

ATIKLARIN YERALTINDA SAKLANMASI SORUNLARI

(ULUSLARARASI ATOM ENERJİSİ (IAEG) 14 NO.LU KOMİSYON RAPORU)

Çevirenler: Faruk ÖZTÜRK DSI Genel Müdürlüğü, Yücepe, ANKARA
Erçin TÜRKEL DSI Genel Müdürlüğü, Yücepe, ANKARA

1. ATIK GRUPLARI

Son yıllarda, endüstrileşmiş ülkelerde atık ürünlerle ilgili sorunlar günden güne daha dikkate değer hale gelmektedir.

Belli başlı atık gruplarından bazıları aşağıdaki biçimde özetlenebilir:

- Evsel atıklar
- Endüstriyel atıklar
- Maden atıkları
- Radyoaktif atık ürünler
- Diğer tehlikeli atık ürünler
- Diğer tehlikeli, yok edilemeyen atıklar.

Bu beş grupta toplanan atıklar, birbirinden oldukça farklı özellikler gösterirler. Bu yüzden depolama işlemleri için ekonomik çözümleri de farklıdır.

Depolanmış atıkların, tehlikeli ürünler oluşturan kimyasal tepkimeler gibi değişimlere uğraması, sorunları daha da karmaşıklaştırır. Bu yüzden depolanan maddelerde oluşan tepkime ve süreçleri hakkında yeterli bilgi sahibi olunması zorunludur.

Serbest su, tehlikeli ve kabul edilebilir sınırların üzerindeki derişimlerde zararlı madde sızıntılarına yol açabilir. Bu yüzden depolama tesisleri malzeme işleme tesisleri gibi değerlendirilmelidir.

Uzun bir zamandan beri ürünler yeraltında depolanmakta ve zamanla çürümektedirler. Bu maddeler uzun bir zamandır unutulmuş olmalarına karşın insanlar ve çevre için hala tehlikeli olabilirler. Yeraltında uzun süreli saklama sözkonusu olduğunda zehirli ve radyoaktif atık ürünler özel işlemler gerektirirler.

Diğer koşulların yanı sıra, bu maddelerin; insanlarla temasını, tehlikeli maddelerle sızmasını ve yeraltı suyuyla yayılmasını engelleyecek kadar derine gömülmesi gerekir.

Birçok ülkede bu amaca uygun yeterince sağlam kaya birimlerinin bulunması olasıdır. Depolama kuru koşullarda gerçekleştirilebilirse, sorunlar önemli ölçüde

basitleşir.

Anakayanın kendisi su tutmasa bile, su anakayanın çatlak ve kırık zonlarına dolabilir. Tehlikeli ürünlerin hareket halindeki yeraltı suyu ile biyosfere kadar taşınması riski bu yüzden en önemli sorundur. Radyoaktif atık ürünlerin yüzlerce-binlerce yıl boyunca çevreden yalıtılmış olarak saklanması için dünya çapında sürdürülmekte olan araştırmalar sayesinde bugün bu sorunlar yeterince çözümlenmiş ve kaya kütlelerini sağlamlaştırmak ve tehlikeli ürünleri yeraltı suyundan yalıtım için yöntemler geliştirilmiş bulunmaktadır.

Son birkaç onyıdır, nükleer enerji insanoğlunun en önemli enerji kaynağı haline geldi. Bugün 25 in üzerinde ülkede nükleer enerjiden elektrik üretilmektedir. Dünya çapındaki üretim 1984 yılı içerisinde 1.300 milyar KWh civarındadır. Nükleer güç, endüstrileşmiş ülkelerin çoğunda hala geliştirilmeye çalışılmaktadır. Dünya çapındaki nükleer enerjiden elektrik üretiminin 1990 yılında 2.000 milyar KWh i geçmesi planlanmıştır.

Bu yüzden nükleer atıkların güvenli bir biçimde depolanması sorunu uluslararası bir sorundur. Son yıllarda, kayda değer nükleer enerji üretimi olan ülkelerin çoğu; oluşan çok zehirli (toksik) ve radyoaktif atık maddelerin güvenli bir biçimde saklanması için projeler oluşturmuşlardır.

Özel endüstriyel kuruluşlar, özel ve devlet otoriteleri ve halk; nükleer enerji ve tıbbi araştırmaların öneminin farkında olmalarının yanı sıra, doğanın ve insanlığın üretilmekte olan insan yapısı zehirli (toksik) ve tehlikeli maddelerin olası yıkıcı etkilerinden korunulması gereğinin de farkına varmış bulunmaktadır.

Uluslararası çevre koruma örgütleri; gelecek kuşaklar için insanlığın ve çevrenin korunması amacıyla tehlikeli maddelerin nasıl zararsız hale getirilebileceği ya da depolanabileceği konusunun çözümlenmesi ile yakından ilgilenmekte ve bu konuda görev almaktadırlar. Bu konu; radyoaktif ürünlerin güvenli depolanmasını da aşmakta, bütün zehirli ve tehlikeli maddeleri kapsamak-

tadır. İnsanlık ve çevre için tehlikeli bütün maddeler gibi radyoaktif atıkların da yalıtılması ve uzun süreli depolanması için en uygun çözüm; yer kabuğunun derinliklerindeki geçirgenliği düşük kaya kütlelerinin kullanılmasıdır. Bu tür depolama işlemi genelde güvenli olarak kabul edilmektedir. Bu yüzden; atığı çevreden yalıtacak ve biyosferin kirlenmesini önleyecek radyoaktif atık depolama teknikleri üzerinde sürdürülmekte olan araştırma ve geliştirmeler, diğer bütün zehirli ve tehlikeli atık maddelere ve tüm yeraltı depolama işlemlerine de uygulanabilir. 1975 yılında Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Birliği; bu çok önemli araştırma alanında mühendislik jeolojisindeki gelişmeleri incelemek üzere bir komisyon oluşturarak, atıkların güvenli depolanması konusunda mühendislik jeolojisinin önemini zamanında göstermiştir.

2. GELİŞME RAPORU

Atıkların yeraltında depolanması iki farklı alanda yapılır: (1) Atıkların ulaşılabilir derinliklere depolanması. (2) Derin Jeolojik katmanlara enjeksiyonu.

Birinci alan; Jeolojik olarak yüzeysel depolamadan farklı değildir. Bu yüzden de komisyonun asıl görev alanına girmektedir.

Tersine ikinci alan; teknikleri, disiplinleri ve özel sorunları ile jeoloji mühendisini ön plana çıkarır. Jeoloji mühendisinin görevi; tehlikeli ürünlerin enjeksiyonunu olası kılacak çalışmalar yapmaktır.

Eğer yeterli güvenlik sağlanmazsa insanın çevresi ve bizzat kendisi de kuşaklar boyunca etkilenebilir.

Eğer bu atıklar depolandıkları yerde varolan doğal malzemelerle aynı karakterde ise veya indirgenme süreçleri iyi bilinen ürünler ise jeoloji mühendisi sahip olduğu teknikler ve belli güvenlik katsayıları ile çözüm yolları gösterebilir.

Fakat bu atıklar atomik kimyasal veya biyolojik ürünlerse sorun hala ortadadır. Çünkü jeoloji mühendisinin kesin çözüm yolları bulmak için yapacağı araştırma sonuçlarının ne kadar kesin olacağı tam olarak bilinemez (örneğin, kesin güvenlik katsayıları verilemez).

Bu noktada jeoloji mühendisinin sorumluluğu sorunu karşımıza çıkmaktadır. Şöyleki: Projenin fizibilitesi ve bedeli yalnız jeoloji mühendisine bağlı olmaktadır.

Bu sorumluluğun tüm gereklerini yerine getirme (veya red etme) çabasındaki jeoloji mühendisi araştırmalarında aşırı güvenli tarafta kalmaya çalışabilir ve bu yüzden tehlikeli atıkların bertaraf edilmesi için başka yolları zorunlu kılabilir.

14 nolu komisyon tarafından aşağıdaki çalışma planı çıkarılmıştır:

ÇALIŞMA PLANI

Aşağıdakilerin araştırılması:

1. Bütün ülkedeki deneyimler
2. Yüzeydeki saklama ve yeraltındaki çukurlarda saklama konularında geliştirilmiş teknikler.
3. Derine enjeksiyon konusunda geliştirilmiş teknikler.

- zemin: stratigrafi, tektonik, petrografi, hidrojeoloji,

sismik

- atıklar: (katı-gaz-sıvı) doğası, çürüyebilirlik, stabilite, derişim (konsantrasyon)

- uygunluk: Adsorpsiyon, liksiviasyon-termo dinamizm.

4. Derin enjeksiyonların etik sorunları

5. Şu anki kurallar

6. Öneriler

İlk görüşmeler özünde Sdneyde sunulmuş olan ön rapor üzerindeki tartışmalar hakkında yapılmıştır. Etik açıdan depolama sorunlarının değişik gruplar ve komisyon üyeleri tarafından önemi kabul edilmesine karşın aynı ayrıntı seviyesinde ele alınmadığı ortaya çıkmıştır.

Mühendislik jeolojisinin teknik ve bilimsel açılardan rolü üzerinde görüşbirliğine varılmıştır. Kısa, orta, uzun ve çok uzun dönemli depolamalar da mühendislik jeolojisi özellikleri sayesinde güvenlik kuralları, önerilebilir. Söz konusu olan bu güvenlik kuralları, doğanın ve insanın korunması ile ilgili idari ve yasal kurallara temel oluşturmaktadır.

