

**KULLANILMIŞ NÜKLEER YAKITIN YATAY JEOLJİK
BERTARAFININ ISIL ANALİZLERİ**

**THERMAL ANALYSIS OF HORIZONTAL GEOLOGICAL
DISPOSAL OF SPENT NUCLEAR FUEL**

GÜREL ÖZEŞME

Dr. Öğr. Üyesi BANU BULUT ACAR

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

Yüksek Lisans TEZİ

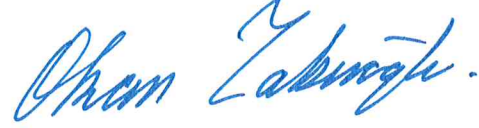
Olarak Hazırlanmıştır.

2019

GÜREL ÖZEŞME'nin hazırladığı "Kullanılmış Nükleer Yakıtın Yatay Jeolojik Bertarafının Isıl Analizleri" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. H. Okan ZABUNOĞLU

Başkan



Dr. Öğr. Üyesi Banu Bulut ACAR

Danışman



Prof. Dr. S. Sinan KESKİN

Üye



Doç. Dr. Şule ERGÜN

Üye



Dr. Öğr. Üyesi Ebru Saraloğlu GÜLER

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak / /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, ve
- Bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

Beyan ederim.

21 / 06 / 2019



Gürel ÖZEŞME

YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim...

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

..21 / 06 / 2019

(İmza)
Gürel ÖZEŞME

ÖZET

KULLANILMIŞ NÜKLEER YAKITIN YATAY JEOLJİK BERTARAFININ ISIL ANALİZLERİ

Gürel ÖZEŞME

Yüksek Lisans, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üye. Banu BULUT ACAR
(Haziran 2019)

Kullanılmış yakıtların ve yüksek aktiviteli radyoaktif atıkların bertarafı için en çok kabul gören yöntem jeolojik bertaraftır. Günümüzde bir çok ülkede jeolojik bertaraf tasarımları geliştirilmektedir ve bu tasarımlar radyoaktif atıkların yerleştirildiği kapların geometrisi ve malzemesi, jeolojik bertarafın gerçekleşeceği kayaç yapısı ve atık kaplarının yerleşimine (yatay ya da dikey) bağlı olarak farklılıklar göstermektedir.

Tesis tasarımını ve atık bertaraf yoğunluğunu (birim alan başına bertaraf edilebilecek radyoaktif atık miktarı) belirleyici en önemli etkenlerden biri jeolojik bertaraf tesisinin bileşenlerinin ısıl davranışıdır. Tesisin ısıl yükünü ise kullanılmış yakıt özellikleri, atık kabı tasarımı ve jeolojik yapının ısıl özellikleri birlikte belirlemektedir.

Bu çalışmada yeni nesil reaktörlerden VVER – 1200 ve ATMEA1 kullanılmış yakıtlarının granit kayaçta yatay jeolojik bertarafı için atık kabı tasarımları yapılmıştır. Kullanılmış yakıt özellikleri (miktar, radyonüklit içeriği ve bozunum ısısı) MONTEBURNS yanma kodu

kullanılarak belirlenmiştir. Tasarlanan atık kaplarının yatay bertaraf tesisine yerleştirilmesi durumunda tesis bileşenleri için ANSYS 19.2 sonlu elemanlar kodu ile ısı analizler gerçekleştirilmiş ve ısı limitleri kullanılarak atık bertaraf yoğunluğu belirlenmiştir. Farklı sayılarda (4, 5 ve 6 adet) ve farklı ön soğutma sürelerine (40, 50, 60 ve 70 yıl) sahip kullanılmış yakıt demeti içeren atık kapları için ısı analizleri yapılmış ve bertaraf yoğunluğu üzerine etkileri incelenmiştir. Atık bertaraf yoğunluğu açısından en uygun tasarım belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kullanılmış yakıt, yatay jeolojik bertaraf, Monteburns, ANSYS

ABSTRACT

THERMAL ANALYSIS OF HORIZONTAL GEOLOGICAL DISPOSAL OF SPENT NUCLEAR FUEL

Gürel ÖZEŞME

Master of Science, Department of Nuclear Engineering

Supervisor: Assistant Prof. Dr. Banu BULUT ACAR

(June 2019)

Geological disposal is the most accepted method for permanent disposal of spent nuclear fuel and high-level waste. There are various geological disposal concepts under development in many countries and these concepts have differences mainly in the geometry and material of disposal canisters, geological formations of host rock and orientation (vertical and horizontal) of disposal canisters.

Thermal behavior of disposal facility components is an important determinant of repository design and waste disposal density (the amount of radioactive waste that can be safely emplaced per unit area of the geological repository). Thermal load of the geological repository strictly depends spent fuel characteristics (amount, isotopic composition, heat generation), disposal canister model and the thermal features of the host rock.

In this study, canisters loaded with spent fuel assemblies discharged from VVER – 1200 and ATMEA1 reactors and disposed horizontally in the granitic rock are modeled. Spent fuel characteristics are evaluated by using the MONTEBURNS 2.0 code. The ANSYS

finite element code is utilized to generate a thermal model of horizontal repository and determine waste disposal densities through thermal analysis by taking into account the thermal constraints. Thermal analysis is repeated for disposal canisters loaded with a various number of spent fuel assemblies (4, 5, 6 assemblies) and with assemblies pre-cooled for various periods (40, 50, 60 and 70 years) in order to assess the impact to waste disposal densities. Most favorable canister model with regard to disposal density is determined.

Key Words: Spent fuel, horizontal geological disposal, Monteburns, ANSYS

TEŞEKKÜR

İlk olarak danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Banu Bulut ACAR'a tez çalışmalarım boyunca olur olmaz bütün sorularıma ve itirazlarıma gösterdiği büyük sabır ve sonrasında gelen rehberliği için,

Tez çalışmalarım sırasında beni imkanlar dahilinde her zaman destekleyen Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü Başkanı Sayın Prof. Dr. Cemil KOCAR'a, Bilgi ve deneyimleri ile çalışmalarımı ışık tutan hocalarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Erol ÇUBUKÇU, Sayın Nilay ÇUBUKÇU, Sayın Doç. Dr. Şule ERGÜN'e ve Sayın Prof. Dr. C. Niyazi SÖKMEN'e,

Tez değerlendirme komitemde bulunan, Sayın Prof. Dr. Okan ZABUNOĞLU'na, Prof. Dr. S. Sinan KESKİN'e, Dr. Öğr. Üyesi Ebru Saraloğlu GÜLER'e değerlendirmeleri ve görüşleri için,

Teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında bana ellerinden gelen her türlü desteği sağlayan Aileme ve Yakınlarıma,

Öğretim kurumunun aynı zamanda bir aile olabileceğini gösteren Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Ailesi'ne,

Çözümlere ihtiyaç duyduğumda bilgi ve birikimleri ile aynı zamanda tecrübelerini de paylaşmaktan çekinmeyen Dr. Araş. Gör. Osman Şahin ÇELİKTEN'e ve Dr. Araş. Gör. Mehmet TÜRKMEN'e,

Bana ortada hiç bir zaman sorun olmadığını, sadece çözümler olduğunu hatırlatan Hasan Tolga ADA'ya ve hayatın sadece rakamlardan ibaret olmadığı gösteren Mert ÖZTÜRK'e,

Çalışmalarım boyunca teknik desteklerini esirgemeyen FİGES A.Ş Nükleer Mühendislik Birimi'ne ve NUMESYS A.Ş. 'ye,

Özel Teşekkürlerimi Sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı ve İçeriği.....	1
1.2. Jeolojik Bertaraf	2
1.3. Literatür Özeti	4
2. KULLANILMIŞ NÜKLEER YAKIT ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ	7
2.1. KNY Özellikleri Belirlenen Reaktör Tipleri.....	8
2.1.1. VVER – 1200 Güç Reaktörü.....	8
2.1.2. ATMEA1 Güç Reaktörü	9
2.2. KNY Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Hesaplama Gereçleri ve Yöntem	11
2.2.1. Hesaplama Gereçleri.....	11
2.2.1.1. MCNP 5.0	11
2.2.1.2. MONTEBURNS 2.0	12
2.2.1.3. ORIGEN2.....	14
2.2.2. Hesaplama Yöntemleri	14
2.2.2.1. Birim Hücre Yaklaşımı	14
2.2.2.2. Bozunum Isısı Eğrilerinin Türetilmesi.....	18
3. ISIL ANALİZLER.....	21
3.1. Referans Jeolojik Bertaraf Tesisi Tasarımı	21
3.1.1. Atık Paketleri	24
3.1.2. Bentonit Katman.....	24

3.1.3. Dolgu Malzemesi.....	24
3.1.4. Jeolojik Yapı	24
3.2. Isıl Analizlerde Kullanılan Hesaplama Gereçleri ve Yöntem	25
3.2.1. ANSYS 19.2	25
3.2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi	25
3.2.3. Referans Alınan Atık Kabı Tasarımın Modellenmesi	27
3.2.3.1. Isıl Model	27
3.2.3.2. Geometrinin oluşturulması	27
3.2.3.3. Sistemin için Simetri Sınır Şartlarının Tanımlanması	31
3.2.3.4. Sistemin Malzeme Bilgilerinin Sağlanması	33
3.2.3.5. Çözüm için Gerekli Ağ Yapısının Oluşturulması	34
3.2.3.6. Çözüm için İhtiyaç Duyulan Başlangıç Sıcaklık Koşulları ve Isıl Yük Değerinin Hesaplanması	36
3.2.3.7. ANSYS Programından Sağlanan Bilgiler ve Değerlendirilmesi	36
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	38
4.1. MONTEBURNS Analiz Sonuçları	38
4.2. ANSYS Analiz Sonuçları.....	40
4.2.1. Elde Edilen Sıcaklık Verilerinin Değerlendirilmesi	48
4.2.2. Bertaraf Yoğunluğunun Hesaplanması.....	52
4.3. Tartışma.....	53
4.4. Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar	54
5. EKLER.....	56
5.1. EK – 1	56
5.2. EK – 2.....	58
6. KAYNAKÇA.....	59

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. VVER – 1200 Güç Reaktörü Tasarım Parametreleri	9
Çizelge 2.2. ATMEA1 Güç Reaktörü Tasarım Parametreleri	10
Çizelge 2.3. MCNP Giriş Dosyasında Tanıtılan Malzemeler ve Kompozisyonlarının Ağırlık Oranları	15
Çizelge 2.4. VVER – 1200 ve ATMEA1 KNY Radyoizotop İçeriği	19
Çizelge 3.1. ANSYS Modelinde Kullanılan Malzemelerin Termo – Fiziksel Özellikleri. .	34
Çizelge 4.1. Birim Hücre Modeli Oluşturulan Reaktörler için Yanma Oranı Değerleri ve Hata Karşılaştırması.....	38
Çizelge 4.2. Atık Kabı Merkezi Sıcaklık Değerleri (°C)	41
Çizelge 4.3. Atık Kabı Dış Yüzey Sıcaklık Değerleri (°C)	42
Çizelge 4.4. Bentonit Katman Dış Yüzey Sıcaklık Değerleri (°C)	43
Çizelge 4.5. Farklı Sıcaklık Limitleri için Atık Kapları Arası Minimum Uzaklık Değerleri	47
Çizelge 4.6. 80 °C Sıcaklık Limiti için Elde Edilen Sonuçların Test Sonuçları	48
Çizelge 4.7. Atık Kapları Arası Minimum Uzaklık Hesaplanan Senaryolar için Bertaraf Yoğunluğu Değerleri.....	53

ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Çoklu Bariyer Sistemi'nin Şematik Gösterimi [3].....	3
Şekil 2.1. Bertaraf Yoğunluğunun Hesaplanması Süreci için Akış Şeması.....	7
Şekil 2.2. VVER – 1200 Yakıt Demetlerinin Yukarıdan Bakıldığında Temsili Görüntüsü	8
Şekil 2.3. ATMEA1 Yakıt Demetlerinin Yukarıdan Bakıldığında Temsili Görüntüsü.....	11
Şekil 2.4. MONTEBURNS Programı Hesaplama Algoritması Genel Akış Şeması.....	13
Şekil 2.5. MCNP Programında Modellenen Birim Hücre Geometrileri.....	15
Şekil 2.6. Birim Hücre Modellerinin Efektif Kritiklik – Yanma Süresi Değişim Grafiği	16
Şekil 2.7. Birim Hücre Modellerinin Efektif Kritiklik Görece Hata – Simülasyonda Kullanılan Parçacık Sayısı Değişim Grafiği	17
Şekil 2.8. Birim Hücre Modeli Oluşturulan Reaktör Modelleri için Isıl Yük Değerinin Zamana Bağlı Değişimi	20
Şekil 3.1. KBS – 3 Jeolojik Bertaraf Tesisi Tasarımı Genel Görünüşü.	22
Şekil 3.2. KBS – 3 Jeolojik Bertaraf Tesisi Atık Kabı Yerleştirme Tünelleri Taslak Yerleşim Planı.	22
Şekil 3.3. KBS – 3 Atık Kabı Konsept Tasarım Gösterimi	23
Şekil 3.4. SEM Modeli için Örnek Ağ Yapısı[37].....	26
Şekil 3.5. VVER – 1200 Reaktörü KNYD'leri için Tasarımlanan Atık Kabı ve Genel Hatlarına Ait Boyut Bilgisi (mm).....	29
Şekil 3.6. ATMEA1 Reaktörü KNYD'leri için Tasarımlanan Atık Kabı ve Genel Hatlarına Ait Boyut Bilgisi (mm)	30
Şekil 3.7. ATMEA1(üstte) ve VVER – 1200(alta) Reaktörlerinin KNYD'leri için Farklı Sayıda KNYD Kapasitesi Gözetilerek Tasarımlanan Atık Kaplarının Yüzey Kesitleri....	31
Şekil 3.8. ANSYS 19.2 Ortamında Tanımlanan Sıcaklık ve Isıl Yük Sınır Koşulları	32

Şekil 3.9. ANSYS 19.2 Ortamında Tanımlanan Simetri Sınır Koşulları	33
Şekil 3.10. Atık Kabı Modeli için Oluşturulan Ağ Yapısının Kesit Görüntüsü.....	35
Şekil 4.1. Bir VVER – 1200 KNYD Başına Düşen Isıl Yük Değeri.....	39
Şekil 4.2. Bir ATMEA1 KNYD Başına Düşen Isıl Yük Değeri	39
Şekil 4.3. 4 KNYD Yerleştirilen Atık Kapları için Atık Kabı Dış Yüzey Sıcaklık – Atık Kapları Arası Mesafe Değişim Grafiği	44
Şekil 4.4. 5 KNYD Yerleştirilen Atık Kapları için Atık Kabı Dış Yüzey Sıcaklık – Atık Kapları Arası Mesafe Değişim Grafiği.	45
Şekil 4.5. 6 KNYD Yerleştirilen Atık Kapları için Atık Kabı Dış Yüzey Sıcaklık – Atık Kapları Arası Mesafe Değişim Grafiği.	46
Şekil 4.6. 4 Adet VVER – 1200 KNY Demeti İçeren Atık Kabı Sıcaklık – Zaman Değişim Grafiği	49
Şekil 4.7. 4 Adet ATMEA1 KNY Demeti İçeren Atık Kabı Sıcaklık – Zaman Değişim Grafiği.....	49
Şekil 4.8. 5 Adet VVER – 1200 KNY Demeti İçeren Atık Kabı Sıcaklık – Zaman Değişim Grafiği.....	50
Şekil 4.9. 5 Adet ATMEA1 KNY Demeti İçeren Atık Kabı Sıcaklık – Zaman Değişim Grafiği.....	50
Şekil 4.10. 6 Adet VVER – 1200 KNY Demeti İçeren Atık Kabı Sıcaklık – Zaman Değişim Grafiği.....	51
Şekil 4.11. 6 Adet ATMEA1 KNY Demeti İçeren Atık Kabı Sıcaklık – Zaman Değişim Grafiği.....	51
Şekil 4.12. Bertaraf Yoğunluğunun Hesaplanmasında Kullanılan Değişkenler	52
Şekil 5.1 40 Yıl Bekletilmiş VVER – 1200 KNYD Atık Kabı Dış Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Atık Kapları Arasındaki Mesafe ile Değişim Grafiği	56
Şekil 5.2 70 Yıl Bekletilmiş ATMEA1 KNYD Atık Kabı Dış Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Atık Kapları Arasındaki Mesafe ile Değişim Grafiği	57

