

AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 027201 (362-373)

AKU J. Sci.Eng.20 (2020) 027201 (362-373)

DOI: 10.35414/akufemubid.605394

Araştırma Makalesi / Research Article

VVER-1200 Tipi Nükleer Reaktörün Kullanılmış Yakıtları İçin Depolama Tesisi Modeli Geliştirilmesi ve Maliyet Analizi

Banu BULUT ACAR¹¹ Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Nükleer Enerji Mühendisliği, 06800 Beytepe, Ankarae-posta: banubulutacar@hacettepe.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7498-5151>

Geliş Tarihi: 15.08.2019

Kabul Tarihi: 13.04.2020

Öz

Nükleer güç santrallerinin kullanılmış yakıtlarının yönetiminde izlenebilecek iki yöntem mevcuttur. Kullanılmış yakıt yeniden işlenebilir veya jeolojik yapılarda bertaraf edilebilir. Ancak, günümüzde jeolojik bertaraf henüz gerçekleştirilemediği için kullanılmış yakıtlar uzun süreli depolanmaktadır. Bu çalışmada, dört adet VVER-1200 tipi reaktör ünitesi içeren bir nükleer güç santralının işletilmesi sırasında oluşacak kullanılmış yakıtlar için depolama tesisi modeli geliştirilmiş ve iki farklı depolama senaryosunun uygulanması durumunda tesisin yaşam döngüsü maliyeti analiz edilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, işletme ömrü boyunca santralden çıkarılacak kullanılmış yakıt miktarı belirlenmiştir. Daha sonra, hesaplanan kullanılmış yakıt envanterinin depolanması için bir depolama tesisi modeli geliştirilmiş ve depolama varilinin tipi, malzemesi, depolama alanı büyüklüğü gibi tesisin temel özellikleri belirlenmiştir. Son olarak, iki farklı depolama senaryosunun uygulanması durumunda "net şimdiki değer" ve "seviyelendirilmiş birim maliyet" yöntemleri kullanılarak tesis için yaşam döngüsü maliyet analizi yapılmıştır.

Anahtar kelimeler

VVER-1200; Kullanılmış yakıt; Kuru depolama; Net şimdiki değer; Seviyelendirilmiş birim maliyet

Development of Storage Facility Model for Spent Fuels of VVER-1200 Nuclear Reactor and Cost Analysis

Abstract

There are two methods to be applied in the management of spent fuels of nuclear power plants. Spent fuel can be reprocessed or disposed of in geological formations. However, since the geological disposal has not been realized yet, spent fuels are stored for a long time. In this study, a storage facility model has been developed for spent fuels of a nuclear power plant containing four VVER-1200 units and life cycle cost analysis of the facility has been performed for two storage scenarios. In the first part of the study, the amount of spent fuel to be discharged from the plant during its operational life is determined. Then, a storage facility model is developed for the storage of estimated spent fuel inventory and basic characteristics of the facility such as storage cask type, material, storage area is determined. Finally, life cycle cost analysis of the facility is performed for two storage scenarios by using "net present value" and "levelised unit cost" methods.

Keywords

VVER-1200; Spent fuel; Dry storage; Net present value; Levelised unit cost

1. Giriş

1000 MWe gücünde tipik bir PWR basınçlı su reaktöründen çıkarılan kullanılmış yakıt yaklaşık olarak kütlece % 95,5 uranyum, %1 plütonyum, % 3,5 fisyon ürünleri ile minör aktinitler içermektedir. Bu nedenle, radyoaktivitesi yüksektir ve önemli miktarda ısı üretir. Reaktörden alınan kullanılmış yakıt, uygulanacak diğer işlemler öncesinde, reaktörün yanı başında yer alan su dolu havuzlarda geçici olarak depolanarak zırhlanır ve soğutulur. Geçici depolama sonrasında, kullanılmış yakıt nihai olarak tasfiye edilene kadar uzun süre depolanır veya içerdiği değerli uranyum ve plütonyum izotoplarını geri kazanmak amacıyla yeniden işlenir.

“Kuru depolama” ve “kullanılmış yakıt havuzlarında bekletme” uzun süre depolamada uygulanan iki ana yöntemdir. Ancak, günümüzde işletmede olan birçok nükleer santralin havuz kapasitesi dolduğu için kullanılmış yakıtların kuru depolama tesislerinde depolanması yöntemi öne çıkmıştır. Ayrıca, Fukushima’da yaşanan nükleer kaza sırasında kullanılmış yakıt havuzunun soğutma işlevini kaybetmesi ve kazanın boyutunun artması üzerine, kullanılmış yakıtların havuzlarda daha az miktarlarda ve daha kısa süreler bekletilmesi yaklaşımı kabul görmüş, kuru depolama yöntemine yönelinmiştir.

Kuru depolama, kullanılmış yakıtların çelik silindirik kaplar içine yerleştirildikten sonra ilave radyasyon zırhlama katmanları kullanılarak depolanması prensibine dayanmaktadır. Kuru depolama tesisi tasarımları, depolamanın yatay ya da dikey olarak yapılmasına ve kullanılmış yakıt yüklü kapları zırhlamak için kullanılan malzemeye bağlı olarak farklılık gösterir. Tesis tasarımını etkileyen en önemli etken kullanılmış yakıtın miktarı ve içeriğidir. Kullanılmış yakıt demetinin geometrisi, radyoizotop içeriği ve bozunum ısısı depolamada kullanılacak varillerin tasarımında belirleyicidir. Depolama senaryosu (kullanılmış yakıtın reaktörden alındığı zaman ve havuzda bekletilme süresi) da tesisin kapasitesini etkilemektedir ve tasarım sırasında dikkate alınmalıdır. Ayrıca, kuru depolama yönteminin, tesisin tasarlanması, kurulumu, işletilmesi ile işletmeden çıkarılması aşamalarını içeren ve 50-60 yıl süren bir uygulama olması,

depolama tesisi modeli geliştirilirken ekonomik etkenlerin de dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, belli bir kullanılmış yakıt envanteri için kuru depolama modeli geliştirilirken, ihtiyaç duyulacak depolama kapasitesinin hesaplanmasının, tesisin bileşenlerinin belirlenmesinin ve maliyet analizinin birlikte gerçekleştirilmesi gerekir.

VVER-1200 Nesil-III+ nükleer reaktörler arasında yer alan bir basınçlı su reaktörüdür. Günümüzde kurulumu devam eden ve yakın zamanda işletmeye alınmış olan VVER-1200 tipi nükleer santraller mevcuttur (Int Kyn. 1). Bu çalışmada, dört adet VVER-1200 ünitesi içeren toplam 4800 MWe kurulu güce sahip bir nükleer santralin işletimi sırasında oluşacak kullanılmış yakıtların güvenli depolanması için bir model önerilmiştir. Reaktörden alınan kullanılmış yakıtların reaktörün yanı başında bulunan kullanılmış yakıt havuzlarında geçici olarak depolandığı varsayılmıştır. Belli bir havuzda bekleme süresinden sonra bozunum ısısı ve radyoaktivite seviyesi azalmış VVER-1200 kullanılmış yakıtlarına “uzun süre depolama” ya da “yeniden işleme” seçenekleri uygulanabilir. Günümüzde işletmede olan VVER tipi reaktörlerde tek geçişli yakıt çevrimi uygulanmakta ve reaktörden alınan kullanılmış yakıtlar uzun süre depolanmaktadır (IAEA 2018). VVER-1200 kullanılmış yakıtları için de aynı yaklaşım uygulanabilir. Bu çalışmada, dört VVER-1200 ünitesinin işletimi sonucunda oluşacak kullanılmış yakıtlar için uzun süre depolama seçeneği olarak “kuru depolama” uygulanacağı varsayılmış ve bu amaçla kurulacak bir tesis modeli geliştirilmiştir. Tesisin iki farklı depolama senaryosu için kurulum ve işletme maliyeti analiz edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Kuru depolama modelinin geliştirilmesinde ilk adım ihtiyaç duyulacak tesis kapasitesinin belirlenmesidir. Çalışmada ilk olarak, VVER-1200 reaktörünün tasarım özellikleri, işletme koşulları ve işletme süresi değerlendirilerek kullanılmış yakıt envanteri ile kuru depolama için gerekli tesis kapasitesi hesaplanmıştır. Daha sonra, kullanılmış yakıt miktarı ve tesis kapasitesi dikkate alınarak bir kuru

depolama tesisi modeli geliştirilmiştir. Tasarlanan tesiste iki farklı depolama senaryosunun uygulanması durumunda “net şimdiki değer” ve “seviyelendirilmiş birim maliyet” yöntemleri kullanılarak depolama maliyeti hesaplanmıştır. Analizlerde girdi olarak kullanılan önemli parametrelerdeki belirsizliklerin maliyete etkisinin değerlendirilebilmesi için duyarlılık analizi yapılmıştır. Duyarlılık analizinde, farklı yıllık faiz oranı ve depolama varili birim fiyatlarının depolama maliyetine etkisi incelenmiştir. Araştırma yönteminin adımları aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.1. Kullanılmış Yakıt Envanterinin Belirlenmesi

Kuru depolama tesisinin kapasitesini depolanacak kullanılmış yakıt miktarı ve bu yakıtların depolama kaplarına yerleştirilme şekli belirlemektedir. Kullanılmış yakıt miktarı nükleer yakıtın tipi, reaktörün işletme koşulları, kapasitesi, yanma oranı gibi birçok değişkene bağlıdır. Bir nükleer reaktörden çıkarılacak yıllık kullanılmış yakıt miktarı aşağıda yer alan Eş. 1 ile hesaplanır:

$$M_{SF} = \frac{P_e \cdot CF \cdot 365}{\eta_{th} \cdot BU} = \frac{P_{th} \cdot CF \cdot 365}{BU} \quad (1)$$

Eş. 1’ de yer alan M_{SF} reaktörden çıkarılacak yıllık kullanılmış yakıt miktarını (kg), P_e reaktörün kurulu elektrik üretim kapasitesini (MWe), P_{th} termal gücünü (MWth), CF kapasite faktörünü (reaktörün bir yılda ürettiği enerjinin nominal güce oranı, %), η_{th} termal verimliliğini, BU yakıtın ortalama yanma oranını (yakıtın birim kütlesinden açığa çıkan enerji, MWd/tHM) simgelemektedir.

Bu çalışmada, dört adet VVER-1200 ünitesinden çıkarılacak yıllık kullanılmış yakıt miktarı Eş. 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Reaktörlerin işletme ömrü boyunca oluşacak toplam kullanılmış yakıt miktarı belirlenmiş, bir VVER-1200 yakıt demetinin içerdiği yakıt miktarı dikkate alınarak kullanılmış yakıt demetlerinin sayısı hesaplanmıştır.

2.2. Kuru Depolama Yöntemi

Kullanılmış yakıtların uzun süre depolanmasında ilk uygulamalar reaktörden çıkarılan yakıtın reaktörün yanı başında veya santral sahasında bulunan kullanılmış yakıt havuzlarında bekletilmesi olmuştur. Bir süre sonra, kullanılmış yakıtların depolanmasında kuru depolama yöntemi de uygulanmaya başlamıştır. Kuru depolama yöntemi belli bir süre (5-10 yıl) havuzda bekletilmiş kullanılmış yakıtların silindirik variller içine yerleştirildikten sonra ilave radyasyon zırhlama katmanları kullanılarak yatay veya dikey doğrultuda depolanması temeline dayanır. Kuru depolama tesisinin temel işlevleri aşağıda verildiği gibidir (Rahayu et al. 2018):

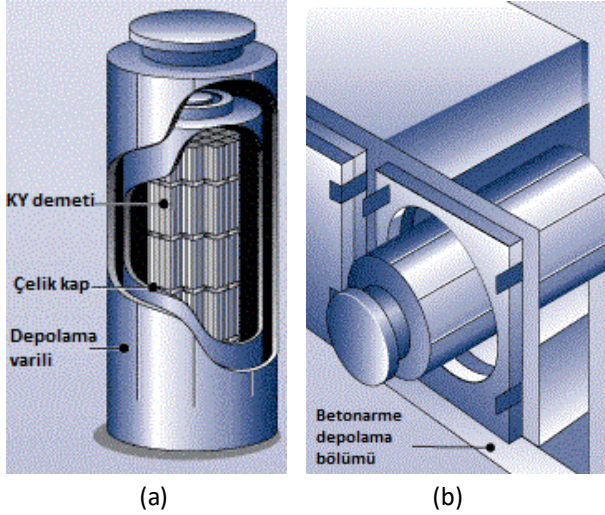
- Fisyon ürünleri ve uranyum ötesi elementlerin radyoaktif bozunumundan kaynaklı ısının yakıttan uzaklaştırılması
- Radyasyonun zırhlaması
- Çevreye olası bir radyonüklit sızıntısının önlenmesi
- Kritikliğin önlenmesi

Yukarıda yer alan temel işlevleri yerine getirecek şekilde birçok depolama yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilmiş tasarımların oyuk sıralı, beton varilli ve metal varilli olmak üzere üç ana grupta değerlendirilmesi mümkündür (IAEA 2009).

Oyuk sıralı tasarımlarda çelik silindirlere yüklenen kullanılmış yakıt demetleri yatay ya da dikey monolitik betonarme yapılar içinde açılmış oyuklara yerleştirilerek depolanmaktadır. Depolamanın yapıldığı betonarme yapılar sabittir ve taşınmaz. Radyasyon zırhlama betonarme yapı ile sağlanırken kullanılmış yakıtın bozunum ısısı doğal konveksiyon ile oyuktan atmosfere aktarılmaktadır. Beton varilli tasarımlarda kullanılmış yakıt yüklü çelik variller zırhlama amacıyla beton variller içine yerleştirilir ve bu variller dikey olarak depolanır.

Metal variller içinde depolama yapılan tasarımlarda ise yapısal malzeme olarak çelik ve dökme demir kullanılmaktadır. Varilin içinde kullanılmış yakıt demetlerinin yerleştirildiği bir veya daha çok sayıda hücre bulunur. Kullanılmış yakıt demetlerinin bozunum ısısı yapısal malzemedan atmosfere

kondüksiyon mekanizmasıyla aktarılır. Metal variller sadece depolama amacıyla tasarlanabileceği gibi kullanılmış yakıtın hem taşınmasında hem de depolanmasında kullanılabilir şekilde “çift amaçlı varil” olarak tasarlanabilir. Metal varilli ve oyuk sıralı kuru depolama uygulamalarının şematik çizimleri Şekil 1’ de gösterilmiştir.



Şekil 1. (a) Metal varilli depolama ve (b) oyuk sıralı depolama (Int Kyn. 2)

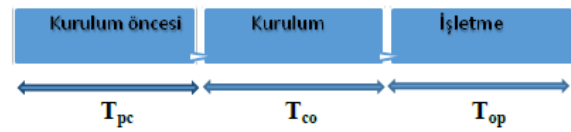
2.3. Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi

Kuru depolama tesisi gibi uzun süreli uygulamaların yaşam döngüsü maliyeti hesaplanırken, ekonomik parametreler ile zaman arasında bir bağıntı kurulması gerekmektedir. Bu nedenle, öncelikle, tesisin yaşam döngüsünü oluşturan fazlar ve bu fazlara ait harcamalar belirlenmelidir. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı’ nın 2009 yılında kullanılmış yakıtların depolanması ile ilgili hazırladığı teknik raporda kullanılmış yakıt depolama tesisinin yaşam döngüsü Çizelge 1’ de verilen fazlara ayrılmıştır. Tesis maliyetini oluşturan giderler yatırım, işletme-bakım ve işletmeden çıkarma olmak üzere üç ana kategoride toplanarak projenin her bir fazının ait olduğu gider kategorisi belirlenmiştir (IAEA 2009).

Çizelge 1. Kuru depolama tesisinin yaşam döngüsü fazları

Gider Kategorisi	Proje Fazı
Yatırım	Tasarım-Mühendislik
	Lisanslama
	İnşaat
İşletme-Bakım-Onarım	Kullanılmış yakıt yükleme Depolama
İşletmeden çıkarma	Tesis sökümü Dekontaminasyon

Bu çalışmada, Çizelge 1’ de yer alan “işletmeden çıkarma” dışındaki tüm fazlar dikkate alınarak tesisin maliyet analizinin yapıldığı zaman aralığı belirlenmiştir. Tesisin yaşam döngüsü Şekil 2’ de gösterildiği gibi kurulum öncesi (tasarım, mühendislik, lisanslama), kurulum (tesis inşaat edilmesi) ve işletme (depolama varillerinin yüklenmesi ve depolanması) fazlarından oluşacak şekilde belirlenmiştir. İşletmeden çıkarma fazı maliyet analizlerine dahil edilmemiştir. Şekil 2’ de yer alan T_{pc} , T_{co} ve T_{op} sırasıyla kurulum öncesi, kurulum ve işletme fazlarının sürelerini ifade etmektedir.



Şekil 2. Maliyet analizi için kuru depolama tesisinin yaşam döngüsü

Maliyet analizlerinin gerçekleştirileceği zaman aralığı ve fazlar belirlendikten sonra, her bir fazda yapılacak harcamaların zamana bağlı değişimini dikkate alarak tesisin maliyetini hesaplamak mümkündür. “Net şimdiki değer (NPV)” yöntemi uzun süreli projelerin maliyetini belirlemek için en sık uygulanan yöntemdir. NPV yönteminde depolama tesisinin maliyeti, tesis ömrü boyunca her yıl söz konusu olacak tüm harcama akışlarının, bir referans zaman için (maliyet hesabının yapıldığı zaman, tesisin inşaatının başladığı zaman gibi) eşdeğerinin bulunması ve bu maliyetlerin toplanması ile belirlenir (Nagano 2003). NPV aşağıda yer alan Eş. 2 kullanılarak hesaplanır:

$$NPV = \sum \frac{C_i}{(1+d)^i} \quad (2)$$

NPV tesisin maliyetinin net şimdiki değerini, i harcamanın yapıldığı yılın indeksini, C_i i yılında yapılan harcama miktarını, d yıllık faiz oranını simgelemektedir. Tesisin tasarımının belli olması durumunda, tesis bileşenlerinin maliyetlerinin karşılaştırılması ve kullanılacak bileşenin seçilmesinde NPV yönteminin kullanılması uygundur. Ancak, tesis tasarımının aynı kalmasına rağmen tesiste uygulanacak depolama senaryosu,

hem depolamaya gönderilen yıllık kullanılmış yakıt miktarını hem de maliyet analizinin gerçekleştirildiği zaman aralığındaki harcama akışını dolayısıyla tesisin maliyetini değiştirmektedir. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'nın 2009 yılında kullanılmış yakıtların depolanması ile ilgili hazırladığı teknik raporda farklı tasarımların veya depolama senaryolarının maliyetlerinin karşılaştırılmasında "seviyelendirilmiş birim maliyet (LUC)" analizi yapılmasının uygun olduğu belirtilmektedir (IAEA 2009). LUC bir projenin yaşam döngüsü boyunca yapılacak harcamaların net şimdiki değerinin projeden sağlanacak kazancın net şimdiki değerine eşit olması gerektiği varsayımına dayanmaktadır. Kullanılmış yakıt depolama tesisinin seviyelendirilmiş birim maliyeti Eş. 3' de verildiği gibi tesisin net şimdiki değerinin depolama periyoduna indirgenmiş kullanılmış yakıt miktarına oranlanması ile belirlenir (Cho et al. 2011).

$$LUC = \frac{NPV}{\sum \frac{M_i}{(1+d)^i}} \quad (3)$$

Eş. 3' de yer alan M_i i yılında kuru depolamaya gönderilen kullanılmış yakıt miktarını (kg) simgelemektedir. Bu çalışmada, depolama senaryosunun tesis maliyetine etkisini değerlendirmek amacıyla iki farklı depolama senaryosu için LUC analizi yapılmıştır. İlk senaryoda, kullanılmış yakıtların reaktörün yanı başındaki havuzlarda mümkün olduğunca kısa süre, ikinci senaryoda ise yakıt havuzunun kapasitesi dolana kadar bekletilerek kuru depolamaya gönderildiği kabul edilmiştir.

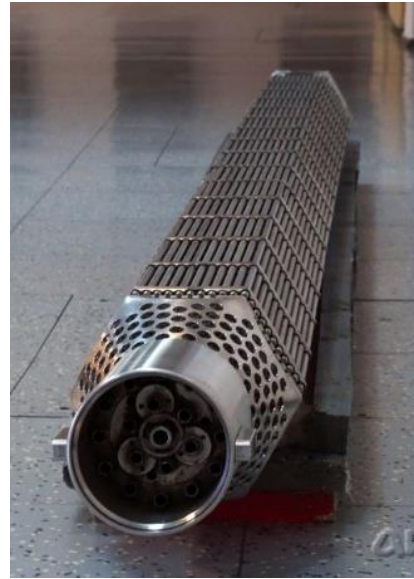
2.4. VVER-1200 Reaktörünün Teknik Özellikleri

VVER-1200 Nesil-III+ nükleer reaktörler arasında yer alan bir basınçlı su reaktörüdür. Ancak, reaktör kalbinde altıgen yakıt demetlerinin kullanımı ve buhar üreteçlerinin yatay yerleşimi gibi özellikleri tipik basınçlı su reaktörlerinin tasarımından farklıdır. Reaktörün nominal elektrik gücü 1200 MWe ve ısı gücü 3200 MWth'dır. VVER-1200 reaktörüne ait teknik özellikler Çizelge 2' de verilmiştir (IAEA 2018).

Bir VVER-1200 ünitesinde altıgen şeklinde ve her biri 312 adet UO_2 yakıt çubuğu içeren toplam 163 adet yakıt demeti bulunmaktadır. VVER-1200 yakıt demeti Şekil 3' de gösterilmiştir. Reaktöre yüklenen taze yakıt ortalama 4,79 w/o zenginliktedir ve 55800 MWd/tHM yanma oranına sahiptir (IAEA 2009).

Çizelge 2. VVER-1200 reaktörünün teknik özellikleri

Parametre	Değer
Elektrik gücü, P_e (MWe)	1170
Termal güç, P_{th} (MWth)	3200
Termal verimlilik, (%)	32,5
Kapasite faktörü, CF (%)	92
Reaktör ömrü (yıl)	60
Yakıt tipi	UO_2
Yakıt zenginliği, ϵ (ağırlıkça %)	4,79
Yakıt yanma oranı, BU (MWd/tHM)	55800
Reaktör kalbindeki yakıt demeti sayısı	163
Yakıt demeti yüksekliği (m)	4,57
Yakıt demetlerinin merkezleri arasındaki uzaklık (m)	0,236
Yakıt demeti içindeki yakıt çubuğu sayısı	312
Yakıt çubuğu dış çapı (mm)	9,1



Şekil 3. VVER-1200 yakıt demeti (Int Kyn. 3)

Bu çalışmada, dört adet VVER-1200 ünitesi içeren toplam 4800 MWe kurulu güce sahip bir nükleer santralin işletimi sırasında oluşacak kullanılmış yakıtların güvenli depolanması için bir tesis modeli önerilmiştir. Her bir ünitenin işletmeye alınmasından bir yıl sonra kullanılmış yakıt oluşumu başlayacak ve her yıl bu kullanılmış yakıtlar reaktörden alınarak taze yakıt yüklenecektir. Reaktörden çıkarılan yakıt, bertaraf öncesinde uzun süre depolanabilir veya karışık oksitli yakıt (MOX) olarak çevrime gönderilmek üzere yeniden işleme

tesisinde işlenebilir. VVER tipi reaktörlerde MOX yakıtlar kullanılabilir, ancak günümüzde işletmede olan VVER ünitelerinde tek geçişli yakıt çevrimi uygulanmaktadır (IAEA 2009). Bu durumda, reaktörden alınan kullanılmış yakıt uzun süre depolama seçeneğinin uygulanması gerekmektedir. Depolama ve taşıma işlemleri öncesinde kullanılmış yakıtın havuza alınarak radyoaktivite seviyesinin ve bozunum ısısının azalması sağlanacaktır. Her bir VVER-1200 ünitesinin yakıt havuzunun kapasitesi, her güç ünitesinin 10 işletme yılı süresince oluşacak kullanılmış yakıtlarının depolanması için yeterli olacak şekilde tasarlanmıştır (IAEA 2009). Yakıt demetlerinin, kullanılmış yakıt havuzunda belli bir süre bekletildikten sonra, saha-içi ya da saha-dışı depolama tesisine aktarılması veya bertaraf tesisine gönderilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, kullanılmış yakıtların uzun süre depolanmak üzere gönderileceği kuru depolama tesisinin santral sahasında bulunduğu varsayılmıştır.

2.5. Kullanılmış Yakıt Miktarının Projeksiyonu

Depolama varillerinin sayısı ve buna bağlı olarak tesis kapasitesi depolanacak kullanılmış yakıt envanteri ile orantılıdır. Bu nedenle, ilk olarak, Eş. 1 ve Çizelge 2' de verilen reaktör tasarım parametreleri kullanılarak her bir üniteden çıkarılan kullanılmış yakıt miktarı belirlenmiştir. Daha sonra, reaktör ömrü boyunca (60 yıl) dört üniteden alınacak kullanılmış yakıt miktarı ve yakıt demeti sayısı hesaplanmıştır. Çizelge 3 nükleer santralden yıllık ve işletme ömrü boyunca çıkarılacak kullanılmış yakıt miktarlarını göstermektedir.

Çizelge 3. Kullanılmış yakıt miktarı

	Ünite 1	Ünite 2	Ünite 3	Ünite 4
Yıllık KY ¹ miktarı (kg)	22462	22462	22462	22462
Yıllık KY demeti sayısı	42	42	42	42
Reaktör ömrü boyunca oluşacak KY demeti sayısı	2520	2520	2520	2520
Toplam KY demeti sayısı	10080			

¹KY: Kullanılmış Yakıt

2.6. Kuru Depolama Tesisi Modeli ve Depolama Senaryoları

Çalışmanın bu bölümünde, yukarıda belirlenen kullanılmış yakıt envanteri için bir kuru depolama

tesisi modeli geliştirilmiştir. Öncelikle, tesiste kullanılacak depolama varili seçilmiş ve bu model temel alınarak reaktörün işletimi sonucunda oluşacak kullanılmış yakıt envanterinin depolanması için gerekli varil sayısı hesaplanmıştır. Sonrasında, varillerin depolanması için ihtiyaç duyulacak tesisin büyüklüğü ve temel özellikleri belirlenmiştir.

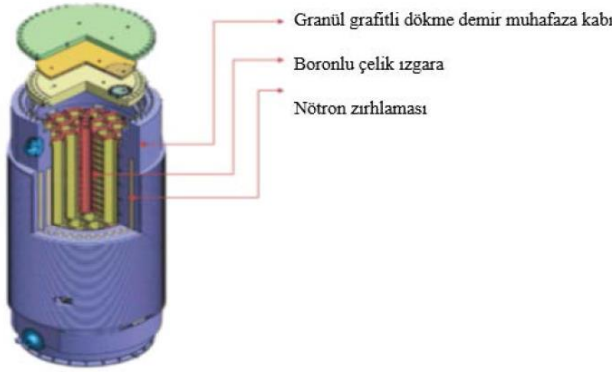
Kuru depolamada kullanılan üç ana yöntemden (oyuk sıralı, beton varilli ve metal varilli depolama), metal varillerde depolama modüler yapıdadır ve depolama kapasitesinin ihtiyaç duyulması durumunda artırılmasına olanak tanır. Bununla birlikte, işletme ve bakım-onarım maliyetleri betonarme depolama sistemlerinden daha düşüktür (Nagano 2003). Ayrıca, sadece depolama yerine taşıma ve depolama işlemlerinin her ikisinde kullanılabilir şekilde çift amaçlı metal variller tasarlanabilmektedir. Çift amaçlı metal variller, kullanılmış yakıt yükleme işleminin sadece bir kere yapılmasını sağlayarak uygulama sırasında doğabilecek radyolojik riskleri azaltır (IAEA 2009). Metal varillerde depolamanın bu avantajları dikkate alınarak, çalışmada, çift amaçlı metal varillerin kullanıldığı bir kuru depolama tesisi modeli geliştirilmiştir.

VVER reaktör sınıfından VVER-440 ve VVER-1000 reaktörlerinin kullanılmış yakıtları için "CASTOR-440/84" ve "TUK-13" çift amaçlı varilleri günümüzde depolama tesislerinde kullanılmaktadır (IAEA 2009). VVER 1200 reaktöründe olduğu gibi yüksek zenginliğe ve yanma oranına sahip kullanılmış yakıtlar için ise "TUK-141" çift amaçlı varil tasarımı geliştirilmiştir. "TUK-141" tasarımının işletme testleri ve lisanslanma işlemleri yakın zamanda tamamlanmıştır (Int Kyn. 4). Çalışmada, VVER 1200 kullanılmış yakıtlarının taşınması ve depolanması için "TUK-141" çift amaçlı varili seçilmiştir. Şekil 4' te modeli yer alan "TUK-141" varilinin çapı 3,12 metre, yüksekliği 5,86 metre ve yakıt yüklenmemiş ağırlığı 98 tondur (Makarchuk 2015).

Radyoaktif maddenin hapsedilmesi, zırhlanması, kritikliğin önlenmesi ve bozunum ısısının kullanılmış yakıttan uzaklaştırılması olmak üzere dört temel güvenlik işlevini yerine getirecek şekilde tasarlanmış

TUK-141 çift amaçlı varilinin bileşenleri ve işlevleri aşağıdaki gibidir:

- 18 adet VVER-1200 kullanılmış yakıtının yerleştirilmesi ve yapısal olarak desteklenmesi, ısının varil gövdesine iletilmesi ve nötron yutulumu ile kritikliğin engellenmesi işlevlerini yerine getiren boronlu çelik ızgara yapı,
- Radyoaktif maddelerin muhafazasını sağlayan granül grafitli dökme demirden yapılmış metal gövde,
- Nötron zırhlaması sağlayan boratlanmış polyester reçine (Makarchuk 2015).

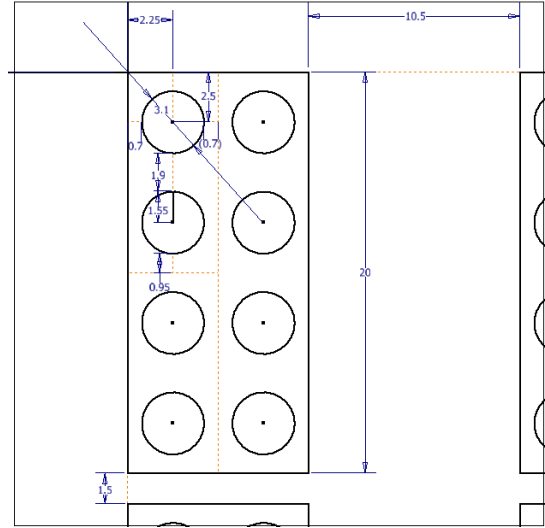


Şekil 4. TUK 141 çift amaçlı varili (Makarchuk 2015)

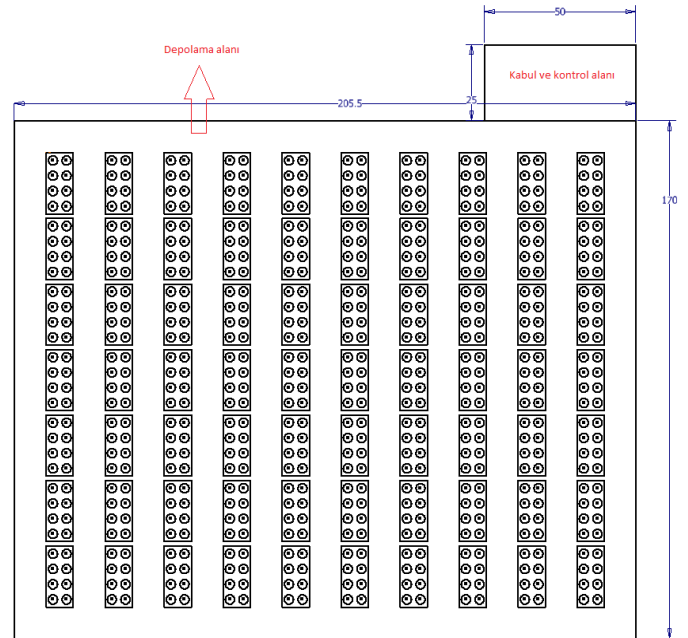
Tesis, idari bina, kabul, kontrol, bakım-onarım ve depolama olmak üzere beş alandan oluşacaktır. Tesisin etrafı çevrilecektir ve radyasyon güvenliği açısından "kontrollü" alan olarak belirlenecektir. Tesisin depolama, kabul ve kontrol alanları ise erişimi "sınırlı" alanlar olarak tasarlanacaktır.

Kabul bölümüne gelen ve kontrol edilen çift amaçlı variller depolama bölümünde beton dolgu üzerine dikey olarak yerleştirilerek depolanacaktır. Varillerin yerleştirileceği beton dolgu parçalı bir yapıda olacaktır. Beton dolgu parça Şekil 5' te gösterildiği gibi üzerine 8 adet depolama varili yerleştirilebilir yapıdadır ve 20x9x1 ebatlarındadır (USNRC 2001).

Depolama alanının tabanı bu parçalı yapılar bir araya getirilerek oluşturulacaktır. Ardışık olarak yerleştirilen beton dolgular arasındaki uzaklık 1,5 metredir. Her bir beton dolgu sırası arasındaki uzaklık ise 10,5 metredir (USNRC 2001). Kuru depolama tesisinin planı Şekil 6' da gösterilmiştir.



Şekil 5. Beton depolama dolgu parçası



Şekil 6. Kuru depolama tesisinin planı

Belirlenen tasarım özellikleri kullanılarak tesiste depolanacak varil sayısı ve tesis büyüklüğü Çizelge 4' te verildiği gibi hesaplanmıştır. Beton dolgu tesisin inşaat aşamasında yapılacak, depolama varilleri ise yıllık olarak temin edilerek kullanılmış yakıt yüklenmiş şekilde depolama tesisine gelecektir.

Çizelge 4. Tesis kapasitesi ve depolama alanı

Tesis bileşeni	Sayısı/Büyüklüğü
Tesiste depolanacak toplam varil sayısı	560
Beton dolgu parçası sayısı	70
Tesisin depolama yüzey alanı (m ²)	34935

Tesiste iki farklı depolama senaryosunun uygulanacağı varsayılmıştır. İlk senaryoda (S1), kullanılmış yakıtların reaktörün yanı başındaki havuzlarda mümkün olduğunca kısa süre, ikinci senaryoda (S2) ise yakıt havuzunun kapasitesi dolana kadar (10 yıl) bekletilerek kuru depolamaya gönderildiği kabul edilmiştir. S1’ de havuzda bekletilme süresi kullanılmış yakıtların depolanmasıyla ilgili düzenleyici dokümanlarda önerilen en kısa süre olan 5 yıl olarak belirlenmiştir (Int Kyn. 5). Kuru depolama tesisinin maliyet analizleri bu iki farklı depolama senaryosu için yapılmıştır.

2.7. Kuru Depolama Maliyetinin Belirlenmesi

Kuru depolama tesisinin maliyeti, kullanılmış yakıtın özellikleri, depolama tesisinin büyüklüğü, depolama senaryoları, birim fiyatlar ve enflasyon faktörü dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Maliyet hesabında yapılan kabuller aşağıda verilmiştir:

- İşletme ömrü 60 yıl olan nükleer santralin 2023 yılında işletmeye alınacağı varsayılmıştır. Tüm ünitelerin 2023-2083 yılları arasında işletmede olacağı ve her üniteden 2024 yılında başlamak üzere her yıl aynı miktarda kullanılmış yakıt çıkarılacağı varsayılmıştır.
- Kullanılmış yakıt kuru depolama tesisi santral sahasında kurulacaktır. Böylece depolama varillerinin saha dışına taşınmasına ilişkin bir maliyet söz konusu olmayacaktır.
- Depolama tesisinin işletmeden çıkarılma maliyeti hesaba katılmamıştır.
- Kurulum öncesi ve kurulum fazlarına ait harcamaların ilgili fazın başlangıcında yapıldığı; işletme fazında ise depolama varillerinin her yıl ihtiyaç duyulan miktarlarda temin edildiği varsayılmıştır.

Tesisin maliyeti Şekil 2’ deki kurulum öncesi, kurulum ve işletme fazlarını içeren zaman aralığı için hesaplanmıştır. Tesisin tasarlanması, mühendislik ve lisanslama çalışmalarını içeren kurulum öncesi faz (T_{pc}) 3 yıl olarak belirlenmiştir (EPRI 2010). Kurulum fazı tesisin ana binasının inşa edilmesi, beton

depolama tabanlarının hazırlanması ve taşıma alt yapısının oluşturulması çalışmalarını içerir ve 4 yıllık bir dönemdir (T_{co}) (EPRI 2010). İşletme fazı kullanılmış yakıt depolama varillerinin yüklenmesi ve depolanmasını içermektedir. İşletme fazında depolama varillerinin her yıl gereken miktarda üretilerek kullanılmış yakıt ile yüklendiği varsayılmıştır. Kullanılmış yakıtın kuru depolamaya gönderildiği yıl (t_{tr}), soğutma süresine (T_c) ve yakıtın reaktörden çıkarıldığı yıla (T_d) bağlı olarak değişecektir ($t_{tr}=T_d+T_c$). Depolama tesisi için işletme fazının sona erdiği zaman (t_{end}) santralin işletmeden çıkarıldığı zaman olarak belirlenmiştir. Bu durumda, belirlenen zaman aralıkları ve fazlar kullanılarak net şimdiki değer hesaplamasında kullanılan Eş. 2 yeniden düzenlenebilir ve Eş. 4’ te verildiği gibi yazılabilir (Al Saadi and Yi 2015):

$$NPV = \frac{C_{pc}}{(1+d)^{(t_{tr}-T_{pc}-T_{co}-t_{ref})}} + \frac{C_{co}}{(1+d)^{(t_{tr}-T_{co}-t_{ref})}} + \sum_{i=t_{tr}-t_{ref}}^{t_{end}-t_{ref}} \frac{C_{op}}{(1+d)^i} \quad (4)$$

C_{pc} , C_{co} , C_{op} sırasıyla, kurulum öncesi, kurulum ve işletme fazlarında yapılan harcamaları simgelemektedir. Analizlerde referans tarih olarak 2019 yılı (t_{ref}) seçilmiş ve tüm harcamalar bu tarihe indirgenerek depolama maliyeti hesaplanmıştır. İktisadi İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı-Nükleer Enerji Ajansı (OECD-NEA)’ nin nükleer yakıt çevriminin ekonomik analizi ile ilgili hazırladığı raporda % 5 yıllık faiz oranı referans değer olarak kabul edilmektedir (OECD 1994). Bu nedenle, maliyet analizinde yıllık faiz oranı % 5 olarak alınmıştır. Sonuçların depolama maliyeti hesaplamalarına ilişkin diğer çalışmalarla karşılaştırılabilmesi için para birimi dolar alınmıştır.

Her bir faz için farklı harcama bileşenleri söz konusudur. Maliyet analizinde kullanılan harcama bileşenleri, kuru depolama tesisleri için literatürde yer alan maliyet verileri kullanılarak belirlenmiştir. Kurulum öncesi dönem harcamaları tasarım, mühendislik ve lisanslama giderlerini kapsamaktadır. Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü (EPRI) tarafından 2009 yılında hazırlanan kullanılmış yakıtların kuru depolanmasının maliyeti ile ilgili raporda, kurulum öncesi dönem harcamaları 51,8 milyon \$ (kurulum öncesi çalışmalar, lisanslama

giderleri ve inşaaata hazırlık işlemleri) olarak verilmiştir (EPRI 2010).

İnşaat fazındaki harcamalar depolama varillerinin yerleştirileceği beton tabanın inşası ve kullanılmış yakıt yüklü depolama varillerinin taşınmasında kullanılacak altyapının oluşturulması giderlerini içermektedir. İnşaat sırasında her bir depolama varili için beton tabanın maliyeti EPRI raporunda 13400 \$ olarak verilmiştir. Bu durumda, bu çalışmada belirlenen tesis boyutları için beton taban inşasının maliyeti 7,5 milyon \$ olarak hesaplanır. EPRI raporunda taşıma altyapı maliyeti yıllık 2000 ton kullanılmış yakıt kabul eden bir kuru depolama tesisi için 135,8 milyon \$ olarak belirlenmiştir (EPRI, 2009). Bu çalışmada hesaplanan yıllık kullanılmış yakıt miktarı 89,85 tondur. Bu durumda altyapı için yapılacak harcama 6,1 milyon \$ olarak öngörülebilir.

İşletme fazı süresince her yıl için çift amaçlı varil tedarikinin bir maliyeti olacaktır. EPRI raporunda günümüzde kullanılan çift amaçlı variller için maliyet 700000 \$ olarak verilmiştir. Ancak, bu değer varilin tasarım özelliklerine göre büyük oranda değişecektir. Bu nedenle, ilk olarak maliyet analizinde varil birim maliyeti 700000 \$ olarak alınmış ve farklı değerler için duyarlılık analizi yapılmıştır. Her faz için belirlenen ve maliyet analizlerinde kullanılan harcama bileşenleri Çizelge 5' de özetlenmiştir.

Çizelge 5. Tesis fazlarının maliyeti

Faz	Harcama bileşeni	Maliyet (2019 yılı doları)
Kurulum öncesi	Mühendislik, lisanslama	51,8 milyon
Kurulum	Beton depolama varili tabanı	7,5 milyon
	Taşıma altyapısı	6,1milyon
İşletme (yıllık)	Çift amaçlı depolama varili	6,53 milyon

Çizelge 1' de her bir faz için verilen maliyet bileşenleri ve % 5 yıllık faiz oranı kullanılarak Senaryo 1 ve 2 için tesisin net şimdiki değeri hesaplanmıştır. Elde edilen net şimdiki değer tesis işletme ömrü ile birlikte değerlendirilerek tesis için seviyelendirilmiş birim maliyet hesaplanmıştır.

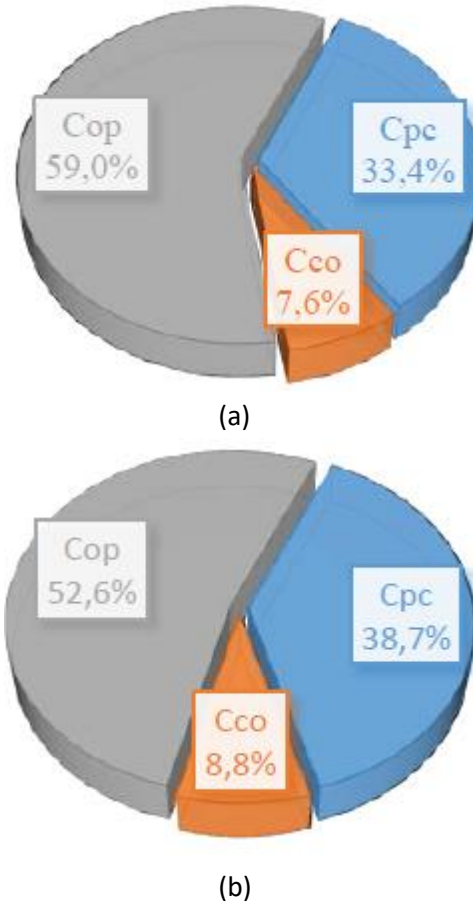
3. Bulgular

S1 ve S2 depolama senaryoları için tesis maliyetinin NPV ve LUC değerleri Çizelge 6' da verildiği gibi hesaplanmıştır. Depolama tesisinde S1 senaryosunun uygulanması durumunda tesis maliyetinin net şimdiki değeri S2 senaryosunun uygulandığı durumdaki maliyetten % 20 daha fazladır.

Çizelge 6. S1 ve S2 senaryoları için kuru depolama maliyeti

Senaryo	NPV (Milyon \$)	LUC (\$/kg-HM)
S1	133,95	123,21
S2	115,71	138,35

S1 ve S2 senaryoları için kurulum öncesi, kurulum ve işletme fazlarının tesisin toplam maliyetindeki payları Şekil 7' de gösterilmiştir.



Şekil 7. Depolama maliyetinin net şimdiki değeri (a) Senaryo 1 ve (b) Senaryo 2

Her iki depolama senaryosunda da en büyük harcama bileşeni tesis maliyetinin yarısından fazlasını oluşturan işletme fazı giderleridir. S2 senaryosunun uygulanması durumunda işletme giderleri S1 senaryosuna göre % 10 azalmaktadır.

Bunun nedeni, S2 senaryosunda kullanılmış yakıtların havuzda 5 yıl yerine 10 yıl bekletilmesinin tesisin yaşam döngüsü boyunca depolanacak kullanılmış yakıt miktarını ve depolama varili sayısını azaltmasıdır. Kurulum fazında yapılacak harcamalar toplam maliyetin yaklaşık 1/10' ini oluşturmaktadır. Kullanılmış yakıtların depolanacağı varillerin işletme sırasında yıllık olarak tedarik edilmesi ve depolama tesisinin nükleer santral sahasında yer alması kurulum fazındaki harcamaların tesis maliyetindeki payını düşürmüştür.

Tesisin seviyelendirilmiş birim maliyeti ise S1 senaryosu için S2 senaryosundan daha düşüktür. Bu durumda, S2 senaryosunun uygulanması halinde nükleer santralden işletme ömrü boyunca çıkarılan kullanılmış yakıtın birim ağırlığının depolanmasının maliyeti artmaktadır.

Maliyet analizinde kullanılan değişkenlerdeki belirsizliklerin NPV ve LUC değerlerine etkisini incelemek amacıyla yıllık faiz oranı ve depolama varili birim maliyeti için duyarlılık analizi yapılarak S1 ve S2 senaryoları karşılaştırılmıştır. Duyarlılık analizinde kullanılan faiz oranı ve depolama varili birim fiyatı değerleri Çizelge 7' de verilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 8' de özetlenmiştir.

Çizelge 7. Duyarlılık analizinde kullanılan değişkenler

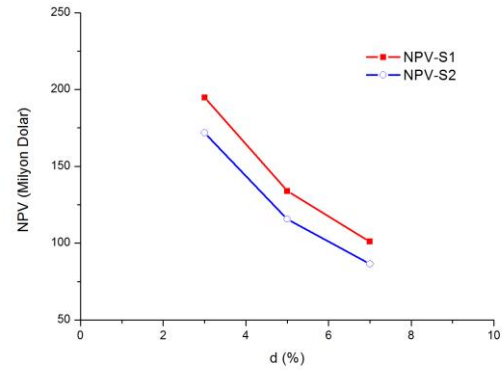
Parametre	Değer		
Faiz oranı (%)	3	5	7
Depolama varili birim fiyatı (\$)	700000	900000	1350000

Çizelge 8. Duyarlılık analizi sonuçları

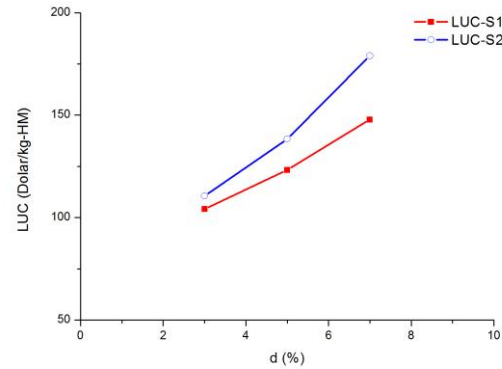
Faiz oranı (%)	Depolama varili fiyatı (\$)	NPV-S1 (Milyon \$)	NPV-S2 (Milyon \$)	LUC-S1 (\$/kg-HM)	LUC-S2 (\$/kg-HM)
3	700000	194,83	171,90	104,14	110,51
5	700000	133,94	115,71	123,21	138,35
7	700000	101,06	86,48	147,82	178,97
3	900000	233,70	204,21	124,92	131,29
5	900000	156,52	133,09	143,99	159,13
7	900000	115,26	96,53	168,60	199,75
3	1350000	321,15	276,92	171,66	178,03
5	1350000	207,35	172,18	190,73	205,87
7	1350000	147,21	119,12	215,34	246,49

S1 ve S2 senaryolarının uygulanması durumunda yıllık faiz oranındaki değişimin tesisin NPV ve LUC değerine etkisini gözlemlemek amacıyla depolama varili birim fiyatının 700000 \$ olduğu varsayılarak

maliyet analizleri yapılmıştır. Yıllık faiz oranındaki değişimin her iki depolama senaryosu için tesis maliyetinin NPV değerine etkisi Şekil 8' de, LUC değerine etkisi Şekil 9' da gösterilmektedir.



Şekil 8. Tesisin NPV değerinin faiz oranı ile değişimi

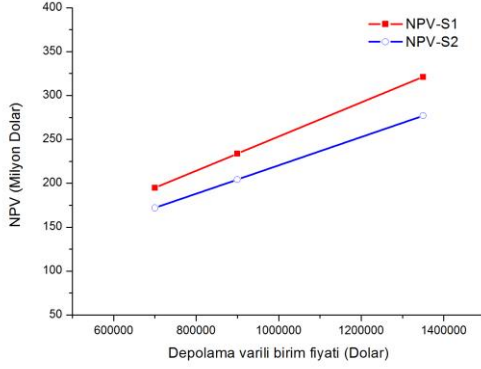


Şekil 9. Tesisin LUC değerinin faiz oranı ile değişimi

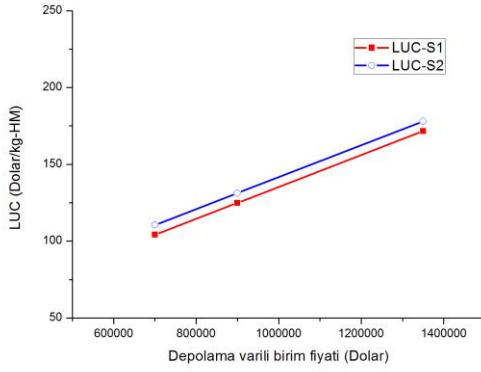
Şekil 8' de artan yıllık faiz oranlarıyla tesisin net şimdiki değerinin her iki senaryo için aynı oranlarda düştüğü görülmektedir. Tesis maliyetinin net şimdiki değerinin artan faiz oranlarıyla azalmasının nedeni gelecekte yapılacak harcamaların referans tarihe (2019) indirgenerek önceden yapılacağı kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 9' da faiz oranındaki artışın her iki senaryo için seviyelendirilmiş birim maliyeti artırdığı gözlemlenmektedir. Ancak, maliyetin artış oranı S1 senaryosu için daha fazladır.

S1 ve S2 senaryolarının uygulanması durumunda depolama varili birim fiyatındaki değişimin tesisin NPV ve LUC değerine etkisini gözlemlemek amacıyla yıllık faiz oranının % 3 olduğu varsayılarak maliyet analizleri yapılmıştır. Depolama varili birim maliyetindeki değişimin her iki depolama senaryosu

için tesis maliyetinin NPV değerine etkisi Şekil 10' da, LUC değerine etkisi Şekil 11' de gösterilmektedir.



Şekil 10. Tesisin NPV değerinin depolama varili birim fiyatı ile değişimi



Şekil 11. Tesisin LUC değerinin depolama varili birim fiyatı ile değişimi

Şekil 10 ve 11' de görüldüğü üzere tesis maliyetinin net şimdiki değeri ve seviyelendirilmiş birim maliyet her iki senaryo için artan depolama varili birim fiyatı ile artmaktadır. Bu durumda, depolama varili birim fiyatının kuru depolama tesisinin maliyetini belirleyici bir unsur olduğu düşünülebilir.

4. Sonuçlar

Günümüzde nükleer santrallerin işletilmesi sırasında oluşan kullanılmış yakıtların güvenli yönetimi için henüz genel kabul görmüş bir yöntem bulunmamaktadır. Nükleer güç programına sahip ülkeler tarafından uzun süre depolama ve kullanılmış yakıtın yeniden işlenmesi gibi farklı yaklaşımlar uygulanmaktadır. Kullanılmış yakıtların uzun süre depolanmasında havuzda bekletme ve kuru depolama gibi seçenekler söz konusudur. Bununla birlikte, kuru depolamada kullanılabilecek

birçok depolama varili ve tesis bileşeni seçeneği mevcuttur.

Bu çalışmada, dört adet VVER-1200 tipi reaktör ünitesi içeren bir nükleer güç santralinin işletilmesi sırasında oluşacak kullanılmış yakıtlar için bir kuru depolama tesisi modeli geliştirilmiştir. Tesiste kullanılacak depolama varili modeli ve tesis bileşenleri belirlenmiştir. Nükleer santralden alınan kullanılmış yakıtların mümkün olan en kısa ve en uzun süre olmak üzere kullanılmış yakıt havuzunda bekletilerek kuru depolamaya gönderildiği iki farklı senaryonun (S1 ve S2) uygulanması durumunda tesisin yaşam döngüsü maliyet analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kullanılmış yakıtların en kısa zamanda kuru depolamaya gönderildiği S1 senaryosunun uygulanması durumunda tesisin maliyetinin net şimdiki değerinin S2 senaryosundan daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ancak, tesiste yapılacak depolamanın seviyelendirilmiş birim maliyetine bakıldığında, kullanılmış yakıtların mümkün olan en uzun süre havuzda bekletildikten sonra kuru depolamaya gönderildiği S2 senaryosunda maliyetin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumda, S2 senaryosu uygulandığında kullanılmış yakıtların birim ağırlığını depolamanın maliyeti artacaktır.

Çalışmada ayrıca, tesis maliyetini etkileyen önemli parametreler için duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, depolama varili birim fiyatının tesis maliyetinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, ileriki çalışmalarda farklı depolama varili modelleri kullanılarak tesis büyüklüğü ve özellikleri belirlenebilir ve maliyet karşılaştırması yapılarak söz konusu kullanılmış yakıt envanteri için en uygun kuru depolama modeli belirlenebilir.

5. Kaynaklar

- Al Saadi S. and Yi Y., 2015. Dry storage of spent nuclear fuel in UAE-Economic aspect. *Annals of Nuclear Energy*, **75**, 527-535.
- Cho C., Kim T., Seong K., Kim H. and Yoon J., 2011. Cost comparisons of wet and dry interim storage

facilities for PWR spent nuclear fuel in Korea. *Annals of Nuclear Energy*, **38**, 976-981.

EPRI (Electric Power Research Institute), 2009. Cost Estimate for an Away-From-Reactor Generic Interim Storage Facility (GISF) for Spent Nuclear Fuel, California, USA, 54.

EPRI (Electric Power Research Institute), 2010. Industry Spent Fuel Storage Handbook, California, USA, 156.

IAEA (International Atomic Energy Agency), 2009. Costing of Spent Nuclear Fuel Storage, Nuclear Energy Series Technical Reports, Vienna, Austria, 85.

IAEA (International Atomic Energy Agency), 2011. Status report 108 - VVER-1200 (V-491) (VVER-1200 (V-491)), Vienna, Austria, 32.

Makarchuk T., 2015. Experience of Cask Technology for SNF Management. IAEA International Conference on the Management of Spent Fuel in Nuclear Power Reactors, Vienna, Austria.

Nagano K., 2003. System analysis of spent fuel management in Japan (II)-methodologies for economic analysis of spent fuel storage. *Journal of Nuclear Science and Technology*, **40 (4)**, 182–191.

OECD-NEA (Organization for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency), 1994. The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, Paris, France, 175.

Rahayu D., Purwanto Y. and Salimin Z., 2018. Design of dry cask storage for Serpong multipurpose reactor spent nuclear fuel. *Urania*, **24 (1)**, 61-72.

USNRC, 2001. Final Environmental Impact Statement for the Construction and Operation of an Independent Spent Fuel Storage Installation on the Reservation of the Skull Valley Band of Goshute Indians and the Related Transportation Facility in Tooele County (NUREG-1714), 910.

İnternet Kaynakları

World Nuclear News, Second Novovoronezh II unit enters commercial operation. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Second-Novovoronezh-II-unit-enters-commercial-operation>. Yayın tarihi: Kasım, 1, 2019, Erişim tarihi: Mart 31, 2020

USNRC, Typical Dry Cask Storage System. <https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/diagram-typical-dry-cask-system>. Yayın tarihi: Ağustos 9, 2017, Erişim tarihi: Haziran 7, 2018

<http://io.ua/13415586.ТВЕЛьизготовл.изциркония>: Erişim tarihi: 10 Ekim, 2015

Rosatom Newsletter, New TUK Cask Licensed to Transport Nuclear Waste, <http://rosatomnewsletter.com/2017/07/28/new-tuk-flask-licensed-to-transport-nuclear-waste>. Yayın tarihi: Haziran 3, 2017, Erişim tarihi: Mayıs 5, 2019

USNRC, Spent Fuel Storage in Pools and Dry Casks. <https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/faqs>. Yayın tarihi: Ağustos 9, 2017, Erişim tarihi: Mayıs 5, 2019