IAEG (Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Birliği) Çalışma grubu 1976 da atıkların yeniden değerlendirilmesinin 14 numaralı komisyonun görev alanına girmediğine karar vermiştir. Bu çalışma grubu; önemi belli olan görevin başka özel bir komisyonun oluşturulması ve daha etkin olarak yerine getirilebileceği sonucuna varmıştır.

3. JEOLJİK ORTAMDA ATIK DEPOLANMASI

3.1. İlkeler

İnsan etkisiyle doğada oluşan jeolojik değişiklikleri doğal çevrede çok yönlü etkiler oluştururlar. Çevre jeolojisinin bozulmasına sebep olan en önemli etkenlerden birisi de atıklardır.

Çevre jeolojisi değişken ve önceden tahmin edilemez yapısı ile jeolojik kaynakların planlaması ve işletilmesini engelleyici bir unsurdur.

Zehirli atıklar da gözönüne alınarak sorunun ve işlemlerin daha iyi anlaşılması ve atıklarla çevrenin karşılıklı ilişkilerinin daha iyi belirlenmesi için bu rapor ile aşağıdaki tavsiyelerde bulunulmuştur.

A) Halihazırda varolan kontrol altındaki atık depolama tesislerinden veri toplanması ve deneyim kazanılması.

B) Sınıflandırma yöntemlerinin geliştirilmesi amacıyla değişik atıkların niteliklerini ve özelliklerini belirlemeye yönelik araştırmaların teşvik edilmesi.

C) Kil tabakaları gibi atıkların hareketini engelleyen tecrit malzemeleri veya doğal bariyerlerin uzun dönemli davranışlarını inceleyen bilimsel araştırmaların teşvik edilmesi.

D) Aşağıdaki konularda tavsiyeler ve uyulması gereken kuralların belirlenmesi ve yürürlüğe konulması.

1) Atıkların depolanması konusunda güvenlik ön-

lemleri,

2) Yer seçiminde göz önüne alınması gereken kriterler.

3) Depolama uygulamasındaki kriterler.

4) Yer seçimi için toplanacak yer bilimleri verilerinin gerekliliği.

Birçok endüstriyel ve diğer faaliyetler sonucu daha sonra kullanımı mümkün olmayan atık maddeler üretilir. Evsel, kentsel, endüstriyel (özellikle radyoaktif) ve madensel gibi çeşitli kaynaklardan oluşan atık maddeler miktar ve biçim olarak çok değişkendirler. Çoğunluğu göreceli olarak zararlı değildir. Fakat bazıları uygun olarak işlenmediği zaman çevre ve sağlık sorunları çıkartabilir ve insanların çoğu geçmişte uygun olmayan işleme yöntemleri kullanıldığının farkındadırlar.

Sonuç olarak, yaşam kalitesinin korunması için kontrol mekanizmalarının oluşturulmasının gerekliliği bilinci halkta oluşmuştur.

Bilim dünyasının, hükümetlerin ve halkın en çok dikkatini çeken atıklar radyoaktif atıklardır (bu maddelerin işlenmesi konusunda) Yerel, bölgesel ve ulusal arası düzeyde kapsamlı yönetmelikler oluşturulmuş ve nükleer güç sorumluluğu taşıyan ülkeler; üretilen atıkların güvenli bir şekilde işlenebilmesi için teknolojiler üretme programları yürütmektedirler.

Zehirli kimyasal atıkların en son işlemleri henüz radyoaktif atıklar ölçüsünde geliştirilmemiştir. Atık ürünler birbirinden oldukça farklı özelliklere sahiptir. Bu yüzden depolama tesisleriyle ilgili ekonomik çözümleri de birbirinden farklıdır. Depolanmış atıkların değişime uğraması sorunları daha da karmaşıklaştırmaktadır. (Örneğin kimyasal tepkimelerle değişik tehlikeli maddeler ortaya çıkabilmektedir). Bu yüzden depolanmış atıkların tepkime işlemleri ve süreçleri hakkında yeterince geniş bilgi sahip olunması zorunludur.

Genel olarak, jeolojik ortamda depolama, zehirli kimyasal atıklar için bile çok güvenli bir depolama sağladığı kabul edilir. Teknik çözümlerden biri atık madde ocakları inşa etmek veya eski (terkedilmiş) maden ocaklarının kullanımınıdır. Atıkların bu şekilde saklanmasını gündeme getiren en önemli neden de dikkatli seçilmiş böyle bir jeolojik bariyerler atıkları çok uzun süreler boyunca saklayabilmesidir. Bu özelliğin en önemli kanıtı atık maddelerin bileşimlerine benzer birçok doğal mineralin bu ortamlarda depolanmış olmalarıdır. Bunun yanı sıra atıkların yerin derinliklerinde saklanması, yerleştirme işleminin iyi planlanması gereğini ve hatalı yerleştirme olasılığını ortadan kaldırır. Sistem tümüyle pasiftir. Çünkü bir kez kapatıldıktan sonra insan faktöründen tümüyle bağımsızdır.

Atıklar, derindeki bir depolama ortamından ve tektonizma ya da erozyon gibi jeolojik süreçlerle direkt olarak açığa çıkarak veya jeolojik zaman içinde taşınarak biyosfere çıkar.

Yeraltı suyuyla taşınma: zehirli parçacıkların depolama ortamından biyosfere taşınmasında en önemli rol oynayan mekanizmasıdır. Bu yüzden derin yeraltı depolarının yeraltı suyu girişi olmayan (veya çok az olan) yerlerde yapılması gerekir. Bugün bu depoların: yüzeyden en az birkaç yüz metre derinde oluşturulması ge-

rektiği düşünülmektedir. Bu tür depoların daha derinlerde yapılması: zehirli madde dağılımı olasılığını daha da azaltır, ancak maliyeti ve madencilik riskini artırır. Bazı atıkların derin depoların sağladığı yüksek yalıtıma ihtiyaçları yoktur. Bu tür atıkların daha önceden varolan boşluklarda veya orta derinlikteki depolarda saklanması yeterli güvenirliliği sağlayabilir.

Doğal jeolojik sistemin: atık durumu, tampon malzemeler, atık kapları ve geri dolgu gibi mühendislik bariyerleriyle desteklenmesi olasıdır. Bu tür bariyerlerin yeraltında uzun döneme etkilenmelerini deneysel olarak kanıtlanabilir. Bunların performansı; mühendislik bariyerlerine ek olarak üstteki malzemenin jeolojik özelliklerinin de dikkate alındığı güvenlik analizleri sonucu tahmin edilebilir.

Orta derinlikteki (100 mt civarı) kayaçlar içerisinde yapıların güvenirliliğini sağlayan teknikler, araştırmalar ve inşaat kontrol yöntemleri oluşturulmuştur (Tablo 1 e bakınız). Özetle: dünyanın dış kabuğu iyice anlaşılabilir ve etkinlikle kullanılabilir. Tektonik analizler, sismik araştırmalar, araştırma sondajları ve karotlar kontrollü patlamalar, inşaat sırasındaki ölçümler, yeraltı suyu kontrol ve pompaj deneyleri ve enjeksiyon teknikleri iyi bilinen işlemlerdir.

Sert kayaçlarda ve 1000 m. den daha derindeki çökel kayaçlardaki depolama konusunda deneyim azdır. Maden işletmelerinden kazanılan deneyimler yeraltı yapılarıyla direkt olarak ilişkilendirilemezler. Geleneksel maden işletmelerinde amaç; genellikle (kayaç içerisinde) lokal boşluklarda bulunan mineralleri toplamaktır. Radioaktif atıklar gibi tehlikeli maddelerin derin-yeraltı depolanmasına yönelik araştırmalar, uygun bir kayaç kütesinin seçimi olasılığının yüksek olması nedeniyle basit projelerdir. Tektonik çalışmalar, fisür araştırmaları, sismik ölçümler vs. potansiyel olarak iyi kaya kütlelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılabilir. Diğer yandan 1000 m veya daha derinde bir sağlam fisürsüz kaya kütesinin varlığını kanıtlamak; böyle bir projenin çok uzun zaman alacağından dolayı çok zordur. Yüksek düzey bir radyoaktif depolamanın bütünlüğü; bir mühendislik sisteminden öte, jeolojik zamanlar ölçeğinde sayılabilecek yüzlerce, binlerce yıl boyunca güvence altına alınmalıdır.

Böylesine uygun bir zaman süresi boyunca birçok şey olabilir. Örneğin; birkaç buzul çağı gelebilir, İskandinavya kara parçası veya benzerleri gibi sismik olarak durağan bölgelerin bile çökmesi veya yükselmesi gündeme gelebilir veya erozyon hatırı sayılır bir düzeye gelebilir. Bu yüzden, depolar jeolojik ve iklimsel koşullardaki değişimlerin atık maddelerin yüzeye çıkmasını sağlayamayacağı derinliklerde yapılmalıdır. Buna ek olarak; depremlerin derin depolar üzerindeki etkilerinin de gözönüne alınması gereklidir.

Özetle; asıl soru; tehlikeli zehirli maddelerin yeraltı suyunun dolaşımı aracılığıyla biosfere çıkması riskinin ne kadar olduğu veya (daha basite indirildiğinde) kayaçların ne kadar geçirimsiz olması gerektiğidir.

Bu soruların yanıtlarını bulmak amacıyla bir çok ülkede uzun süreli jeolojik ve yeraltı suyu davranışları üzerinde yoğun araştırmalar yapılmıştır. Örneğin; oluşumları tanımlamak için bilgisayar destekli ölçüm ve yorumlama uydu fotoğrafları yardımı ile plaka tektoniği-

nin tanımlanması. Plaka tektoniği teorisi ve çözümlenmesindeki bu gelişmeler, laboratuvar deneyleriyle birlikte bilim adamlarının kesin lokasyon ve kesin derinlikleri karakterize etmelerini kolaylaştırmıştır.

Gerçekte tümüyle yalıtkan (geçirgen olmayan) kaya kütlesi yoktur. Yalnızca bir çok kaya pratik olarak geçirimsiz olarak sınıflandırılır. Buna karşın kaya kütleleri, içerdikleri boşluklardan kırıklardan ve diğer süreksizliklerden dolayı az veya çok su içerirler. Çok geçirimsiz kaya kütleleri, mağmatik masif kayalar, çok dayanımlı sedimenter tabakalar, metamorfize olmuş kayalar ve kaya tuzları içerisinde bulunabilirler.

Böyle kaya kütlelerinin içerisinde mağaralar, tüneller ve shaftlar açılarak buralar yakma ve kimyasal işlemlerle etkisiz hale getirilemeyen tehlikeli maddelerin uzun dönemli depolanmaları için kullanılabilirler.

Jeolojik formasyonlardaki gerekli geçirimsizlik düzeyi; içinde saklanacak zehirli maddelerin bozunma süresi ve izolasyonuna bağlıdır. Özel ve çok zor istekler, özellikle uzun ömürlü radyoaktif elementler için uygulanır. Bu tür elementler için kaya içinde oluşan depolar çevresindeki geçirimsizlik, radyoaktif ve radyonüklük maddelerin yeraltı suyuyla yüzeye taşınmasının engellenmesi açısından önemlidir (Bkz. Şekil 1).

Dr. R. W. Corkey (Güney Wales Jeoloji Derneği) ve Dr. M. J. Kuigh (Güney Wales Üniversitesi, Uygulamalı Jeoloji Bölümü) Çeşitli jeolojik atık depolama yöntemlerini ve bu yöntemlerin bölgesel jeohidrolojik dengeyle ilişkilerini Şekil. 1 de göstermişlerdir.

Bunu izleyen bölümlerde, atık depolama hedefine yönelik ocaklar ve bu hedefe yönelik yöntem ve ölçümler irdelenmektedir. Birçok ülkede nicel yönde irdelenmesine rağmen bu irdeleme niteldir.

Bu bölümler, Dr. M. Langer'in komisyona verdiği ve sözlü olarak UNESCO'ya sunduğu ocakların jeolojik çevreye etkileri adlı çalışmasını temel almıştır (Talin UDSSR, Temmuz 1986).

3.2. Amaçlar

Atık deposu son haliyle bakım gerektirmeyen, duyarlı ve zararlı maddeler için güvenilir bir depo olmalıdır. Jeolojik bir birim içerisindeki atık deposu; deponun çalışması ile oluşan zehirlilikten doğayı ve insanı kesinlikle korumalıdır. Depoda yapılan açma ve yerleştirme çalışmaları sonrasında depo emniyetli bir şekilde kapatılmalı, biyosferden yalıtılmalıdır. Çürümeler sonucunda oluşan, depodan dışarıya sızması olası maddelerin hiçbir zaman tümüyle engellenmesi mümkün olmayan taşınma yöntemleriyle biyosfere ulaşmaları sonucu olabilecek birikimlerin koruma deliklerinin altında kalması sağlanmalıdır.

Bir atık ocağının Planlama ve inşaat aşamalarında olduğu gibi yer seçimi ve araştırılması aşamaları için de kesin rakamsal bir güvenlik katsayısı saptanamaz. Çünkü bu tür ocakların mühendislik çalışmaları standartlaşmamış, jeolojik koşullar üzerine kurulmuştur. Jeolojik birimler içindeki bu depolanabilir ocakların gerekli güvenliği özel güvenlik analizleriyle gösterilmelidir. Bu analizler, atık madde etkilerini, deponun mühendislik özelliklerini, jeolojik koşulları ve olaylarını dikkate almalıdır.

Genel Kavramlar

Atıkların saklanmasıdaki hedef; atıklardan insan sağlığını ve doğayı korumak, gelecek kuşaklar üzerindeki etkisini en aza indiren yöntemlerle ortadan kaldırmaktır.

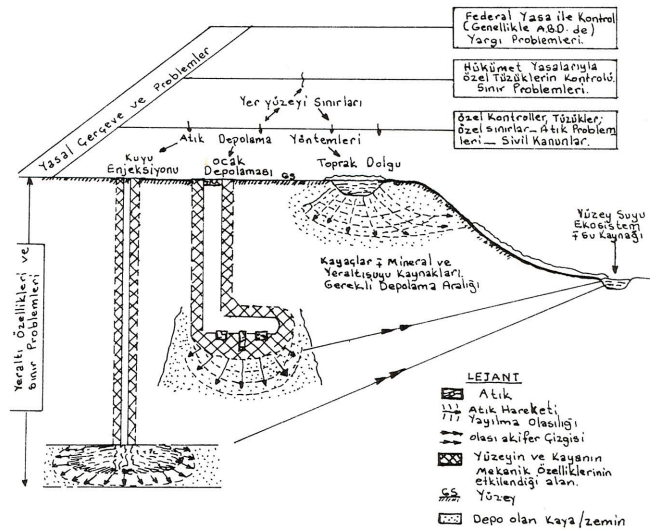
Sorunların karmaşıklığından dolayı; değişik grupların ve ülkelerin doğaya karşı tutumları da farklıdır. Doğa; bazıları tarafından kabul edilen genel kanı; doğanın kötü kullanılmaması (tahrip edilmemesi) gerektiği ve doğanın kalitesinin insan yaşamının kalitesini etkileyen önemli bir etken olduğudur. Doğa kalitesinin belirlenmesinin zor olmasına karşın; birçok ülkelerde otoritelerce insan faaliyetlerinin doğa üzerindeki etkilerinin kabul edilebilir sınırlarını belirleyen standartlar geliştirilmektedir.

Gelecek kuşakların refahı gözönüne alındığında, çoğunlukça kabul edilen genel ilke şudur: Önlenebilir zararlara bilerek göz yummak yanlış, zararın oluşmasını engellemek için elden gelen çabanın sarfedilmesi doğrudur. Zehirli atıkların saklanmasıyla ilgili risklere bakıldığında; şu anki mevcut kuşağın, gelecek kuşaklar da oluşabilecek riskleri engellemek için gereken dikkati göstermesi gerektiği ilkesini benimsemek zorundayız.

Mutlak güvenliği sağlamak hiçbir zaman mümkün olmadığı için; bu toplumun gelecek kuşaklara bırakacağı koşulların, kendileri için kabul edilebilirliğinden daha kötü olmaması gerektiği genel kabuldür.

3.3. Amaçlara Ulaşmadaki Önlemler

Amaçlara ulaşmak için, işlem yöntemleri ve teknik önlemler birbirine uyandırılmalı ve jeolojik gerçeklere dayandırılmalıdır. Şu akıldan çıkartılmamalıdır ki; atıkların saklanmasında koruma hedeflerine ancak alt sistemler (atık maddeler, atık depolama tesisi, jeolojik çevre) arasındaki karşılıklı etkileşimler dikkate alın-



Şekil. 1- Atık depolama yöntemleri ve yasal çerçevede bunların olası çevresel reaksiyonlarını sistematik şekilde gösteren genelleştirilmiş diyagram

rak ulaşılabilir. Hedeflere ulaşmak için aşağıdaki yöntem dizini izlenmelidir.

- A) Yer seçimi,
- B) Çoklu-engel ilkesi,
- C) Güvenlik kavramı ve
- D) İleri düzey (gelişmiş) teknoloji.

A) Yer seçimi; inşaat ve depolama ocağı çalışmalarını için pek önemli değildir. Yer seçimi, asıl uzun dönemli güvenlik açısından önemlidir. Yerle kaya ve bunun jeolojik alt sisteminin bütünüyle ilişkisi esas belirleyicidir. Yer seçimi aşağıdaki hususları içerir:

- Tektonik duraylılık (stabilite), yavaş yeraltı suyu hareketleri ve yüzeye uzun akış yolları olma kriterlerine uyan yerlerin belirlenmesi.

- Bu yerlerin ve çevresinin hidrojeolojik ve jeolojik koşullarının yoğun yeraltı araştırmalarıyla belirlenmesi.

- Depo özelliklerinin ilk koşullara ve gelecekle ilgili varsayımlara dayanılarak tahmin edilmesi.

- Bu tahminlerle ilgili risklerin belirlenmesi.

Bunlar, kapsamlı özel bir yer seçimi araştırması (Bkz. bölüm 6) gerektirir.

B) Teknik ve doğal engellerin etkileri farklı depolama işleminde farklı olsalar bile, ilke olarak depolama işleminin tümü doğal ve teknik engeller (çoklu engel ilkesi) veya paralel bir sistemle emniyete alınmalıdır.

Teknik engeller (bariyerler) atık maddeyi çevreleyerek kapatan yapay yalıtım malzemeleridir. Bu engellerin görevi sızma hızını azaltmak ve atık malzemeler ile bunların çevresindeki zemin veya kayanın ayrışmasına yolaçabilecek kimyasal reaksiyonları engellemektir.

Doğal engeller, atıkları çevreleyen toprak veya kaya formasyonlarıdır. Yukarıdakilerine ek olarak, jeolojik yerleşim; yeraltı suyunun atıkları içine girmesini ve sızmaları veya kirlenmiş suyun biyosfere çıkışını tümüyle engellemeli veya kabul edilebilir limitler içinde tutmalıdır.

