large Dams, Paris.

Kobilka, J.G., Hauck, H.H. (1982): ‘‘Sediment Regime in The Backwater Ponds of The Austrian Run-of-River Plants on The Danube’’, Trans. 14th ICOLD, Q. 54, R. 10.

Korucu, T., Kirişci, V., Görücü, S. (1998): ‘‘Korumalı Toprak İşleme ve Türkiye’deki Uygulamaları’’, Conservation Tillage and Its Application in Turkey, *Tarımsal Mekanizasyon 18. Ulusal Kongresi*, 17–18 Eylül, Tekirdağ, 321–333.

Kresser, W. (1964): ‘‘Gedanken Zur Geschiebe- und Schweb-Stoffführung Der Gewässer’’, Österreichische Wasserwirtschaft, 16 (1/2): 6-11.

Krumdieck, A., Chamot, P. (1979): ‘‘Sediment Flushing at The Santo Domingo Reservoir’’, Water Power and Dam Construction, December 1979, p. 25-30.

Liechti, W., Haeberli, W. (1970): ‘‘Les Sedimentation dans Le Bassin de Compensation de Plagiredra et Les Dispositions Prises pour Le Déblaiement des Alluvions’’, Trans. 10th ICOLD, Q38, R. 3.

Mahmood, K. (1987): ‘‘Reservoir Sedimentation: Impact, Extent, Mitigation’’, *World Bank Technical Report,* No. 71, Washington, D.C.

Mavis, F.T., Laushey, L.M. (1948): ‘‘A Reappraisal of The Beginning of Bed Movement-Competent Velocity’’, International Association for Hydraulic Research, Second Meeting, Stockholm, Sweden.

McManus, J. (1985): ‘‘Physical Processes of Reservoir Sedimentation’’. In: Bruk, S. (ed.) *Methods of Computing Sedimentation In Lakes and Reservoirs*, Unesco, Paris, p.11-39.

Meshkati Shahmirzadi, M.E., Dehghani, A.A., Sumi, T., Mosaedi, A., Meftah, H.M. (2010): ‘‘Experimental Investigation of Pressure Flushing Technique in Reservoir Storages’’, *Water and Geoscience*, ISSN: 1790-5095, ISBN: 978-960-474-160-1, 2010, P. 132-137.

Miller, C.R. (1951): ‘‘Analysis of Flow Duration Sediment Rating Curve Method of Computing Sediment Yiled’’, 1951, U.S. Department of The Interior (USDI), Bureau of Reclamation Sedimentation Section. pp. 3-15 Co1orado.

Morris, G.L. (1996). ‘‘Design Analysis of Sediment -Excluding off- Stream Reservoir, Rio Fajardo, Puerto Rico’’, pp. V.78-V.84, 6th *Federal Interagency Sedimentation Conf.*, Las Vegas.

Morris, G.L., Fan, J. (1998): *‘‘Reservoir Sedimentation Handbook’’*, Design and Management of Dam, Reservuar and Watersheds for Sustainable Use, McGraw-Hill, New York, 1998, In: Electronic Version, Ver. 1.01, September 2009.

Morris, G.L., Fan, J. (1997): *‘‘Reservoir Sedimentation Handbook’’*, McGraw-Hill, New York, 1997.

Mosonyi, E. (1965): *‘‘Water Power Development’’*, Book Published by Akade Miai Kiado, Budapest, 1965.

Nelson, J.M., Shreve, R.L., Mclean, S.K., Drake, T.G. (1995): ‘‘Role of Near-Bed Turbulence Structure in Bed Load Transport and Bed Form Mechanics’’, Water Resour. Res., **31**, 2071-2086.

Özcan, Z., Kırkgöz S.M. (1994): *''Bazı Baraj Haznelerinde Katı Madde Ölçümlerinin Değerlendirilmesi, Su ve Toprak Kaynaklarının Geliştirilmesi Konferansı''*, Cilt-**2** DSİ, Ankara, Türkiye.

Paul, T.C., Dhillon, G.S. (1988): ''Sluice Dimensioning for Desilting Reservoirs'', *Int. Water Power & Dam Construction*, Vo1.**40**, No.S, May, p.40-44.

Qian, N. (1982): ''Reservoir Sedimentation and Slope Stability. Tech. and Environmental Effects'', *14th Int. Congress on Large Dams*, ICOLD, Rio de Janeiro, Brasil, Vol **III**, Q54, G.R 54, p.639-690.

Raudkivi, A.J. (1990): *''Loose Boundary Hydraulics (Third Edition)''*, Pergamon Press, Oxford, England.

Reed, O. (1931): ''Swiss Methods of Avoiding Silt Deposits in Reservoir'', Engineering News-Record, Vol. **107**, No. 8, p. 289-290.

Robinson, A.R. (1981): ''Erosion and Sediment Control in China's Yellow River Basin'', Soil and Water Conservation, No.**36**: 125-127.

Rooseboom, A. (1985): *''Reservuar Sedimentation: Planning Directives''*, Scientific Basics for Water Resources Management, IAHS Publ. No. **153**, Sebtembre'85.