SİMGELER ve KISALTMALAR

Değer	Birim	Simge
Kullanılmış Nükleer Yakıt		KNY
Kullanılmış Nükleer Yakıt Demeti		KNYD
Fisyon Ürünleri		FÜ
Uranyum		U
Plütonyum		Pu
Yüksek Aktiviteli Atık		YAA
Ön-soğutma	Yıl	ÖS
Parçacık Sayısı		PS
Yanma Adımı Sayısı		YS
Toplam Isıl Yük	W	TIY
Yakıt Demeti Sayısı		YDS
Birim Hücre Başına Isıl Yük	W	BHIY
Yakıt Demeti Aktif Yüksekliği	m	H _{aktif}
Demet Başına Yakıt Çubuğu Sayısı		DBYÇS
Global Kapasitans Matrisi		M
Zaman Adımı	s	Δt
Katılık Matrisi		K
Isıl Yük Matrisi		f
Sıcaklık	°C	T
Isıl İletkenlik Katsayısı	W/(m°C)	k
Özgül Isı	J/(kg°C)	C _p
Malzeme Yoğunluğu	kg/m ³	ρ
Isı Üretimi	J/(m ³ .s)	\dot{q}
Dünya Yüzey Sıcaklığı	°C	DYS

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı ve İçeriği

Nükleer güç üretiminde, fisyon tepkimesinin kontrollü olarak sürdürülebilmesi için belli oranlarda fisil ve fertil izotoplar içeren nükleer yakıt kullanılmaktadır. Nükleer yakıt ham maddesinin cevher halinde çıkartılıp işlenmesiyle başlayan ve reaktörden alınan kullanılmış nükleer yakıtın (KNY) bertarafına kadar uygulanan işlemler “nükleer yakıt çevrimi” olarak adlandırılır. Taze nükleer yakıtın üretilmesi ve reaktöre yüklenmesine kadarki adımlar “reaktör öncesi”, reaktörden kullanılmış yakıtın bertarafına kadarki bölüm ise “reaktör sonrası” yakıt çevrimini oluşturmaktadır. Yakıt çevriminin “reaktör öncesi” bölümünde uygulanan yakıt ham maddesinin elde edilmesi, zenginleştirilmesi ve fabrikasyonu işlemleri günümüzde standartlaşmıştır. “Reaktör sonrası” yakıt çevriminde ise reaktörden alınan KNY’ in yönetimi için farklı yaklaşımlar söz konusudur.

“Reaktör sonrası” yakıt çevrimi, tasarlanmış yanma oranlarına ulaşıncaya kadar güç üretimi için kullanılan nükleer yakıtın reaktör korundan alınması ile başlar. Tipik bir hafif sulu reaktör KNY’ ı yaklaşık olarak kütlece %96 uranyum, %1 plütonyum ile fisyon ürünleri ve minör aktinitler içermektedir içermektedir[1]. KNY bu içeriği ile yüksek radyoaktiviteye ve bozunum ısısına sahiptir. Bu nedenle, “reaktör sonrası” çevrimin ilk adımı, uygulanacak diğer işlemler öncesinde KNY’ in genellikle reaktör korunun yakınında yer alan havuzlarda soğutulması ve aktivitesininin azaltılmasıdır. Belli bir soğutma süresi sonrasında KNY, içerdiği değerli uranyum ve plütonyum izotoplarının geri kazanılması ve tekrar yakıt üretiminde kullanılması amacıyla yeniden işlenir veya radyoaktif atık olarak kabul edilerek bertaraf edilir.

KNY ‘ların bertarafında günümüzde önerilen yöntemlerden en çok kabul göreni “jeolojik bertaraf” yöntemidir. Jeolojik bertaraf, KNY demetlerinin uzun yıllar çevreden izole edilmesini sağlayacak şekilde tasarlanmış atık kaplarına yerleştirilmesi ve sismik olarak kararlı jeolojik yapılarda bulunan yeraltı tünellerinde depolanması prensibine dayanmaktadır. Jeolojik bertaraf tesisi tasarımları KNY tipi, atık kabı tasarımları, jeolojik

formasyon ve atık kaplarının yatay veya dikey yerleştirilmesine bağlı olarak değişmektedir.

Bu çalışmada, yeni nesil nükleer reaktörler arasında yer alan VVER – 1200 ve ATMEA1 tipi reaktörlerin KNY' larının yatay bertarafı için ısıl analizler gerçekleştirilmiş ve atık bertaraf yoğunlukları belirlenmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, VVER – 1200 ve ATMEA1 KNY' larının ısıl ve nötronik zellikleri MONTEBURNS 2.0 kodu kullanılarak birim hücre yaklaşımı ile belirlenmiştir. İkinici blmde, yatay jeolojik bertaraf tesisinin üç boyutlu modeli ANSYS ile oluşturulmuş ve ilk blmde elde edilen KNY zellikleri kullanılarak ısıl analizler gerçekleştirilmiştir. Atık kaplarına farklı ön-soğutma sürelerine sahip (30, 40, 50 ve 60 yıl) ve farklı sayılarda KNY demeti (4, 5 ve 6 adet) yüklenmesi durumunda atık bertaraf yoğunluğundaki değişim incelenmiştir.

Bu tez beş blmden oluşmaktadır. Giriş bölümünde tezin içeriği hakkında bilgi verilmiş, jeolojik bertaraf anlatılmış ve literatürde yer alan, bu konuda daha önce yapılmış çalışmalar özetlenmiştir. İkinici blmde, ısıl modelleme için girdi olarak kullanılacak KNY' ların kompozisyonu ve bozunum ısısı hesaplamalarında kullanılan yöntem ve hesaplama gereçleri anlatılmıştır. Dördüncü blmde, ısıl modelleme için kullanılan ANSYS programı tanıtılmış ve oluşturulan ısıl model anlatılmıştır. Beşinci blmde elde edilen ısıl analiz sonuçları ve bertaraf yoğunlukları sunulurak tartişılmıştır.

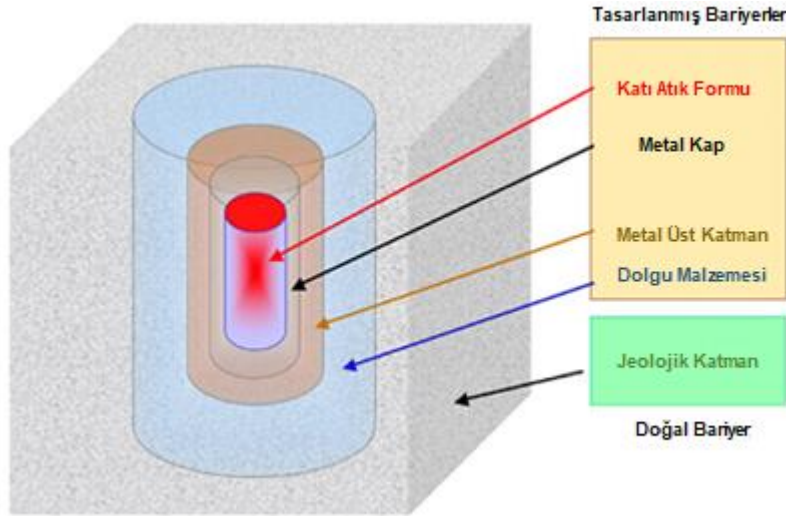
1.2. Jeolojik Bertaraf

KNY yönetiminin son adımı için “jeolojik bertaraf” genel olarak kabul gören bir yöntemdir. Jeolojik bertarafa, KNY' ın metal atık kaplarına yerleştirilerek yer kabuğunda bulunan duraylı jeolojik yapılarda kalıcı ve güvenli olarak izole edilmesi temel alınmıştır.

Jeolojik bertaraf ilk olarak 1950'li yıllarda KNY ve yüksek aktiviteli atıkların (YAA) yönetimi için uygun ve güvenilir bir yöntem olarak önerilmiştir. KNY' ların yer kabuğunun yüzlerce metre altında bertaraf edilmesi ve bu işlem için detaylı bir tasarıma sahip, güvenli bir tesisin inşa edilmesi süreci ilk olarak A.B.D tarafından (Yucca Dağı Projesi) 1950'li yıllarda başlatılmış [2] ve 1987 yılında uygulamaya geçilmiştir. Proje bir süre ilerlemiş olup

daha sonra askıya alınmıştır. Günümüzde aktif bir jeolojik bertaraf tesisi bulunmamaktadır ancak başta İsveç ve Finlandiya olmak üzere Çin, Kanada, Almanya, İsviçre, Fransa, Japonya ve Kore gibi bir çok ülkede jeolojik bertarafa ilişkin çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalar sonucunda, farklı jeolojik yapılarda uygulanabilecek bir çok jeolojik bertaraf tesisi modeli geliştirilmiştir.

Geliştirilen jeolojik bertaraf tasarımları jeolojik yerleşim, atık kabı modelleri, atık türü ve atık kabının tesise yerleştirilme şekline göre farklılık göstermektedir. Ancak bütün jeolojik bertaraf tasarımlarında ana fikir radyoaktif atığın çevreden izolasyonunu ve güvenliğini sağlayabilmek için çoklu bariyer sistemlerinin kullanılmasıdır. Çoklu bariyer sisteminde hem bertarafın yapıldığı kayacın doğal bir bariyer olarak çalışması hem de atık formu ile kayaç arasında tasarlanmış bariyerler kullanılması temel alınır.



Şekil 1.1. Çoklu Bariyer Sistemi'nin Şematik Gösterimi [3].

Jeolojik bertaraf tasarımlarında atığın güvenliği açısından 4 farklı bariyer söz konusudur:

- Kimyasal Bariyer
- Fiziksel Bariyer
- Mühendislik Ürünü (Tasarlanmış) Bariyer
- Jeolojik Bariyer

Çoklu bariyer sisteminde atık formu (kimyasal bariyer), atık kabı (fiziksel bariyer), tasarlanmış bariyerler (bentonit tampon bölgesi ve tünel dolgusu) ve tesisin içinde

bulunduğu kayaç yapısı (jeolojik bariyer) radyonüklitlerin dışarı sızması riskine karşı izolasyon sağlar. Şekil 1.1' de çoklu bariyer sisteminin şematik gösterimi bulunmaktadır. Çoklu bariyer sisteminin temel alındığı, farklı duraylı jeolojik formasyonlarda uygulanabilecek bir çok jeolojik bertaraf tasarımı bulunmaktadır. Bu tasarımlar atığın söz konusu jeolojik yapıya yerleştirilme şekline göre adlandırılmaktadır ve 3 ana sınıfta toplanır: tünel zemininde bertaraf, tünel içinde bertaraf [4], [5] ve çok derin kuyu tipi bertaraf [6], [7].

Tünel zemininde bertaraf, yerkabuğundan 200-1000 m derinlikte paralel tüneller kazılarak tünel zeminde uygun boşluklarla açılan hücrelerde KNY/YAA içeren atık kaplarının yerleştirilmesi ve tünelin dolgu malzemesiyle kapatılarak atığın izole edilmesi temeline dayanır. Tünel içinde bertaraf, tünel zemininde bertaraf ile benzerdir. Ancak, bu tasarımda tünel zemininde sıra halinde uygun aralıklarla açılan hücreler yoktur. YAA doğrudan tünellere yerleştirilmektedir [8], [9].

Tünel zemininde bertaraf, tünel içinde bertarafa kıyasla daha avantajlıdır. Bu metodun en belirgin avantajı atık paketlerinin kayaç içerisinde isteğe bağlı olarak yatay veya dikey olarak depolanabilmesidir. Bu serbestlik tesisin işletimi sırasında atık kaplarını zırlama sağladığı için kolaylık sağlar. Bu tekniğin dezavantajı ise tünellerin sağlayabildiği sınırlı alan dolayısıyla depolama deliklerinin açılması için özel altyapı gereksinimidir[10].

Çok derin kuyu tipi bertarapta YAA' lar 4–6 km gibi çok derin seviyelere yerleştirilir ve radyonüklitlerin yeraltı sularına erişerek biyosfere ulaşması riski büyük oranda azaltılmıştır. Ancak, bu yöntem borosilikat içeren atık formları haricindeki atıklar için yüksek ortam sıcaklığı dolayısıyla uygulamaya müsait değildir[10].

1.3. Literatür Özeti

Jeolojik bertaraf için yapılan araştırma geliştirme çalışmaları tünel açma teknikleri, yeraltı bertaraf tesisi bileşenlerinin tasarımı, bertaraf tünellerinin yapısal dayanıklılığı, radyonüklitlerin tesis bileşenleri ve jeolojik yapı ile kimyasal etkileşimleri gibi bir çok alanı

kapsamaktadır. Bunun sonucu olarak, literatürde kullanılmış yakıtların jeolojik bertarafına ilişkin bir çok çalışma bulunmaktadır.

Çalışmalarda, jeolojik bertaraf için granit kayaç (granit, bütünleşik kaya yapısı veya bazalt), tuz veya kil formasyonlarının uygun olduğu sonucuna varılmıştır. KNY veya YAA içeren atık kaplarının yer kabuğunun derin bölgelerinde (400-500 m civarı ve daha derin [11]) tüneller içerisinde belli uzaklıklarda yerleştirilerek bertaraf edilebileceği görülmüştür. Seçilen jeolojik yapının uzun vadeli bir süreçte (yaklaşık 1000 yıl) sismik stabiliteye sahip olmasının ve gerçekleşebilecek bir kaza veya doğal afet durumunda yüzeyin etkilenmemesi için yeraltı sularından uzak, yeterince derin olarak belirlenmesinin gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmalar sırasında jeolojik bertaraf tesisinin tasarımını belirleyen en önemli faktörlerin atık paketlerinin tesis bileşenleri ile jeokimyasal etkileşimleri ve radyoaktif atığın oluşturduğu ısı yükünün tesis bileşenlerine etkisi olduğu görülmüş, araştırmalar da bu alanda yoğunlaşmıştır. Birçok çalışmada farklı kayaç yapıları ve jeolojik bertaraf tasarımları için ısı analizler yapılmış ve radyonüklit transfer mekanizmaları irdelenmiştir[15],[17].

Jeokimyasal etkileşimle ilgili çalışmalar çoğunlukla bertaraf tesislerinde kullanılan mühendislik bariyerlerinden bentonit ile radyonüklidlerin etkileşiminin (çözünme, birikme, absorbe edilme ve salınma) farklı jeokimyasal durumlarda incelenmesi üzerine yoğunlaşmıştır [12]–[21].

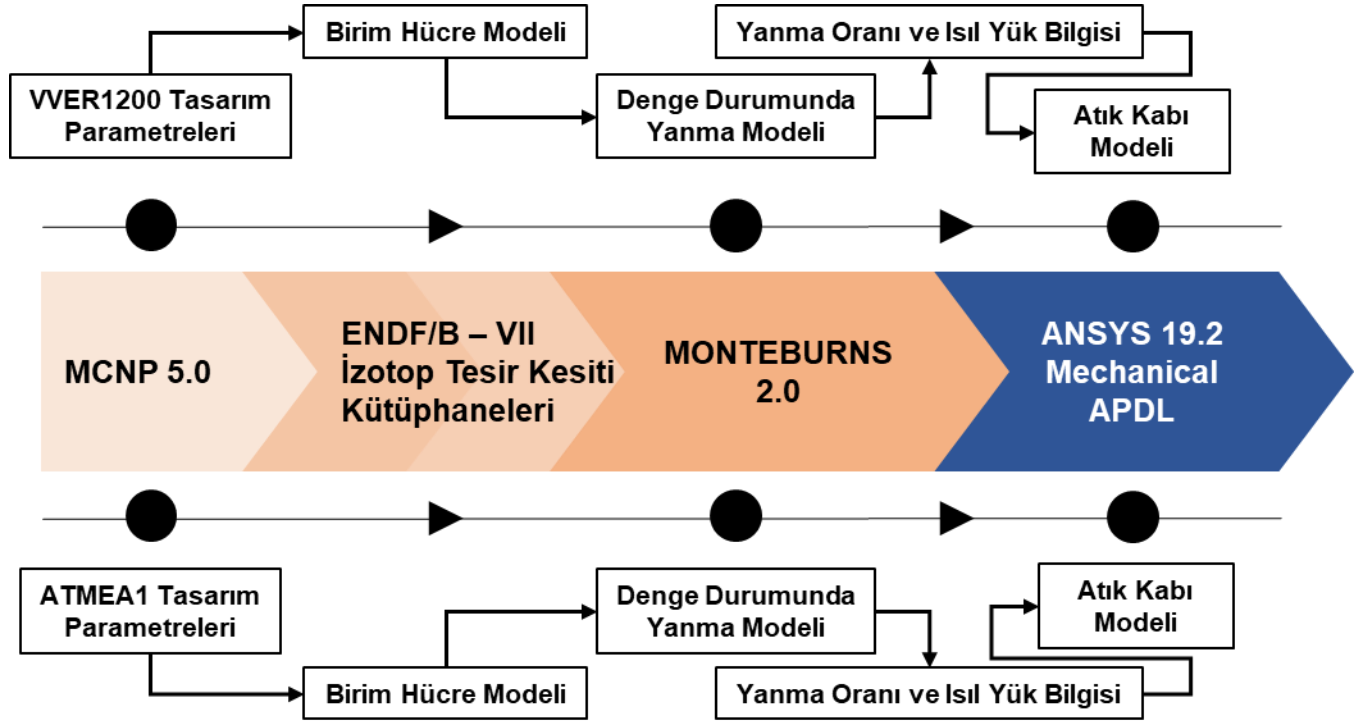
Jeolojik bertaraf tesislerine ilişkin ısı analizler için bulunabilecek en temel ve ilk örneklerden biri Tarandi 'nin çalışmasıdır. Bu çalışmada granit bir jeolojik yapıda modellenen jeolojik bertaraf tesisi yüzeyden 500 m derinlikte, 25 – 60 metre arası tünel uzaklıklarına sahip ve dikey olarak açılmış atık kabı hücreleri arası uzaklık ise 4.3 – 8 m arası olacak şekilde planlanmıştır. Bertaraf hücreleri 4.7 m yüksekliğe sahip atık kapları barındırmaktadır. Her bir atık kabı için başlangıçtaki ısı yük 850 W olarak belirlenmiş olup bu ısı yük zamanla eksponansiyel olarak azalacak şekilde model oluşturulmuştur. Isı

transferi mekanizmasının sadece “iletim” olacağı kabul edilmiş olup yüzeyden jeolojik bertaraf tesisi merkezine doğru sıcaklık değişimi değeri tek boyutlu olarak çıkartılmıştır [22]. Takip eden başka bir çalışmada aynı geometri için parametreler 20 – 30 m arası tünel uzaklıkları ve 3 – 6.2 m hücreler arası boşluklar olarak seçilmiş ve ısı yük 1066 W seviyesindeyken (SKB -91 bertaraf modelinin özellikleri) hesaplamalar sonlu elemanlar metodu kullanılarak, iletim modu ile ısı transferi çözümlenerek tekrar edilmiştir. Bulgular, Tarandi’ nin çalışmasıyla örtüşmekte olup yeni atık kabı modeli kullanılarak bilgiler güncellenmiştir. Benzer atık kabı modelleri ve jeolojik kayaç ısı özelliklerinin kullanıldığı çalışmalarda bu modellemeler daha sonra üç boyutlu olarak tekrarlanmıştır[23], [24].

İsveç Nükleer Yakıt ve Atık Şirketi tarafından geliştirilen KBS-3 jeolojik bertaraf tesisi tasarımı, kullanılacak atık kabı modeli ve yerleşimi açısından ilk olgun tasarımlardan biridir [3], [25]. Bu tasarım daha sonra yatay (KBS – 3H) ve dikey (KBS – 3V) olarak genişletilmiştir. Bahsedilen iki tasarım arasındaki ana fark jeolojik bertaraf için kullanılan atık kaplarının yeraltındaki tesise depolanırken dikey veya yatay konumlanmasıdır [26]. Bu tez çalışmasında atık kaplarının bertaraf tesisi içerisinde paralel açılmış tüneller boyunca yatay ve ardışık olarak yerleşimi esas alınmıştır. İsveç Nükleer Yakıt ve Atık Yönetimi tarafından geliştirilen KBS-3H [26] tasarımın parametreleri kullanılmış ve tesiste kullanılan atık kabı[27] günümüz basınçlı su reaktörü tasarımlarından VVER – 1200 ve ATMEA1 reaktörlerinin yakıt demetlerine uyarlanmıştır. Bertaraf tesisinin ısı analizleri yapılmış ve geliştirilen atık kaplarının kullanılması durumunda atık bertaraf yoğunluğunun ne olacağı hesaplanmıştır.

2. KULLANILMIŞ NÜKLEER YAKIT ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu çalışmada, yeni nesil nükleer reaktörler arasında yer alan VVER – 1200 ve ATMEA1 tipi reaktörlerin KNY' larının yatay bertarafı için ısı analizler gerçekleştirilmiş ve atık bertaraf yoğunlukları belirlenmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, VVER – 1200 ve ATMEA1 KNY' larının ısı ve nötronik özellikleri MONTEBURNS kodu kullanılarak birim hücre yaklaşımı ile belirlenmiştir. İkinci bölümde, yatay jeolojik bertaraf tesisinin üç boyutlu modeli ANSYS ile oluşturulmuş ve ilk bölümde elde edilen KNY özellikleri kullanılarak ısı analizler gerçekleştirilmiştir. Atık kaplarına farklı ÖN-SOĞUTMA sürelerine sahip (40, 50 ve 60 yıl) ve farklı sayılarda KNY demeti (4, 5 ve 6 adet) yüklenmesi durumunda atık bertaraf yoğunluğundaki değişim incelenmiştir. ATMEA1 ve VVER – 1200 KNY bertaraf yoğunluklarının hesaplanmasında kullanılan yöntem ve programları özetleyen akış şeması Şekil 2.1' de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Bertaraf Yoğunluğunun Hesaplanması Süreci için Akış Şeması.

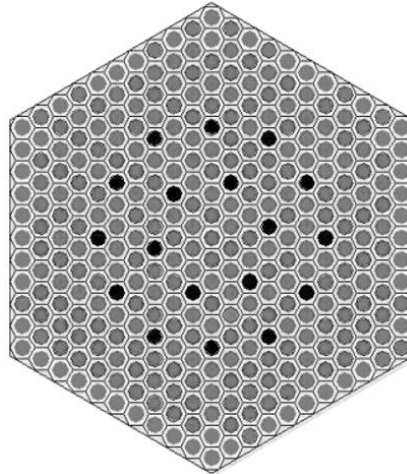
Tezin bu bölümünde, ATMEA1 ve VVER – 1200 tipi reaktörler tanıtılmış; KNY ısı ve nötronik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan hesaplama yöntemi ve gereçleri ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

2.1. KNY Özellikleri Belirlenen Reaktör Tipleri

2.1.1. VVER – 1200 Güç Reaktörü

VVER – 1200 reaktör modeli menşei Rusya Federasyonu olan Atomenergoproekt şirketi tarafından geliştirilmiş bir 3+ nesil reaktör modelidir. Bazı kaynaklarda “V-491” kod numarası ile de anılır. Rus tipi basınçlı su reaktörü olan VVER-1000 tasarımının yeni güvenlik sistemleri eklenerek ve yakıt yüksekliği artırılarak (reaktör kalbinin hacmi genişletilerek) geliştirilen türevi olduğu söylenebilir. VVER – 1200 3300 MW ısı güce sahiptir ve reaktör ömrü 60 yıl olarak tasarlanmıştır. Teorik olarak 70 GW-gün/ton maksimum yanma oranına çıkabilmekle birlikte reaktör için denge durumunda 18 aylık yakıt döngüsü süreçleri ile ortalama 55 GW-gün/ton değerlerinde bir yanma oranı elde edilmesi beklenmektedir.

Reaktör kalbi 163 adet yakıt demeti içermektedir. Her bir yakıt demeti Şekil 2.2’de gösterildiği gibi altıgen geometriye sahiptir. 312 adet yakıt çubuğu ve 18 adet kontrol çubuğu içermektedir [28].



Şekil 2.2. VVER – 1200 Yakıt Demetlerinin Yukarıdan Bakıldığında Temsili Görüntüsü.

VVER – 1200 KNY özelliklerinin belirlenmesi için oluşturulan MONTEBURNS 2.0 modelinde Çizelge 2.1’ de yer alan tasarım parametreleri kullanılmıştır [28], [29].

Çizelge 2.1. VVER – 1200 Güç Reaktörü Tasarım Parametreleri.

Parametre	Değer
Reaktör Nominal Güç Değeri (MW-th)	3300
Reaktör Hedef Emre Amadeliliği (%)	90
Nominal Yakıtın Kor İçerisinde Kalma Süresi (yıl)	3 – 4.5
Bir Yakıt Döngüsü uzunluğu (yıl)	1,5
Yakıt Demeti Yüksekliği (m)	4.57
Reaktör İçerisindeki Yakıt Demeti Sayısı	163
Yakıt Demetlerinin Merkezleri Arasındaki Uzaklık (m)	0.236
İki Yakıt Demeti Arasındaki Boşluk (m)	0.002
Yakıt Demeti İçerisindeki Yakıt Çubuğu Sayısı	312
Yakıt Demeti İçerisindeki Yakıt Bulunan Uzunluk (m)	3.73
Denge Yakıt Çevrimindeki Yakıt Zenginliği (ağırlıkça %)	4.775
Denge Yakıt Çevrimi Yanma Oranı (Beklenen/Maksimum) (GWd/t)	55/70
Yakıt Çubuğu Merkezleri Arasındaki Uzaklık (m)	0.01275
Yakıt Çubuğu Dış Yarıçapı (m)	0.00455
Yakıt Peleti Boşluk Yarıçapı (m)	0.00390
Yakıt Peleti Yarıçapı (m)	0.00380
Yakıt Peleti Merkez Boşluğu Yarıçapı (m)	0.00006
Yakıt Peleti Yoğunluğu (g/cm ³)	~10.40
Zarf Malzemesi	E – 110 Alaşım
Zarf Malzemesi Yoğunluğu (g/cm ³)	~6.54

2.1.2. ATMEA1 Güç Reaktörü

ATMEA1 reaktör modeli Fransa menşeli AREVA ve Japon menşeli MHI (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd) ortaklığında geliştirilen yeni nesil bir reaktör modelidir. Reaktörün tasarımı EPR (European Pressurized Reactor) tasarımı ile çok benzerlik göstermektedir. Teorik olarak maksimum 60 GW-gün/ton yanma oranına çıkabilmekle birlikte reaktörün

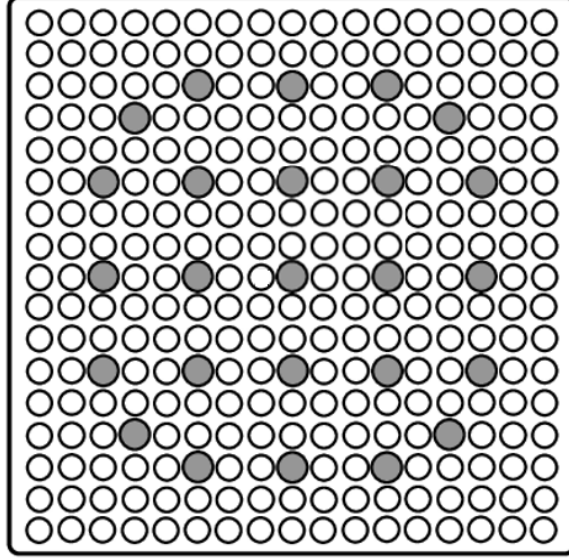
denge durumunda 18 aylık yakıt döngüsü süreçleri ile ortalama 55 MW-gün/ton yanma oranı elde edilmesi beklenmektedir.

Reaktör kalbi 157 adet, her biri 312 adet yakıt çubuğu içeren ve 17x17 çubuk dizilimine sahip Şekil 2.3' de gösterilen yakıt demetlerinden oluşmaktadır[30].

ATMEA1 KNY özelliklerinin belirlenmesi için oluşturulan MONTEBURNS 2.0 modelinde Çizelge 2.2.' de yer alan teknik parametreler kullanılmıştır [30], [31], [32], [33].

Çizelge 2.2. ATMEA1 Güç Reaktörü Tasarım Parametreleri.

Parametre	Değer
Reaktör Nominal Güç Değeri (MW-th)	3150
Reaktör Hedef Emre Amadeliliği (%)	92
Nominal Yakıtın Kor İçerisinde Kalma Süresi (yıl)	3 – 4.5
Bir Yakıt Döngüsü uzunluğu (yıl)	1,5
Yakıt Demeti Yüksekliği (m)	4.80
Reaktör İçerisindeki Yakıt Demeti Sayısı	157
Yakıt Demetlerinin Merkezleri Arasındaki Uzaklık (m)	0.21405
İki Yakıt Demeti Arasındaki Boşluk (m)	0.00205
Yakıt Demeti İçerisindeki Yakıt Çubuğu Sayısı	265
Yakıt Demeti İçerisindeki Yakıt Bulunan Uzunluk (m)	4.2
Denge Yakıt Çevrimindeki Yakıt Zenginliği (ağırlıkça %)	5.0
Denge Yakıt Çevrimi Yanma Oranı (Beklenen/Maksimum) (GWd/t)	55/65
Yakıt Çubuğu Merkezleri Arasındaki Uzaklık (m)	0.012600
Yakıt Çubuğu Dış Yarıçapı (m)	0.004750
Yakıt Peleti Boşluk Yarıçapı (m)	0.004280
Yakıt Peleti Yarıçapı (m)	0.004095
Yakıt Peleti Yoğunluğu (g/cm ³)	~10.45
Zarf Malzemesi	M5 Alaşım
Zarf Malzemesi Yoğunluğu (g/cm ³)	~6.45



Şekil 2.3. ATMEA1 Yakıt Demetlerinin Yukarıdan Bakıldığında Temsili Görüntüsü.

2.2. KNY Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Hesaplama Gereçleri ve Yöntem

2.2.1. Hesaplama Gereçleri

VVER – 1200 ve ATMEA1 KNY radyoizotop içerikleri ve bozunum ısıları belirlenirken MCNP 5.0 (Monte Carlo N-Particle Transport Code) parçacık transport kodu ile ORIGEN2 yanma kodunun birlikte çalışmasını sağlayan MONTEBURNS 2.0 arayüz programı kullanılmıştır. Bu bölümde, MCNP 5.0, ORIGEN2 ve MONTEBURNS 2.0 kodları detaylı olarak anlatılmıştır.

2.2.1.1. MCNP 5.0

MCNP 5.0 (General Monte Carlo N – Particle Transport Code) geniş enerji aralıklarında, nötron, foton, elektron gibi bir çok parçacığın taşınımını Monte Carlo istatistiksel modelini kullanarak üç boyutlu karmaşık geometrilerde ve zamana bağlı olarak çözen bir yazılımdır [34]. Fisil sistemlerde nötronlar için çoğaltma faktörü hesaplanması MCNP' nin standart bir özelliğidir. MCNP kodu ile nükleer etkileşimleri inceleyen birçok probem çözülebilmekte olup uygulama alanlarına örnek olarak reaktör kor içi modellemeleri, parçacık hızlandırıcısı analizleri, radyasyon zırhlama gösterilebilir.

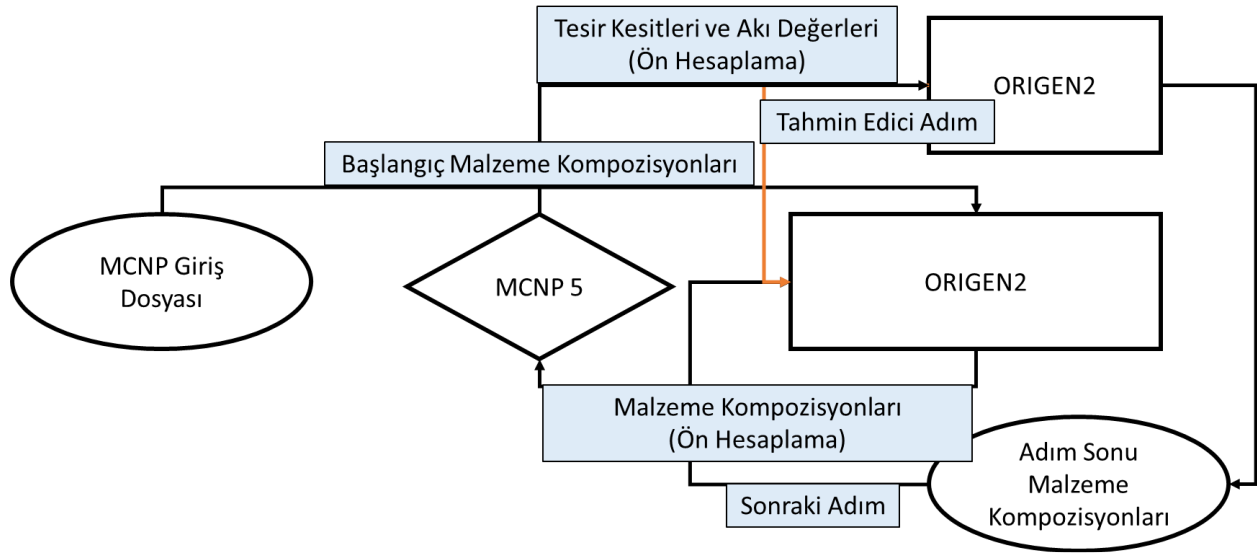
Monte Carlo metodu, bir sistem içinde yer alan parçacıklar için olasılık dağılımından gelen rastgele örneklemeler yapılarak istatistiksel geçmiş üretilmesi esasına dayanmaktadır. Böylece, sistemde bulunan parçacıkların sistem sınırlarından kaçana ya da soğurulana kadarki ömrü boyunca davranışı (parçacığın yaptığı etkileşim tipleri, enerji değişimi, yeni parçacıkların oluşumuna etkisi) modellenir ve bunun sonucunda sistemin genel davranışı (parçacık akıları, nükleer reaksiyon oranları, enerji oluşumu, dozlar) hakkında bilgi edinilir. Parçacığın sistem içindeki etkileşimlerinin olasılıkları sistemdeki malzemelerin tesir kesiti değerleri ile hesaplanabilmektedir. MCNP kodu nokta tabanlı tesir-kesiti verilerini içeren oldukça geniş bir tesir-kesiti veri kütüphanesine sahiptir. Nötronlar için, ENDF/B-VII gibi belirli tesir-kesiti değerlendirmelerinde verilen bütün reaksiyonlar dikkate alınmıştır. Termal nötronların tanımlanmasında hem serbest gaz hem de $S(\alpha,\beta)$ modelleri kullanılmıştır. Kod fotonlar için, koherent ve inkoherent saçılmaları, fotoelektrik soğurulma sonrası floresan yayılma olasılığını ve elektron-pozitron çift oluşumunda soğurulmayı dikkate alır. Elektron-pozitron parçacıklarının taşınımı için sürekli-yavaşlama modelini kullanmakta ve x-ışınlarını içeren ikincil parçacık üretimini, bremsstrahlung ve gama ışınlarının yok olmasını hesaba katar[34].

MCNP hesaplama yapılacak sistemle ilgili bilgileri kullanıcı tarafından hazırlanan girdi dosyalarından alır. Girdi dosyasında sistem geometrisi, malzemelerin tanımlanması, tesir-etki kesiti hesaplama yöntemlerinin seçimi, nötron, foton ya da elektron kaynağının sistemdeki yeri ve özellikleri, hesaplanması istenen değişkenler ve hesaplamanın etkinliğini artıracak varyans azaltma yöntemleri yer almaktadır[34].

2.2.1.2. MONTEBURNS 2.0

MONTEBURNS 2, MCNP Monte Carlo parçacık taşınım kodu ile ORIGEN2 yanma kodu arasında köprü vazifesi görerek birlikte çalışmalarını sağlayan bir koddur. Program, kullanıcı tarafından hazırlanan ve sistem geometrisi, başlangıç malzeme içerikleri, sisteme malzeme ekleme/çıkarma bilgileri ile koda özel değişkenleri içeren bir girdi dosyasını kullanmaktadır[35].

MONTEBURNS 2.0 nin çalışması sırasında MCNP ENDF/B-VII değerlendirilmiş nükleer veri dosyalarını kullanarak sistemdeki nötron, foton, elektronların taşınımını simule eder ve hesaplanan tesir-etki kesitleri ve akılar yanma oranı hesaplamalarında kullanılmak üzere ORIGEN2 koduna gönderilir. ORIGEN 2, matris eksponansiyel yöntemini temel olarak başlangıçta tanımlanmış malzeme bileşimi, ısıl güç, ışınlanma süresi verilerini ve tek-grup tesir kesitlerini kullanarak yanma hesabı yapar. Yanma hesabı sonrasında elde edilen yeni malzeme bileşimi MCNP koduna aktarılır ve tesir-etki kesitleri ve akılar tekrar hesaplanır. MONTEBURNS 2.0' ın ana işlevi iki kod arasındaki veri transferini döngüsel bir şekilde tekrarmasıdır. Şekil 2.4' te bulunan akış şeması MONTEBURNS 2.0' ın ORIGEN2 ve MCNP ile etkileşimini göstermektedir. Hesaplama çevriminin sonunda, MCNP ve ORIGEN den elde edilen veriler derlenerek akı, güç üretimi, malzeme bileşimi ve miktarları, etkin çoğaltma faktörü, radyoaktivite ve radyotoksisite bilgilerini içeren bir çıktı dosyası hazırlanır.



Şekil 2.4. MONTEBURNS Programı Hesaplama Algoritması Genel Akış Şeması.

MONTEBURNS kodunu çalıştırmak için MCNP girdi dosyasına ek olarak iki ek dosyaya daha ihtiyaç duymaktadır. Bu dosyalar "feed", "input" uzantılıdır ve MCNP dosyası ile aynı ismi taşır. "input" dosyası MONTEBURNS 2.0 koduna hesaplama yapılacak sistemi tanıtmak için kullanılmaktadır ve dosyada yanma oranı analizi yapılacak sistemin özellikleri (yanma oranı miktarı ve reaktör tipi seçimi), yanma oranı hesaplamalarının yapılacağı MCNP girdi dosyasındaki malzemelerin bilgisi ve kod ile ilgili diğer

parametreler bulunmaktadır. Giriş dosyasında ayrıca takibi yapılacak izotoplar malzeme kartlarıyla belirtilmekte olup bu tez için yapılan çalışmalarda 77 izotop için takip yapılmıştır. “feed” dosyası ise sistemin yanma oranı değerlerinin hesaplanacağı adımların belirtildiği, malzeme ekleme/çıkarma bilgilerinin verildiği yanma senaryosunu içeren dosyadır.

2.2.1.3. ORIGEN2

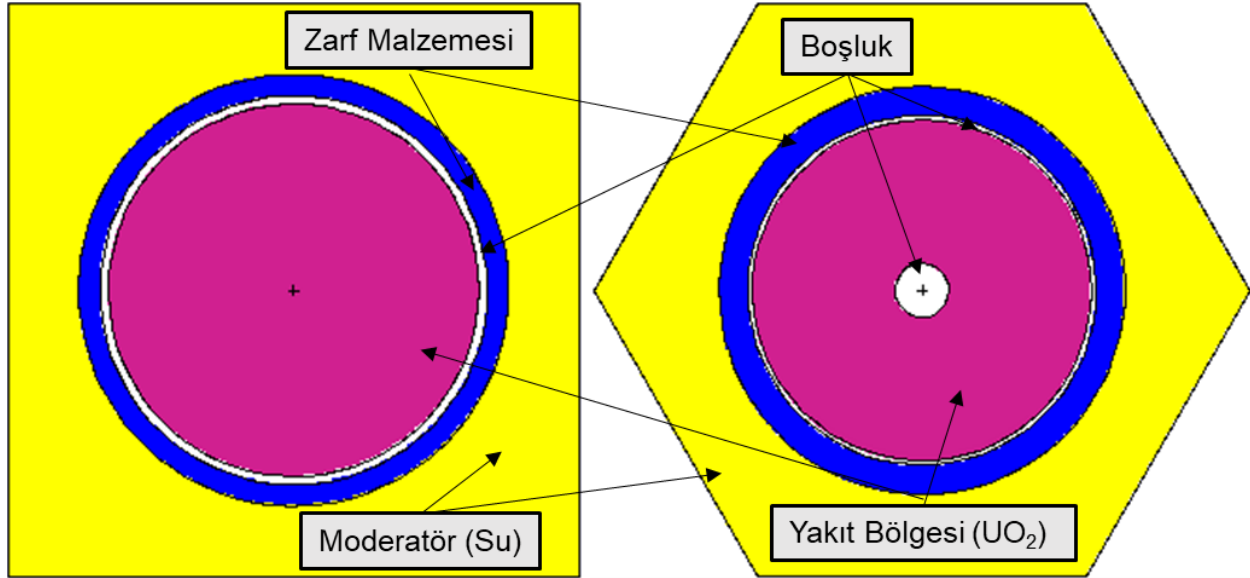
ORIGEN2 A.B.D. Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı (ORNL) tarafından geliştirilmiş bir yanma ve radyoaktif bozunum kodudur. ORIGEN2 bir sistem için giriş doyasında tanımlanan malzeme kompozisyonu ve miktarı, 1 – grup malzeme - izotop tesir kesitleri, ihtiyaç dahilinde sisteme malzeme girişi / çıkışı miktarı, ışınlama süresi, şiddeti ve akı değerlerini kullanarak anlık olarak nötronik transmutasyon, fisyon, radyoaktif bozunum, ya da malzeme girişi/çıkışı yoluyla oluşan veya tükenen çok sayıda radyonüklitin bulunduğu sistemlerde zamana bağlı konsantrasyon ve ilgili kaynak terim hesaplamaları yapar. Nükleer yakıtların reaktörlerde ışınlanması, depolanması, taşınması ve kimyasal olarak yeniden işlenmesi ile ilgili çalışmalar da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bahsedilen hesaplamalar matris exponansiyel metodu ile bir diferansiyel denklemler sistemi kullanarak MONTEBURNS 2.0 kodu için malzeme kompozisyonu değişimleri ve yanma oranı hesaplarını sürekli birbirini takip eden zaman adımlar için hesaplayarak bu değerleri ayrı ayrı çıktı dosyasında tanımlamaktadır.

2.2.2. Hesaplama Yöntemleri

2.2.2.1. Birim Hücre Yaklaşımı

VVER – 1200 ve ATMEA1 reaktörlerinin KNY radyoizotop içeriklerini, radyoaktivitelerini ve bozunum ısılarını belirlemek amacıyla MONTBEURNS2.0 kullanılmıştır. MONTBEURNS 2.0 hesaplamalarında dengedeki reaktör korunu temsil eden en küçük yapının birim hücre olduğu varsayılmıştır. VVER – 1200 ve ATMEA1 reaktörlerinin birim hücreleri Çizelge 2.1. ve 2.2. 'de verilen geometrik özellikler ve malzeme bilgisi

kullanılarak MCNP5 ile modellenmiştir. Reaktörlerin MCNP5 birim hücre modellerinin kesit görünüşleri Şekil 2.5' te verilmiştir.



Şekil 2.5. MCNP Programında Modellenen Birim Hücre Geometrileri.

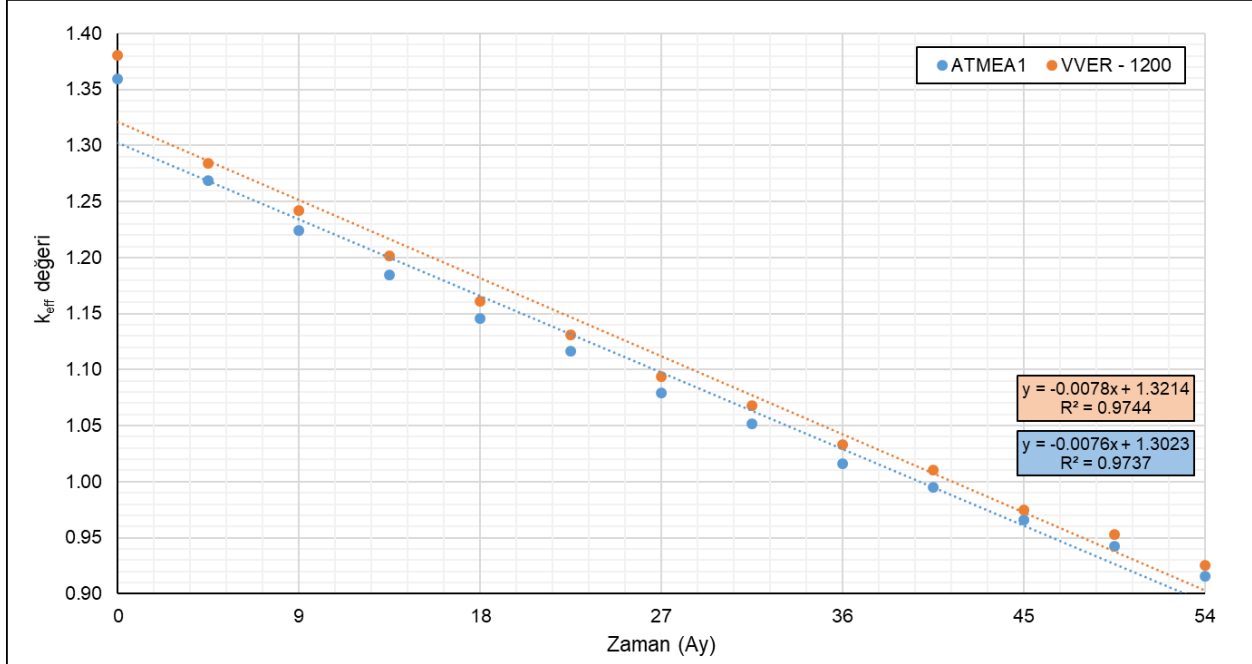
Birim hücre modellerinde yakıt bölgesinde VVER – 1200 için % 4.775, ATMEA1 için % 5.000 denge yakıt çevrimi zenginliklerine sahip UO_2 kompozisyonu kullanılmıştır. Kullanılan taze yakıt ve zarf malzemesi kompozisyonlarındaki ağırlıkça yüzde izotop oranları Çizelge 2.3. 'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. MCNP Giriş Dosyasında Tanıtılan Malzemeler ve Kompozisyonlarının Ağırlık Oranları.

	İzotop Oranları		VVER – 1200	ATMEA1
Yakıt İçeriği (UO_2)	Uranyum	U - 234	0.0367	0.0387
		U - 235	4.7750	5.0000
		U - 238	95.188	94.961
	Oksijen (O_2/UO_2)		0.1186	0.1186
Zarf Malzemesi	Zr		0.9900	0.9760
	Nb		0.0100	0.0100
	O		-	0.0140

Yukarıda verilen taze yakıt kompozisyonları ile Çizelge 2.1. ve 2.2.'de verilen ortalama nihai yanma oranlarına ulaşıldığında reaktörden alınacak KNY' ların radyoizotop içeriği ve bozunum ısıları MONTEBURNS2.0 ile belirlenmiştir. KNY için yanma senaryosu (reaktörün gücü, reaktörde ışınlanma süresi ve nihai yanma oranı) hazırlanan MONTEBURNS2.0 girdi dosyaları ile belirlenmiştir. MONTEBURNS2.0 ile yapılan hesaplamalarda 77 izotop için malzeme bilgisi elde edilmiştir.

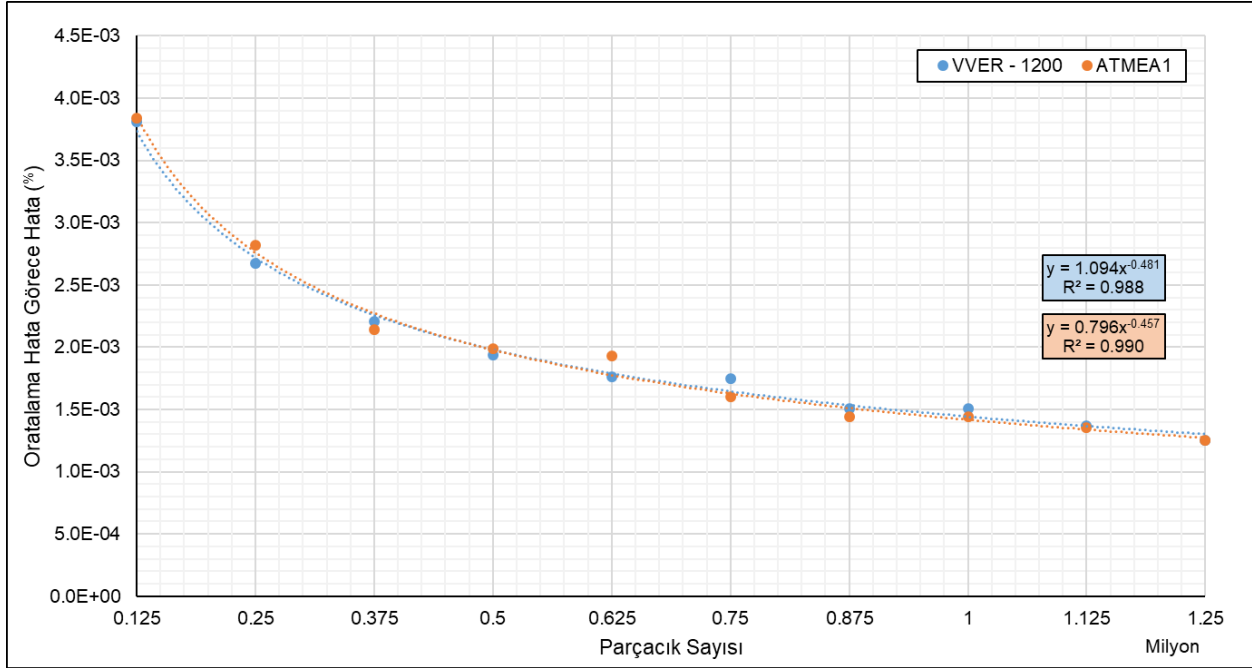
MCNP5 kodu ile yapılan hesaplamalarda malzemeler için ENDF/B VII tesir-kesiti kütüphanesi kullanılmıştır. Ayrıca, reaktör tipleri dikkate alınarak MONTEBURNS hesaplamalarında PWRU ve PWRPUPU kütüphaneleri seçilmiştir. Bu konfigürasyon kullanılarak sistem modellerinden elde edilen k_{eff} – zaman değişimi Şekil 2.6' da verilmiştir.



Şekil 2.6. Birim Hücre Modellerinin Efektif Kritiklik – Yanma Süresi Değişim Grafiği.

MONTEBURNS 2.0 giriş dosyasında elde edilecek sonuçların hassasiyetini ve dolayısıyla hesaplama zamanını etkileyen 2 ana parametre mevcuttur. Bunlardan ilki sonuçları değerlendirilen parçacık sayısı (PS) ve yanma adımı sayısı (YS) dir. PS değeri ile görece hata değeri $Hata \sim 1/\sqrt{PS}$ ilişkisi ile birbirini etkiler. YS sayısı ise programın işleyişi ile alakalı olarak PS kadar doğrudan orantılı olmasa da hata oranını her bir yanma

adımı içerisinde MCNP programına iletilen ORIGEN2 ile hesaplanan malzeme kompozisyonlarını daha sık (değer arttıkça) hesaplayacağından hata oranında görüldüğü gibi bir düşüş gözlenmektedir. PS arttıkça görece hata oranının değişimi Şekil 2.7 'de görülebilir. Bu şekilde görece hata değeri düşürülebilecek olsa da bunun işlemci hesaplama maliyeti olarak bir geri dönüşü olacaktır. Dolayısıyla, hesaplama sürelerini çok yükseltmeden mantıklı kabul edilebilecek hata değerleri ile hesaplamaların yapılmasında fayda vardır.



Şekil 2.7. Birim Hücre Modellerinin Efektif Kritiklik Görece Hata – Simülasyonda Kullanılan Parçacık Sayısı Değişim Grafiği.

Bu tezde MONTEBURNS 2.0 kullanılarak yapılan yanma ve ön-soğutma benzetimlerinde PS 1,250,000 ve YS 40 olarak seçilmiştir. Yanma oranı hesaplamaları tamamlandığında aşağıdaki bilgileri her yanma adımı için içeren çıktı dosyasıları değerlendirilmiştir:

Sisteme ilişkin Genel Bilgiler

- Yanma adımlarına göre sistemdeki efektif kritiklik katsayısı, yanma oranı, hata oranı ve diğer kritiklik parametreleri

Yanmanın gerçekleştiği MCNP hücre kartına ilişkin,

- Tesir kesitleri bilgisi
- Nötron akı spektrumu

- Malzeme miktarı değişimleri (1 ton malzeme için oran şeklinde)
- Radyoaktif aktivite değişimleri
- Isı üretim bilgisi
- Birim hacim hava için kontaminasyon bilgisi

MONTEBURNS2.0 çıktı dosyalarından VVER – 1200 ve ATMEA1 KNY larının reaktörden çıkarıldıklarındaki radyonüklit içerikleri ve bozunma ısısı üretim miktarları belirlenmiştir. Bozunum ısısının zamana bağlı değişimini belirlemek için farklı soğutma süreleri için girdi dosyaları hazırlanmış ve benzetimler tekrar edilmiştir.

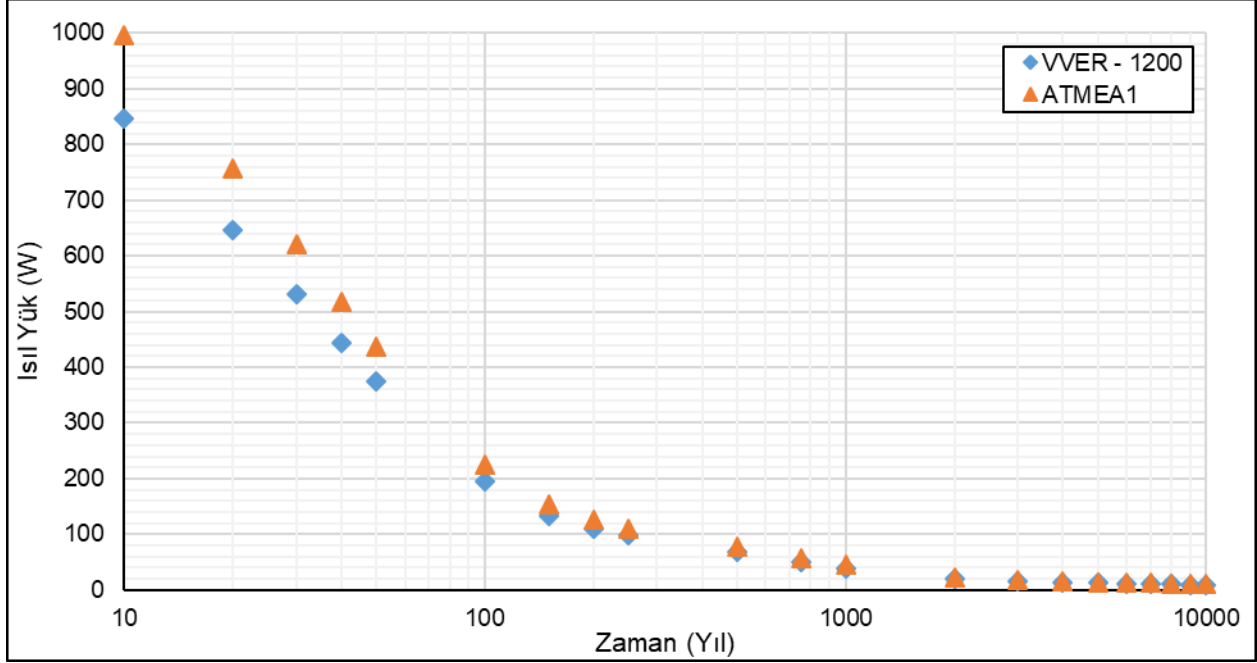
2.2.2.2. Bozunum Isısı Eğrilerinin Türetilmesi

Kütlece % 4.775 taze yakıt zenginliğinde, 55000 MW-gün/tU yanma oranına sahip VVER – 1200 KNY' larının ve kütlece % 5.000 taze yakıt zenginliğinde, 55000 MW-gün/tU yanma oranına sahip ATMEA1 KNY' larının reaktörden çıkarıldığındaki radyoizotop içerikleri MONTEBURNS 2.0 kullanılarak elde edilmiştir. Çizelge 2.4. 'te VVER – 1200 ve ATMEA1 KNY' ı için elde edilen radyoizotop içeriği verilmiştir. Çizelgede uranyum izotopları, plütonyum izotopları, minör aktinitler (Am, Np gibi) ve önemli fisyon ürünleri (Cs, Xe gibi) için izotop oranları yer almaktadır.

Çizelge 2.4. VVER – 1200 ve ATMEA1 KNY Radyoizotop İçeriği.

Aktinitler		ATMEA1		VVER - 1200		Aktinitler		ATMEA1		VVER - 1200			
		1 Ton KNY içinde (Gram - Yüzde)						1 Ton KNY içinde (Gram - Yüzde)					
		8.31E+05	100.00%	8.33E+05	100.00%			8.31E+05	100.00%	8.33E+05	100.00%		
U	238	8.03E+05	98.45%	8.06E+05	98.47%	Xe	134	2.16E+03	0.33%	2.10E+03	0.32%		
	235	8.58E+03		8.18E+03			131	5.42E+02		5.28E+02			
	236	6.13E+03		5.82E+03			133	2.75E-08		2.75E-08			
	234	1.50E+02		1.37%		1.45E+02	1.35%	Nd	143	1.11E+03	0.24%	1.08E+03	0.24%
	233	5.87E-03				4.96E-03			145	9.26E+02		9.00E+02	
	237	5.44E-05				5.46E-05		Np	237	1.28E+03	0.15%	1.21E+03	0.15%
	240	1.47E-12				1.47E-12			238	5.59E-07		5.46E-07	
Pu	239	6.32E+03	6.22E+03	Ru	101	1.09E+03	0.13%		1.06E+03	0.13%			
	240	2.61E+03	2.60E+03		103	3.13E+00		3.13E+00					
	241	1.67E+03	1.66E+03		Tc	99		1.09E+03	1.07E+03				
	242	7.14E+02	7.21E+02	109		1.05E+02	1.05E+02						
	238	4.47E+01	4.36E+01	Mo	95	1.05E+03	1.02E+03						
	237	1.60E-05	1.43E-05		Am	243	2.04E+02	2.02E+02					
	243	6.44E-13	6.16E-13	241		9.95E+01	9.81E+01						
Cs	137	1.71E+03	0.50%	1.68E+03	0.48%	Diğer	-	2.78E+03	0.33%	2.73E+03	0.33%		
	133	1.52E+03		1.48E+03			242	2.98E+00		2.91E+00			
	135	6.77E+02		6.45E+02									
	134	2.08E+02		2.08E+02									
	136	3.76E-04		3.52E-04									

Çizelge 2.4' te verilen yakıt bileşimine sahip KNY' nın içeriğindeki aktinitler ve fisyon ürünlerinden kaynaklı olarak radyoaktivitesi ve ısı üretimi oldukça yüksektir, ancak hem radyoaktivite hem de bozunum ısı zamana bağlı olarak azalmaktadır. VVER - 1200 ve ATMEA1 reaktörleri için bozunum ısısının zamana bağlı değişimi MONTEBURNS 2.0 kodu çıktı dosyası aracılığıyla Şekil 2.8' de verildiği gibi gözlemlenmiştir.



Şekil 2.8. VVER – 1200 ve ATMEA1 KNY Bozunum Isısının Zamana Bağlı Değişimi.

Çalışmada, reaktörden alınan KNY 'lara jeolojik bertarafa gönderilmesi öncesinde radyoaktivitesini ve bozunum ısısını bir miktar düşürmek için ön-soğutma uygulandığı varsayılmıştır. Farklı ÖN-SOĞUTMA sürelerine sahip KNY' ların bozunum ısısının zamana bağlı değişimini hesaplayabilmek için MONTEBURNS girdi dosyalarında bekleme süreleri (30, 40, 50 ve 60 yıl) tanımlanmıştır. Çıktı dosyalarından ise birim hücre başına hesaplanmış zamana bağlı ısı yükleri atık kabı modelinin içerdiği KNY demeti sayısına karşılık gelecek bir hacmi temsil edecek şekilde aşağıdaki denklem ile yeniden hesaplanmıştır.

$$TIY = YDS \times BHIY \times H_{aktif} \times DBYÇS$$

Denklemede TIY: Toplam ısı yük; YDS: Yakıt demeti sayısını, H_{aktif} : Yakıt demeti aktif yüksekliği; DBYÇS: Demet başına yakıt çubuğu sayısı' nı simgelemektedir. Hesaplanan zamana bağlı değişen toplam ısı yük değerleri zamana bağlı bir fonksiyon oluşturacak şekilde düzenlenmiştir. VVER – 1200 ve ATMEA1 için türetilen ısı yük eğrileri 4. bölümde verilmiştir. Elde edilen ısı yük eğrileri yatay jeolojik bertaraf tesisinin ısı analizlerinde

kullanılmış ve modellenen atık kabı geometrisine zamana bağlı ısı üretim değeri olarak tanımlanmıştır.

3. ISIL ANALİZLER

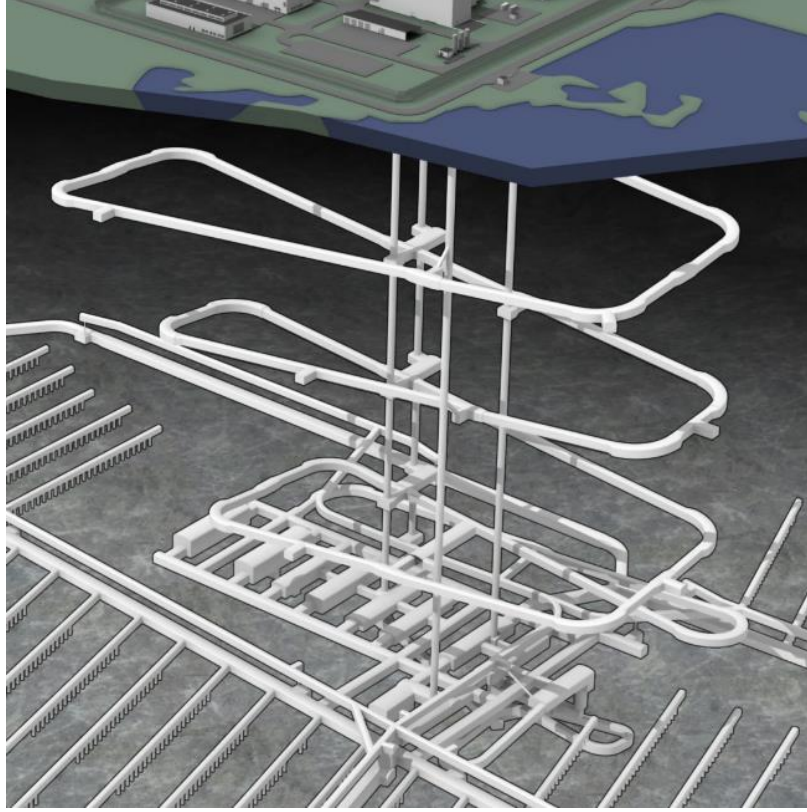
3.1. Referans Jeolojik Bertaraf Tesisi Tasarımı

Reaktörden çıkarılmış ve kuru ya da ıslak depolama yapılarak bir süre soğutulmuş KNY' lar bertaraf edildikten sonra da ısı üretimine devam etmektedir. Bunun sonucu olarak, bertaraf tesisinin bileşenlerinin sıcaklıkları zamanla artmaktadır. Sıcaklık, bertaraf tesisinde gerçekleşen birçok prosesi etkilemektedir ve bertaraf edilen KNY' in özelliklerine (miktar, izotopik içerik ve ısı yük) son derece bağlıdır. Bu nedenle, jeolojik bertaraf tesisi tasarımı yapılırken KNY bertaraf yoğunluğunun (tesisin birim alanında güvenli olarak bertaraf edilebilecek KNY miktarı) belirlenmesi ve tesis bileşenlerinin zamana bağlı sıcaklık dağılımlarının incelenmesi gerekmektedir.

Bu bölümde, MONTEBURNS 2.0 ile elde edilen VVER – 1200 ve ATMEA1 KNY özellikleri kullanılarak referans bir jeolojik bertaraf tesisi için ısı analizler gerçekleştirilmiştir. Bertaraf tesisinin üç boyutlu modeli ANSYS ile oluşturulmuş ve atık kaplarına farklı ÖN-SOĞUTMA sürelerine sahip (40, 50 ve 60 yıl) ve farklı sayılarda KNY demeti (4, 5 ve 6 adet) yüklenmesi durumunda tesisteki zamana bağlı sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Isıl limitler kullanılarak atık kapları arasındaki minimum uzaklıklar ve atık bertaraf yoğunluğundaki değişim incelenmiştir.

İsveç Nükleer Yakıt ve Atık Şirketi tarafından geliştirilen KBS – 3 tasarımı günümüzde en olgun tasarımlardan biri olarak kabul edilmektedir. Birçok ülkede bu tasarım referans alınarak ülke jeolojisi ve radyoaktif atıklarına uyarlanmaktadır. Öncelikle dikey (KBS – 3V) olarak geliştirilen tasarım daha sonra yatay (KBS – 3H) bertaraf için genişletilmiştir. Bahsedilen iki farklı tasarım arasındaki ana fark jeolojik bertaraf için kullanılan atık kaplarının yeraltındaki tesise depoalanırken dikey değil yatay konumlandırılmasıdır[26]. Her iki tasarım da atık kapları, bentonit katman, tünel dolgu malzemesi ve jeolojik yapıyı içermektedir.

Referans jeolojik bertaraf tesisi KBS-3H, Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi yüzey birimlerinden başlayarak yeraltındaki (~500m) depolama bölgesine kadar atık kaplarının transfer edileceği bir hattan oluşmaktadır [27].



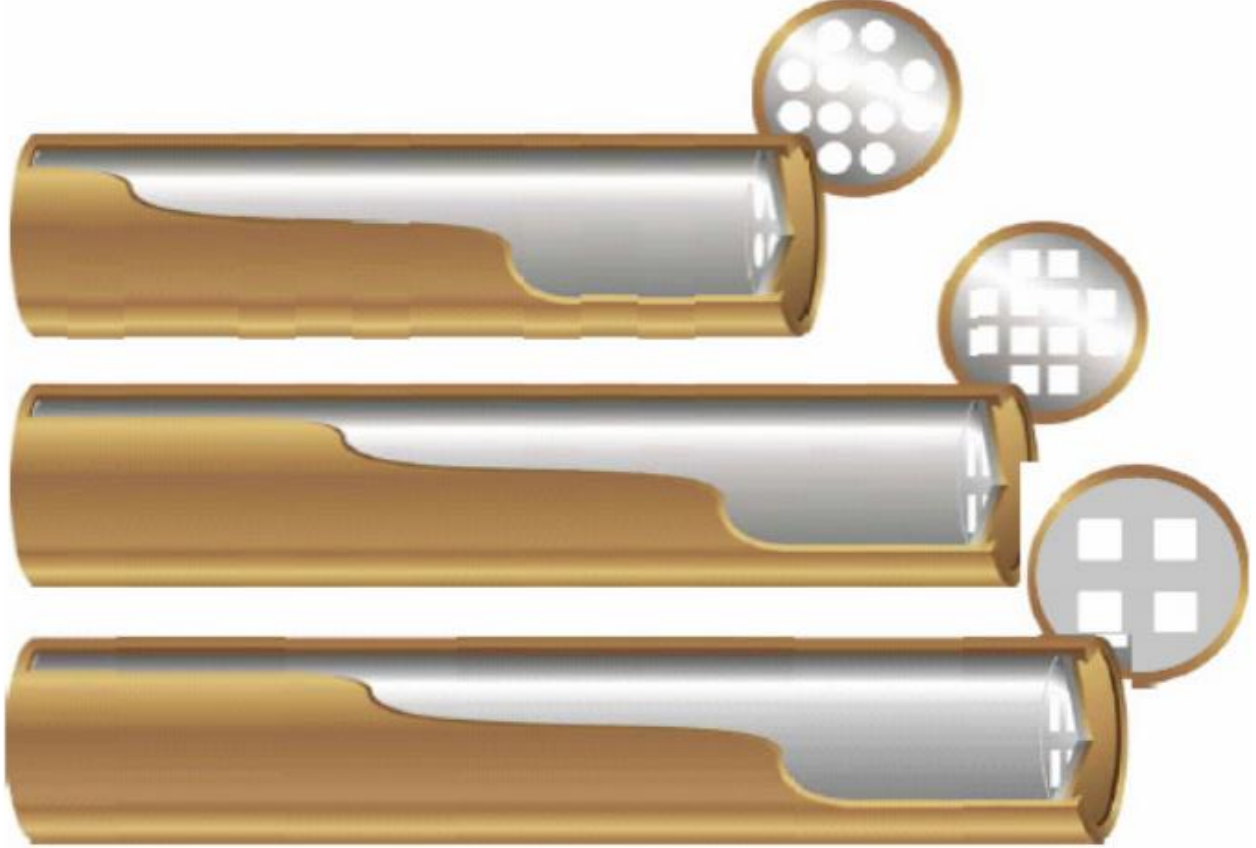
Şekil 3.1. KBS – 3 Jeolojik Bertaraf Tesisi Tasarımı Genel Görünüşü.

Tesiste birbirine paralel ve 40 metre uzaklıklarda açılmış bertaraf tünellerinde atık kapları birbirinin ardı sıra ara katmanlar (bentonit ve dolgu malzemesi) kullanılarak yerleştirilecektir. Şekil 3.2. 'de tünellerin taslak yerleşim planı verilmiştir.



Şekil 3.2. KBS – 3 Jeolojik Bertaraf Tesisi Atık Kabı Yerleştirme Tünelleri Taslak Yerleşim Planı.

KBS-3H bertaraf tesisinde atık kaplarının birbirine uzaklıkları ısı limit (atık kabı dış yüzeyi için 95 °C) değerleri aşılmayacak şekilde belirlenmiştir. Yatay bertaraf tesisinde VVER – 440, BWR, EPR tipi reaktörlerin KNY 'ları için tasarlanmış atık kaplarının bertaraf edilmesi planlanmaktadır. VVER-440, BWR ve EPR KNY' ları için tasarlanan atık kapları Şekil 3.3. 'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. VVER-440, BWR ve EPR KNY' ları için tasarlanan atık kapları.

Şekil 3.3. 'te gösterilen atık kabı tasarımları bu çalışma sırasında belli parametreler sabit tutularak VVER – 1200 ve ATMEA1 KNY' ları için yeniden modellenmiştir. EPR reaktörlerinin KNY' ları için tasarlanan atık kabı esas alınarak, atık kabı yüksekliği, KNY yerleşim yapısı, KNY sayısı hem VVER – 1200 hem de ATMEA1 KNY' ları için değiştirilmiştir. 4, 5 ve 6 adet VVER – 1200 ve ATMEA1 KNY' ı içeren durumlar için 6 farklı atık kabı tasarımı oluşturulmuştur.

Referans tesiste Şekil 3.3. 'teki atık kabı tasarımlarında görülen dökme demir (gri renkle gösterilen) ve bakır (turuncu ile gösterilen) bileşenlere ek olarak tasarlanmış bariyerler vardır. Tesiste bertaraf edilen atık kabı bentonit malzeme ile sarılacak olup bunun dışına ise dolgu malzemesi ile destek katmanı oluşturulacaktır. Tesis bileşenlerine ilişkin detaylı bilgiler aşağıda sunulmuştur.

3.1.1. Atık Paketleri

Referans alınan tasarımda radyoaktif atık paketleri (bu tezde yapılan çalışmalar için KNYD) dökme demir ile yapılmış taşıyıcı parçanın içerisine yerleştirilir ve dışı oksijen içeriği bulunmayan, fosfor katkılı 5 cm kalınlığında bakır kabuk (silindir) ile kapatılır. Böylece dökme demir kısmın mekanik yüklere ve radyasyona karşı sağladığı direnç ile birlikte bakır kabuk aracılığıyla korozyona karşı bir bariyer oluşturulmuş olur.

3.1.2. Bentonit Katman

Bertaraf için tünele yerleştirilen atık kabı bentonit halka ve bloklar ile sarılarak desteklenir. Bu katman atık kabını kayaç içerisinde gerçekleşen küçük kaymalara ve dış ortamın kontamine olmasına karşı korur. Bentonit yeraltı su kaynakları ile karşılaştığında suyu emerek şişer ve atık kabının yeraltı suları ile doğrudan temasını engeller.

3.1.3. Dolgu Malzemesi

Bentonit katman ile çevrelenen atık kabının tam olarak betrafı için mevcut bulunduğu tünelin tamamen doldurulup mühürlenmesi gerekmektedir. Bu iş için gereken malzeme ise %70 bentonit %30 ezilmiş kaya içeren bir karışımı ile elde edilir ve bu karışım kullanılarak işlem gerçekleştirilir [36]. Bu işlem aynı zamanda gerektiğinde tünele kolay erişim sağlayabilmek, kayalardan kaynaklı oluşabilecek hasarı azaltmak ve aynı zamanda kimyasal olarak bir ek katman sağlayabilmek içindir.

3.1.4. Jeolojik Yapı

Kayaç yapısı ve jeolojik altyapının sağlam olması jeolojik bertaraf tesisi için tasarlanmış bariyerlerin yanısıra mekanik, kimyasal, hidrolojik olarak bir izolasyon sağlayabilmekte olup bu durum çok uzun yıllar değişmeden kalabilmektedir. Bu şartları sağlayabilmek için

tesisin genellikle kil, tuz, kristal (granit, tuf, bazalt) kaya yapısı içeren bölgelerde inşa edilmesi tercih edilir. Referans tesis için seçilen kayaç granittir. Granit kayaç yapısının avantajı yüksek katılık seviyesi, kristal yapısının iç stabilitesi ve az çözünürlük göstermesidir.

3.2. Isıl Analizlerde Kullanılan Hesaplama Gereçleri ve Yöntem

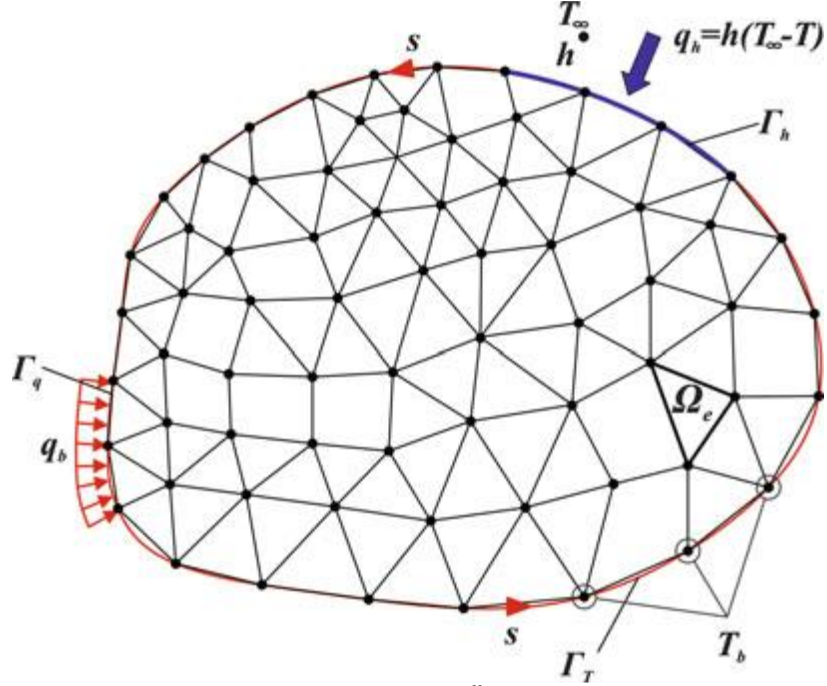
3.2.1. ANSYS 19.2

ANSYS, mekanik, ısı transferi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, elektromanyetik ve yapısal analiz gibi birçok alanda çalışılmasına olanak sunan ve sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir yazılımdır. Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık problemlerin küçük ve çok sayıda parçalara ayrılarak yaklaşık olarak çözülmesini sağlamaktadır. ANSYS farklı mühendislik alanları için geliştirilmiş modüllere sahiptir. Bu tez için ANSYS programının Mechanical APDL modülü kullanılmış olup bu modül aracılığıyla yatay jeolojik bertaraf tesisi modeli geliştirilerek ısı analizler gerçekleştirilmiştir.

3.2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Tez çalışması için yürütülen çalışmalarda bu kısım için yapılan analizler sonlu elemanlar metodu tabanlıdır. Metod üzerine genel bir bilgi vermek gerekirse, sonlu elemanlar metodunda karmaşık kabul edilen bir problem kendisinden daha küçük bölgelere bölünür ve üzerinde uygulanan her türlü diferansiyel denklem veya fonksiyonun bu elemanlar üzerinde parça parça cebirsel olarak çözüleceği düşüncesi üzerinden ilerler. Tanımlanan bütün problemdeki küçük parçalar bir denklem sistemi üzerinde toplanarak matris formunda çözüm gerçekleştirilir.

Çözülme istenen denklem sistemi yapısı itibarıyla ilk ve sınır koşulları tanımlanmadığı sürece denklem sistemi olarak kalmaya devam edecektir. Bu koşullar olmadığı sürece tekil çözümüne ulaşmak imkansızdır. Sağlıklı bir çözüm yapısı için problemin ilk ($t=0$ sn) halindeki sıcaklık değerleri ve problemin karakteristiğini belirleyecek diğer sınır koşulları (ısı yük, belli düğüm noktaları için sabit veya zamana bağlı sıcaklık değerleri) tanımlanmalıdır (Şekil 3.4. [37]).



Şekil 3.4. SEM Modeli için Örnek Ağ Yapısı[37].

Bu altyapı kullanılarak çözüm sabit problemler için nispeten daha elverişli bir hal almaktadır. Bu sistemde, problemin her düğümündeki sıcaklık değeri hesaplanabilmektedir. Buradan yola çıkarak ve düğümler arasındaki sıcaklık değerleri de interpolasyon yaklaşımıyla elde edilebilecektir. İnterpolasyon fonksiyonunun seçimi hesaplama zorluğunun artması ve problem içerisindeki uygunluğu gibi kriterler çerçevesinde değişik seçeneklere (lineer, parabolik gibi) açıktır. Zamana bağlı çözümler için klasik SEM metodundaki ısı difüzyon denklem sistemi modelini zamana bağlı sürekli güncelleme gereksiniminden dolayı biraz daha geliştirmek gerekmektedir. Zamana bağlı çözümlerde denklemin hali aşağıdaki gibi olacaktır[37].

$$([M] + \Delta t[K])\{T\}^{n+1} = \Delta t\{f\}^{n+1} + [M]\{T\}^n$$

Bu denklemde M, global kapasitans matrisi'dir. Element başına hesaplanan ilk formlarından elde edilir. Δt ; çözüm için tercih edilen zaman aralığı değerini, K; katılık matrisini, T; sıcaklık değerleri matrisini, f; sistemdeki yükler (bu tez için ısı yükler) matrisini ve n ise zaman adımı sayısını temsil eder.

3.2.3. Referans Alınan Atık Kabı Tasarımın Modellenmesi

3.2.3.1. Isıl model

KNYD yüklü atık kapları bertaraf tesisine yerleştirildiği andan itibaren KNY' ların ısı üretimi nedeniyle bertaraf tesisinde zamana bağlı olarak büyüklüğü değişen bir ısı aktarımı gerçekleşecektir. KNYD yüklü atık kaplarının bertaraf tesisine yerleştirilmesi sonrasında tünellerin doldurulması nedeniyle baskın olan ısı aktarım modu iletimdir. Ayrıca, analiz edilen sistemin çok daha büyük olduğu göz önüne alındığında KNYD blok geometriler olarak kabul edilebilir. Bu durumda, radyasyon ve konveksiyon ile ısı iletimi ihmal edilebilir. Ana ısı transferi modunun kondüksiyon olduğu varsayılarak tesis için ısı iletim denkleminin aşağıdaki gibi olduğu söylenebilir:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Denklemden c_p özgül ısıyı [$J/(kg^\circ C)$], k ısı iletkenlik katsayısını [$W/(m^\circ C)$], ρ malzeme yoğunluğunu [kg/m^3] ve \dot{q} ise ısı üretimini [$J/(m^3.s)$] ifade etmektedir.

3.2.3.2. Geometrinin oluşturulması

Referans jeolojik bertaraf tesisinin 3 boyutlu ısı modeli ANSYS ile oluşturulmuştur. ANSYS modeli oluşturulurken bertaraf tesisinin aynı ısı üretimine sahip sonsuz sayıda bertaraf tüneli içeren sonsuz sayıda tünelden oluştuğu düşünülmüştür. Tüm sistemin tasarlanması yerine geometrik simetri dikkate alınarak tek bir KNYD atık kabı ve bu kabın depolanacağı tünelin ilgili kısmının geometrisi modellenerek sistemin kendini tekrar edecek şekilde davranması sağlanmıştır.

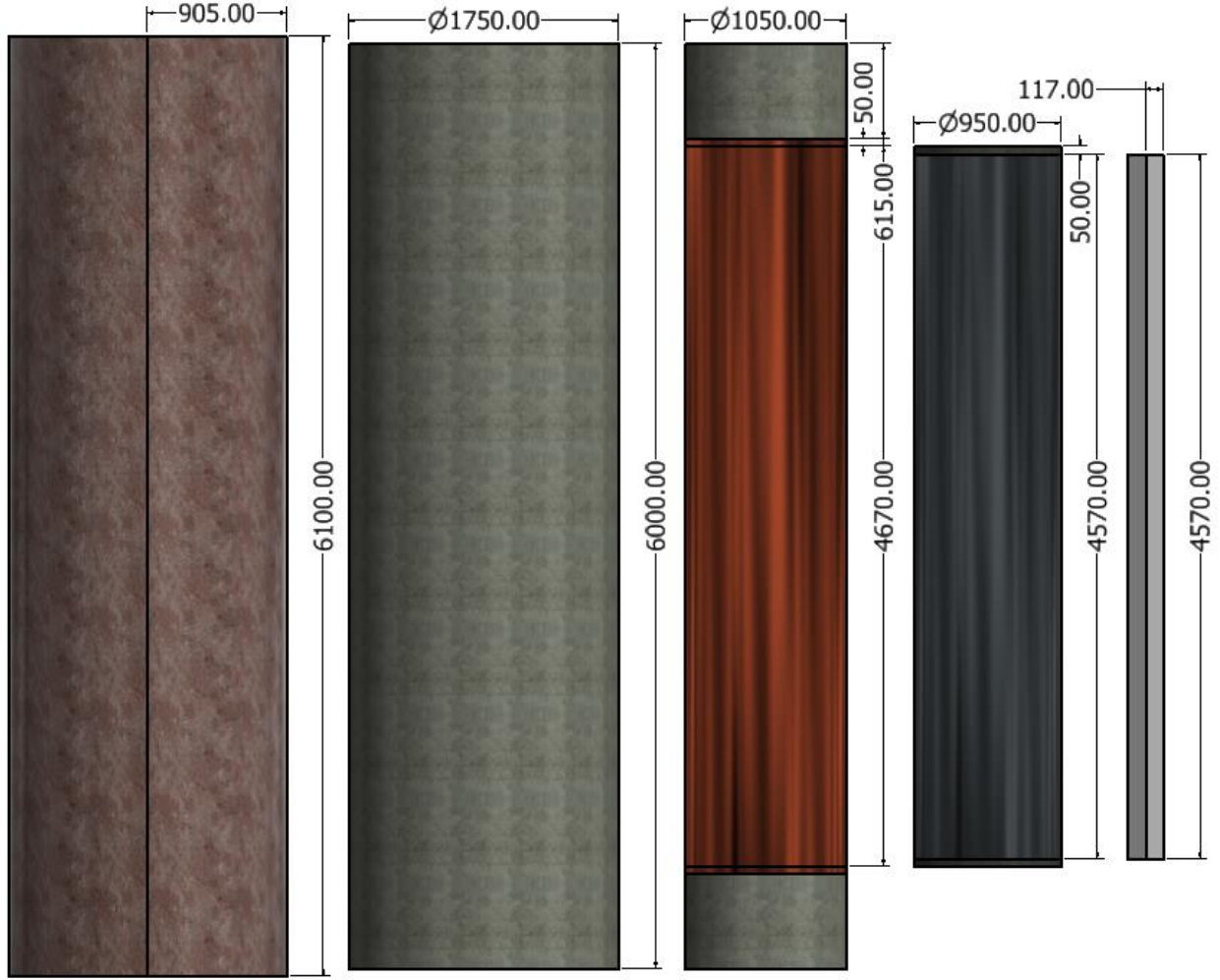
Geometrik model KNYD, bakır atık kabı, bentonit katman, tünel ve kayaç bölgelerini içermektedir. Modelin üst ve alt sınırları atık kabının 20 m yukarısı ve aşağısı olarak belirlenmiş olmasına rağmen benzetim sonuçlarının değişmediği gözlenerek bu sınırlar 3 m 'ye kadar düşürülmüştür. Böylece ısı benzetiminin makul sürede tamamlanması sağlanmıştır. Atık kabının yan taraflarında kalan sınırlar ise bu hat üzerinde ısı etkinin çok az değiştiği gözlenerek yine aynı derinlik seviyesine kadar yaklaştırılmıştır. Yatay

jeolojik bertaraf tesisi geometrisine ait bütün bileşenler Autodesk Inventor çizim programı aracılığıyla oluşturulmuş olup daha sonra zamana bağlı ısı analizler için ANSYS' e aktarılmıştır.

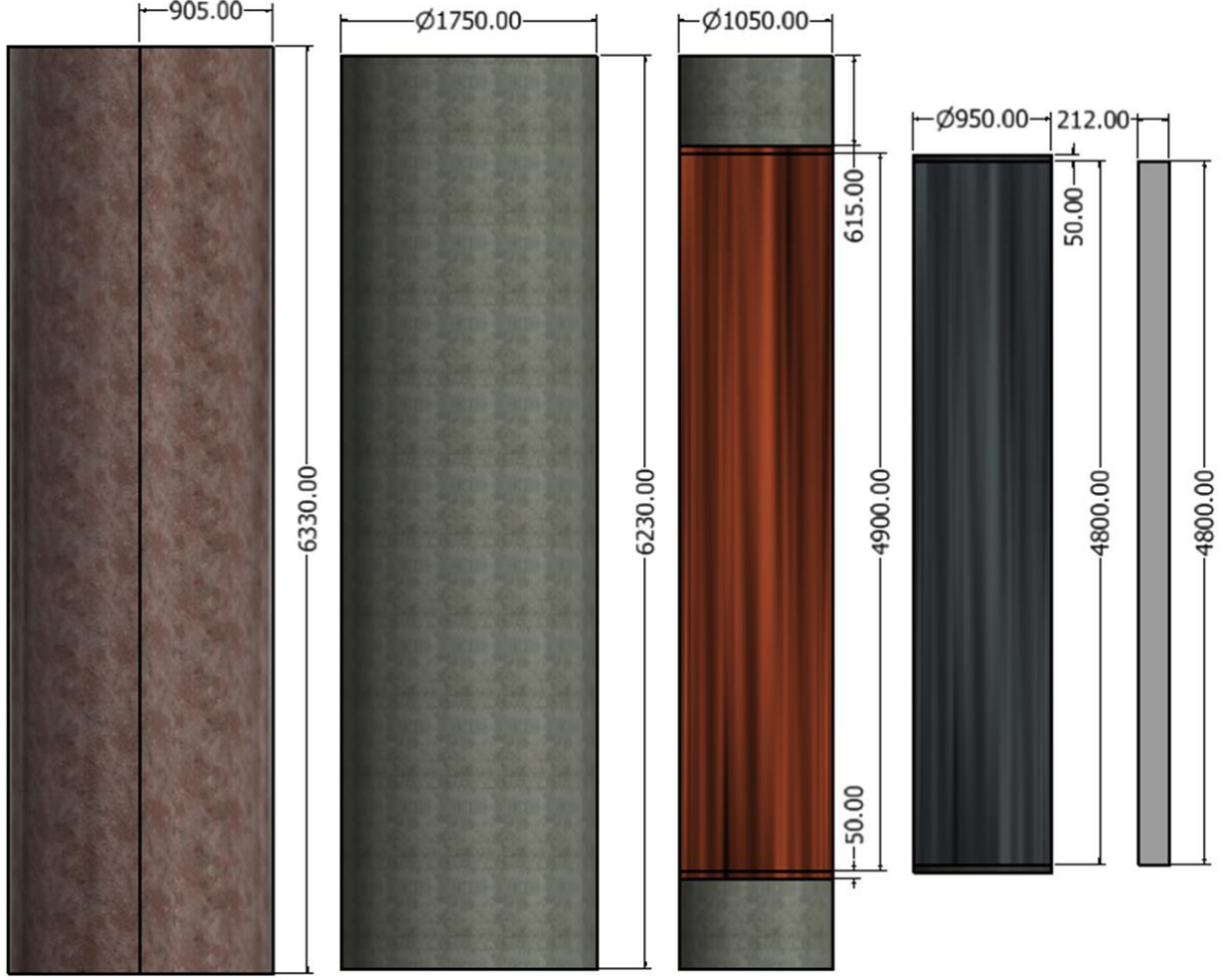
Referans yatay jeolojik bertaraf tasarımındaki tüm boyutlar aynı tutulmuştur. Ancak, referans tesisin atık kapları VVER – 440, EPR ve BWR tipi reaktörlerin KNY demetleri için geliştirildiğinden VVER – 1200 ve ATMEA1 tipi reaktörlerin KNY demetleri için atık kabı boyutlarında değişiklikler yapılmıştır. Referans atık kabı tasarımı söz konusu reaktörlerin KNY demetleri için uygulanırken tasarımda aşağıda bulunan parametreler sonuçların kıyaslanabilirliği açısından sabit kabul edilmiştir:

- KNY demetleri arasındaki paralel kenarların olduğu yerleşimde en kısa uzaklık 5 cm olacaktır.
- Atık kabının çapı ve bakır kalınlığı sabit tutulmuştur.
- Atık kabı yüzeyi ve KNY demetleri arasındaki en kısa uzaklık 5 cm olacaktır.
- Atık kabı yüksekliği KNY demeti uzunluğuna eşit olacaktır.
- Bentonit katmanının dışında 50 cm kalınlığında bir tünel dolgu malzemesi mevcuttur.

Tasarlanan ATMEA1 ve VVER 1200 atık kaplarının boyutları ve Autodesk Inventor ile oluşturulan geometrileri Şekil 3.5. ve 3.6.' da gösterilmiştir.



Şekil 3.5. VVER – 1200 Reaktörü KNY' ları için Tasarlanan Atık Kabı ve Genel Hatlarına Ait Boyut Bilgisi (mm).

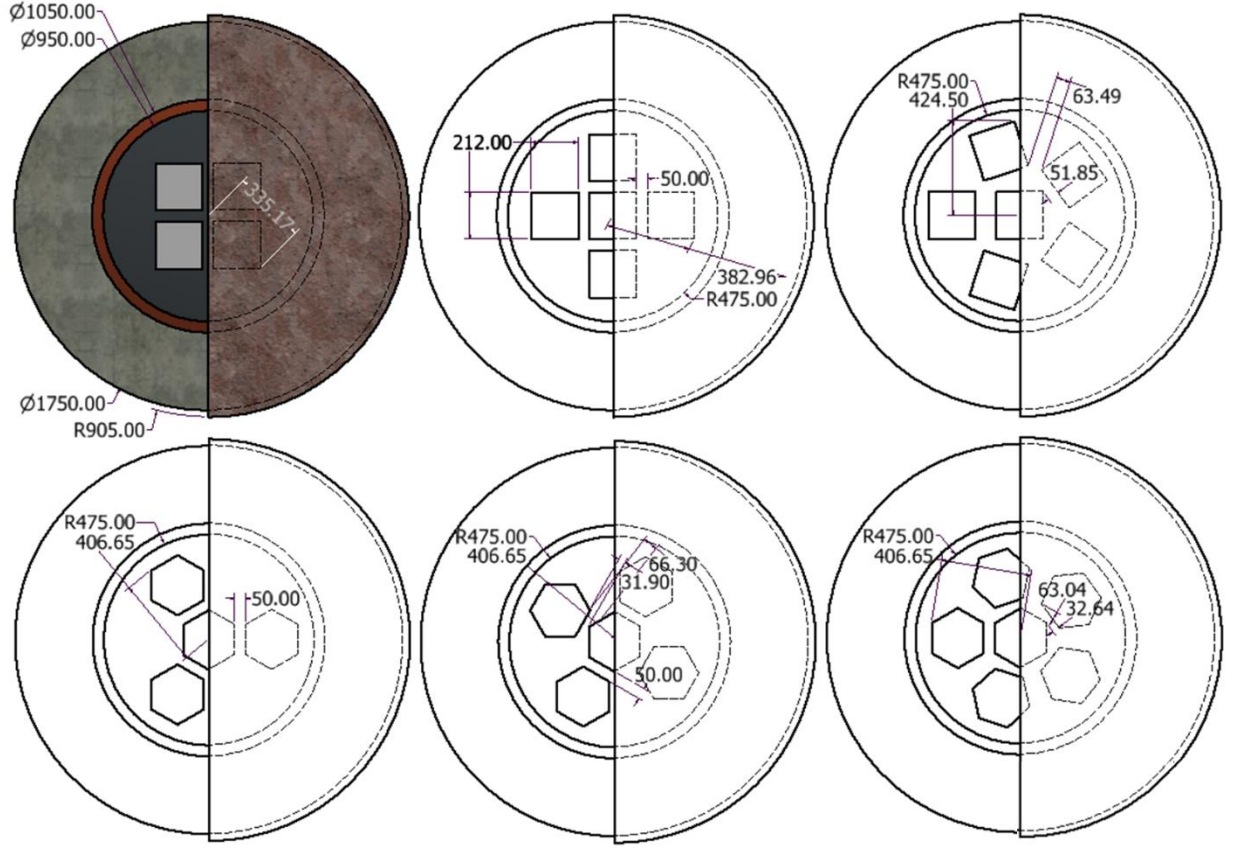


Şekil 3.6. ATMEA1 Reaktörü KNY 'ları için Tasarımlanan Atık Kabı ve Genel Hatlarına Ait Boyut Bilgisi (mm).

Her bir reaktör tipinin KNY' ları için 4, 5, 6 adet KNY içeren atık kabı geometrileri oluşturulmuştur. Geliştirilen ATMEA1 ve VVER – 1200 atık kabı tasarımlarının yüzey alanı kesitleri Şekil 3.7. 'de verilmektedir.

Şekiller içerisinde yüzey alanı kesitlerinin yanı sıra tasarımların belirlenen ölçütlere uygunluğuna atıf yapmak için ilgili uzaklık ve boyut değerleri de bu görsele dâhil edilmiştir. Paralel olan sınırlarda 5 cm uzaklık değeri korunurken paralel olmayan kesimlerde ise dış çemberdeki yakıt elemanının merkez ve açısız yerleşimleri sabit tutularak iki yüzeyin birbirine ortalama uzaklığının 5 cm 'den büyük olması sağlanmıştır. Açısız yerleşim 4 adet VVER – 1200 KNYD içeren atık kabında 120 derece, 5 adet VVER – 1200 veya ATMEA1

KNYD içeren atık kabı tasarımlarında 90 derece, 6 adet VVER – 1200 veya ATMEA1 KNYD içeren atık kabı için ise 72 derecedir.