Depolama Yöntemi	Rölatif (Görece) Derinlik	Depolanan yaygın atıklar
Sondaj kuyusu enjeksiyonu ve kap yerleştirilmesi	Çok derin; 200 m. den kilometrelerce derinliğe kadar	Genellikle sıvı endüstriyel atıklar ve daha sonra katılaşan çamurlar. Kaplar içerisinde veya çamur halinde radyoaktif atıklar.
Eski maden boşluklarının doldurulması ve kap yerleştirilmesi	Derin. 200-1000 m. (Şaft/tünel ve açık işletme türü ocaklar).	Evsel ve endüstriyel katı atıklar; Serbest halde veya kaplar içerisinde zehirli endüstriyel sıvı atıklar. Kaplar içerisinde radyoaktif atıklar.
Toprak dolgu ve kap yerleştirilmesi	Siğ yüzey kazıları (100 m.ye kadar).	Evsel katı atıklar; endüstriyel sıvı atıklar (serbest halde ve kaplar içerisinde) Kaplar içerisinde radyoaktif atıklar.

Tablo. 1- Başlıca yeraltı depolama yöntemleri: Rölatif (görece) derinlikleri ve yaygın atık durumları (Derinlikler görecedir, inşaatlarda kullanılacak kesin rakamlar değildir.)

Bu yüzden jeolojik engellerin iki bileşeni dikkate alınmalıdır; yerli kaya ve çevre jeolojisi: Uygun kayalar deponun dayanımını etkileyen fiziksel ve kimyasal koşullar sağlarlar. Deponun yeterli derinlikte olması ve kaya kütlelerinin yanıl devamlılığı deponun yalıtımını sağlar. Deponun dayanım ve yalıtım bütünlüğünün devam etmesi için bu kaya özelliklerinin tektonik duraylılık ve hidrolojik rejimden yalıtılmışlık özellikleriyle birleşmelidir.

C) Çoklu engel ilkesi, teknoloji içerisinde güvenliği ile kendisini kanıtlamıştır. Atık depolama tesisinin güvenliğinin sağlanması, dikkate alınması gereken en önemli koşuldur. Jeolojik formasyonlardaki atık depolama durumunda; kayanın veya zeminin yük taşıma kapasitesi, çevreleyen formasyonların uzun süreli koruyucu etkileri ve tesis çevresindeki jeolojik duraylılık önemli faktörlerdir. Fakat güvenlik kavramı yalnızca yapı mühendisliği açısından ele alınmamalı, jeolojik faktörleri de göz önüne alınmalıdır.

Böylesi yapılar için normal mühendislik yapılarına uygulanan güvenlik faktörleri yeterli değildir.

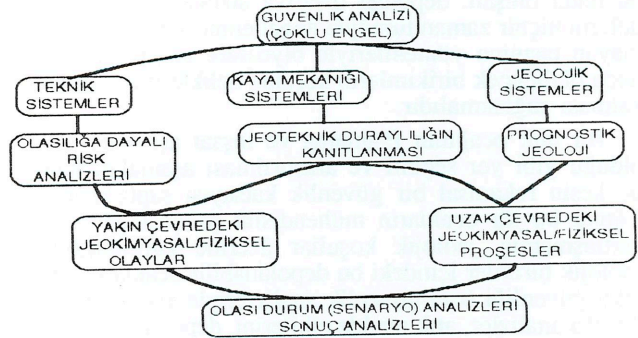
D) Bir atık depolama ocağının açılması ve inşaat safhalarında gelişmiş ileri teknoloji kullanılmalıdır. Bilimde ve teknolojideki devam eden gelişmeler uygulanmalıdır. Madencilerin, mühendislerin ve jeoloji mühendislerinin deneyimleri göz önüne alınmalıdır.

3.4. Güvenlik Kavramı

Yukarıda değinilen koşullara uyan ve çoklu engel ilkesi (zararlı maddelerin sızıntısını yavaşlatan) üzerine kurulmuş bir güvenlik sistemi radyoaktif atıklar için (Langer M. u.a: Bir radyoaktif atık deposunda yatak kayasının duraylılık ve engel etkinliğini kanıtlamak için mühendislik jeolojisi yöntemleri. Proc. IAEA Sempozyumu, IAEA - sn - 289/23, Hannover 1986) ve kimyasal atıklar için (Langer, M. Atık depolama için gerekli güvenlik kriterleri-Atık depolama ve çevre jeolojisi uluslararası toplantısı, Viyana, 1993, 203-215) geliştirilmiştir. Bu güvenlik kavramının ana basamakları Şekil. 2 de verilmiştir.

A) Kaya mekaniği sistemleri (sondaj kuyusu, ocaklar, dolgular), jeolojik sistemler (hidrojeoloji, tektonizma) ve teknik açıdan (kaplama ve atık çeşidi) her bir engelin etkisinin ayrı analizleri her durum için uygun yöntemler kullanılarak yapılması.

- Teknik sistemlerin istatistiksel risk analizleri.



Şekil. 2- Atık depolama için güvenlik kavramı

- Kaya mekaniği sistemlerine göre duraylılık ispatı.
- Jeolojik sistemlere göre olası jeokimyasal, hidrojeolojik ve tektonik olayların tahmini.

B) Değişik sistemdeki engellerin (bariyerlerin) bir-biriyle etkileşimleri sonucu oluşan fiziksel ve jeokimyasal olayların analizi ve meydana gelebilecek bu zararlı maddelerin yakın ve uzak mesafelere taşınma etkilerinin belirlenmesi.

- Yalıtım maddelerinin doğal ortamdaki korozyonunun sızıntı miktarı için öneminin araştırılması.
- Zemin ve kayada gelişen uzun dönemli jeokimyasal olayların değerlendirilmesi.
- Depolanmış atıkların ısı potansiyeliyle ilişkili olarak depo civarındaki kayaçların gerilme ve deformasyonlarının termomekanik yollarla hesaplanması.

C) Toksik malzemelerin kaçış riskini gündeme getirecek teorik olarak mümkün her olasılığın kazalar dahil göz önüne alınarak bütün engellerin karşılıklı etkileri ışığında nihai depolama tesisinin kapsamlı güvenlik analizi.

- Kaplamanın yenilmesi (kırılması veya çatlaması).
- Ocağın veya madenin kaya mekaniği yönünden çökmesi ve
- Jeolojik veya tektonik felaketler.

Ayrıntılar için Böl. 5 (güvenlik analizleri)ne bakınız.

4. ENGEL YETERLİLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Yeraltı ocaklarındaki atık depoların güvenlikleri herşeyden önce doğal jeolojik engellerin etkinliğine bağlıdır. Bu engellerin, atıkları çok uzun yıllar boyunca çevreden yalıtacağı beklenir. Bu yüzden jeolojik bariyerlerin etkilerinin nicel olarak belirlenmesi gereklidir.

4.1. Modelleme

Çoklu bariyer ilkesine göre jeolojik yerleşim, uzun yıllar boyunca yalıtımı sağlamalıdır. Nitel çözümleme model ve uzman deneyimleri önemli faktörler olsa da jeolojik engellerin bütünlüğünün garanti altına alınması için bu bütünlüğün geçerli jeomekanik ve hidrojeolojik modeller üzerinde denenerek hesaplanması gereklidir. Yerli kayacın ve bunu çevreleyen, jeolojik formasyonların hesaplanabilir bir model içerisinde idealize edilmesi gerçekçi bir hesaplama için temel oluşturur. Doğal sistem; geçirimsizlik (permeabilite), termomekanik davranış, tektonik çatlak ve kırıklar gibi özellikleri ile göz önüne alınmalıdır.

Atık deposu bir jeoteknik sistem olarak oluşan jeolojik durumu en iyi şekilde kullanabildiği yerde deponun açımı sırasındaki ilk koşulların da dikkate alınması gerekir. Bu en iyi şekilde kullanma için örneğin uzun-süreli jeolojik ve jeokimyasal olaylar, ısı sınırları, kaya yenilmeleri gibi sistem şartlarının doğasında olanlar dikkate alınmalıdır. Engel yeterliliğini tespit etmek için kullanılan hesaplama modelinin yeterliliği bir kesinleştirme yöntemiyle kanıtlanmalıdır.

Kompleks bir jeolojik yapının gerçek davranışının her zaman için bir ölçüye kadar bilinmez kalması kaçınılmaz olduğu için modellemeler ancak bir yere kadar geçerlidir. Bu genel zorluğu aşmanın bilimsel yolu modelin yeni bilgiler ışığında sürekli geliştirilmesidir. Bu yaklaşımın temel özelliği mekanik ve hidrojeolojik davranışlar arasındaki karşılıklı ilişkilerin belirlenmesi, modelin kesinleştirilmesi, inşaat yerinden alınan verilerin değerlendirilmesidir.

Model kesinleştirilmesinde (modelin doğruluğunun ispatı için) belli bir bilimsel yol izlenmelidir.

- Kesinleştirme öncesi hesaplamalar için kullanılan nümerik program kontrol edilmelidir. Yani programın matematiksel olarak doğru sonuçlar verdiği kanıtlanmalıdır.

- Model kesinleştirilmesi; laboratuvar ve arazi deneyleri, kapsamlı ve tutarlı bir modelleme, uygun sınır koşulları ve ön koşullar hakkında başarılı tahminlerle mümkündür. Model kesinleştirilmesi; geri-analizlerle veri düzeltimi değil, modelin yerli kayacın davranışları ne ölçüde yansıttığının bir göstergesidir. Bunun yanı sıra; modelin bütün mekanik ve hidrojeolojik davranışları yansıtamayacağı da unutulmamalıdır.

- Ancak bundan sonra kaya kütlesi için kesinleştirilmiş kapsamlı ilişkiler, yerine özgü jeolojik durumun modellenmesi için uygun temeller oluşturur. Bunun yanı sıra yerine-özü aynı davranışları gösteren birimler ve bunlarla ilişkili parametreler belirlenmeli ve arazi deneyleriyle doğrulukları kanıtlanmalıdır.

Jeolojik engellerin (bariyerlerin) yeterliliğinin değerlendirilmesinde kullanılan nümerik modeller jeolojik ortamın fiziksel sistemini temsil etmelidir. Bu temsilin doğruluğu önemlidir. Çünkü matematik modellerin yanlış uygulanışı hatalı sonuçlara götürür. Her koşulda; matematik modellerin kullanımı araziden gelen verilerle desteklenmelidir. Bu veriler kapsamlı arazi araştırmalarından elde edilmiş olsalar bile yine de jeolojik sistemi modellemede belli bir hata payı kalacaktır. Bu yüzden sınır yaklaşımları tedbirli şekilde kullanılmalıdır. Sınır yaklaşımlarının tedbirli şekilde kullanılması, engel yeterliliği tahmininin doğruluğunu etkiler.

Yine de atık depolama durumunda modele dayalı nümerik hesaplamalar bir yere kadar anlamlıdır. Çünkü böyle yapılara izin verilebilmesi için yapının güvenliğinin önceden güvenli ve inandırıcı bir biçimde gösterilmesi gereklidir.

Yine de atık depolama durumunda modele dayalı nümerik hesaplamalar bir yere kadar anlamlıdır. Çünkü böyle yapılara izin verilebilmesi için yapının güvenliğinin önceden güvenli ve inandırıcı bir biçimde gösterilmesi gereklidir.

4.2. Jeomekanik Modeller ve Hesaplamalar

Jeomekanik modellemenin amacı duraylılık (stabilite) hesaplamalarıdır. Bu duraylılık hesapları ile ocak veya termal kaynaklı gerilmeler sonucu oluşan yeni gerilme dağılımının kayaç içerisinde varolan duraylı dengeyi tehlikeye düşürmeyeceğinin, ocak açma işlemleri sırasında destek hasarlarına veya çökmelere yol açmayacağı ve formasyonun uzun süreli duraylılığının sağlanacağı gösterilmesi gereklidir. Ocağı çevreleyen formasyonlardaki gerilme dağılımlarının ve deformasyonların kayacın asıl özellikleri de dikkate alınarak hesaplanması ve kaya kütlesinin taşıma gücüyle karşılaştırılması gereklidir. Tüm bunlar jeomekanik modelin ve ilgili diğer hesaplama modellerinin formülasyonunu, parametre seçimini ve yenilme koşullarının belirlenmesini gerektirir (Şekil. 3).

Hesaplamalar için bir model oluştururken bazı şeylerin idealize edilmesi kaçınılmazdır. Bu model kapsamında aşağıdakilerin ayırıcına varmak gereklidir:

- Kaya mekaniği modelleri ve
- Statik modeller.

Kaya mekaniği modeli aşağıdaki konuları kapsar:

- Kaya kütlelerinin jeolojik yapısı
- Kaya kütlelerinin zamana, sıcaklığa ve gerilmeye bağlı deformasyon ve dayanım özelliklerini gösteren malzeme parametreleri.

- Kaya kütlelerinin ilkel durumu (gerilme, ısı).

Statik modellemede aşağıdaki şartların belirlenmesi gerekir.

- Geometrisi (düzlemsel veya uzaysal olarak kaya kütlelerinin taşıma kapasitesinin belirlenmesi) ve

- Gerilme durumu ve bunun zamana bağlı değişimi.

a) Termal etkiler (depolama ve ısı ile oluşan atıklar, havalandırma vb. gibi)

b) Mekanik etkiler (sızma, dolgu, statik yükler vb. gibi)

Bu tip jeomekanik problemlerin çözümü için özellikle uygun hesaplama yöntemi sonlu element (finite element) yöntemidir. Bu sayısal hesaplama yöntemi, tektonik özellikler, uygulama şartları, ocak geometrisi, inşa yöntemi vb. gibi bir çok önemli faktörün (Şekil. 4) nümerik olarak uygun değerler verilerek gerçek şartlara yaklaşmasını sağlar. Sonlu element yöntemi doğrusal olmayan değerleri hesaplama için de uygun bir yöntemdir. Atık depolama tesisleri analizlerinde özel amaç için; tabii kaynaklar ve yerbilimler enstitüsü [(BGR), F.R.G.] ANSALT kodlu bir bilgisayar programı geliştirmiştir (kaya tuzu analizlerinin doğrusal olmayan termo-mekanik analizleri).

Diğer bir uygun bilgisayar programı da kaya mekaniği amaçları için kullanılan "ADINA"dır.

Bir atık ocağının kaya davranışlarındaki jeomekanik hesaplamalar aşağıdaki amaçları içerir.

- Hesaplama yöntemiyle termo-mekanik işlemlerin analizi uygun bir sonuca götürmeli.

- Deneyim bağlı sonuçlar hesaplama yoluyla geliştirilebilir.

- Duraylı bir ocağın planı için kaya mekaniği kriteri, parametre hesaplama yöntemiyle geliştirilebilir.

- Bunun gibi kriterler, bir ocağın ön araştırmasının gerçek jeolojik şartlara uyarlanması için gereklidir.

- Bir jeolojik engellenen bütününe uzun-dönem değerlendirilmesinde deneyim tek başına yeterli değildir. Hesaplama ile olasıdır.

4.3. Hidrojeolojik Modeller ve Hesaplamalar

Hidrojeolojik modellemenin esas amacı

- Zehirli maddelerin yeraltı suyu ile taşınabilmesi işleminin daha iyi anlaşılması.

- Zehirli maddelerin zararlı olmayan konsantrasyonlarının biyosfere taşındığının gösterilmesi.

- Atıkların izolasyonunun uzun dönem garanti altına alındığının ispat edilmesi içindir.

Hidrojeolojik modelleme, bundan başka, özellikle yeraltı suyu yoluyla taşınmaya etki eden faktörleri dikkate almak zorundadır.

Bunlar da

- Akışla taşınma
- Dağılma ve yayılma ile taşınma
- Akış yönünde kayaçlardaki kimyasal reaksiyon
- Atıkların eriyik haline dönüşme hızı.

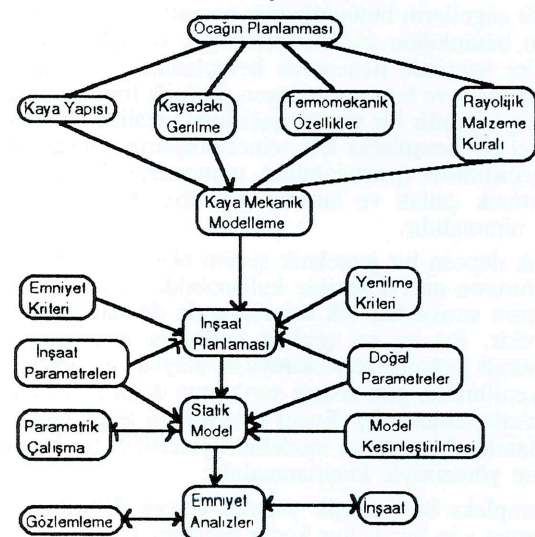
Hidrojeolojik modelleme kavramı, kalitatif miktardaki suyun sisteme eklendiği noktadaki beslenme alanı ve sistemi terkettiği noktadaki boşalım noktasına dayanmak zorundadır. Bunun yanında, sistemden geçen suyun genel akış yönü, taşıma hızı ve bütün sistemin çeşitli bölümlerindeki yeraltı suyunun kimyasal ve fiziksel özelliklerinin dikkat alınması gereklidir. Absorpsiyon ve yağış, iyon değişimi ve adsorpsiyon gibi kimyasal reaksiyonlar bazı kirlenici maddelerin hareketini durdurur veya yavaşlatır. Absorpsiyon ve iyon değişimi özellikle kirlenici maddenin oksidasyonu ve bileşimi gibi kimyasal durumuna bağlıdır. Kimyasal maddelerin absorpsiyon özellikleri büyük farklılıklar gösterir ve hatta elementlerin birçoğu farklı uygun ortamlarda ve depolama şartları altında belirlenir. Bunun yanında, bu reaksiyonların temel prensipleri hemen hemen aynıdır.

Kirlenici madde akışının modellemesini yapmak için, yeraltı suyuna süzülen mevcut atık maddenin bilinmesi zorunludur. Bu mevcut olma durumu atık maddenin durumuna bağlı olacaktır.

Basit olarak, yeraltı suyunun gözenekli ortamda (zeminde) akışının tek boyutlu incelendiğinde, akış hızı Darcy kanunu ile verilir.

Kristalize olmuş yerli kayanın engelleme modellemesi için süreksizler (eklem, çatlak, fisür) boyunca suyun iletkenliği ve permeabilitesinin dikkate alınması ge-

Depolanabilir bir ocağın
planlama ve inşaatı için Jeoloji Mühendisliği Yönünden
Emniyet Analizi



Şekil. 3- Jeomekanik modelleme

reklidir. Çünkü, suyun içeriye doğru sızma kabiliyeti ve kirlenmiş suyun çökellerden biyosfere doğru akışı önemli bir özelliktir. Fisürlü veya eklemli kayalar da, süreksizlikler kaya kütesinin permeabilitesini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bu, sağlam kayaların boşluk hacimlerinde ikincildir. Yani önlem verilecek kadar değildir. Hidrolik geçirimsizlik; süreksizliklerin oluşumu ve kesişimi kadar süreksizliklerin yüzeyi, genişliği ve dolu malzemesine de büyük ölçüde bağlıdır.

Bu durumda, hidrojeolojik modelleme ve hesaplama (kaya deneyleri gibi) kayacın kaya basıncı ve su basıncı ile ilgili olarak yöne-bağımlı permeabilite miktarını belirler. Bu bilgiler çatlaklı kayalarda yeraltı suyu akışı için eşdeğer-gözenekli ortam kavramının uygulanabilirliğinin anlaşılmasını sağlar. Kontrol faktörleri ve uygun ölçekte Darcy kanununun uygulanması gerekli olduğu zamanlarda belirlenebilir.

Darcy kanunu esasına bağlı olarak hidrojeolojik modelleme için bilgisayar programları her yerden sağlanabilir (Örneğin Kompüter Programı SWIFT, PHOENICS). Fakat maalesef, fisürlü ortamlardaki su akışı modellemesinde taşıma sisteminin detayları hakkında hala birçok bilgi eksiklikleri vardır. Bu alanda son zamanlarda uluslararası büyük araştırmalar yapılmasına rağmen, gerçekten de çatlaklı ortamlarda taşıma ve mekanizması ve su akışı hesaplamalarında doğruluk ve güvenilirlik gibi fiziksel temeller (yani mekanik) unutulmaktadır.

Çatlak sistemlerinin istatistiksel analizi çatlaktaki akışa bir yaklaşımdır.

İstatistik bilgiler, münferit çatlak modellemesinde, sayısal modelleme ile bir arazinin istatistiksel olarak hidrolik özelliklerini tekrar belirlemek için kullanılır. Bu yaklaşım sadece kaya kütesindeki çatlak sistemleri hakkında hiçbir bilgi olmadığı yerlerde uygulanır. Bu yaklaşımda, sayısal hesaplamalardan elde edilen sonuçların aralıkları hemen hemen araziden rastgele alınan örneklerden elde edilen sonuçların aralıklarına yakın olacaktır.

Sonlu eleman programı ADINAT veya yeni geliştirilmiş FE programı DURST(BGR, Hannover) fisürlü kayalarda akış işlemi görüntüsü vermek için kullanılabilir. Bu programda, fisurlar üç boyutlu olarak temsil edilir ve sonlu eleman bir, iki veya üç boyutlu olabilir.

Emniyet Kriteri	Doğal Etkenler	Teknik etkenler	Ölçümler
Deformasyon	Jeolojik şartlar	Boşluk geometrisi	Jeolojik inceleme
Gerilmeler	Tektonik	İnşaa işlemi	Jeoteknik araştırma
Yenilme modu	İlkel gerilme	Kullanma yöntemi	Statik hesaplar
Taşıma Kapasitesi	Mekanik kaya karakterislikleri	Uygulama şartları	Kontrol deneyleri
Ani luzlu su akışı	gaz ve luzlu su çokeli	Sıcaklık	Ocak ölçümleri

Şekil. 4- Jeoteknik duraylılığın (stabilite) etken ve kriterleri

4.4. Kaya Deneyleri

Hesaplama modellemesinde, jeolojik formasyonda bulunan depolanabilir ocağın uygun idealize edilmesi, engelleme (bariyer) yeterliliğinin gerçeğe uygun değerlendirilmesi için gereklidir. Jeolojik çevre; dahili yapı, termo-mekanik davranış, hidrojeolojik özellikler ve başlangıç şartları gibi kompleks özelliklerle göz önüne alınmalıdır. Bu sebeple, oluşan model içinde kaya davranışlarının doğru tanımlanması temel bir önem taşır, hesap sonuçları da sadece kompüter verisi olabilir. Bunun ötesinde, kaya deneyleri herhangi bir modellemenin vazgeçilmez kısmıdır. Atık depolama için temel kaya özellikleri; mukavemet, deformasyon ve hidrolojik özellikleri ile ilgilidir. Bu özellikler ve karakteristikler Tablo. 2 ve Tablo. 3 de verilmiştir.

Yeraltı depolanabilir tesislerin mühendislik planlaması için sağlamlık mukavemeti gereklidir. Özellikle yeraltı açıklıklarının tamamının korunmasında mukavemet özellikleri erozyon ve bozuşmaya karşı malzemenin dayanıklılığının ve duraylılığını sağlar. Genel olarak, yüksek mukavemet bozuşmaya karşı yüksek dayanıklılık kabiliyeti demektir. Mukavemeti belirleyici parametreler; kohezyon, içsel sürtünme açısı, tek eksenli basınç mukavemeti, çekme mukavemeti ve akma limitidir. Gerilme-deformasyon özellikleri, bir malzemenin gerilme altında gösterdiği deformasyonu belirler. Bir atık depolama ortamının deformasyon özelliklerini tarifleyen parametreler elastik parametreler (young modülü, poison oranı, bulk modülü ve kesme modülü) ve rayolojik parametrelerdir (akma parametreleri, plastisite). Bunlar, izolasyon için malzemelerinin özelliklerinin analizinde önemlidir. Bir zemin malzemesinin akışkan olarak süreksizlikleri doldurması ve deforme olabilme ka-

Karakteristik Değerler	Gerilme Durumu Ölçüm Yöntemleri	Deformasyon özellikleri		Mukavemet özellikleri	
		Karakteristik Değerler	Ölçüm Yöntemleri	Karakteristik değerler	ölçüm yöntemleri
Gerilmenin ilkel durumu (içsel gerilmeler, Tektonik residual gerilmeler)	Gerilme boşalım ölçümleri a. Kuyu içinde b. Yarık içinde	Elastisite(E-modülü, G-modülü yanıl sıkıştırma oranı)	a. Tek eksenli hidrolik basınç, üç-eksenli laboratuvar ölçümleri b. Yerinde, (arazi de)kaya dinamik ölçümleri	Basınç mukavemeti	Tek eksenli hidrolik basınç
Gerilmenin ikincil durumu (desteklerdeki basınç)	a. kuyu ekstansometresi b. Gerilme ölçerler (ankraj)			Germe mukavemeti	Brezilya deneyi
Gerilmenin üçüncül durumu (zaman içindeki gerilme-dağılımı)	Galeri deformasyon ölçümleri	rayoloji(V-modülü, plastisite post-elastisite)	a. çok eksenli hidrolik pres b. Yerinde plaka yüklenme deneyi, pressiometre (kuyu dilatometre yüklemeye deneyi)	Kesme mukavemeti (kohezyon, sürtünme açısı)	a. Laboratuvar da direk kesme deneyi b. Yerinde kesme deneyi

Tablo. 2- Kaya mekaniği karakteristik değerleri ve ölçüm yöntemleri

Hidrojeoloji	
Veriler	Yöntem
Akiferin potansiyometrik seviyesi	Hidrolojik sondaj buhar deneyi; derin kuyu da piezometre
Akiferin porozitesi	Kuyudibi jeofizik-loglaması; Karot numune üzerinde laboratuvar deneyleri
Akiferin permeabilitesi	Hidrolojik sondaj deneyleri; Arazi tarama deneyleri
Yeraltısuyu tablası seviyesi	Kuyu deneyi; piezometre; yüzey elektrik rezistivite deneyi
Yeraltısuyu ısısı	Isı loglaması
Yeraltısuyu viskozitesi ve yoğunluğu	Laboratuvar deneyleri
Transmite, depolama katsayısı, kapasitesi	Kuyuda pompaj deneyi
YAS beslenme ve boşalım noktaları	Piezometre, hava fotoğrafları, kuyu logları

Tablo. 3- Hidrojeolojik karakteristik değerleri ve ölçüm yöntemleri

biliyeti istenir. Tersine, sert bir zemin malzemesi atık depolanabilir tüneller için önemlidir. Hidrolojik özellikler akıcılık değerlendirmelerinde önemlidir. Bunlar; porosite, hidrolik eğim ve permeabilite parametreleri ile değerlendirilir. Radyoaktif maddelerin taşınmasını sınırlamak için mümkün olduğunca düşük bir permeabilite gerekir.

5. EMNİYET ANALİZLERİ

5.1. Yöntem

Bir atığın depolanması için emniyet kavramının prensipleri Bölüm 3.4'de anlatılmıştır. Emniyet analizini başarıyla yürütmek için, yöntem ve verilerin serbest bırakılan toksik (zehirli) maddelerden çevreye ve insana vereceği olası zararların değerlendirilmesi ve bu zararlar arasında mukayeseye olanak sağlaması gerekir.

Bir emniyet değerlendirmesini yapmak için temel adımlar ve yöntemler Şekil 5 de verilmiştir.

Bir atık depolama sisteminin bütün temel safhalarında (evrelerinde) emniyetlilik değerlendirmeleri yapılmalıdır. Kavram safhasında yerli kaya ve kaplama yöntemleri gibi atık depolama sistemi elemanları ve yer seçimi sorularına yanıt aranır. Planlama safhasında emniyet analizi; ocak açma operasyonu ile birlikte herhangi bir güvenlik değerlendirmesini ve bütün sistemin kabul edilebilir kriterlerini içeren kanıtların çıkarılmasını kapsar, böylece ocak açımı ve inşaat ilerleyebilir. Son emniyet değerlendirmelerinde bu kriterlerin devamlı çıkışını kontrol edilmeli ve planlama ve inşaat esnasında oluşan daha detaylı veriler dikkate alınmalıdır. Emniyet değerlendirmesinin bu son safhasında, sadece oluşacak sonuçların tesbiti değil bilinmeyenlerin ve oluşabileceklerin tahmininin de yapılması gerekir. Şekil 5 de emniyet değerlendirme işlemine genel bir bakışı ve proje gelişimi boyunca ilgili işlemleri göstermektedir.

Yeterlilik ve hassaslık analizleri için ilk safha basitleştirilmiş olmasına rağmen, yöntemler genel olarak temelde aynıdır. Şekil 5 de gösterildiği gibi emniyet kavramına gelince, jeoteknik stabilite, jeolojik varsayımlar (senaryo analizi) ve sonuç analizinin ispatı, bir yeraltı atık depolama ocağının güvenlik analizinin temel kısımlarını oluşturur. Daha detaylı açıklamalar sonraki bölümlerde verilecektir.

	kavram safhası	planlama safhası	inşaat ve operasyon safhası
Emniyet Analizi çeşidi(Tipi)	Amaçlar için basit modelleme ve kavramların hassasiyet analizi	Jeoteknik duraylılık son emniyet analizi için ileri modelleme	Doğrulama analizi (sonuç analizi)
Yerlilikleri ve Jeoteknik işlemler	genel jeolojik çevre verilerinin toplanması	Yer seçimi	inşaat ve operasyon gözlemlerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi
Düzenleme işi	mühendislik-jeolojisi ön etüdü	Tesislerin detaylı mühendislik jeolojisi etüdü	Jeoteknik değerlendirme ve nihai detaylı planlama
	kabul edilebilir kriterlerin formülasyonu	Güvenlik analizi raporunun tekrar incelenmesi	kontrol ve enjeksiyon
		inşa yetkisi	

Şekil 5- Atık depolama işlemlerinde emniyetlilik değerlendirmesinin temel safhaları.

5.2. Jeoteknik Stabilitenin (Duraylılık) İspatı

Bir yeraltı açıklığının (tüneller, galeri, ocak), taşıma kapasitesi ve/veya yeraltı inşaatının kullanılabilirliği (boşluk sistemi, destekleme, çevreleyen kaya) gösterildiği zaman duraylı olarak kabul edilir. Bir yeraltı inşaatının taşıma kapasitesi veya taşıma kabiliyeti olarak tarif edilen ek yük taşıyabilirliği (örneğin ocak açma operasyonundan dolayı) bize bir denge konumundan, başka bir denge konumuna (gerilme dağılımından dolayı) geçişinde büyük deformasyonlar veya çatlaklar oluşmayacağını gösterir. Bunun anlamı; bir atık depolama tesisinde yenilme olmayacağını, destekleme sistemlerinin ocak açma operasyonu esnasında (ilkel/ikincil gerilme konumunda) veya uzun-dönem termal yükleme esnasında (ikincil üçüncü gerilme konumunda) emniyetli olduğunu gösterir. Bundan başka, bariyer fonksiyonu yapan çevre kayanın suyun etkisiyle minerallerinin ayrışmasından dolayı veya olası termal yüklerden dolayı yenilmelerin oluşturacağı zarardan korunması için yeteri kadar iyi olması gereklidir ve yenilme analizinden belirlenen seviyeyi geçmemelidir.

Duraylılığın genel tarifinden radyoaktif ve atık depolamanın özellikle koruma amacı için, aşağıdaki kanıtlar gösterildiği zaman bir atık depolama ocağı duraylı olarak kabul edilir.

İnşaat ve operasyon safhası için (açık/yarı dolu) ocak.

- Kaya patlaması gibi hızlı veya akma gibi yavaş gerilme değişimleri sonucunda sistemin taşıma kapasitesinin aşılması kayanın taşıma kapasitesini zayıflatması.

- Ocak açma işlemi esnasında veya sonrasında ne yeraltı açıklıklarında ne de yüzeyde ocağın kullanımını ve/veya yerüstü inşaatının emniyetini etkileyebilecek, istenmeyen deformasyonların ve/veya akmanın oluşması.

- Termal yüklerden dolayı oluşan mineral bozuması (dehidrasyon) yerli kayanın bütününe zarar vermemesi.

- Su ve tuzlu su sızmasının ve/veya gaz sızıntısının kontrol altına alınması gerekir.

Operasyondan sonraki safha için (ocağın tamamen doldurulması durumunda).

- Uzun zaman periyodu içinde; gerilme değişimleri, mineral bozuması, korozyon gibi etkiler çevre kayanın bütünlüğüne zarar vermemeli ve istenilmeyen derecede zayıflatmamalı.

- Tuzlu su girişi ve yeraltı suyu hareketi kabul edilmez derecede zararlı toksik maddelerin girişini başlatmamalıdır.

Yerli kaya engellemesinin (bariyerinin) uzun dönem etkilenmesinin değerlendirilmesi ve depolanabilirlik planlaması için aşağıdaki ek faktörlerin gözönüne alınması gerektiği, yukarıda sıraladığımız kriterlerden görülür.

A) Doğal Faktörler

- Jeolojik şartlar (örneğin; dizilimi, kayanın petrografik bileşimi, tektonik özellikleri, eklem takımları)

- Hidrojeolojik şartlar (örneğin; boşluk suyu, eklem

suyu, permeabilite, yeraltı suyu hareketi)

- Yerinde gerilme şartları
- Depremselliği (deprem etkisi)
- Tuzlu su ve gaz olması

- Kaya ve/veya kaya kütlelerinin ısı ve zamana bağlı deformasyon özellikleri (örneğin; elastisitesi, akma davranışı, plastisitesi).

- Kaya ve/veya kaya kütlelerinin ısı ve zamana bağlı kırılma davranışları (örneğin; basınç mukavemeti, çekme mukavemeti, kesme mukavemeti, akma parametreleri, maksimum taşıma kapasitesi).

B-) Teknik Faktörler

- Radyoaktif atık maddenin özellikleri (örneğin; ısı üretmesi, radyoaktivitesi, çekirdeğin yarılanma süresi, uzun dönem fiziksel ve kimyasal etkiler).

- Ocak açma tekniği (patlatma veya kazıcı makinelerle açma)

- Yeraltı açıklığının geometrisi (galeri ve sütunların genişliği ve şekli, barajların inşaatı)

- Veriler (son depolama için sondaj kuyularının düzenlenmesi, galerilerde maksimum kabul edilebilir ısı, güvenlik ölçümleri ve önlemleri).

C-) Sistemle İlgili Faktörler

- Kaya ve desteklemenin yenilme modları.

- Yeraltısuyundaki ısı artışının limit değerleri.

- Minerallerdeki ısı artışının limit değerleri.

- Radyoaktif yayılmadan dolayı kaya özelliklerinin değişimi.

- Kayanın absorbe (soğurma) özellikleri.

- Uzun - dönem jeolojik olaylar (tektonik oluşumlar).

Bir atık depolama tesisinin duraylılığı çeşitli araştırmalar (etüd) ve hesaplamaların bileşimi ile belirlenir. Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik araştırmalar ve etütleri, kaya mekaniği ölçümleri, statik hesaplamalar, teknik parametre gözlemleri ve ocak açma deneyiminin hepsinin dikkate alınması gerekir.

Araştırmaların ve ölçümlerin, doğruluğu ve mertebesi, statik hesaplama ile bulunan emniyet faktörleri nihai (son) analizler (Bölüm. 5.3 de anlatılacak) de gösterildiği gibi olası yenilmelerin etkilerine bağlı olmalıdır. Araştırmalar, ölçümler ve teorik hesaplamalar; karşılıklı etkilemeleriyle birlikte bir birim olarak dikkate alınmalıdır. (Örneğin; kayanın mekanik modeli, parametrik analizler, statik hesaplamanın kontrolü). Duraylılık analizleri için, nihai kaya tanımlaması ve kaya parametrelerinin kesin olarak belirlenmesi ancak ocak açımı sonucunda olacağından dolayı, planlama safhasındaki duraylılık hesapları sadece bir varsayıma dayanmaktadır.

5.3. Senaryo ve Sonuç Analizi

Senaryo analizinin temel amaçları,

- Bir zehirli maddenin çıkışı ve çıkış hızının etkisi veya kaynağından insanlara taşınması gibi olayların tanınması.

- Bu olayların oluşum olasılığının tahmini ve bunla-

rın atık depolama sistemine etkisini belirlemek böylece sonradan yapılacak sonuç analizi için, gerekli başlangıç ve sınır şartlarını sağlamak.

Sonuç analizi, zehirli maddelerin daha sonra oluşacak taşıma modelini ve sonuçlarının etkisinin tahminini içerir.

Sonuç analizi aşağıdaki tahminleri içerir.

- Atık maddelerin davranışları (özellikle sızma ile ilgili).

- Astarlama ve geri dolgu oluşumu gibi engelleme (bariyerin) davranışları ve engelleme boyunca maddelerin taşınması gibi yerli kayanın çevresi ile karşılıklı etkisi.

- Jeolojik çevre boyunca maddelerin taşınması.

- Maddelerin biyosfere taşınması ve insanların maruz kalması.

- Ve maruz kalma durumunda olası sonuçların değerlendirilmesi.

Senaryo veya sonuç analizlerinde uygulanan yöntem ve teknikler aşağıdaki kategorilere bölünebilirler.

A) Olasılığa dayalı yöntemler

Bir bütün sistemde mümkün olan sonuçları belirlemek için olasılıklara dayandırılan her bir kanıtın bir bütün içinde birleştirilmesi bir örnektir. Sonuçları istatistiksel olarak tahmin etmek için model parametrelerinin olasılık dağılımı ile belirlenmesi de diğer bir örnektir.

B) Tespite dayalı yöntemler

Burada işlemler yeteri kadar iyi anlaşılabilir olarak dikkate alınır, bu yüzden veriler kesin olmasa bile, mühendislik ve bilimsel temel kanunlar nicel olarak uygulanabilir.

C) Hassas ve kesin olmayan analitik yöntemler

Sistem özelliklerinin belirlenmesinde, parametrelerin önemi ve karşılıklı etkileri, herbir parametrenin bütün sonuçlara etkisini saptayarak gösterilir.

Bu farklı yöntemler birbirini tamamlayıcıdır ve emniyet analizlerinin bütün temel parçalarında uygulanabilir. Bunun yanında, bu yöntemlerin uygulanmasında gerekli olan sınırlamalar net olarak bilinmelidir.

Son yıllarda kullanımda olan doğal sistemlerin gelecekteki gelişmelerinin modellenmesi için, tektonizma (faylaşma, kıvrılma, deprem, volkanizma) ve jeomorfoloji (bozunma, ayrışma, erozyon, toprak kayması, çökme) gibi bir çok olay ve sürecin gelecekteki hızının belirlenmesi için gerekli olasılıkların olmamasından, modellenmenin başından sonuna kadar uygun ve ihtiyaca cevap verecek veri akışının oluşmamasından şikayet edilmektedir.

Faylanma, sismik aktivite ve iklim değişiklikleri gibi geçmişteki jeolojik olaylar rastgele oluşmamıştır, fakat oluşum yeri, büyüklüğü, değişik hızı ve sıklığı için tesbite dayalı açıklama yapmak zordur. Özellikle geçmiş jeolojik olayları açıklama da hem tesbite dayalı hem de olasılığa dayalı modellemelere önem vermeyecek, gelecekteki jeolojik olayların tahminini yapmak imkansızdır.

Jeolojik varsayımların tayinindeki belirsizlik, tek tek etkileri basit olabilen yöntemler ve kanıtlar arasındaki

karmaşık ilişkilerin sonucudur.

Bundan başka, yerbilimlerinde uzun-dönem varsayımlar, tanımlanmış ve tanımlanmamış olaylar arasındaki olası etkilemelerin karmaşasından dolayı güvenilirmez ve imkansızdır.

Bir olasılığa dayalı emniyet analizinin emniyetlilik derecesi ilk olarak istatistiksel verilerin kalitesine bağlıdır. Bundan başka, bunların sıklıkları istatistik tekniklerin de olduğu gibi tahmin edilemez. Bu kanıtları oluşturmak için bir karmaşık teknik sistem yetersiz olmak zorundadır. Bunun yanında, bir karmaşık sistemin yenilmesi daha az karmaşık bir alt sistemin yenilmesi sonucunda oluşur. Eğer, uygulamada bu bileşenlerin yeterli miktarda ampirik verileri sağlanırsa, yenilmelerin sıklığı için beklenen değer çok güvenilirlikle bulunur.

Uygun mantık ile bu tahmin edilen yenilme sıklıklarının bileşimi az güvenilirliğe sahip karmaşık sistemlerin gerilme sıklıkları için umulan değere götürür.

Bir kompleks sistemden çok basit ve alelade bir sisteme kadar bu teknikler genel olarak jeolojik sistemler için uygulanabilir değillerdir. Kompleks sistemlerin yenilme sıklıklarını göreceli bir kaç kanıt ya da makul kabullere dayandırarak tahmin etmek elbetteki olasıdır. Bunun yanında eğer atık depolama sahasında emniyet analizi için bu tahminler çok yararlıysalar, bunlar az güvenilirlikli ve şüpheli olacaktır. Ayrıca, emniyet analizinin bu bölümü için tesbite dayalı yöntemin kullanılması olasılığa dayalı yaklaşımdan daha uygun olacağı görülmektedir. Bunun anlamı yenilme "release tree" tekniği ile tesbit edilir ve bunların yeraltı suyundaki zehirli madde çıkışını içeren sonuçları hesaplanır.

6. ÖZEL-YER SEÇİMİ VE MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ ARAŞTIRMA PROGRAMI

Mühendislik jeolojisi/jeoteknik veriler ön araştırma, planlama, inşaat safhaları ve zehirli atıkların depolanabilmesindeki emniyet analizleri için gereklidir. Araştırma programlarının tipi ve amacı Bölüm. 4 de belirtildi, özellikle işlevinden etkileyen faktörlerine kadar. Aşağıdakiler, jeomekanik bakış açısından istenilen verilerin listesi veya başlangıç araştırmalarının kontrolü gibi kabul edilebilir. Bunlar tekniği, kaya mekaniğini ve jeolojiyi kapsar.

6.1. Teknik sistemlerin araştırılması

A) Atığın durumu,

- miktarı, şartların durumu, geometrik boyutları, ağırlığı

- kimyasal içeriği, ısı durumu

- korozyon ve sızma verileri

- taşınması, nihai (son) depolama tipi,

B) Geri dolgu malzemesi, örneğin kırık malzeme.

- mineralojik/kimyasal bileşimi, ısı davranışı, uzun-dönem kimyasal davranışlar.

- termo - mekanik özellikler (sıkışma, genleşme, radyolojik malzeme verileri, uzundönem mukavemet).

- boşluk hacmi, permeabilite, zaman ve ısı.

Mineralojik/kimyasal ve jeoteknik laboratuvar araştırmaları, uygun ekipmana sahip özel laboratuvarlarda

yapılmalıdır.

C) Dolgu malzemesi, örneğin Bitüminler, elastik-plastik malzemeler.

- mineralojik/kimyasal bileşimi, ısı davranışı, uzun-dönem kimyasal davranışlar.

- termo-mekanik özellikler (sıkışma, genleşme, radyolojik malzeme verileri, uzun-dönem mukavemet).

- boşluk hacmi, permeabilite, zaman ve ısı.

6.2. Kaya mekaniği sistemlerinin araştırılması

A) Yakın alandaki yerli kaya

- Yanal genişlemesi, yoğunluk ve depolamanın derinliği

- Kayanın mühendislik jeolojisi özellikleri ve yerindeki bileşimi, homojen zonların belirlenmesi, eklem yapısı, permeabilitesi.

- Isı ve zamana bağlı deformasyon davranışları (elastisite, akma davranışları, plastisite)

- Isı ve zamana bağlı yenilme davranışları (kesme mukavemeti, çekme mukavemeti, akma şartları, taşıma kapasitesi limitleri) ve

- Yerinde gerilme durumu.

Derin sismik, karot numune, bozulmamış karot numune ve jeofizik kuyu ölçümleri (ısı ölçümlerini de içerir) ile başlayan çalışma yerinde gerilme durumunun belirlenmesi, mühendislik jeolojisi raporunun hazırlanması, jeomekanik laboratuvarında kaya mekaniği raporunun hazırlanması ile sonuçlanır.

B) İnşaat safhasındaki boşluklarla yerli kayanın birbirine etkisi.

- Boşluğun şekli (durumu ve genişliği), sütunların durumu (şekli ve genişliği)

- Kazı yöntemi (örneğin, sulu veya susuz sondaj, kesme) inşaat şartları, desteklemeler.

- Boşlukların olası yenilme tipi ve boyutlandırılması.

C) Uygulama safhası esnasında atıkların/dolgu malzemenin/yerli kayanın birbirine etkisi.

- Jeokimyasal işlemler

- Dolgu yöntemi (malzeme, taşınma yöntemi, sıkışma ölçümleri)

Dolgu malzemesinde;

- Zaman, basınç ve ısıya bağımlı sıkışma ve yük taşıma etkileri

- Emniyet kriteri ve kaya mekaniği sisteminin bütünü

Atık/kayanın birbirine olan etkisinin araştırılması, bütün sistemin detaylı kaya mekaniği modelinin planlanması, depolama teknolojisi ve geometrisine göre optimum uygulama, emniyet kavramının ve kriterinin belirlenmesi ve büro değerlendirmesi.

6.3. Jeolojik sistemin çalışılması

- Genel jeolojik, hidrojeolojik ve tektonik ilişkiler (detaylı stratifikasyon, petrografi, faylanmalar, kıvrılmalar, gaz ve tuzlu su oluşumu)

- Uzun-dönem jeolojik işlemler (tuzlu su hareketi, deprem gerilmeleri, neotektonik hareketler)

- Uzun dönem jeokimyasal işlemler (sızma, dinano-termal metamorfizma, absorpsiyon özellikleri)

Araştırmalar mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği kabullerine bağlı olarak ilerler.

7. Tavsiyeler

Sonuçta, aşağıdaki tavsiyeler verilmiştir.

1. İyi kontrol edilen atık depolama tesislerinde oluşan deneyimlerin ve verilerin toplanması.

2. Yeraltı depolanması ile ilgili daha önceki çalışmalar hakkında bilgi toplanması.

3. Kil tabakası gibi dolgu malzemelerini içeren doğal bariyerlerin uzun-dönem davranışları hakkında bilimsel araştırmalar teşvik etmek.

4. Yeraltı suyu sisteminin davranışları ile ilgili bilimsel araştırmaları cesaretlendirmek (özellikle; yeraltı suyu akış yönü, fisürlü kayaların hidrolik özellikleri ve yeraltı suyunun kalitesi)

5. Ocaklarda atık depolanması için tavsiyelerin sıralanması.

A) Emniyet kavramı

B) Yer seçimi kriteri

C) Depolama işlemi kriteri

D) Yer özellikleri için yerbilimleri verilerinin gereksinimi