Rienössl, K., Schnelle, P. (1982): ''Sedimentation of Small Reservoirs in The High Alps'', *14th Int. Congress on Large Dams*, ICOLD, Rio de Janeiro, Brasil, Vol **III**, Q54, R5, p.65-82.

Schälchli, U. (1987): ''Reservoir Sedimentation and Flushing in A Hydroulic Model'', In: Topics in Hydr. Modelling, *Proc. 22nd IAHR Congress*, Lausanne, Switzerland, p. 240-245.

Scheuerlein, H. (1987): ''Sedimentation of Reservoirs-Methods of Prevention, Techniques of Rehabilitation'', *First Iranian Symp. on Dam Engrg.*, Teheran, Iran, June '87.

Scheuerlein, H., Tritthart, M., Nunez Gonzalez, F. (2004): ''Numerical and Physical Modeling Concerning The Removal of Sediment Deposits From Reservoirs'', *Conference Proceeding of Hydraulic of Dams and River Structures*, Tehran, Iran, 2004.

Schoklitsch, A. (1929): ''The Hydraulic Laboratory at Gratz. 2. The Desearch Laboratory and The Researches Undertaken There In. B.(f) on The Flow of Water Trough Lakes'', Hydraulic Laboratory Penetice (Ed. Freeman, J.R.), ASME, p. 322-325.

Shields, A. (1936): ''Anwendung der Aehnlichkests Mechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegual'', Mitt. Preussische Versuchanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin'36.

Sly, P.G. (1978): ''Sedimentary Processes in Lakes'', In: Lakes - Chemistry, Geology, Physics. (Ed. A Lerman), Spring-Verlag, 65-89.

Sucu, S., Dinç, T. (2008): ''Çoruh Havzası Projeleri'', DSİ 26. Bölge Müdürlüğü, Artvin, *TMMOB 2. Su Politikaları Kongresi*, 20-22 Mart 2008.

Tolouie, E. (1989): *''Reservoir Sedimentation and De-siltation''*, M.Phil. Thesis, U. Birmingham, U.K.

Üneş, F., Ağıralioğlu, N. (2004): ‘‘Yoğun Dalmış Hazne Akımlarının Matematik Modelle İncelenmesi’’, *itüdergisi/d mühendislik,* Cilt:**3**, Sayı:6, 47-58, Aralık 2004.

Van Rjin, L.C. (2007): ‘‘Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves I. Initiation of Motion, Bed Roughness and Bed-Load Transport’’, *J. Hyd. Eng, .* ASCE, 133, 649-667

Vanoni, V.A. (1977): ‘‘Sedimentation Engineering’’, ASCE, New York, p.587-604 and p.616-618.

Vanoni, V.A. (1975): ‘‘Sedimentation Engineering’’, Manual and Report on Engineering Practice, No. 54. Am. Soc. Div. Engrs. Hydr. Div., 745 pp.

Vermeer, K. (1985): ‘‘ODIRMO A One-Dimensional Model for River Morphology’’, Delft Univ. of Technol., The Netherlands (in Dutch).

Wen Shen, H. (1999): ‘‘Flushing Sediment Through Reservoirs’’, *Journal of Hydroulic Research,* vol.**37**:6, 743-757, 1999.

Wen Shen, H., Lai, J.S. (1996): ‘‘Sustain Reservoir Useful Life by Flushing Sediment’’, *International Journal of Sediment Research,* IRTCES, Vol. **11**, No 3. December.

White, R. (2001): *‘‘Evacuation of Sediments From Reservoirs’’,* Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Ltd.

White, R., Bettess, R. (1984): ‘‘The Feasibility of Flushing Sediments Through Reservoirs’’, *Challenges In African Hydrology and Water Resources,* Proceeding of Harare Symposium, July, D.E. Walling, S.S.D. Foster, P. Wurzel, eds, IAHS Publication No, 1984.

Willi, W. (1965): ‘‘Zur Frage der Sotilen Erosion bei Grossen Gefâllen’’, Mitt.; Vers. Anst. Wasserbau (VAWE), Zürich, Nr. **68**.

Yalin, M.S. (1992): *‘‘River Mechanics’’,* Pergamon Press, Oxford, 219 pages, [ISBN 0-08-040190-2].

Yang, C.T. (1973): ‘‘Incipient Motion and Sediment Transport’’, *J. Hyd. Div.*, ASCE, **99**, 1679-1704.

Yanmaz, M. (1997): *‘‘Applied Water Resourses Engineering’’,* METU Press. Ankara.

Yıldız, D., Kaş, İ. (2007): ‘‘Rezervuarlarda Sediment Birikimi ve Uzaklaştırma Yöntemleri’’, Teknik Rapor, Ada Mühendislik, Ankara 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad:	Burcu Odabaşı
Doğum Yeri ve Tarihi:	Almanya, 14 Ocak 1982
E-Posta:	burcuodabasi@hotmail.com
Lisans Üniversite:	Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği