

Baraj Rezervuarlarında Sedimentasyon ile Mücadele Yöntemleri

Methods to Combat Sedimentation in Dam Reservoirs

Abdulkadir ÜNÜŞTÜ^{1*}, Doç. Dr. Aslı ÜLKE KESKİN²

^{1*}19 Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Fakültesi, Samsun, Türkiye

^{2*}19 Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Samsun, Türkiye

ÖZET

Sedimentasyon, Dünya üzerindeki su kaynaklarının güvenliğini tehlikeye sokan ve süreklilik arz eden bir olgudur. Sedimentasyonla mücadele, hem su kaynaklarının ve su üzerindeki yapıların hem de akarsu havzasındaki ekolojik dengenin korunması açısından çok büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada sedimentasyonla mücadele dört ana başlığa ayrılarak incelenmiştir. Bu başlıklardan üç tanesi baraj rezervuarı ve bulunduğu havzada alınabilecek önlemlere odaklanırken diğer başlık ise havzanın sediment potansiyeline uygun baraj rezervuarının adaptasyon stratejilerine odaklanmaktadır. Başlıklar altında değinilecek mücadele yöntemleri kapsamlı bir şekilde irdelenmiş ve diğer yöntemlerle kıyaslama yapılmak suretiyle stratejiler arası farklar ortaya konmuştur. Sedimentasyonla mücadele yöntemlerine Dünya üzerinden örnekler de sunulmuştur. Bu çalışma ile bir akarsu havzasının, çevresel şartlarına bağlı olarak uygun sediment mücadele yöntemlerinin tekil ya da kombine şekilde kullanılarak su yapılarının aktif işletme ömrünün uzatılması adına yardımcı rehber niteliği taşıması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: "Baraj ekonomik ömrü, Rezervuar koruma yöntemleri, Sedimentasyonla mücadele, Sediment savakları"

ABSTRACT

Sedimentation is an ongoing phenomenon that endangers the security of water resources on Earth. Combating sedimentation is of great importance in terms of protecting both water resources and structures on water, as well as the ecological balance in the river basin. In this study, combating sedimentation was examined under four main headings. Three of these titles focus on the dam reservoir and the measures that can be taken in the basin in which it is located, while the other title focuses on the adaptation strategies of the dam reservoir suitable for the sediment potential of the basin. The struggle methods to be mentioned under the headings have been examined comprehensively and the differences between the strategies have been revealed by comparing them with other methods. Examples from around the world of methods to combat sedimentation are also presented. This study aims to serve as a helpful guide to extend the active operational life of water structures by using appropriate sediment control methods individually or in combination, depending on the environmental conditions of a river basin.

Keywords: "Dam economic life, Reservoir protection methods, Combating sedimentation, Sediment weirs"

1. GİRİŞ

Barajlar gibi büyük rezervuarlara sahip su yapıları, Dünya'daki sediment taşınımının kesilip, biriktirildiği büyük havuzları oluşturmaktadır. Bu durum akarsu havzalarında, barajların ekonomik ömrünün kısalması, Hidroelektrik santrallerinin türlü biçimde hasar görmesi, su kaynağı yapılarının, görevini yerine getiremeyecek duruma gelmesi gibi anlık veya uzun vadede olumsuz etkilerinin yanında verimli toprakların kaybı ve ekolojik dengenin bozulması gibi türlü sıkıntılara da yol açmaktadır. Konu güncel olarak ele alındığında rezervuarlar, küresel malzeme taşınımının yüzde 26'sına denk gelen 100 milyar metreküpten ton dan fazla malzemeyi tutmaktadır (Syvitski vd., 2005).

Sediment taşınımı, ülkeler için yüksek maliyetli yatırımlar olan baraj gibi yapıların aktif işletme ömrünü hızla tüketmektedir. Yapılan araştırmalar neticesinde, sedimantasyondan dolayı birçok baraj rezervuarında sediment doluluğuna 100 yıl olmadan ulaşacağı ön görülmektedir. (Wisser, D. vd., 2013) Bu durum araştırmacıları, akarsu havzalarındaki sediment yükünün azaltılması veya taşınım hızının yavaşlatılması çalışmalarına yönlendirmiştir.

Önceki çalışmalarda sedimentin kaynakları irdelendiğinde, oransal olarak en büyük payın erozyon kaynaklı sedimantasyona ait olduğu görülmektedir. Erozyonun yavaşlatılabileceği lakin hiçbir zaman tamamiyle önüne geçilemeyeceği gerçeği karşısında, bir akarsu havzasındaki barajın, sediment giriş ve çıkış dengesinin sağlanması, baraj mansabında bulunan delta ovalarının geleceği açısından da çok önemlidir. Bu durum ekolojik denge hususunda, barajları sediment kontrolü açısından da önemli bir noktaya taşımaktadır. Akarsularda tasınan sediment ya da diğer bir deyişle katı madde problemi erozyonun tabii bir sonucu olarak su problemleri arasına girmiştir. Akarsu üzerinde kurulacak depolama tesisleri ve diğer su kontrol yapılarının projelendirilmesinde, akarsuyun tasıdığı sediment miktarının bilinmesine ihtiyaç vardır (Ülke, 2010).

Ülkemizde sediment birikiminin baraj rezervuarlarına etkisi türlü çalışmalara konu olmuş ve incelemeler yapılmıştır. Örnek olarak, Demirköprü Barajı'nın rezervuarına gelen sedimentin hacimsel etkisini tespit etmek adına sediment haritaları ve sediment gözlem istasyonu verileri kullanılmış ve söz konusu baraj rezervuar hacminin %33'ünün kaybedildiği tespit edilmiştir. (Kökpınar, vd., 2010)

Bu durumla ilgili olarak, baraj tasarımı yapılırken, rezervuar ömrü kavramından yola çıkılarak öncelikle hayati boyutlandırmalar yapılması gerekmektedir. Rezervuar ömrü diğer bir karşılığıyla barajın ekonomik ömrü, üzerinde kurulu olmuş olduğu akarsuyun sediment potansiyeline bağlıdır. Barajın ekonomik ömrü, ölü hacmin dolacağı süreye göre tayin edilir. Bu süreç planlanırken 50 yıldan 100 yıla kadar çeşitli süreler, tasarımda konu edinilir. Baraj rezervuarında ölü hacim hesabına ilişkin 2003 yılında yapılan bir çalışmada, Kayseri'de bulunan Yamula Barajı ölü hacim hesabı yapılmış, belirlenen ekonomik ömrün zamanla oluşacak zeminsel hareketlenmelerden ötürü sediment birikimi ile beklenenden daha az süre işletme görebilecek görülmüştür. (Latifoğlu, 2003)

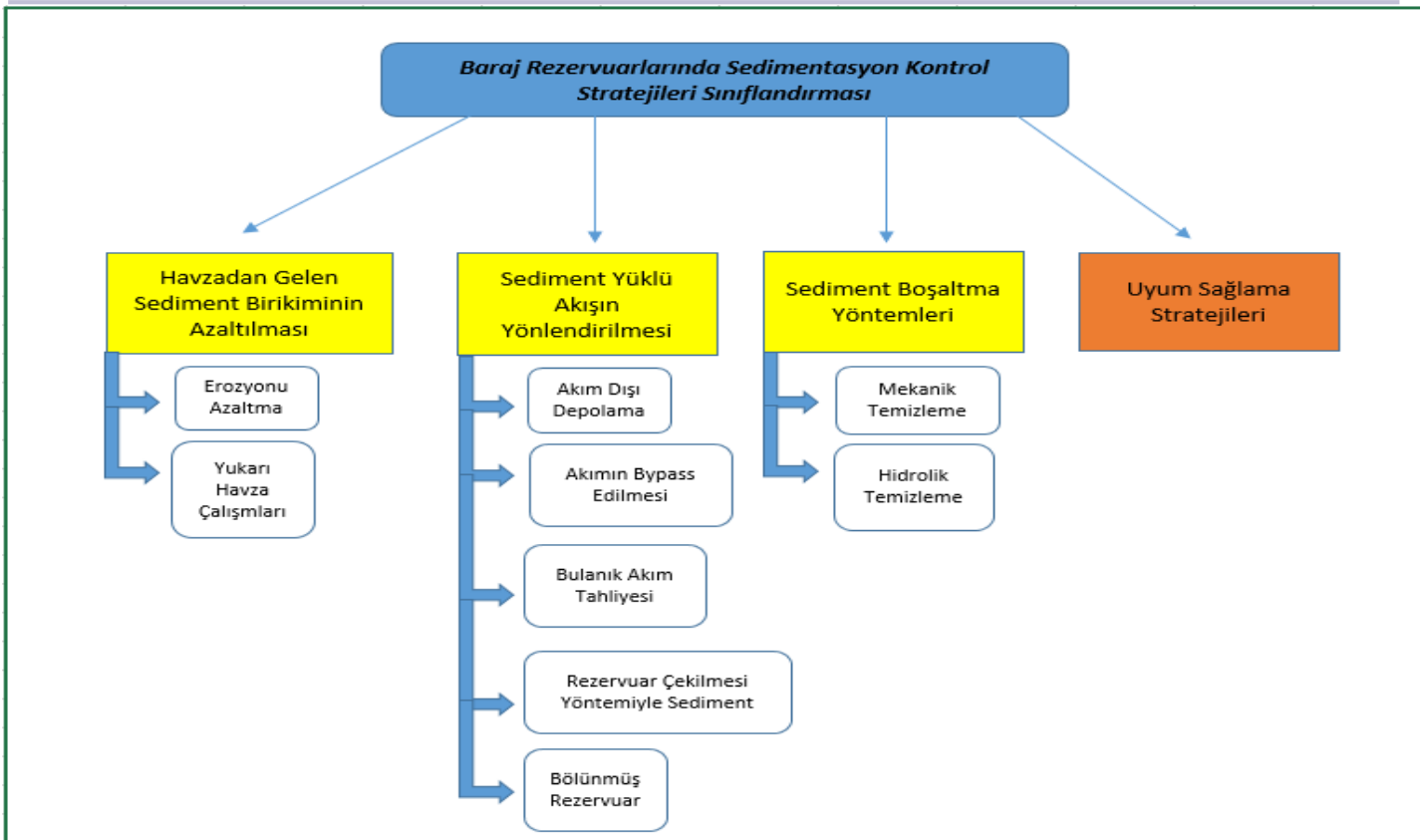
Barajlar, diğer mühendislik yapıları gibi belirli bir ömre sahip olduğundan işletme ve bakım süreçleri çok önemlidir. İşletme ve bakım süreçleri ne kadar bir barajın ömrünü uzatabilirse, bir o kadar da gelecek aşırı bir yağış, heyelan veya aşırı erozyonda bu duruma denk olarak yapının ömrünü hızlı bir şekilde tüketecektir. Bununla birlikte işletme bakım konusunda Morris ve Fan bu konu hakkında şöyle bir tespitte bulunmuşlardır: Yirminci yüzyıl yeni barajların inşasına odaklanırken, yirmi birinci yüzyıl zorunlu olarak mevcut altyapının ömrünü uzatmak için sedimantasyonla mücadeleye odaklanacaktır. (Morris ve Fan,1998)

Geçmişte ve günümüzde yapılan çalışmalar; baraj rezervuar işletmelerinin, uygun sediment yönetimi olmadan fonksiyonlarını tam anlamıyla sürdüremeyeceğini ortaya koymuştur. Makale içerisinde konu edinilen sediment yönetimi stratejilerinin, her bir baraj rezervuarında, içinde bulunduğu hidrolojik, jeolojik ve diğer şartlar ele alınarak değerlendirilmesi gerekliliği belirtilmiştir. Bu doğrultuda, makalenin içermiş olduğu sediment yönetim stratejileri itibariyle, bir baraj planlamasında ve ön tetkiklerinde, sediment kontrolü sağlanması amacıyla bir rehber niteliğinde olması amaçlanmıştır. Makale kapsamında, rezervuarlarda sediment kontrolü yöntemleri genel anlamda irdelenecek, çalışma prensibi hakkında detay bilgiler verilecek ve güncel uygulama örnekleri sunulacaktır.

2. YÖNTEM VE BULGULAR

2.1 Baraj Rezervuarları İçin Sediment Yönetim Stratejileri Sınıflandırılması

Uygun ve sürdürülebilir sediment yönetimi, çevresel zararı minimize etmenin yanı sıra içme-kullanma veya sulama amaçlı yapılan barajların ve hidroelektrik santralleri gibi su yapılarının uzun dönem faydasının sürekliliğini hedeflemektedir. Uygun sediment yönetimi, bir baraj rezervuarına giren ve çıkan sedimentin, memba-mansap birikme dengesinin kurulmasında da önemli bir rol oynamaktadır. Sediment yönetim stratejileri, genel anlamda dört başlık olarak incelenecektir. İlk üç başlık, rezervuarlarda sedimantasyonu önleme niteliğinde olup bunlar;



Şekil 1. Baraj rezervuarlarında sedimentasyon kontrol stratejilerinin sınıflandırılması

Havzadan gelen sediment birikiminin azaltılması, Sediment yüklü akışın yönlendirilmesi, Sediment boşaltma yöntemleridir. Son başlık ise baraj rezervuarının sediment potansiyeline uyum sağlama yöntemleridir.

Bir baraj rezervuarına uygulanacak uygun strateji belirlenirken, barajın içinde bulunduğu teknik, hidrolik, çevresel ve mevzuata uygunluk gibi şartlarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Yukarıda sıralanan yöntemler kısmi veya gereken durumlarda kombine şekilde uygulanabilir. Bunun için öncelikle barajın içinde bulunduğu tüm koşulları kapsayacak nitelikte bir su-rezervuar koruma planı yapılmalıdır.

2.1.1. Havzadan gelen sediment birikiminin azaltılması

a) Erozyonun önlenmesi

Verimli arazilerin kaybına sebebiyet veren, doğal yaşamı oldukça olumsuz yönde etkileyen erozyon, gittikçe artan küresel bir sorun haline gelmiştir. Öyle ki, yirmi birinci yüzyılın ortalarına doğru, Dünya'da ekilebilir alanların yaklaşık %30'unun yitirilmiş durumda olacağı düşünülmektedir (Pimentel, D., vd., 1995). Avrupa Birliği ülkelerinde erozyon tehlikesinin, 12 milyon ha'lık ekilebilir alanın şiddetli erozyon ile karşı karşıya kalması ve mevcut alanların yıllık %0.43'nin kaybına sebebiyet vermesi şeklinde kendini göstermesi beklenmektedir. (Panagos, vd., 2018)

Yukarıda verilen istatistikî bilgiler doğrultusunda, erozyonu önlemek amacıyla öncelikle bir havza ele alınırken yereldeki yağış şartları, havza üzerinde bulunan su yapıları ve en önemlisi ekim ve dikim işi ile uğraşan tarımsal etkenler ile dikkate alınmalıdır. Bununla birlikte ortaya konacak çalışma planı erozyonun yoğun olarak gerçekleştiği havzanın kısımlarını belirgin olarak göstermeli ve uzun vadede tarımsal faaliyet sonucu kendi kendine idame edebilen bir erozyon kontrol planını ortaya koymalıdır. Erozyon kontrol planını oluşturmak adına SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ve benzeri paket programlar kullanılarak hedef planlar oluşturulabilmektedir. SWAT, arazi yönetim pratiklerinin farklı toprak türü, arazi kullanımı ve yönetimi koşullarında, su, sediment, zemin üzerindeki uzun sürelerde etkisini tahmin etmek için geliştirilmiş bir havza modelidir (Arnold vd. 1998). Örneğin; Karas (2005), Sakarya Havzası'nda yer alan, ülkemiz şartlarında uzun sayılabilecek sürede verileri elde edilen ve seri düzeyinde toprak etütleri yapmış, toprak, topoğrafya, iklim ve arazi kullanım özellikleri mevcut bir su toplama havzasında SWAT, USLE (Üniversal Toprak Kayıpları Denklemi) ve RUSLE (Revize Üniversal Toprak Kayıpları Denklemi) modellerinin sonuçlarını araştırmıştır. Çalışmada Güvenç Havzası'nın su ve sediment verimleri, dağınık parametrelili bir model olan SWAT kullanılarak tahmin etmiştir. Havzadan akışla ve su erozyonu ile gelebilecek sedimente kaynaklık eden potansiyel toprak kayıplarının havzadaki konumu ve miktarı USLE ve RUSLE modeli CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ile entegre edilerek tahmin edilmiş ve sonuçta havzaların sürdürülebilir bir yönetimi için alınması gereken toprak koruma önlemlerinin sonuçlarının ve etkinliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Başka

bir örnekte ise; Kuzey Etiyopya da bulunan Debre Yacob Bölgesi'nin yayla olarak kullanılan yüksek kısımlarında geleneksel otlama ve bilinçsiz ekim neticesinde zarar gördüğü ve bu durumun mevcut tarımsal alanın kaybına sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. Bu bölgede hayata geçirilen kapsamlı erozyon odaklı planlar oluşturmak amacıyla paket programlarına, alana özgü şartlar tanımlanarak çıktılar alınmış ve neticesinde söz konusu bölge, şu an kendi içinde toprak kaybı olmadan otlama ve ekim yapılabilen verimli tarım alanına dönüştürülmüştür. (Morris, L., 2020)

b)Yukarı havza çalışmaları

En etkili yöntemlerden biri de sedimentin, baraj rezervuarının memba kısmına ulaşmadan yukarı havzada yapılacak sediment tutucu havuzlarda tutulması ya da sedimentin baraj rezervuarına gelişini yavaşlatacak önlemler alınarak zaman kazanılmasıdır. Yukarı havza depolaması, baraj yapımının fazla olduğu bölgelerde sediment verimini sınırlayan temel bir faktördür ve bölgesel sedimantasyon modellemesinde dikkate alınmalıdır (Minear ve Kondolf,2009). Yukarı havza çalışmalarının Dünya genelindeki örnekleri incelendiğinde, ABD'de yaygın olarak karşılaşılan, hem içme-kullanma suyu olarak kullanılabilen hem de sediment biriktirme alanı olarak kullanılan sediment çökeltme havuzlarıdır. (Mekonnen, M. vd. 2015). En az 2,6 milyon sediment tutucu havuz, ABD'nin toplam drenaj alanının %21'inden akışı yakalar ve bu da toplam tabaka ve dere erozyonunun %25'ini temsil etmektedir. (Renwick, W.H. vd. 2005). Bu küçük ölçekli yapılar membada suyun tutulmasını ve erozyon ve benzeri kaynaklı yerinden sökülen malzemenin tutulması veya akışının gecikmesini sağlayan yapılardır. Yaygın olarak, Çin'de de kullanılan bu yapılar, Çin'in Yellow River Nehri'ndeki son derece aşınmaya müsait olan lös eteklerinde, aynı anda toprak erozyonunu kontrol etmek ve verimli tarım arazileri oluşturmak için çeşitli büyüklükte kontrol barajları olarak karşımıza çıkmaktadır. Kontrol barajları, sürüklenen toprak alanları, verimli tarım arazilerine dönüştürmek amacıyla toprağı ve aşırı konsantre akışları hapsetmek için tasarlanmıştır. 1950'lerden bu yana, kontrol barajı niteliğinde farklı ölçeklerde büyüklüğe sahip 110.000'den fazla barajın inşa edildiği, toplamda 210 milyar ton silt tutulduğu ve geniş tarım arazilerinin geri kazanıldığı bildirilmektedir (Hu, C. Vd. 2004).

2.1.2. Sediment yüklü akışın yönlendirilmesi sediment yüklü akışın yönlendirilmesi

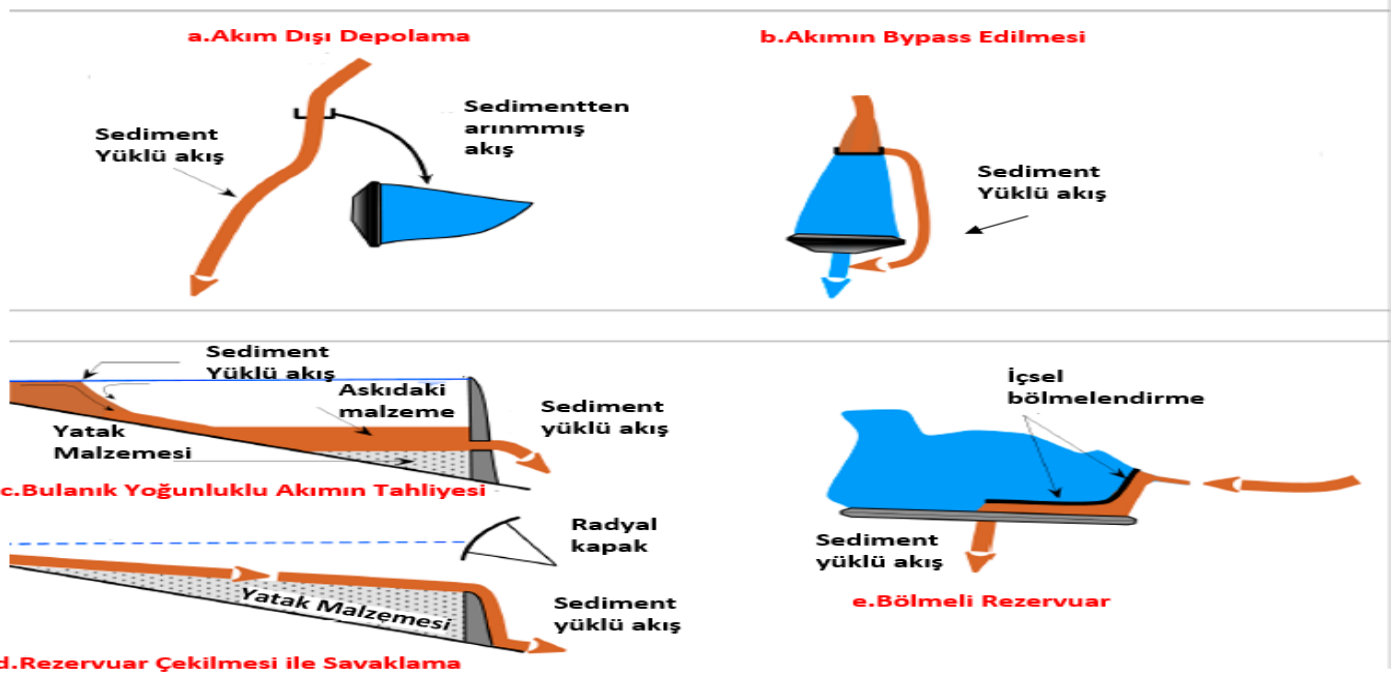
Dünya üzerindeki tüm akarsular taşıdıkları sediment yükü itibariyle farklı zaman aralıklarında değişken miktarlarda sedimenti, akarsu havzasında eğimin az olduğu bölgede biriktirirler. Her ne kadar planlamaya tabi ölçümler sonucu yaklaşık akarsu sediment potansiyelleri ölçülse de bazı durumlarda kısa bir zaman aralığında oldukça yüklü bir sediment taşınımı, akarsu üzerinde bulunan baraj rezervuarının ömrünü çok önceden tüketebilir.

Bölgeye özgü yağış yüksekliği eşiklerini aşan aşırı yağışlar, kapsamlı eğimsel kaymalar başlatabilir (Bogaard, T. vd. 2018) Örneğin, Nepal'deki yoğun 1993 musonu, 85 milyon m³'lük Kulekhani Rezervuarı'nın üzerinde bulunduğu havza yamaçlarında kütle hareketini başlatmış ve "normal" hidrolojik koşullar için yaklaşık 100 yıllık sedimantasyona eşdeğer bir depolama kaybına neden olmuştur. Olaydan üç yıl sonra, sediment verimleri olay öncesi seviyelerine geri dönmüştür. (Shrestha, H.S. 2012). Benzer şekilde, Porto Riko'daki 55 milyon m³'lük Caonillas Rezervuarı'nda, Hortense (1996) ve Georges (1998) kasırgaları, ilk 50 yıllık su tutmaya eşit bir kapasite kaybına neden olmuştur. (Soler-López, L.R. 2001).

Tablo 1. Sediment yönlendirme stratejileri ve yönetim şekilleri

<i>Strateji</i>	<i>Yönetim Şekli</i>
Sedimentin Bypass Edilmesi	
(a) Akım Dışı Depolama	Temiz su depolamaya yönlendirilir.
(b) Akımın Bypass Edilmesi	Sediment yüklü akım, sediment tüneli yardımıyla atılır.
Sedimeti Akıştan Ayırma Yöntemleri	
(c) Bulanık Akım Tahliyesi	Yoğunluk farkı sayesinde çökelmiş malzeme akışkandan ayrılır.
(d) Rezervuar Çekilmesi Yöntemiyle Sediment Savaklama	Taşkın dönemlerindedeki rezervuardaki su seviyesinin azaltılmasıyla dipsavaktan atılım sağlanır.
(e) Bölünmüş Rezervuar	Rezervuar içinde oluşturulacak bölümler ile yoğunluk ve su seviyesi farkı yardımıyla malzeme ve su farklı bölümlere yönlendirilir.

Yukarıda bahsi geçen örneklere karşın; sediment yönlendirme stratejileri, kısaca sediment yüklü akışın minimum biriktirme ile depolama alanını boyunca veya çevresinden akmasını sağlamak böylece temiz akışın depolama alanına yönlendirilirken, sedimentin, akış güzergâhına devam etmesini sağlamak olarak nitelendirilebilir. Beş temel yönlendirme stratejisi ve çalışma görselleri Tablo 1’de belirtilmiştir.



Şekil 2. Sediment yönlendirme yöntemleri temsili gösterimleri

a) Akım Dışı Depolama (Offstream Reservoir)

Akım dışı depolama, bir akarsu havzasının memba tarafında, ana akışın dışında konumlandırılacak şekilde sedimentten ayrılmış suyu biriktirmek amacıyla yapılmış küçük rezervuarlar vasıtasıyla elde edilir. Yerçekimi veya pompaj sayesinde ayrılmış temiz su depolama alanına yönlendirilirken sediment yüklü akış akarsu vasıtasıyla güzergâh boyunca akmaya devam eder. Günlük kullanımda sık karşılaşılan bu depolama şekli, Porto Riko’da inşa edilen Rio Fajardo ve Rio Blanco Akım Dışı Depolamaları ile yerel halkın temiz su ihtiyacı karşılanırken, bu sayede sedimentin %90’nını temizlediği tespit edilmiştir (Morris, 2010).

Ayrıca bazı HES yapılarında büyük ebatlı sedimentin tribünlere zarar vermemesi amacıyla da akım dışı depolama şekli kullanıldığı bilinmektedir. Kolombiya’da San Fransisco, Şili’de Tinguiririca ve Bolivya’daki Hidro San Jose bunlardan birkaçıdır.

Akım dışı depolama, büyük çapta sedimenti rezervuarda depolamak yerine akarsu yatağında bırakarak hem depolama yapısının ekonomik ömrünü tüketmemekte hem de delta ovalarının korunması ile birlikte ekolojik dengeye de katkıda bulunmaktadır. Bu şekilde hem ekonomik anlamda bir avantaj sağlanırken hem de sediment kaynaklı ekolojik deformasyon riskide önlenmiş olmaktadır.

b) Akımın Bypass Edilmesi (Sediment Bypass Tüneli (SBT))

Akımın Bypass edilmesi, depolama yapısının altından bir tünel vasıtasıyla sediment yüklü akışın, biriktirme yapmadan geçişine izin verilmesiyle sağlanır. Bypass sistemli barajlarda tipik olarak sediment bypass tüneli (SBT) bulunur ve bu tüneller, çoğunlukla Güney Afrika’daki Nagle Rezervuarı’ndaki gibi yüksek kapasiteli şekilde inşa edilmektedir. Bypass sisteminde, gelen yatak malzemesini veya askıdaki malzemeyi yönlendirmek amacıyla yönlendirme savağı ve kılavuz kanal yapıları bulunmaktadır.

Bypass tüneli bulunan barajlara örnek olarak Dünya’da 30’a yakın yapı olmakla birlikte günümüzde bu yapılara ilgi artmaktadır. Barajların rehabilitesinde dahi kullanılmaya başlanan bu tünel sistemi, suyun maksimum hızına göre tasarlanmakta ve günümüzde uzunluğu 4.3 km’ye varan örneklerine rastlanmaktadır. En eski sediment bypass tüneli örneği, 1905’te inşa edilen Karasuhara (Japonya) depolamasıdır (Reed, O., 1931).

Akımın barajlarda bypass edilmesi, yönlendirme savağının konumu ve yönlendirilen malzeme itibarıyla günümüzde üç tip şekilde bulunmaktadır. Şekil 2.'de gösterilen bu tiplerden, en yaygın olarak kullanılan şekli Tip-A'dır(Onda, C., vd., 2018).

Tip-A sediment bypass tüneli sisteminde, yönlendirme savağı rezervuarın en memba tarafına konumlandırılır ve yüksek akımda batık duruma gelen savak hem taşınım halinde olan yatak malzemesini hem de askıdaki malzemeyi tünele yönlendirir. Akım hızı yavaşladıkça büyük çaptaki malzeme ayrılarak çökler. Bu durum, rezervuarın membasında bulunan tünelin girişinde diğer bir yüksek debili akıma kadar yatak malzemesini oluşturur. Böylelikle anlık yüklenmeden ötürü oluşabilecek taşkın da önlenmiş olur. (Sumi, T., vd., 2016).

İkinci konfigürasyonda gösterilmiş olan Tip-B'de ise Tünelin girişi daha çok rezervuarın dipsavak kısmına yakın teşkil edilerek tünelin boyu kısaltılmış olur. Bu tip SBT'de sürekli yatak malzemesinin taşınımı tünel vasıtasıyla sağlanmış belirli seviyedeki askıdaki malzemenin ise serbest dolaşımına izin verilmektedir. Bu tip SBT örneği ise The Solis Hidroelektrik Santrali (İsviçre)'de görülmektedir. (Auel, C. vd. 2020)

Son olarak Tip-C'de ise yönlendirme savağı iptal edilerek yatak malzemesinin tünel girişine kadar birikmesine izin verilir dipsavaktan atılımı sağlanır. Bu tip bir sonraki başlık konusu olan bulanık yoğunluklu akımların tahliyesine örnek olacak olan Tayland'da bulunan Shihmen Rezervuarında görülmektedir(Morris, L., 2020).

	Yatak Yüğü ve Delta kontrolü	Minimum işletme kotu altına kadar çekilme var mı?	Yatak yükü ayrılıyor mu?	Malzeme salınım stratejisi
 <p>Tip-A</p>	Yatak yükü rezervuarın membada ayrılır.	Bypass için çekilmeye gerek yoktur.	Evet	Yatak ve askıdaki malzeme SBT ile yıkanır.
 <p>Tip-B</p>	Delta kontrolü saptırma savağı ile sağlanır.	Proje tasarımına bağlı olarak değişir.	Hayır	Yatak ve askıdaki malzeme SBT ile yıkanır.
 <p>Tip-C</p>	Yatak yükü ve delta oluşumu yıkama ile kontrol altına alınır.	Bypass için çekilmeye gerek yoktur.	Evet	Askıdaki malzeme SBT ile savaklanırken, Yatak malzemesi dipsavak ile atılır.

Şekil 3. Akımın bypass edilme türleri (Tip A, Tip B ve Tip C)

c) Bulanık Akım Tahliyesi

Bulanık akımın tahliyesi, bulanıklığı oluşturan askıdaki malzemenin su ile oluşacak yoğunluk farkından dolayı rezervuarın tabanına çökmesi ardından gerçekleşir. Yukarıdan bakıldığında çamurlu bir suyun ilerlemesi şeklinde görülen bulanık akımlar uygun koşullar altında kilometrelerce ilerleyebilir. Akımın hızı ve sıcaklık koşulları ile birlikte hızı azalan sediment malzemesi rezervuar tabanına çökecektir. Tabanda çökelen malzeme, rezervuar zemininde yayılır. Yayılan bu malzeme kılavuz kanal vasıtasıyla barajın dipsavağından atılır. Kılavuz kanalın eğriliğinden ötürü fil hortumu olarak da adlandırılır. Tayvan'da bulunan Zengwen Rezervuarı bu tip tahliye ye örnektir(Chiun-Chau, S., 2019)

d) Rezervuar Çekilmesi Yöntemiyle Sediment Savaklama

Rezervuar çekilmesi yöntemiyle sediment savaklama, taşkın sırasındaki sediment taşınımının gölet rezervuarında birikme yapmamasına odaklanmaktadır. Rezervuardaki su seviyesi azaltılarak akış hızı artırılır ve sedimentin mansaba bırakılması sağlanır. Bu sayede sediment tutulumu ve sediment sıkışması önlenmiş olur. Rezervuar Çekilmesi Yöntemiyle Sediment Savaklama yöntemi başka bir strateji ile mukayese edildiğinde taşkın durumlarında, sedimentin bypass edilmesi stratejisi de uygun olabilir. İki sistem arasındaki fark, bypass sisteminde sediment yüklü akış, temiz akıştan ayrılırken, rezervuar çekilmesinde tüm akış mansaba bırakılması olarak

karşımıza çıkmaktadır. (Morris, L., 2020).

Savaklama olayı, hidrolojik anlamda küçük depolamalı barajlarda en etkin yöntemlerden biri olmakla birlikte mevcut Japonya'daki beton barajlarda kapakların taşkın sırasında açılması yardımıyla bu yöntem efektif olarak kullanılır. Sedimentin rezervuar çekilmesi yöntemiyle savaklanması her ne kadar az da olsa rezervuardaki daha önce depolanmış sedimenti temizlese de, sediment yıkama yönteminde işleneceği gibi tümüyle temizlemeyi hedeflemez. Asıl hedef giren sedimentin, çıkan sedimentle dengesini koruyarak herhangi bir birikmeyi önlemektir. Savaklama ve yıkama yöntemi arasındaki farklar aşağıda belirtilmiştir.

Tablo 2. Savaklama ve yıkama yöntemleri arasındaki farklar

Parametre	Savaklama	Yıkama
Zamanlama	Taşkın zamanları çalışır.	Taşkına gerek yoktur. Planlanmış bir tarihte gerçekleşebilir.
Dipsavak Kapasitesi	Minimum su ile büyük taşkınları atabilir.	Dipsavak kapasitesi kadar akış gerekmektedir.
Sediment Deşarjı	Sediment girişi yaklaşık olarak çıkışına eşit miktardadır.	Sediment çıkışı, sediment girişinden fazladır.
Kaybedilen Kapasitenin Geri Kazanılması	Yıllık sediment birikimi devam eder.	İşlem sonucunda kapasite artar.
Mansap Kanalındaki Biriktirme	Büyük taşkınlar sonucu kanalda birikmeler olabilir	İhtiyaç duyulduğu takdirde yıkama sonrası temiz su ile yıkama olacağından birikme olmaz.
Sediment Yoğunluğunun Ani Artışı	Ani bir şekilde aşırı sediment yoğunluğu oluşmaz.	Su seviyesi düştükçe sediment yoğunluğu, hızlı bir şekilde pik seviyeye ulaşır.

e) Bölmeli Rezervuar

Bazı durumlarda, depolama yapısına giren sediment yüklü akışı düzenlemek adına, rezervuarın, inşa edilecek içsel bir bariyer yardımıyla tek rezervuarda iki ayrı depolama davranışı göstermesi mümkün kılınabilir. Elde edilen bölme sayesinde daha düşük kotlarda bulunan sediment çökerek yönlendirme sağlanacak ve sedimentten arınmış suyun farklı bölmeye aktarılması sağlanacaktır. Bu yapı örneği, Endonezya'da bulunan Wonogiri Depolması'nda



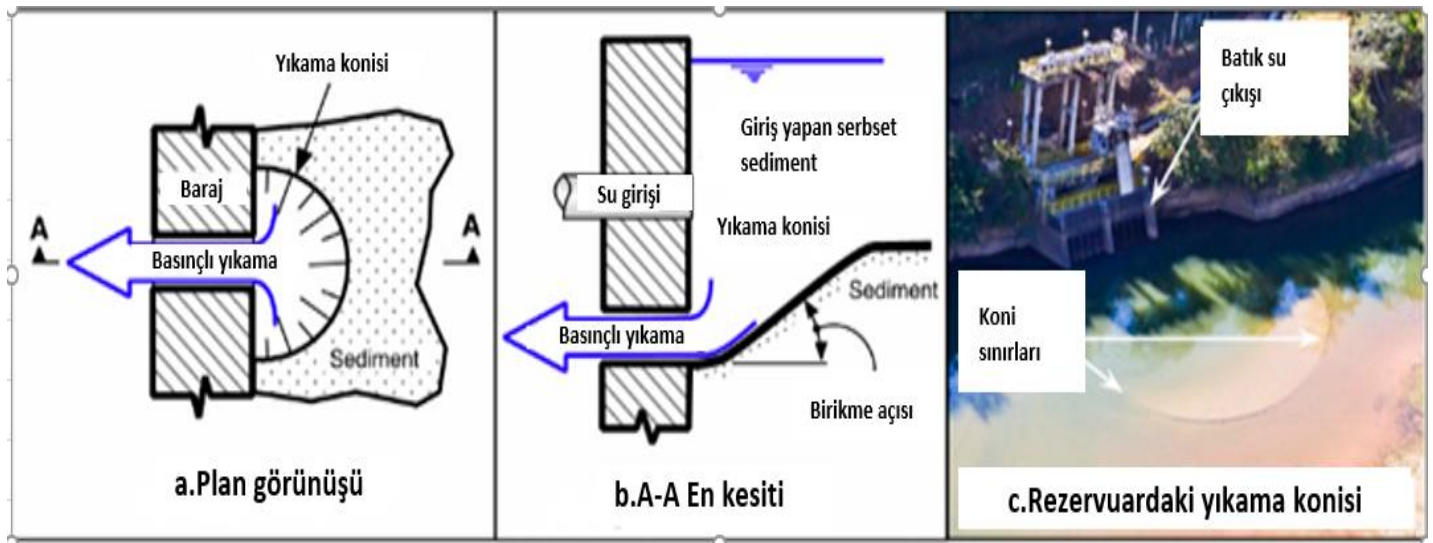
Şekil 3. Bölmeli rezervuar örneği

mevcuttur. Şekil 3'de bölmeli rezervuar tatbiki örnek olarak uydu görüntüsü verilen baraj, 1981 yılında, faaliyete geçtikten kısa bir süre sonra hızla sediment dolmaya başlamış, topografyasının da müsait olmasıyla inşa edilen içsel bariyer sayesinde sediment birikimi önlenmiştir. İçsel bariyere ilaveten teşkil edilen iki adet dolusavak çıkışı söz konusu akarsu üzerinde sediment kontrolünü sağlamıştır. (Jayadi, R. 2018)

2.1.3.Sediment boşaltma yöntemleri

a) Basınçlı sediment yıkama yöntemi

Kavramsal olarak yıkama yöntemi, daha önceden depolanmış olan malzemenin, oluşacak hidrolik yıkama kanalı ile temizlenmesi anlamına gelmektedir. (Morris L., 2020).Basınçlı yıkama ise rezervuar su seviyesinin yüksek olması durumunda dipsavak veya benzeri bir alt kot çıkışının açılması vasıtasıyla oluşacak hidrolik yıkama kanalı vasıtasıyla rezervuardan uzaklaştırılmasıdır. Yıkama aşamaları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4. Basınçlı yıkama sistematiği

b) Boşaltma yapılarak yıkama

Boşaltma yapılarak yıkama veya daha temel anlamıyla yıkama işlemi, rezervuar dipsavağının açılıp sonrasında nehir akışı marifetiyle boşaltılması yardımıyla sırasıyla askıdaki malzemenin ve çökelen malzemenin uzaklaştırılmasıdır. Yıkama işlemi üç aşamadan oluşur.(Morris ve Fan, 1998)

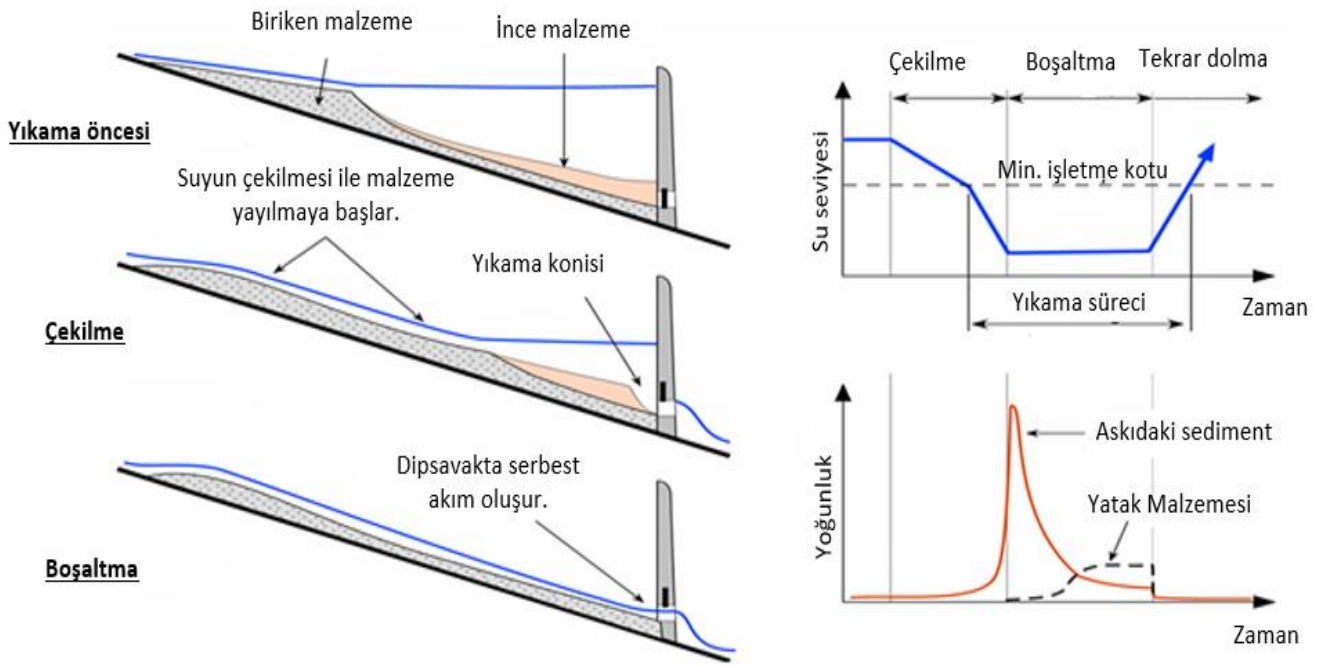
1.Çekilme: Dipsavak kapağının veya vanasının açılması ile suyun tahliyesi başlar. Bu etapta malzemenin tahliyesi yavaş ve miktarı azdır. Sediment, nehir akışının yardımıyla dipsavağın orada toplanmaya ve az da olsa oluşan hidrolik akımla meydana gelen yıkama konisi yardımıyla atılmaya başlanır.

2.Boşaltma: Aşağıdaki Şekil 5'te gösterildiği gibi akım serbest akış seviyesine iner, malzemenin tamamen tahliyesi tamamlanır.

3.Tekrar Doldurma: Rezervuar tekrar doldurulmaya başlandığı evredir. Burada dikkat edilmesi gereken tekrar gelecek malzemenin kontrollü bir şekilde birikimi sağlanmalı, gerekirse dipsavak kademeli olarak kapatılır.

Yıkama işleminin yapılacağı mevsim belirli planlamaya göre yapılmalıdır. Akışın azaldığı mevsimler yerine akış yüksek olduğu dönemlerde daha efektif sonuçlar elde edilecektir. Bir diğer husus da yörede bulunan canlı yaşamı ve ekolojik denge olup aynı nehir üzerinde bulunan diğer su yapılarının da etkileneceği düşünülerek daha kapsamlı bir yıkama planı oluşturulmalıdır.

Sonuç olarak yıkama ve savaklamada benzer yöntemler gibi görünse de içerdiği farklı teknikler, bıraktığı su ve malzeme miktarı yönünden ayrılmaktadır. En önemli fark ise savaklama olup, yüksek yoğunluklu sedimente sahip akışları yönetmede yıkama yöntemi kadar başarılı değildir.



Şekil 5. Boşaltma yapılarak yıkama sistematığı

c) Kazma İşlemi

Daha çok kuru mevsimlerde tercih edilen bu yöntem, rezervuar suyunun çekilmesi ile mümkün olabileceğinden, yağış olmayan kurak mevsimler tercih edilir. Düşük su kotlarında özellikle büyük çapta sediment türlü hafriyat araçları ile yerinden sökülerek uygun depo sahalarına taşınır. Yeterli drenaj sağlanmadığı takdirde bu işlem sırasında ince malzemenin rezervuar alanından uzaklaştırılması güçleşir.

d) Tarama İşlemi

Tarama işlemi, su içerisinde askıda veya yüzen malzemenin belirli teçhizatlarla alınması işlemidir. İki tip tarama işlemi yapılmaktadır. Bunlardan ilki mekanik sistemlerle tarama ikincisi ise hidrolik sistemlerle yapılan tarama işlemidir.

Mekanik sistemlerle tarama işlemi salma olarak da tabir edilen makinelerin ucunda asılı olan sepeti su içerisine daldırması ile yapılan tarama ve temizleme işlemidir.

Hidrolik sistemlerle tarama işlemi ise su ile karışık olan sedimentin borulu sistemler vasıtası ve piyezometrik seviye yardımıyla bir sifon yapısına çekilip ayrıştırılmasıdır. Çoğu rezervuarda tarama işlemi hidrolik sistemlerle yapılır. Bu sistemde, su kaybı veya rezervuarı işletme kesintisine uğratmadan sifon veya hidrolik pompaj sistemi ile suyun malzemeden ayrılması sağlanır (Hotchkiss,1995).

Tarama sonrasında ortaya çıkan susuzlaştırılmış malzeme uygun bir yerde depolanarak ticari gelir elde etmede veya bol miktarda içerdiği mineral sayesinde verimli tarım arazileri olarak kullanılmaktadır. Örneğin; ABD'deki Springfield Gölü'nden elde edilen susuzlaştırılmış çökeltiler daha sonra tarım arazisi olarak kullanılmıştır. (Morris ve Fan,1998).



Şekil 6. Melet Irmağı temizleme çalışmalarından bir kesit (DSİ, 2020)



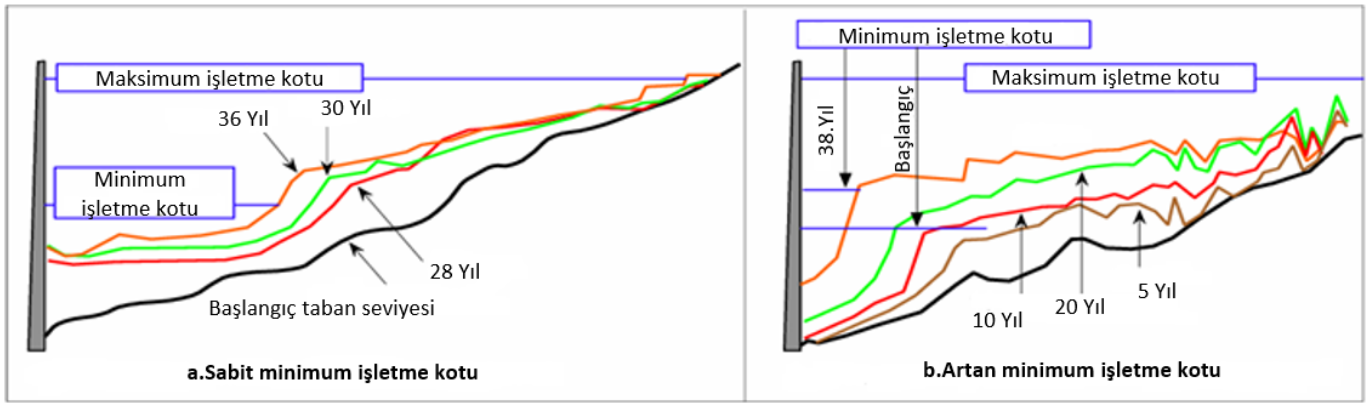
Şekil 7. Hidrolik yıkama sistemleri örneği

2.1.4.Uyum sağlama stratejileri

Uyum sağlama stratejileri, sediment dengesini sağlamak yerine daha çok sedimentin bir rezervuardaki etkilerini azaltmayı hedeflemekte olup, beş başlık altında incelenebilir.

a) Sediment dağılımını düzenlemek

Bir barajın işletilmesi sırasında belirlenen minimum işletme seviyesi sedimentin rezervuar alanındaki yerleşimi açısından önemlidir. Belirlenen minimum işletme kotuna kadar çekilen rezervuarda sediment her sene düzenli olarak yeniden yerleşim sağlayarak ertesi sene gelecek akımlarla mevcut sedimentin nispeten zayıf olanlarının sökülüp tekrar yerleştirilmesi ile kümülatif olarak artacaktır. Bu durumun aksine seçilecek daha yüksek bir minimum işletme kotu, kot yükseldikçe artan alandan ötürü sedimentin daha geniş alana daha düzenli bir şekilde yerleşmesini sağlayacak ve işletme ömrünü uzatacaktır (Morris, L., 2020). Uygulama örneği Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. İşletme kotu farklılığının etkisinin grafiksel gösterimi, Tarbela Rezervuarı, Pakistan)

b) Depolama kapasitesinin artırılması

Alt yapısı veya topografyası müsait olan rezervuarlarda aynı akarsu üzerine inşa edilebilecek bir depolama yapısı ile tutulacak malzeme ile mevcut barajın ömrü uzatılabilir.

c) İşletme planını geliştirmek

Eğimin fazla olduğu yörelerde, mevcut baraj rezervuarlarındaki sedimentasyonu azaltmak amacıyla yapılmış olan regülatör, bent gibi su tutucu havuzlarda işletme limitleri, başka bir deyişle tutulacak veya geçişine izin verilecek malzeme miktarları tekrar gözden geçirilerek, söz konusu baraj rezervuarlarındaki sediment kontrolü sağlanabilir. Örneğin, bir baraj membağında bulunan taşkın kontrol havuzunda tutulan malzeme miktarı, aynı barajın mansabında bulunan başka su tutucu yapıdaki malzeme miktarından genellikle çok olacaktır. Bu durum baraja gelen sediment tutulumunu azaltacağı için rezervuar hacmi daha hızlı dolacaktır. Aksi durumda membadaki su tutucu havuzun kontrollü bir şekilde kullanılıp mansaba aktarılması durumunda havuzlar arası eşit dağılım olacağından barajın rezervuarı daha geç dolacak ve ekonomik ömrü uzayacaktır. Mevcut barajların ve su tutucu havuzların işletme planları gözden geçirilerek daha ucuz maliyetli sediment kontrolü yapılabilecektir (Kantoush, S.A., 2017)

d) Baraj ekipmanlarının modifiyesi

Sedimentin bazı durumlarda kontrol altına alınmadığı takdirde su alma yapılarına, dolusavaklara, ızgaralı geçişlere veya HES'lerdeki birçok ekipmana zarar verebilir. İnce malzeme çoğunlukla kabul edilebilir olsa da daha büyük çaptaki malzeme aşındırıcı etkiye sahip olmakla birlikte özellikle bir hidroelektrik santralde bulunan tribün yapısına zarar verebilir. Çözüm olarak ise gelen sedimente maruz kalacak yapılar aşındırma dirençli kaplamalar yapılabilir ve yahut su alma yapıları belirli seviye yükseltilerek en azından gelen malzemenin ilk giriş hızı düşürülerek aşındırma etkisi azaltılabilir.

e)Su kullanımının düzenlenmesi

Rezervuar kapasitelerinin azalması en genel anlamda suya erişimin tehlikeye ya da su menşei ekonomik faaliyetlerin sekteye uğramasına sebep olmaktadır. Su odaklı ekonomilerde suyun korunması adına tüm paydaşların bilinçli davranması gerekmektedir. Örneğin yeraltı suyu kullanımı, ülkemizde olduğu gibi bir mevzuata sahip olması bilinçsiz tüketiminin önüne geçerek yeraltı sularının korunmasını sağlamaktadır. Öte yandan suyun kısıtlı olduğu alanlarda, su ihtiyacının fazla olduğu ürünlerden ziyade az su ile daha çok getiri sağlanacak ürünlere teşvik yapılabilir.

3.SONUÇ

Bu çalışmada incelenen sedimentasyonla mücadele stratejileri, tekli veya kombine şekilde farklı durumlar için kullanılabilir. Hangi stratejinin hangi havzada daha uygun olacağı, geniş bir irdeleme ve alanının özelliklerini içeren tanımlama ile mümkün olabilecektir. Bir havzada bulunan akarsu, barajların sayısı ve kapasitesi, kullanımda bulunan su miktarı, hava sıcaklıkları vb. şartlar tanımlandıktan sonra uygun strateji veya stratejiler rezervuara uygunlanmalıdır. Oluşan şartları daha iyi tanımlayabilmek için SWAT gibi uygun paket programlarda kullanılabilir. Sonrasında bir baraj rezervuarını veya bir akarsu boyunca bulunan tüm su tutan rezervuar yapılarını etkileyen sedimentasyonun, giriş ve çıkış arası dengeyi sağlayabilmek adına çalışma yapılarak hem ekolojik denge sağlanabilir hemde yüksek maliyetli çalışmalardan ülkeler ekonomik olarak kaçınılabilir.

Ancak, jeolojik devinim hiçbir zaman durmayacağı gibi bu sebepli malzeme taşınımında hiçbir zaman durmayacaktır. Özellikle makalenin başında bahsi geçen ülkelere büyük kayıplar yaşatan erozyon insan yaşamıyla birlikte sürekli var olacaktır. Bu sebepten ötürüdür ki bir sedimentin taşınımının önlenmesinden ziyade bahse konu olacak akarsu havzada memba ve mansap sediment dengesinin korunması daha gerçekçi ve uygulanabilir bir yöntem olacaktır. Sonuç olarak; bir baraj tasarımı planlanırken, sedimentin planlamamasının yapılması hayati önem taşımaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı Beyanı

Makale yazarları, makaleye eşit miktarda katkı sağlamışlardır.

KAYNAKLAR

- Auel, C., Berchtold, T., & Boes, R. (2010). Sediment management in the Solis reservoir using a bypass tunnel. In Proceedings of the 8th ICOLD European Club Symposium, 22–23 September 2010, Innsbruck, Austria (pp. 438–443). Retrieved from <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/27077>
- Bogaard, T., & Greco, R. (2018). Invited perspectives: Hydrological perspectives on precipitation intensity-duration thresholds for landslide initiation: Proposing hydro-meteorological thresholds. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 31–39. *environment, Science*, 314, 1442–1445, doi:10.1126/science.1132027.
- Chiun-Chau, S., Chun-Shen, C., & Chun-Hung, C. (2019). Analysis of turbidity currents movement in Tzengwen Reservoir (Taiwan). In Proceedings of the 3rd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, Taipei, Taiwan, 9–12 April 2019. Taipei, Taiwan: National Taiwan University.
- Hu, C., Wu, D., Jayakumar, R., & Ajisawa, S. (2004). *Warping Dams Construction and its Effects on Environment, Economy, and Society in Loess Plateau Region of China*. Beijing, China: International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation.
- J.G. Arnold, R. Srinivasan, R.S. Muttiah, J.R. Williams, Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 34 (1) (1998)73–89.doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x
- Jayadi, R.; Istiarto; Pradipta, A.G. Impact of sedimentation counter measure on the performance of flood control: A case study of Wonogiri reservoir. *Appl. Mech. Mater.* 2018, 881, 78–85.
- Karaş, E. (2005). Küçükalmalı ve Güvenç Havzalarının Su ve Sediment Verimlerine Göre Sürdürülebilir Yönetimi. *Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı*, Ankara.

- Kantoush, S.A.; Sumi, T. The aging of Japan's dams: Innovative technologies for improving dams water and sediment management. In River Sedimentation, Proceedings of the 13th International Symposium on River Sedimentation, ISRS 2016, Stuttgart, Germany, 19-22 September 2016; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017; pp. 1030-1037, ISBN 978-1-317-22531-7.
- Kokpinar, M. A., Kumcu, S. Y., AltanSakarya, A. B., Gogus, M., 2010. Reservoir Sedimentation in the Demirkopru Dam, Turkey, Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2010, Braunschweig, 2, 1125-1130.
- Latifoğlu, L. (2003), Barajlarda ölü hacim hesabı ve Yamula Barajı örneği, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Mekonnen, M., Keesstra, S.D., Stroosnijder, L., Baartman, J.E.M., & Maroulis, J. (2015). Soil Conservation Through Sediment Trapping: A Review. *Land Degradation & Development*, 26, 544-556.
- Minear, J.T., & Kondolf, G.M. (2009). Estimating reservoir sedimentation rates at large spatial and temporal scales: A case study of California: Technical note. *Water Resources Research*, 45.
- Morris, G.L. (2010). Offstream Reservoirs for Sustainable Water Supply in Puerto Rico. In Proceedings of the American Water Resources Association: 2010 AWRA Summer Specialty Conference, 30 August-1 September 2010, San Juan, PR, USA.
- Morris, G.L., & Fan, J. (1998). Reservoir sedimentation handbook. New York, NY, USA: McGraw-Hill Book, Co
- Morris, G.L. (2020). Classification of Management Alternatives to Combat Reservoir Sedimentation. GLM Engineering PSC, San Juan, PR 00907, USA. Email: gmorris@glmengineers.com. Received: 9 January 2020; Accepted: 13 March 2020; Published: 19 March 2020.
- Onda, C.; Sumi, T.; Asahi, T. Planning and analysis of sedimentation countermeasures in hydropower dams considering properties of reservoir sedimentation. *J. Disaster Res.* 2018, 13, 702-708.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saouri, R., (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267, 1117-1123.
- Reed, O. Swiss methods of avoiding silt deposits in reservoirs. *Eng. News Rec.* 1931, 8, 289-290.
- Renwick, W.H., Smith, S.V., Bartley, J.D., & Buddemeier, R.W. (2005). The role of impoundments in the sediment budget of the conterminous United States. *Geomorphology*, 71, 99-111.
- Shrestha, H.S. (2012). Sedimentation and Sediment Handling in Himalayan Reservoirs. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science & Technology.
- Soler-López, L.R. (2001). Sedimentation Survey of Lago Caonillas, Puerto Rico, February 2000. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3368. San Juan, PR, USA.
- Sumi, T.; Yoshimura, T.; Asazaki, K.; Sato, T. Retrofitting and Change in Operations of Cascade Dams to Facilitate Sediment Sluicing in the Mimikawa River Basin; ICOLD Congress: Stavanger, Norway, June 2015; Volume Q99-R45, pp. 597-611; International Congress on Large Dams: Paris, France, 2015.
- Syvitski, J.P.M., Vörösmarty, C.J., Kettner, A.J., & Green, P. (2005). Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 308, 376-380. [CrossRef] [PubMed]
- Ülke, A. (2010). Ege Bölgesi doğal akarsularında kati madde taşınımı için ampirik, regresyon ve yapay zeka yöntemlerinin uygulanması [Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik-Hidroloji ve Su Kaynakları Anabilim Dalı].
- Wisser, D., Frohling, S., Hagen, S., & Bierkens, M.F.P. (2013). Beyond peak reservoir storage? A global estimate of declining water storage capacity in large reservoirs. *Water Resources Research*, 49, 5732-5739. [CrossRef]Goswami, B. N., V. Venugopal, D. Sengupta, M. S. Madhusoodan, and P. K. Xavier (2006), Increasing trends of extreme rain events over India in a warming environment, *Science*, 314, 1442-1445, doi:10.1126/science.1132027.