

Yakın Yüze Bertaraf Tesislerinin Maliyetlendirilmesi, Türkiye için Senaryo Analizi

Semih Sadi KILIÇ^{1,2} , Halil İbrahim VARIYENLİ^{3*} 

¹Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Nükleer Enerji ve Uluslararası Projeler Genel Müdürlüğü, Ankara Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 28/11/2023

Revision: 12/12/2023

Accepted: 21/12/2023

Keywords

Yakın yüze bertaraf tesisi
Radyoaktif atık
Çok düşük seviyeli atık
Kısa yarı ömürlü düşük
ve orta seviyeli atık
Tesis maliyetlendirme
Ölçeklendirme

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 28/11/2023

Düzeltilme: 12/12/2023

Kabul: 21/12/2023

Anahtar Kelimeler

Near-surface disposal
facility Radioactive waste
Very low-level waste
Short-lived low and
intermediate-level waste
Facility costing
Scaling

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Çalışmada, yakın yüze bertaraf tesislerinin maliyetlendirilmesine dair formülizasyon, ekonomik analiz yöntemleri, maaş faktörü, ölçeklendirme, belirsizlik ilkeleri ve teknik yaklaşımlarla dünyadaki tesisler örneğinde oluşturulmuş ve Türkiye için senaryolar ortaya koyulmuştur. / In the study, the formulation for the cost estimation of near-surface disposal facilities was developed based on the examples of facilities on the world, using economic analysis methods, salary factor, scaling, contingency principles and technical approaches. Scenarios were also developed for Türkiye.

	2 Nükleer Güç Santrali (10 GWe)			3 Nükleer Güç Santrali (15 GWe)		
	100 m ³ ÇDS/ 100 m ³ DOS	150 m ³ ÇDS/ 150 m ³ DOS	200 m ³ ÇDS/ 200 m ³ DOS	100 m ³ ÇDS/ 100 m ³ DOS	150 m ³ ÇDS/ 150 m ³ DOS	200 m ³ ÇDS/ 200 m ³ DOS
Toplam Hacim (⁰⁰⁰ m ³)	Hendek: 84 Tonoz: 104	Hendek: 111 Tonoz: 131	Hendek: 138 Tonoz: 158	Hendek: 124 Tonoz: 154	Hendek: 164 Tonoz: 194	Hendek: 205 Tonoz: 235
Lisans/ Plan	74	80	85	84	90	96
İnşaat	351	413	471	457	539	616
İşletme	767	1074	1269	1215	1499	1774
Kapatma	276	312	344	334	378	417
Toplam	1468	1879	2169	2089	2506	2903

Şekil A: Yakın Yüze Bertaraf Tesisi Gecelik Maliyeti İçin Senaryo Analizi (M\$) / Figure A: Scenario Analysis for Near-Surface Disposal Facility Overnight Cost

Önemli noktalar (Highlights)

- Radyoaktif atık yönetiminde ülkeler için maliyetler oldukça önemlidir. / Radioactive waste management costs are very important for countries.
- Yakın yüze bertaraf tesislerinin radyoaktif atık yönetiminde oldukça önemli bir yeri vardır. / Near-surface disposal facilities play a significant role in radioactive waste management.
- Toplam radyoaktif atık hacmi, atığın türü, maaş faktörü, ölçeklendirme, belirsizlik ilkeleri ve teknik yaklaşımlar maliyetleri etkileyen başlıca hususlardır. / The total volume of radioactive waste, the type of waste, the salary factor, scaling, contingency principles, and technical approaches are the main factors affecting costs

Amaç (Aim): Çalışmanın amacı, radyoaktif atık yönetiminin önemli tesislerinden birisi olan yakın yüze bertaraf tesisinin maliyetinin yaklaşık değerini gösteren katsayılar ve ölçeklendirmeyi bulabilmektir. / The purpose of the study is to find the coefficients and scaling that show the approximate value of the cost of the near-surface disposal facility, which is one of the important facilities in radioactive waste management.

Özgünlük (Originality): Bu çalışma, tek bir tesis özelinde olmayan ve yakın yüze bertaraf tesislerini bütün dünyada istenilen kapasitede inşa edilmek için kullanılacak ve Türkiye için senaryo analizi sunan ilk çalışmadır. / This study is the first study that is not specific to a special facility and can be used to build near-surface disposal facilities of any desired capacity in the world and provides a scenario analysis for Türkiye.

Bulgular (Results): Çalışma, senaryo analizleri ışığında ülkemiz için yakın yüze bertaraf tesisine dair oluşabilecek maliyetleri ortaya koymaktadır. / The study reveals the potential costs of a near-surface disposal facility for our country in the light of scenario analyses.

Sonuç (Conclusion): Ölçeklendirme faktörü lisans ve planlama için 0,3, inşaat için 0,68, işletme ve uzun süreli izleme için 0,85 ve kapatma için ise 0,49 olarak bulunmuştur. Maliyetlerin ülkemizde planlanan 15 GWe kurulu güç için 3 milyar dolara ulaşabileceği sonucu elde edilmiştir. / The scaling factor was found to be 0.3 for licensing and planning, 0.68 for construction, 0.85 for operation and long-term monitoring, and 0.49 for closure. it was found that these costs could reach 3 billion dollars for the 15 GWe installed capacity planned in our country.



Yakın Yüzey Bertaraf Tesislerinin Maliyetlendirilmesi, Türkiye için Senaryo Analizi

Semih Sadi KILIÇ^{1,2} , Halil İbrahim VARIYENLİ^{3*} 

¹Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Nükleer Enerji ve Uluslararası Projeler Genel Müdürlüğü, Ankara Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 28/11/2023
Revision: 12/12/2023
Accepted: 21/12/2023

Keywords

Yakın yüzey bertaraf tesisi
Radyoaktif atık
Çok düşük seviyeli atık
Kısa yarı ömürlü düşük
ve orta seviyeli atık
Tesis maliyetlendirme
Ölçeklendirme

Öz

Radyoaktif atık yönetimi nükleer alanda teknoloji sahibi ülkeleri yakından ilgilendirmektedir. Özellikle nükleer güç santraline sahip olan ülkeler depolamanın da ötesinde bertarafa ihtiyaç duymaktadır. Çok düşük seviyeli ve kısa ömürlü düşük ve orta seviyeli radyoaktif atıklar, radyoaktif atık yönetiminin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu çalışmada, çok düşük seviyeli ve kısa ömürlü düşük ve orta seviyeli radyoaktif atıklar için bertaraf tesisi maliyetlerinin bulunabilmesi ve Türkiye için uygun senaryo analizlerinin oluşturulması hedeflenmiştir. Maliyetlerin tespiti öncesinde ilk olarak bertaraf tesislerinin türleri, örnekleri ve teknik özellikleri incelenerek tesise dair teknik yaklaşım geliştirilmiştir. Sonrasında tesis kapasitesi, yıllık radyoaktif atık miktarı ve işletme süresinin belirlenebilmesi adına nükleer güç santralleri için işletme ve işletmeden çıkarma döneminde, diğer tesis ve uygulamalarda faaliyetlerin gerçekleştirildiği dönemlerde ortaya çıkan radyoaktif atık miktarları hacimsel bazda ayrı ayrı belirlenmiştir. Nihayetinde ekonomik analiz yöntemleri, maaş faktörü, ölçeklendirme ve belirsizlik yaklaşımları kullanılarak hendek ve tonoz yapılar için ayrı ayrı olmak üzere maliyet formülleri oluşturulmuştur. Bu formüller yakın yüzey bertaraf tesislerinde yüksek seviye maliyet tahmini yapacak ülkeler için ön çalışma veya çalışmalarını doğrulayıcı olarak kullanılabilir. Ülkemizde 8 veya 12 büyük ölçekli nükleer reaktörün kurulması yani yaklaşık kurulu gücün 10 GWe ve 15 GWe olması durumları için senaryo analizleri yapılarak önerilerde bulunulmuş ve genel değerlendirme yapılmıştır.

Yakın Yüzey Bertaraf Tesislerinin Maliyetlendirilmesi, Türkiye için Senaryo Analizi

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/11/2023
Düzeltilme: 12/12/2023
Kabul: 21/12/2023

Anahtar Kelimeler

Near-surface disposal
facility Radioactive waste
Very low-level waste
Short-lived low and
intermediate-level waste
Facility costing
Scaling

Abstract

The management of radioactive waste is of significant concern to countries with nuclear capabilities. Particularly, countries with nuclear power plants need more than just storage; they require proper disposal methods. Low-level and short-lived low and intermediate-level radioactive wastes constitute a substantial portion of radioactive waste management. This study aims to determine the costs of disposal facilities for very low-level, short-lived low, and intermediate-level radioactive wastes and to create suitable scenario analyses for Türkiye. Prior to cost determination, an initial technical approach for the facility was developed by examining the types, examples and technical specifications of disposal facilities. Subsequently, the capacities of the facilities, annual amounts of radioactive waste, and operational periods were determined separately for nuclear power plants during operation and decommissioning periods, as well as for other facilities and practices involving radioactive waste. Ultimately, cost formulas were developed separately for trench and vault structures using economic analysis methods, salary factor, scaling, and contingency approaches. These formulas can be used as a preliminary study or validation for countries that will make high-level cost estimates in near-surface disposal facilities. Scenario analyses were conducted for the installation of 8 or 12 large-scale nuclear reactors in the country, corresponding to approximately 10 GWe and 15 GWe of installed capacity, respectively. Recommendations were made based on these scenarios, and a comprehensive assessment was conducted.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Radyoaktif atıklar, radyoaktivite ve radyoaktivitenin ürettiği ısı seviyelerine, içerdikleri radyonüklitlerin yarı ömürlerine göre sınıflandırılmaktadır. Radyoaktif atıkların sınıflandırılmasında ülkelerin farklı yaklaşımları olabilmektedir. Birçok ülke tarafından bu konuda Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (UAEA) güvenlik standartları ile belirlenen sınıflandırma esas alınmaktadır. Ulusal radyoaktif atık sınıflandırması ile UAEA radyoaktif atık sınıflandırması arasında bir paralellik bulunmakla birlikte, ulusal sınıflandırmada Düşük Seviyeli ve Orta Seviyeli (DOS) radyoaktif atıkların tek sınıf olarak ele alınması yönüyle bir farklılık bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında bilinmesi gereken Çok Düşük Seviyeli (ÇDS) radyoaktif atık, muafiyet sınırının üzerinde radyoaktivite içeren, çok kısa ömürlü radyoaktif atık sınıfına girmeyen ve serbestleştirme sınırlarının da yaklaşık 100 katının altında aktivite konsantrasyonu içeren radyoaktif atıklar olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte DOS radyoaktif atık ise, radyoaktivite seviyeleri ÇDS radyoaktif atıkların aktivite konsantrasyonundan fazla olan ancak yüksek seviyeli radyoaktif atık sınıfına girmeyen atıklar olarak tanımlanmaktadır. Atığın insanlar ve çevre için radyolojik bir tehdit oluşturup oluşturmayacağı atıktaki radyonüklidlerin yarılanma ömrüne de bağlıdır. Radyonüklidler 30 yıl veya daha az yarı ömürlü ise kısa ömürlü olarak belirlenir. Radyonüklidler daha uzun yarılanma ömürleri ile özellikle yüksek seviyeli radyoaktif atıklarda olmak üzere orta seviyeli radyoaktif atıklarda da bir dereceye kadar bulunurlar [1,2].

Radyoaktif atıkların büyük çoğunluğu Nükleer Güç Santrali (NGS) enerji üretimi sonucunda ortaya çıksa da araştırma, tıp ve endüstri alanlarında da yapılan uygulamalarda da radyoaktif atıklar meydana gelmektedir. Bu radyoaktif atıkların doğadan izole edilmesi ve güvenli bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Radyoaktif atık yönetiminin türü ve bunların somut gereklilikleri farklı radyoaktif atıkların risk potansiyellerine göre belirlenir [3].

Radyoaktif atığın geri alınma niyeti olmadan uygun bir tesise yerleştirilmesi işlemine bertaraf denilmektedir. Genelde uygun konteynerlere yerleştirilmiş katı formdaki radyoaktif atıklara uygulanır. Bunlar radyoaktif maddelerin çevreye göç etme riskini en aza indirmek amacıyla ilk önce uygunlaştırma işlemiyle güvenli taşıma, depolama ve bertaraf için kararlı bir forma dönüştürülür [2].

Atıkların özelliklerine ve güvenlik gerekliliklerine göre farklı radyoaktif atık yönetimi teknikleri kullanılır. ÇDS radyoaktif atıklar genellikle yüzeyde,

kısa yarı ömürlü DOS radyoaktif atıklar ise genellikle yakın yüzeyde veya orta derinlikte nihai bertaraf edilir. İzleme ve bakım, nihai tesis kapatılana kadar sürekli devam eder. Normalde, radyoaktif atıkların bertarafı için üç farklı derinlik seviyesi uygun kabul edilir. 30 metreye kadar olan tesisler Yakın Yüzey Bertaraf Tesisi (YYBT) olarak kabul edilir. Orta derinlikteki tesisler yüzeyin yaklaşık 30 ila 100 m altındaki menzildedirler. Derin jeolojik tesisler ise genellikle yaklaşık 500 m'den daha büyük derinliklerde kabul edilir. Artan aktivite seviyeleri ve daha uzun yarı ömürler, daha fazla önlem alınmasını gerektirir. Bununla birlikte, derinlik radyoaktif atık bertarafında önemli hususlardan yalnızca bir tanesidir. Kaya oluşumu ve özellikleri, tesisin mühendislik özellikleri, düzenleyici kısıtlamalar, ulusal politika vb. eşit veya daha çok öneme sahip diğer faktörlerdir. ÇDS radyoaktif atıklar ve kısa ömürlü DOS radyoaktif atıkların bertarafı için kullanılan YYBT'nin maliyetlendirilmesi bu çalışma kapsamındadır [3,4].

Literatürde, YYBT'lerin maliyetlendirilmesi, ülkeler için maliyet planlarının yapılması ve ölçeklendirmelerine dair sınırlı sayıda kaynak yer almaktadır. Uluslararası kuruluş olan UAEA, bu çalışmanın teknik gereksinimleri üzerine 2002, 2003, 2004, 2013, 2017, 2020 yıllarında raporlar ve teknik dokümanlar hazırlamıştır [2,5,6,7,8,9]. Bunun yanı sıra yine uluslararası bir kuruluş olan OECD/NEA 2013'de nükleer yakıt çevrimi tesislerinin ekonomisi başlıklı raporunu ülkelerin deneyimlediği maliyetleri de içerecek şekilde yayınlamıştır [10].

Avrupa komisyonu, 2020 yılında radyoaktif atık ve kullanılmış yakıtı dair avrupa ülkelerinde oluşan tesis maliyetlerine yer verecek şekilde bir rapor hazırlamıştır [11]. Bu rapor, gelecek nesillere aşırı yük getirmeden kullanılmış yakıt ve radyoaktif atıkların sorumlu ve güvenli yönetimi için hazırlanmış Avrupa Birliği Konseyi Direktifi 2011/70/Euratom çerçevesinde hazırlanmıştır. Bunun dışında EURAD kısaltması ile anılan 2019-2024 yılları için planlanan projenin de raporu 2022 yılında yayınlanmıştır [12].

Micheal I. Ojovan ve Hans J. Steinmetz tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada nükleer atıklara ilişkin bertaraf yaklaşımları üzerinde durulmuştur [13]. 2020 yılında, Fan Xia, Jiyun Zhao ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, Çin'deki DOS radyoaktif atık bertaraf stratejisini etkilemek için aktivite temelli yaşam döngüsü maliyet hesaplama (AB-LCC) yaklaşımına dayalı bir temel maliyet tahmin modeli önerilmiştir. AB-LCC modeli, DOS radyoaktif atık bertarafının dinamik maliyet tahminini sağladığı belirtilerek uygulamanın bölge ve zaman tarafından kısıtlanmadığı ifade edilmiştir [14].

2011 yılında Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı tarafından 18 ülkede Düşük Seviyeli (DÜS) radyoaktif atıkların bertarafının nasıl yapıldığına dair

teknik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Her bir ülke için nükleer kapasite, düzenleme ve yasalar, radyoaktif atık yönetimi uygulamaları ve tesisleri, şuan ki ve gelecekte radyoaktif atıklara dair durum incelenmiştir [15]. Yine Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı tarafından 1997 yılında kullanılmış yakıt ve radyoaktif atık envanterine dair çalışma yapılmıştır [16]. 2013 yılında, Haiying Chen, Chunming Zhang ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada ÇDS radyoaktif atık ve bertarafı hakkındaki yerel ve yabancı tanımlar belirtilerek ÇDS radyoaktif atıkların yüzeye yakın bertaraf alanları için yerleşim ilkeleri tartışılmıştır. ÇDS radyoaktif atık bertarafının geliştirilmesi yönünde önerilerde bulunulmuş ve bunun da Çin'de çalışmaların geliştirilmesini teşvik edeceği belirtilmiştir [17].

2019 yılında Rebecca Harms, Wolfgang Neumann ve diğerleri tarafından Dünya Nükleer Atık Raporu hazırlanmıştır. Bu rapor radyoaktif atıkların kaynakları ve sınıflandırılması, atıkların nitelikleri, insan ve çevre için riskler, radyoaktif atık yönetim konseptleri, maliyetler ve finansman ile ülke örnekleri başlıklarını içerecek şekilde oluşturulmuştur [18].

Bu çalışmaların yanı sıra IAEA tarafından 2007 yılında işletmeden çıkarma atıklarının nasıl bertaraf edileceğine dair bir teknik doküman hazırlanmıştır [19]. Bununla beraber IAEA tarafından tıpkı Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı gibi bütün ülkeler için bir radyoaktif atık ve kullanılmış yakıt envanteri hazırlanmıştır [20]. Yine bu kapsamda OECD/NEA tarafından ülkelerin düşük seviyeli radyoaktif atıklarının envanteri için çalışma gerçekleştirilmiştir [21]. Bu çalışmaların yapılmasının ülkeler için gerekli olması sebebiyle ülkemiz içinde bu çalışmalara benzer şekilde hazırlanan ülkemiz envanterini de içeren Ulusal Radyoaktif Atık Planı 2020 yılında yayınlanmıştır [1].

Radyoaktif atık yönetimi ve tesislere dair kaynaklarla beraber maliyetleri oldukça etkileyen belirsizliklerin ve ölçeklendirmenin nasıl yapılacağına dair yayınlarda hazırlanmıştır. Bunlardan belirsizlik ile ilgili olanları, 1999 yılında Edward ve Parsons tarafından yayınlanan radyoaktif atık projelerinde belirsizlik ile 2019 yılında Pedram Danesh-Mand tarafından yayınlanan ve enerji projelerinin tamamında kullanılabilen belirsizliklere dair kılavuzdur [22,23]. Ayrıca yukarıda belirtildiği üzere ölçeklendirmeye dair de 1985 yılında George Woite tarafından nükleer güç santrallerinde yatırım maliyetleri çalışması ile 1986 yılında M.A. Tribe ve R.L.W. Alpine tarafından ekonomik ölçeklendirme ve 0,6 kuralının anlatıldığı çalışma yayınlanmıştır [24,25].

Literatürde yer alan çalışmalar kapsamlı olarak

incelendiğinde nükleer alana yeni katılımcı olan ülkelerin radyoaktif atık yönetimi maliyetlerinin ne olacağına dair belirsizlikleri çözümlendirmeye çalıştığı ve bununla beraber nükleer alanda 50 yıldan fazla tecrübeye sahip olan ülkelerinde ek tesislere ihtiyaç duyması sebebiyle maliyet planları hazırlandığı görülmektedir. Bu çalışma kapsamında literatürden farklı olarak tek bir tesis maliyetine odaklanmak dışında elde edilebilen verilerin ölçeklendirme ilkeleri çerçevesinde en gerçekçi şekilde günümüze uyarlanarak ülkelere bir örnek oluşturulması hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda ülkemizin nükleer kurulu güç hedeflerinin bilinen ilk aşaması kullanılarak ülkemize bir yaklaşım sunulmuş diğer ülkeler içinse maliyetlendirmede yüksek aşama maliyetlendirme olarak bilinen ilk örnek hedef maliyeti bulmalarına yardımcı olacak maliyetlendirme formleri oluşturulmuştur.

2.MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Yakın Yüzey Bertaraf Tesisleri (Near-Surface Disposal Facilities)

Radyoaktif atık yönetiminin uygulama yöntemleri ve ihtiyaçlar farklı radyoaktif atıkların risk potansiyellerine göre belirlenir. Bu potansiyel çıkan iyonlaştırıcı radyasyonun doğası ve yoğunluğundan kaynaklanır [3]. Radyoaktif atıkların belirli özelliklerine ve bunun sonucunda ortaya çıkan güvenlik gerekliliklerine bağlı olarak, farklı atık kategorileri, farklı atık yönetimi yollarına atanır. Çalışma kapsamında olan ÇDS radyoaktif atıklar yüzeyde, kısa ömürlü DOS radyoaktif atık pratikte, yakın yüzeyde veya orta derinlikte nihai bertaraf edildiği belirtilmiştir.

30 metreye kadar olan tesisler yakın yüzey bertaraf tesisi olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada ÇDS radyoaktif atıkların hendek, kısa ömürlü DOS radyoaktif atıkların ise tonoz yapılarında bertaraf edileceği düşünülmüştür [3,4]. YYBT'ler basit, tasarlanmış ve kuyu/saft tipi bertaraf tesisleri olarak sınıflandırılmakta olup başlıklar halinde sunulmuştur.

2.1.1. Basit Yakın Yüzey Bertaraf Tesisi (Simple Near-Surface Disposal Facility)

ÇDS radyoaktif atıkların bertarafı için onlarca yıldır basit hendekler kullanılmıştır. Basit hendek yaklaşımı genellikle yalnızca risk teşkil etmeyecek olan radyoaktif atıklar ve kullanılmayan kaynaklar için uygun kabul edilir. Genellikle bu radyoaktif atıklar 100 ila 300 yıl olarak kabul edilen izleme süresi içinde riskli radyoaktivite seviyesinin altına indiğinden basit YYBT'lerde bertaraf edilmesi uygun görülmektedir [3]. Basit yakın yüzey bertaraf tesislerinden birisi olan Drigg Şekil 1'de gösterilmiştir [15].



Şekil 1. Basit yakın yüzey bertaraf tesisi (Drigg) [15] (Simple near-surface disposal facility)

2.1.2. Tasarlanmış Yakın Yüzey Bertaraf Tesisi (Engineered Near-Surface Disposal Facility)

Tasarlanmış YYBT'ler, binlerce metreküp kapasiteli oldukça büyük ölçekli olarak planlanmakta basit YYBT'lere benzer ve gelişmiş radyoaktif atık barındırma amaçlarına sahiptirler. Tasarım, radyoaktif atık yerleştirme kolaylığı sağlamayı, sürecin kolay yönetimini ve kapatmada artan verimliliği

amaçlamaktadır. YYBT'nde radyoaktif atığın aktivitesinin bozunma gerçekleşene kadar bekletilmesi, muhtemel doz değerlerinin kabul edilebilir olup olmadığı performans değerlendirmesinde göz önüne bulundurulmalıdır [5,6]. Tasarlanmış yakın yüzey bertaraf tesislerinden birisi olan El-cabril Şekil-2'de gösterilmiştir [26].



Şekil 2. Tasarlanmış yakın yüzey bertaraf tesisi (El-cabril) [26] (Engineered near-surface disposal facility)

2.1.3. Yakın Yüzey Kuyu veya Şaft Tipi Bertaraf Tesisleri (Near-surface Borehole or Shaft Facilities)

Tasarlanmış tesislerin alternatifi veya tamamlayıcısı olan bu bertaraf seçenekleri ekonomik olmakla birlikte insanların izinsiz girişini daha kolay önleme imkânı sağlamaktadır. İstenildiği takdirde ilave hem radyasyondan hem de insan etkilerinden koruma sağlamak için tesislerin tasarımına ve inşasına mühendislik bariyerleri eklenebilmektedir. Tasarlanmış YYBT'lerden daha gelişmiş özelliklere sahip bu tesislerde, kuyu deliğine büyük bir beton tıkacı veya kapak yerleştirilmesiyle izinsiz girme ihtimalinin azaltılması amaçlanmıştır. Kalınlığı 1 metreyi bulan betonarme kalıplar, istenmeyen girişe karşı caydırıcı olarak düşünülebilmektedir. Böylelikle izleme ve kurumsal kontroller öngörülen 300 yıllık dönemde daha kolay gerçekleştirilebilecektir. Bununla birlikte, yüksek aktiviteli veya daha uzun ömürlü radyoaktif atıkların bertaraf edilmesine olanak sağlamamaktadırlar [5,6].

2.2. Ekonomik Analiz Yöntemleri (Economic Analysis Methods)

Ekonomik analiz gerçekleştirilirken bazı formül, ilke ve yöntemler kullanılmaktadır. YYBT'lerin maliyetlendirilmesi ve ölçeklenmesinde nükleer enerjinin teknik kapsamı ile finansal ilke ve yöntemler birlikte uygulanmalıdır. Finansal ve ekonomik değerlendirmelerin yapılabilmesi için yatırım, bütçe, zaman gibi değerler ile nakit akışı, faiz, enflasyon, iskonto oranı, paranın zaman değeri, bugünkü değer faktörü, net bugünkü değer, fayda masraf oranı, iç kârlılık oranı gibi temel formüller ve ilkeler kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılacak temel finansal ifadeler aşağıda başlıklar halinde sunulmuştur.

2.2.1. Para-zaman İlişkisi (Time Value of Money)

Para ve zaman kavramı; maliyet, nakit akışı, yatırım, kaldıraç oranları vb. her türlü ekonomik değer belirlenmesinde kullanılan finansal yaklaşımların en temel ilkeleridir. Elde edilecek veya ödemesi gerçekleştirilecek herhangi bir tutarın zamanlaması, hesaplamaların ve sonuçların en doğru şekilde bulunması için oldukça önemlidir. Dolayısı ile paranın bir zaman değeri vardır. Ekonomik hayatta paranın bir kazanç gücü olduğu kabul edilir ve her dönem bunun artacağı düşünülür. Bugün elde edilecek 100 birim gelir, bir ay sonra elde edilecek 100 birim gelirden daha değerlidir [27]. Paranın zaman değerinin hesaplanmasında kullanılan temel bazı ögeler başlıklar halinde verilmiştir.

2.2.2. İskonto Oranı (Discount rate)

Bu oran, yatırım, birikim vb. süreçler için beklenen getiri oranını ifade etmektedir. Kısaca, geleceğe dönük beklentiyi göstermektedir. Dolayısı ile iskonto oranı yatırımcı veya birikimi yapan tarafından öngörülmesi gereken bir değerdir. Bu oran ile gelecekte meydana gelmesi düşünülen nakit akışları bugünkü değere indirgenmektedir.

Geleceğe dönük enflasyon öngörüsü, nakit akışının yapısı ve dağılımı, yatırım veya birikim tutarının süresi, türü ve başlangıç maliyeti vb. unsurlar iskonto oranının belirlenmesinde oldukça önemlidir [27,28,29].

2.2.3. Bugünkü Değer Yöntemi (Present Value Method)

Bugünkü değer yönteminde, yatırım veya birikime her yıl sağlanacak nakit girişleri, belirli bir iskonto oranı üzerinden indirgenerek toplanır. Yatırım veya birikim için yapılacak harcamaların da belirli bir iskonto oranı üzerinden bugünkü değeri bulunur. Yatırım veya birikimin gelirlerinin bugünkü değerlerinden harcamaların bugünkü değeri çıkarılır. Aradaki farkın pozitif olması hedeflenmektedir [30,31]. Nakit girişlerinin belirlenen iskonto oranı ile başlangıç dönemine indirgenmesi için kullanılan eşitlik aşağıda yer almaktadır. Burada r iskonto oranını ifade etmektedir.

$$P = F / (1 + r)^n \quad (3.1)$$

2.2.4. Gelecek Değer Yöntemi (Future Value Method)

Gelecekteki değer metodu net bugünkü değer metodunun bir varyasyonudur. Bir projeye ait nakit girişlerinin gelecekteki değerlerinden, nakit çıkışlarının gelecekteki değerinin çıkarılmasıyla bulunur. Proje veya yatırımda kârlılık bekleniyorsa bu fark belirlenen kâra göre değerlendirilir.

Bu yöntemde her bir akış teker teker geleceğe taşınabileceği gibi belirli akışların birbirleri ile toplanarak veya çıkarılarak topluca geleceğe taşınması da mümkündür. Doğru sonucun elde edilebilmesi için sürecin nakit akışı, ne kadar bir zaman dilimi için planlamanın yapıldığı, o yıla ait faiz oranları ve ortalama faiz oranları, enflasyon değerleri gibi kavramlar dikkate alınarak yöntemin farklı şekillerde uygulanması mümkün olabilmektedir. En basit ifadesiyle eşitlik aşağıda yer almaktadır [30,31].

$$F = P \cdot (1 + r)^n \quad (3.2)$$

2.3. Yakın Yüzey Bertaraf Tesislerine Maliyet Yaklaşımı (Cost Approach to Near-Surface Disposal Facilities)

2.3.1. Nükleer Güç Santrali İşletme Dönemi Radyoaktif Atık (Radioactive Waste of Operation Period for Nuclear Power Plant)

Bu çalışmada senaryoların doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için teknik veriler doğru bir şekilde ortaya koyulmalıdır. Maliyetlendirme gerçekleştirilirken teknik verilerin oldukça önemli olduğu bilinmelidir. Teknik verilerde tutarsızlık olması, yeterli miktarda araştırma yapılmadan tek kaynaktan verilerin toplanması, maliyetlerin tutarlılığını olumsuz yönde etkileyecektir. YYBT'ler için ihtiyaç duyulan ÇDS ve kısa ömürlü DOS radyoaktif atık için toplam hacim, yıllık miktar, aktivite değerleri, sınıflandırma, zamanlama, konumlandırma ve belirsizlikler etkin bir şekilde belirlenmelidir. Radyoaktif atık yönetimi konusunun ciddi belirsizlikler içerdiği unutulmamalıdır.

Yapılan literatür araştırmasında, üretilen elektrik değerleri kullanılarak yaklaşık radyoaktif atık miktarlarının hesaplandığı bilinmektedir. Bu çalışmalara göre, hafif sulu basınçlı su reaktörleri için, üretilen GWe başına yıllık yaklaşık 100 m³ ila 300 m³ hacminde DOS radyoaktif atık ortaya çıktığı belirtilmektedir [8,16,32,33,34]. VVER reaktörü özelinde yıllık yaklaşık 600 m³ ÇDS ve DOS radyoaktif atık çıktığı sonucuna ulaşılmıştır. Yeni tip VVER reaktörlerinde ise tasarım aşamasında ve işletim sırasında uygulanan tedbirler ile ortaya çıkan radyoaktif atık miktarının oldukça azaltıldığı belirtilmiştir [35,20].

Akkuyu NGS ÇED Raporu'nda işleme, süper sıkıştırma ve yakma sonrası katı formdaki DOS radyoaktif atıkların yaklaşık 170 m³, geçici depolama tesisine gönderilecek olan yıllık ÇDS radyoaktif atığın 255 m³ olacağı belirtilmiştir [36]. Değerlerin farklılıkları ülkelerin radyoaktif atık yönetimine farklı yaklaşımlarından veya tutucu bir anlayış benimsemelerinden kaynaklığı olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, literatürden elde edilen verilerin üzerinden zaman geçtiği ve bu süre içerisinde uygulanan yöntemlerle NGS'lerinde meydana gelen ÇDS ve DOS radyoaktif atık miktarının ciddi oranda azaltıldığı göz önünde bulundurulmuştur.

Eldeki veriler ile son yıllarda uygulanan işleme tekniklerinin tamamı uygulamaya dahil edildiğinde korumacı bir yaklaşım ile yıllık üretilen GWe başına minimum 100 m³ ÇDS, 100 m³ DOS radyoaktif atık çıkabileceği kabul edilmiştir.

2.3.2. Nükleer Güç Santrali İşletmeden Çıkarma Dönemi Radyoaktif Atık (Radioactive Waste of Decommissioning Period for Nuclear Power Plant)

Bir NGS'nin işletmeden çıkarılması, işletmeye alınmasından teorik olarak işletme ömrü olan 60 yıldan sonra başlayacak bir süreç olsa da işletmeye almadan önce işletmeden çıkarma stratejisine sahip olunması ve bertaraf edilmesi gereken atık türleri ve hacimleri üzerine bilgi sahibi olunması önem arz etmektedir. Bunun önemli sebeplerinden birisi öngörülemez durumlarda NGS'nin erken işletmeden çıkarılması durumudur.

İşletmeden çıkarma politikası olarak hemen sökülmesi benimsendiği ve işlemlerin dünyadaki uygulamalara göre 15-25 yıl içinde tamamlanması öngörülmektedir. Reaktörlerin sökülmesi sonucu oluşacak aktive olmuş çelik, beton, kirli ferritik çelik, kirli kaplama, inşaat malzemeleri, kirli teknolojik atıklar ve toprak gibi katı malzemelerden oluşmaktadır. Bu atıkların büyük bir kısmı ÇDS, DOS radyoaktif atık sınıfında olup işletme radyoaktif atıkları gibi bertaraf edilebilmektedir. 1 GWe güce sahip tipik bir basınçlı veya kaynar su reaktörünün işletmeden çıkarma radyoaktif atıklarının hacminin yaklaşık 5000-10000 m³ arasında olduğu belirtilmektedir [8].

İsveç'te bulunan 12 NGS için, işletmeden çıkarmadan dolayı oluşan radyoaktif atığın toplam hacminin 150.000 m³ olarak tahmin edilmektedir. Bu radyoaktif atıkların büyük çoğunluğunu paketlenmiş DÜS radyoaktif atıklar oluşturmaktadır. Buhar üreteçleri ve reaktör basınç kapları gibi bazı büyük bileşenlerin paketlenmesi yapılmadan ele alındığı tahmin edilmektedir [19].

Ulusal Radyoaktif Atık Yönetimi Planı'nda, 1 GWe güce sahip tipik basınçlı su reaktöründen işletmeden çıkarma aşamasında ise 3000 m³ ÇDS ve 2100 m³ DOS radyoaktif atığın ortaya çıkacağı tahmin edildiği belirtilmiştir [1]. Sinop'ta kurulması planlanan NGS'nin işletmeden çıkarılması sonrası çıkması beklenen radyoaktif atığa referans olarak alınan durum Sinop NGS Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Raporu'nda verilmiştir. Rapora göre 1 GWe güce sahip basınçlı su reaktörünün işletmeden çıkarılması sonucu korumacı yaklaşım ile paketlenmiş olarak yaklaşık 700 m³ ÇDS, 3000 m³ kısa ömürlü DOS radyoaktif atık ortaya çıkmaktadır [37].

Eldeki veriler ışığında son yıllarda uygulanan işleme tekniklerinin tamamı uygulamaya dahil edildiğinde korumacı bir yaklaşım ile GWe başına 2500 m³ ÇDS, 4500 m³ DOS radyoaktif atık çıkabileceği kabul edilmiştir. Bu veriler Uluslararası Atom Enerji Ajansı'nın beklentisi olan 5000-10000 m³ aralığı ile de uyumludur [8].

2.3.3. Diğer Tesis ve Faaliyetler ile Oluşan Radyoaktif Atık (Radioactive Waste Generated by Other Facilities and Activities)

Nükleer teknoloji sadece elektrik üretimi amacı ile kullanılmamaktadır. Bununla birlikte sağlık, tarım, endüstri, araştırma ve geliştirme alanlarında da nükleer teknolojiden faydalanılmaktadır. Bununla beraber NGS dışında, nükleer alanda faaliyet gösteren madenler, yakıt üretimi için dönüştürme, zenginleştirme, yakıt imalat tesisleri de vardır. Bu tesisler ve faaliyetler neticesinde de radyoaktif atıklar ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmanın ana konusu olan maliyeti belirleyen unsur aktivite ve hacimdir. NGS dışında faaliyet gösteren tesis ve uygulamalardan çıkacak radyoaktif atıkların hacimleri NGS'ye kıyasla oldukça düşüktür ve zamanlama belirsizdir. Dolayısı ile ülke özelinde bir yaklaşım belirlenmesi gerekmektedir. Ülkemiz için hazırlanan senaryo analizi başlığında diğer tesis ve faaliyetlerden ortaya çıkacak radyoaktif atık için hali hazırda durum değerlendirilerek bir kabul yapılmıştır.

2.3.4. Yakın Yüzey Bertaraf Tesisi Kapasite, Seçim ve Maliyetleri (Near-Surface Disposal Facility Capacity, Selection and Costs)

Diğer ülkeler incelendiğinde farklı türlerde inşa edilmiş YYBT'ler bulunmaktadır. Bu kapsamda tesislerin bulunduğu ülkelerin radyoaktif atık envanterleri ile kıyaslamalar sonucu belirlenen hacimlerin doğruluğunun da saptanması sonrası uygun tesisler seçilmiştir. YYBT olarak Belçika Dessel, İspanya El- Cabril, Çekya Dukovany, Fransa Centre de l'Aube, Macaristan Püspökszlágy, İngiltere Drigg çalışma kapsamına alınmıştır [22]. Maliyet kırımını yaklaşıma göre değişmektedir.

Maliyetler 2024 yılının maliyetleri olmakla birlikte Maliyetlerin kıyaslanabilmesi için ülkelerin işgücünden kaynaklı maliyetlerini standartlaştırmak en doğru yöntemdir. Bu kapsamda Avrupa Komisyonu tarafından hazırlanmış raporda yer alan maaş faktörü tablosuna göre maliyetler yeniden düzenlenecektir. Avrupa içinde ortalama saatlik ücretin 2020 yılı için 30,34 Euro olduğu bilinmektedir. Saatlik ücret değişse de oranlar benzerlik göstereceği için herhangi bir enflasyon çalışması yapılmamıştır [12]. Her ne kadar maaşlara dair katsayı bu rapordan alınsa da rapordaki gibi maliyetlere %100 oranında değil, lisanslama ve planlama ile kapatma da işgücünün maliyete etkisi %50, inşaat ve işletmede işgücünün maliyete etkisi ise %30 olarak kabul edilmiştir. Tablo 1'de maaş faktörü tablosu, Tablo 2'de ise maaş faktörüne göre düzeltilmiş ve düzeltilmemiş YYBT maliyetleri ile teknik detaylar yer almaktadır. Maliyet sütunlarında düzeltilmiş maliyetler üstte ve vurgulu olarak verilmiş düzeltilmemiş maliyetler altta verilmiştir.

Tablo 1. Saatlik Ücrete Göre Düzeltme Faktörü [12] (Hourly Wage-Based Adjustment Factor)

Ülke	Saatlik Ücret (Euro)	Düzeltme Faktörü
Belçika	39,65	1,31
İspanya	21,17	0,70
Çekya	11,27	0,37
Fransa	35,97	1,19
Macaristan	9,11	0,30
İngiltere	25,68	0,85

Tablo 2. Yakın Yüzey Bertaraf Tesisleri, Düzeltilmiş ve Düzeltilmemiş Maliyetleri [12,22] (Near Surface Disposal Facilities, Adjusted and Unadjusted Costs)

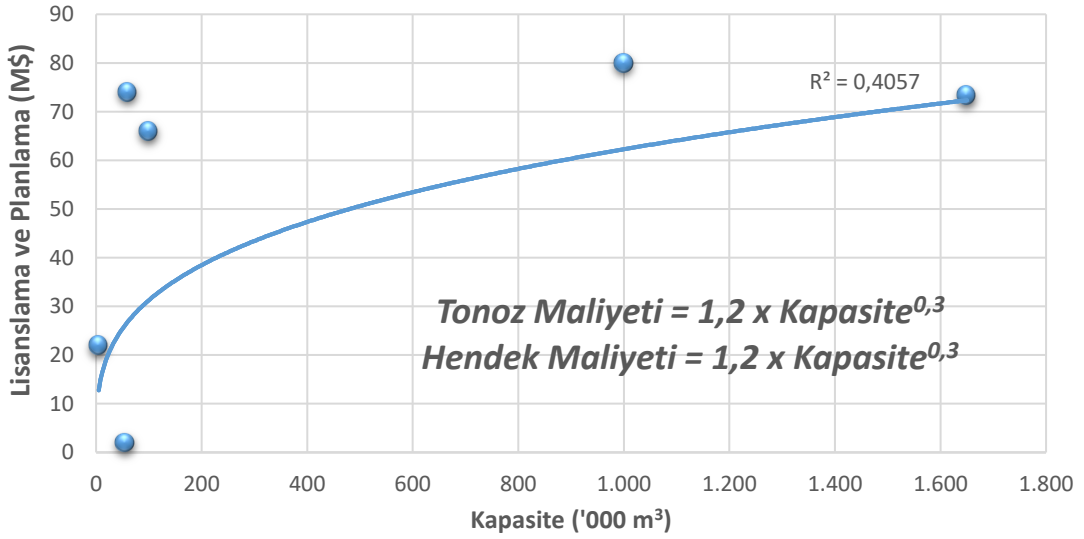
Ülke / Tesis	Atık Kabul / Bertaraf Metodu	İlk Bertaraf (yıl)	Tesis Kapasitesi (m ³) / Yıllık teslim (m ³ /yıl)	Lisans ve Planlama Maliyeti (M\$)	Inşaat Birim Maliyeti (\$/m ³) / İşletme Birim Maliyeti (\$/m ³)	Kapatma Maliyeti (M\$)
Belçika/ Dessel	DOS-KÖ / Tonoz	60000 / 1000	65 74	6140 / 14290 6610 / 15382	212 240
İspanya/ El-Cabril	ÇDS, DOS-KÖ / Tonoz	1993	100000 / 5000	80 66	3541 / 5075 3138 / 4497	182 150
Çekya / Dukovany	DOS-KÖ / Tonoz (5m)	1994	55000 / 310	1648 / 3217 1091 / 2129	124 67
Fransa/Centre de l'Aube	DOS-KÖ / Tonoz	1992	1000000 / 20000	74 80	1047 / 5147 1100 / 5406	303 330
Macaristan /Püspökszlágy	DÜS / Tonoz (6m)	1976	5000 / 237	48 22	4539 / 7599 2670 / 4470	17 8
İngiltere/ Drigg	ÇDS,DÜS/ Hendek ve Tonoz	1959-1988	1650000 / 12000	80 73	768 / 2895 729 / 2749	433 398

2.3.5. Yakın Yüzey Bertaraf Tesisi Maliyetleri için Ölçeklendirme (Scaling for Near-Surface Disposal Facility Costs)

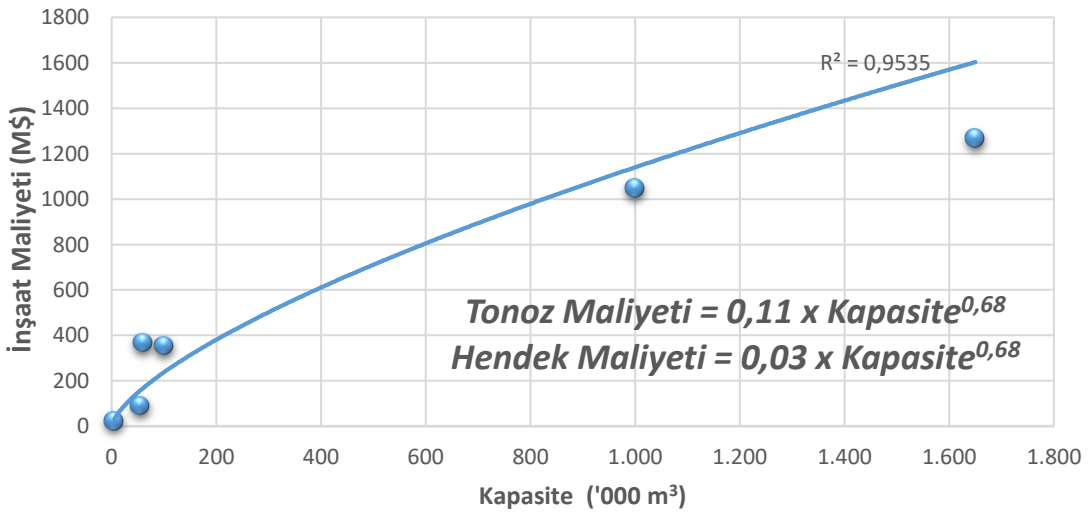
Tesislerin maliyetleri hesaplanırken ilk aşama da yaklaşık olarak ne kadar bir tutar ile karşılaşılacağı örnek tesislerin maliyetlerinin bulunması ve ölçeklendirilmesi ile tespit edilir. Ölçeklendirme yasası ciddi tasarım değişiklikleri olmadığı durumda daha net sonuçlar vermektedir. Literatürde yer alan birçok maliyet çalışmasında tek bir ölçeklendirme değeri kabul edilerek sonuçlara gidilmiştir. Bu çalışmada ise lisanslama ve planlama, inşaat, işletme ve kapatma maliyetleri için ayrı ayrı ölçeklendirme grafikleri

oluşturularak formüller tespit edilmiştir.

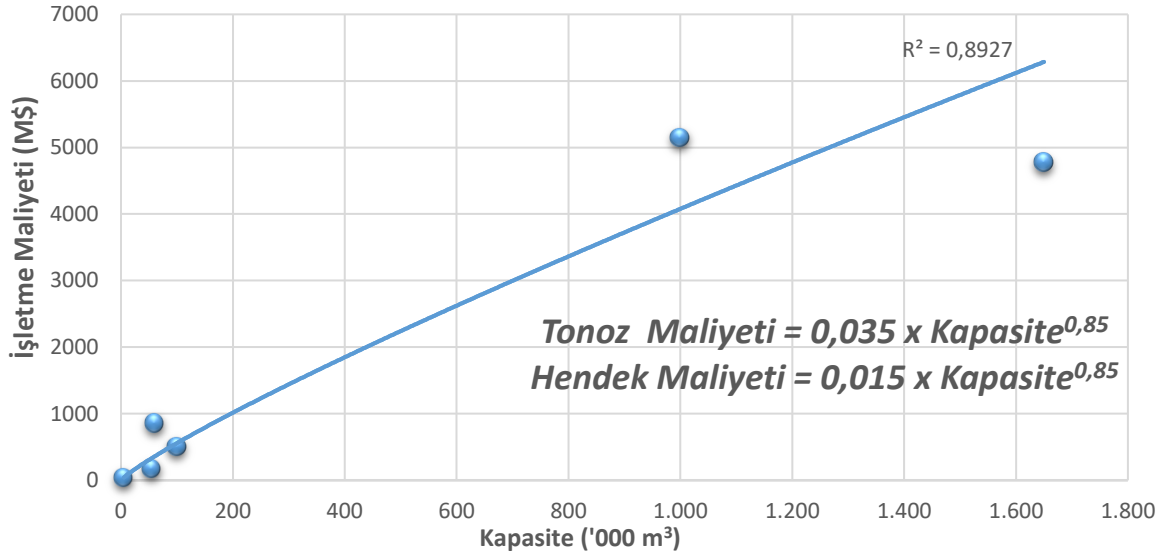
Grafik üzerinde yer alan katsayılar DOS radyoaktif atıkların bertaraf edildiği tonoz yapılar için ve ÇDS radyoaktif atıkların bertaraf edileceği hendek yapılar için ayrı ayrı verilmiştir. Grafik üstündeki formüllere %20 belirsizlik maliyeti eklenmiştir [23,24]. Burada yer alan işletme maliyeti grafiğine hendek için kapatma sonrası 100 yıl, tonoz için kapatma sonrası 200 yıl izleme maliyeti dahildir. Yıpranmaya dair herhangi bir kabul kullanılmamıştır. Lisanslama ve Planlama Maliyeti Şekil 3'te, İnşaat Maliyeti Şekil 4'te, İşletme Maliyeti Şekil 5'te, Kapatma Maliyeti ise Şekil 6'da grafik olarak formülleri ile gösterilmiştir.



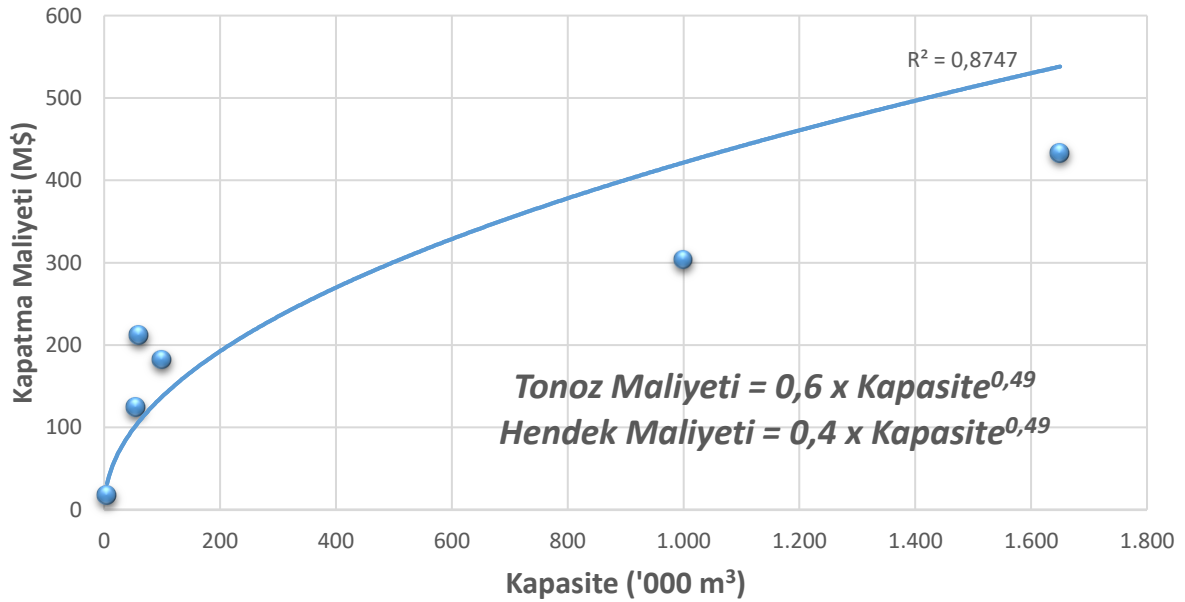
Şekil 3. Lisanslama ve Planlama Maliyeti Ölçeklendirme Grafiği (Licensing and Planning Cost Scaling Chart)



Şekil 4. İnşaat Maliyeti Ölçeklendirme Grafiği (Construction Cost Scaling Chart)



Şekil 5. İşletme Maliyeti Ölçeklendirme Grafiği (Operating Cost Scaling Chart)



Şekil 6. Kapatma Maliyeti Ölçeklendirme Grafiği (Closure Cost Scaling Chart)

Toplam maliyet hesaplanırken literatürde yer alan diğer maliyet çalışmaları gibi bir ölçeklendirme katsayısı kullanılmak istenirse maliyetlerdeki ağırlıklar dikkate alınarak [0,65-0,75] aralığının uygun olacağı görülmüştür [24,25].

3. SENARYO ANALİZİ VE TARTIŞMA (SCENARIO ANALYSIS AND DISCUSSION)

Ülkemizde kurulması planlanan 3 büyük ölçekli NGS projesi bulunmaktadır. Maliyet değerlendirmesi için 2 NGS yani 8 büyük ölçekli ve 3 NGS yani 12 büyük ölçekli reaktör için 2 ayrı senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolara göre yaklaşık olarak 10 GWe ve 15 GWe kurulu güç baz alınmıştır.

1 GWe kurulu güce sahip nükleer reaktörün işletilmesi esnasında ortaya çıkan radyoaktif atık için ise 100 m³ ÇDS / 100 m³ DOS, 150 m³ ÇDS / 150 m³ DOS ve 200 m³ ÇDS / 200 m³ DOS olmak üzere 3 farklı senaryo oluşturulmuştur. Bununla beraber reaktörün işletmeden çıkarılması esnasında 2500 m³ ÇDS, 4500 m³ DOS radyoaktif atık çıkacağı kabul edilmiştir. Ayrıca diğer tesis ve faaliyetler esnasında günümüze kadar meydana gelen radyoaktif atık hacimleri ile araştırma reaktörünün de işletmeden çıkarılması da dikkate alınarak toplamda maksimum 5000 m³ ÇDS ve 5000 m³ DOS radyoaktif atık meydana geleceği kabulü yapılmıştır. Toplamda 6 farklı senaryo için maliyetler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Yakın Yüzey Bertaraf Tesisi Gecelik Maliyeti İçin Senaryo Analizi (M\$) (Scenario Analysis for Near-Surface Disposal Facility Overnight Cost)

	2 Nükleer Güç Santrali (10 GWe)			3 Nükleer Güç Santrali (15 GWe)		
	100 m ³ ÇDS/ 100 m ³ DOS	150 m ³ ÇDS/ 150 m ³ DOS	200 m ³ ÇDS/ 200 m ³ DOS	100 m ³ ÇDS/ 100 m ³ DOS	150 m ³ ÇDS/ 150 m ³ DOS	200 m ³ ÇDS/ 200 m ³ DOS
Toplam Hacim ('000 m ³)	Hendek: 84 Tonoz: 104	Hendek: 111 Tonoz: 131	Hendek: 138 Tonoz: 158	Hendek: 124 Tonoz: 154	Hendek: 164 Tonoz: 194	Hendek:205 Tonoz: 235
Lisans/ Plan	74	80	85	84	90	96
İnşaat	351	413	471	457	539	616
İşletme	767	1074	1269	1215	1499	1774
Kapatma	276	312	344	334	378	417
Toplam	1468	1879	2169	2089	2506	2903

Ülkemiz için radyoaktif atık yönetimi planlaması gerçekleştirilirken tabloda yer alan YYBT maliyetleri ve süreç planlaması oldukça önemlidir. Tabloya göre 2 NGS'nin 60 yıl işletmede kalması halinde minimum 1.5 Milyar Dolara, 3 NGS'nin 60 yıl işletmede kalması halinde ise minimum 2.1 Milyar Dolara ihtiyaç duyulacağı tespit edilmiştir. Finansman çalışması gerçekleştirilirken 2 veya 3 NGS seçeneğine göre her 3 alt senaryo içinde çalışma yapılması önerilmektedir. Bu rakamlar belirsizlikleri içerecek şekilde gecelik maliyet olup maliyet kırımları planlaması, sürece göre değişiklik göstermektedir. Finansman yöntemi kirleten öder prensibi doğrultusunda radyoaktif atık üretenlerden alınarak havuz oluşturmaya dayanmaktadır. Ülkemizde toplanan bu paraların yatırım araçları ile değerlendirilmesi planlanmaktadır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

Nükleer teknolojiye sahip ülkeler radyoaktif atık yönetimini doğru bir şekilde yapmanın çabası içerisinde olmalıdırlar. Radyoaktif atık yönetiminin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi için maliyetlendirmenin doğru bir şekilde yapılması ve finansmanın nasıl ve ne şekilde sağlanacağını belirlemesi oldukça önemlidir.

Özellikle NGS bulunan ülkelerde ÇDS ve kısa ömürlü DOS radyoaktif atıklar için çözümün NGS'nin işletilmesinin ilk yıllarında belirlenmesi gerekmektedir. Bu radyoaktif atıkların bertarafı YYBT'lerde gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda literatürden farklı olarak dünya üzerinde örnekleri bulunan bu tesislerin maliyet kırımları net bugünkü değer yöntemi ve maaş faktörü

kullanılarak formüle edilmiştir. Literatürde yer aldığı gibi tek bir ölçeklendirme faktörü kullanmak yerine maliyetler üzerinde çalışarak ölçeklendirme faktörü lisans ve planlama için 0,3, inşaat için 0,68, işletme ve uzun süreli izleme için 0,85 ve kapatma için ise 0,49 olarak bulunmuştur. Bunlarla beraber pratik ve ilk aşamalarda kullanılmak üzere genel ölçeklendirme faktörü aralığı 0,65 – 0,75 olarak tespit edilmiştir.

Ölçeklendirme faktörünü de içerecek şekilde geliştirilmiş formüller ile ülkemiz için senaryo analizi çalışması yapılmıştır. Literatürde yüksek seviye maliyet hesaplamalarında %30 - %50 olarak alınan belirsizlik, literatürden farklı olarak daha gerçekçi sonuçlar için %20 olarak alınmıştır. Bu senaryolar kurulu güç bakımından 2 NGS (10 GWe) ve 3 NGS (15 GWe) olarak meydana gelen radyoaktif atık bakımından ise 100 m³ ÇDS / 100 m³ DOS, 150 m³ ÇDS / 150 m³ DOS ve 200 m³ ÇDS / 200 m³ DOS şeklinde kabul edilmiştir. Sonuç olarak 2 NGS'nin 60 yıl işletmede kalması halinde gecelik maliyetin minimum 1,5 Milyar Dolar maksimum 2,2 Milyar Dolar, 3 NGS'nin 60 yıl işletmede kalması halinde ise gecelik maliyetin minimum 2,1 Milyar Dolar maksimum 2,9 Milyar Dolar olacağı öngörülmüştür.

Kısacası, literatürden farklı yaklaşımlarla ülkemiz özelinde hazırlanan bu çalışma radyoaktif atık yönetimi maliyet tahminlerinin doğruluğu konusunda sonuca ulaşamayan diğer ülkeler içinde yol gösterici olacaktır.

Bundan sonra yapılacak çalışmalar için aşağıdaki önerilere,

- Çalışmada yer alan örnek tesisler dışında kalan başka tesislerin maliyetleri kullanılırken maaş faktörünün doğru bir şekilde kullanılması,

- İşletme maliyeti hesaplanırken işletme süresinin ve kapatma sonrası izleme süresinin belirleyiciliğinin ihmal edilmemesi,
 - Toplam radyoaktif atık hacmi ve yıllık miktarı hesaplanırken tek bir kabul ile değil senaryolar ile hesaplamalara yer verilmesi,
 - Toplam radyoaktif atık hacmi hesaplanırken hali hazırda bulunan radyoaktif atık envanteri ve işletmeden çıkarma esnasında ortaya çıkacak radyoaktif atıkların da dahil edilmesi,
 - Maliyet hesaplamalarındaki aşamalara göre belirsizliklerin maliyetlere eklenmesi,
- dikkat edilmesinde fayda görülmektedir.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

ÇDS : Çok Düşük Seviyeli

DÜS : Düşük Seviyeli

DOS : Düşük ve Orta Seviyeli

F : Gelecek Değer

NGS : Nükleer Güç Santrali

P : Bugünkü Değer

r : İskonto Oranı

UAEA : Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı

YYBT : Yakın Yüzey Bertaraf Tesisi

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal- özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Semih Sadi KILIÇ: Literatür araştırması, senaryoların oluşturulması ve analiz edilmesi ile çalışmanın yazımında rol almıştır.

He played a role in the writing of the study by conducting literature research, creating and analyzing scenarios.

Halil İbrahim VARIYENLİ: Çalışmanın kontrolü

ve yayınlanma sürecinin takibinde rol almıştır.

He played a role in the control and follow-up of the study's publication process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] TENMAK, Ulusal Radyoaktif Atık Yönetimi Planı, 2020
- [2] IAEA, Selection of Technical Solutions for the Management of Radioactive Waste, IAEA TECDOC-1817, 2017
- [3] Jürgen K., WOLFGANG N., DETLEF A., Nuclear Fuel Cycle, Heinrich Böll, 2006
- [4] STRLSCHVO, Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung in der Fassung der Bekanntmachung vom, 2001
- [5] IAEA, Scientific and Technical Basis for the Near-surface Disposal of Low and Intermediate Level Waste, Technical Reports Series No. 412, 2002
- [6] IAEA, Considerations in the Development of Near-surface Repositories for Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 417, 2003
- [7] IAEA, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7, 2004
- [8] IAEA, Options for Management of Spent Fuel and Radioactive Waste for Countries developing New Nuclear Power Programmes, 2013
- [9] IAEA, Costing Methods and Funding Schemes for Radioactive Waste Disposal Programmes, 2020
- [10] OECD/NEA, The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle, 2013
- [11] Avrupa Komisyonu, Methodologies of Cost Assessment for Radioactive Waste and Spent Fuel Management an Overview of The Practices, 2020
- [12] P. Carbol, J. Faltejsek, I. Mele ve diğerleri, Guidance on Cost Assessment and Financing Schemes of Radioactive Waste Management Programmes, 2020
- [13] Micheal I. Ojovan ve Hans J. Steinmetz, Approaches to Disposal of Nuclear Waste, 2022
- [14] Fan Xia, Jiyun Zhao ve diğerleri, Dynamic cost analysis for disposal of low and intermediate level nuclear waste in China, 2020

- [15] US DoE, International Low Level Waste Disposal Practices and Facilities, 2011
- [16] US DoE, Integrated Data Base Report: U.S. Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Inventories, Projections, and Characteristics, 1997
- [17] Haiying Chen, Chunming Zhang ve diğerleri, Discussion on Very Low-Level Radioactive Waste near Surface Disposal, 2013
- [18] Rebecca Harms, Wolfgang Neumann ve diğerleri, The World Nuclear Waste Report, 2019
- [19] IAEA, TECDOC 1572 Disposal Aspects of Low and Intermediate Level Decommissioning Waste, 2007
- [20] IAEA, Estimation of Global Inventories of Radioactive Waste and Other Radioactive Materials, 2008
- [21] OECD/NEA, Low-level Radioactive Waste Repositories, 1999
- [22] Edward L. Parsons, J., Waste Management Project Contingency Analysis, 1999
- [23] D. Pedram, Risk Engineering Society Contingency Guideline, 2019
- [24] W. Georg, Capital Investment Costs of Nuclear Power Plants, 1985
- [25] M.A. Tribe, R.L.W. Alpine, Scale Economies and the "0.6 rule", Engineering Costs and Production Economics, 1986
- [26] İnternet: El-Cabril Tesisi Resmi Sayfası URL: <https://www.enresa.es/eng/index/activities-and-projects/el-cabril> Son Erişim Tarihi:18.12.2023
- [27] Tutar H., İşletme Yönetimi, Seçkin, İstanbul, 2015
- [28] Okka M., Proje Yönetimi ve Mühendislik Ekonomisi, KTO, Konya, 2017
- [29] Erdem H., Yatırımların Ekonomik Değer Ölçümü, YTÜ, İstanbul, 2020
- [30] Ay S., Elektrik Enerjisi Ekonomisi, Birsen, İstanbul, 2008
- [31] Yaşar N., Finansal Yönetim ve Mali Analiz, Seçkin, İstanbul, 2015
- [32] Murray R., Understanding Radioactive Waste, Edited by Judith A. Powell, Columbus: Battelle Press, 1994
- [33] OECD-NEA, Radioactive Waste in Perspective NEA No. 6350, 2010
- [34] West P.J., Waste Management for Nuclear Power, 1999
- [35] IAEA, Improvements of Radioactive Waste Management at WWER Nuclear Power Plants, 2006
- [36] Akkuyu NGS Elektrik Üretim A.Ş., 4.800 MWe Kurulu Gücünde Olan Akkuyu Nükleer Güç Santrali Projesi Nihai ÇED Raporu, 2014
- [37] ICC, Sinop NGS Projesi, Sinop Nükleer Güç Santrali Projesi Nihai ÇED Raporu, 2020