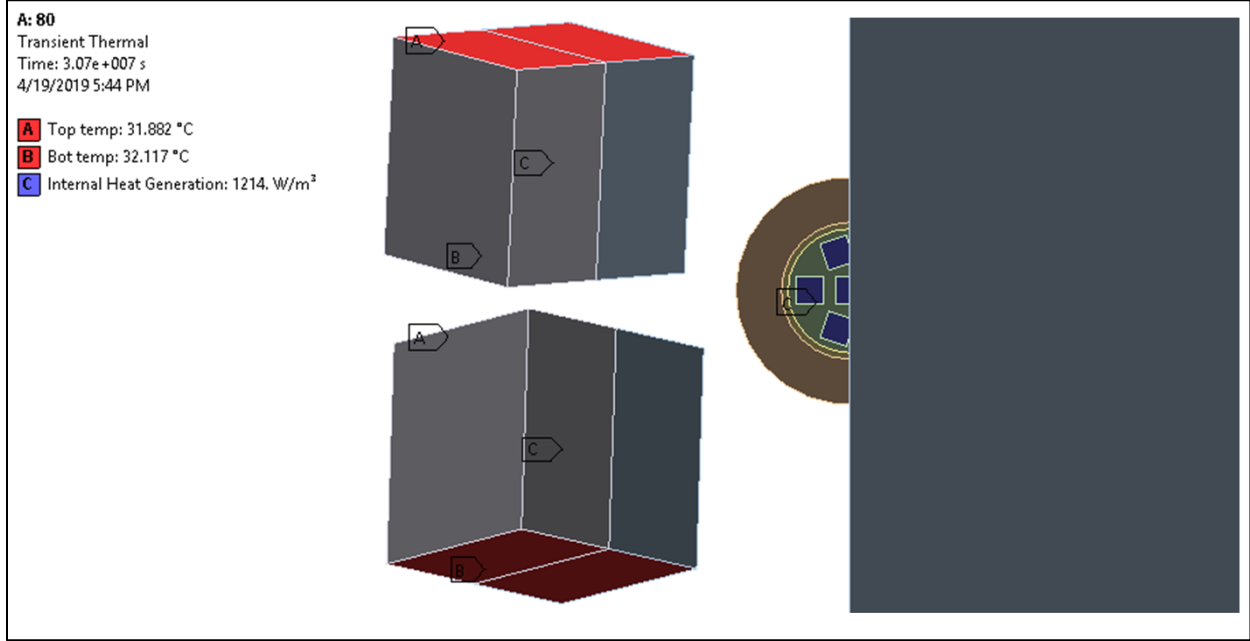


Şekil 3.7. ATMEA1(üstte) ve VVER – 1200(alta) reaktörlerinin KNYD 'leri için Tasarlanan Atık Kaplarının Yüzey Kesitleri.

3.2.3.3. Tasarlanan Modelin Sınır Şartlarının Tanımlanması

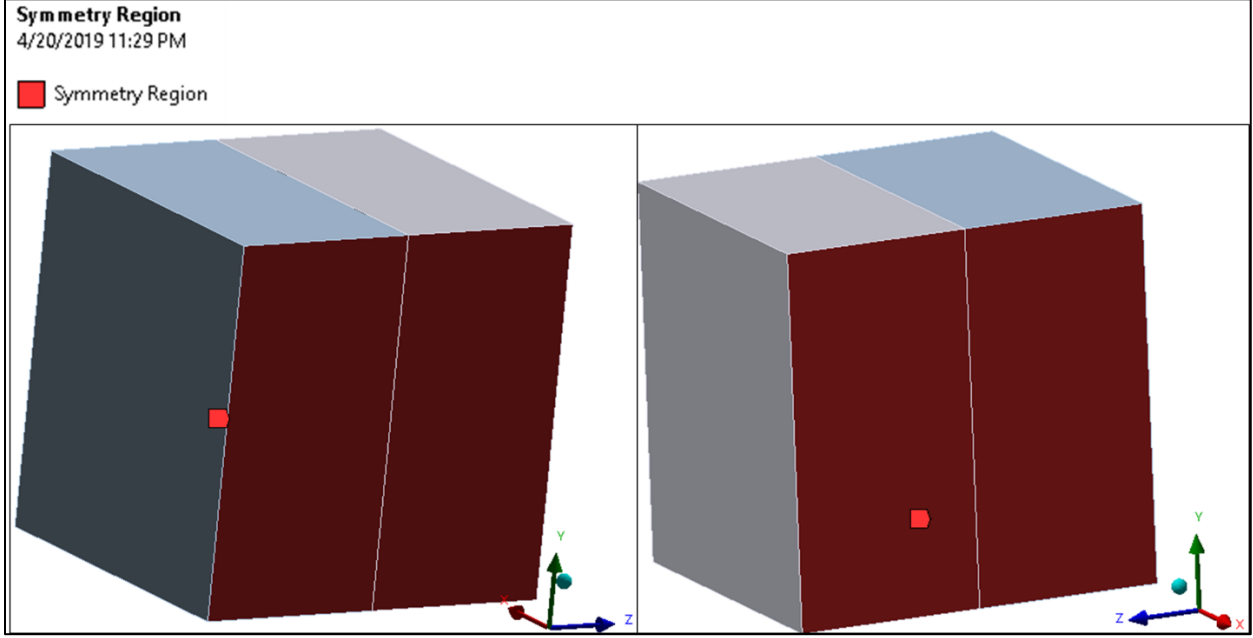
Isıl analizler ANSYS 19.2 yazılımının Mechanical APDL modülü ile “transient thermal” şablonu kullanılarak yapılmıştır. Bu süreçte, atık kabı modelinin yerin 400 m altına konuşlandırılacağı [11], [38] düşünülerek bentonit katmanı saran dolgu malzemesinin dış yüzeyinden 3 metre uzaklığa kadar ek granit kayaç blokları atık kabı modellerinin çevresini saracak şekilde yerleştirilmiştir. Bu bloklar üzerinde yer kabuğu derinliği yönündeki eksen boyunca ilk ve son yüzeye jeolojik gradient değerinden hesaplanan sıcaklık değerleri tanımlanmıştır[39].

Atık kabı içindeki yakıt demeti geometrilerine ısı üretimi fonksiyonundan alınan zaman verileri zaman bilgisi ile birlikte tanımlanarak KNY ' ların bozunum ısısı üretimi ve sıcaklık değerleri bilgisi için gerekli girdi oluşturulmuştur. Bu girdilerin modellenen geometri üzerindeki konumları Şekil 3.8. 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. ANSYS 19.2 Ortamında Tanımlanan Sıcaklık ve Isıl Yük Sınır Koşulları

Bunun yanında, modelde atık kaplarının birbiri ardına belirli boşluklarla yerleştirilmiş gibi davranması gerekmektedir. Bunun için atık kaplarının yatay yerleştirildiği eksen boyunca simetri özelliği tanımlanmıştır. Bu özellik ile sistem simetri tanımlanan yüzey doğrultusunda sürekli kendini tekrar ediyormuş gibi davranacaktır. Şekil 3.9. 'da modelin simetri yüzeyleri gösterilmektedir.



Şekil 3.9. ANSYS 19.2 Ortamında Tanımlanan Simetri Sınır Koşulları.

3.2.3.4. Malzeme Bilgilerinin ANSYS Programında Tanımlanması

Bu çalışmada kullanılan malzeme özelliklerine ait bilgilerin tam olarak elde edilmesi mümkün olmamıştır. Özellikle KNYD 'lerinin yoğunluk, ısı iletim katsayısı ve öz ısı değerleri için teoriyle birleştirilmiş herhangi bir kaynak bulunamamış olup bulunan diğer malzeme verileri de birçok değişkene (içeriğindeki nem oranı, saflık, ortam sıcaklığı, işlenme koşulları) bağlı olarak farklılık göstermektedir[12], [13], [40]. Diğer malzemelere ait veriler ise ANSYS yazılımının "Granta" isimli bilgi sağlayıcısından edinilen kütüphanesinden alınmıştır. Bertaraf tesisinin ısıl analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 3.1. 'de sunulduğu gibidir.

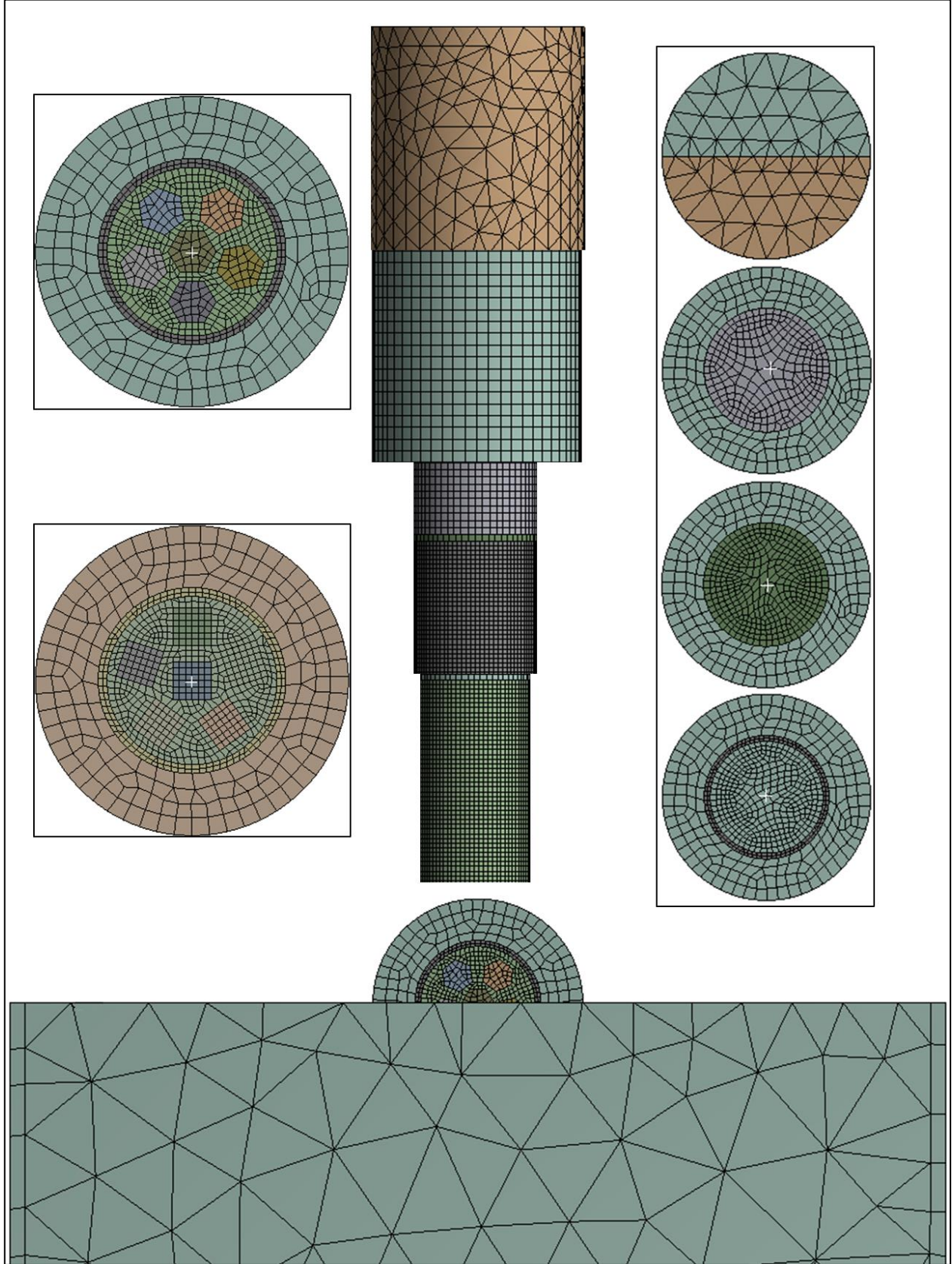
Çizelge 3.1. ANSYS Modelinde Kullanılan Malzemelerin Termo – Fiziksel Özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Isı İletim Katsayısı (W/m°C)	Öz ısı (kJ/kgK)
KNY demeti	2000	0.135	2.640
Dökme Demir	7200	52	0.447
Bakır	8940	394	0.385
Bentonit	1970	1	1.380
Dolgu (Toprak)	2270	2	1.190
Granit	2900	2.65	0.807

3.2.3.5. Sonlu Elemanlar Çözümü İçin Gerekli Ağ Yapısının Oluşturulması

ANSYS programı tanımlanan model ne olursa olsun çözüm için gerekli ağ yapısını oluşturacak altyapıya sahiptir. Bu çalışmada temel ağ yapısı başlangıç kabul edilerek simülasyonu gerçekleştirilen bütün senaryolarda kullanılmak üzere ortak bir ağ yapısı tabanı oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapılarındaki nokta sayısı 516331 – 576566, eleman sayısı ise 113935 – 123760 aralığında değişmektedir. Ağ yapısı aşağıdaki yaklaşımla oluşturulmuştur:

- İlk eleman için hedef boyut 0.5 m olarak belirlenmiştir. Geometriye göre özelleştirilmediği veya yapısı nedeniyle kısıtlanmadığı sürece bu boyutta mesafelerle noktaların konumu belirlenecektir.
- Değiştirilmediği sürece elemanlar üçgen tabana sahip (yüzey bölgeleri) dörtgen bloklar (tetrahedron) olarak atanacaktır.
- Atık kabı içeriğinde bulunan bütün yapılar (KNY, dökme demir tutucu iskelet ve bakır kap) sweep metoduyla ağ yapısı oluşturacak şekilde detaylandırılmıştır. Bu metod daha çok silindirik yapılara uyum sağlamasıyla bilinmektedir. Elemanların şekilleri dikdörtgen veya yamuk prizmaya benzemektedir. Eleman boyutu 0.04 m'dir. Bentonit katman için ise eleman boyutu 1 m' dir. Jeolojik bertaraf modeline uygulanana ağ yapısının görünümü Şekil 3.10. 'da detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Atık Kabı Modeli için Oluşturulan Ağ Yapısının Kesit Görüntüsü.

3.2.3.6. Çözüm İçin İhtiyaç Duyulan Başlangıç Sıcaklık Koşulları ve Isıl Yük Değerinin Hesaplanması

Modellenen ve ağ yapısı tanımlanmış bu bertaraf tesisi benzetimi tüm ısıl analizlerde kullanılmıştır. Bu uygulamalar esnasında modellenen sistemin üst ve alt sıcaklık değerleri aşağıdaki bağıntı ile belirlenmiştir.

$$Sıcaklık(^{\circ}C) = DYS(^{\circ}C) + 30(^{\circ}C/km) \times Derinlik (km)$$

Eşitlikte DYS: Dünya yüzey sıcaklığı'nı temsil eder ve değeri dünya genel ortalaması olan 20 °C[39] olarak kabul edilmiştir.

Modellerde ısı üretim değerleri her bir KNYD farklı ön-soğutma süreleri için MONTEBURNS kodundan alınan çıktı dosyalarından türetilmiş olsa da ANSYS yazılımı için bu türetilen değerlerin KNY hacmi için değil birim hacim (m³) için programa tanımlanması gerekmektedir. Bu çevrim yapıldıktan sonra senaryolar çözüm için hazır hale gelmiştir.

3.2.3.7. ANSYS Programından Sağlanan Bilgiler ve Değerlendirilmesi

Analizler sırasında atık kabı içerisinde, bakır atık kabının dış yüzeyinde ve bentonit katmanının dışında zamanla oluşan en yüksek sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Bu değerler ısıl limitlerle birlikte değerlendirilerek atık kapları arasındaki minimum uzaklıkların belirlenmesinde kullanılmıştır.

KNY 'lar yüksek aktivitelidir ve sıradan malzemelerin tasarlanmış bariyer olarak kullanılamayacağı düzeyde ısı yayılımı gerçekleştirmektedir. Ayrıca, KNYD 'nin bütün olarak bertaraf edilmesi üretilen ısının yoğunluğunu artırmaktadır. Bu nedenle, kullanılan malzemelerin bütünlüğünün bozulmaması adına koruma bariyerleri için belirli ısı limitleri[41] bulunmaktadır. Eski nesil Sovyet tasarımı RMBK – 1500 reaktörünün KNYD 'leri için yapılan çalışmalarda atık kabının kimyasal stabilitesinin korunabilmesi için dış yüzey sıcaklığının 100 °C'yi geçmemesi tasarım limiti olarak belirlenmiştir[42].

Günümüzde kullanılan tasarımlar içinde geçerli olan bu limit olup dış çevreye radyonüklitlerin yayılmaması açısından kritik önem teşkil etmektedir.

Mühendislik bariyerleri için kontaminasyonu önleyici limitlerden biri olarak kabul edilmiş olsa da tek başına bu değeri kabul etmek yeterli olmamaktadır. Genel olarak mühendislik bariyeri malzemesi olarak kullanılan Bentonit (veya yaygın adıyla güçlendirilmiş beton) içeriğinde bulunan madde oranlarının değişimine göre sıcaklık seviyesine karşılık iç stabilitesini koruma noktasında az da olsa değişkenlik gösterebilmektedir[12], [13]. Bu durum göz önüne alındığında söz konusu limitin en yüksek 95 °C olması ve güvenli – optimal tasarımın 90 °C – 95 °C atık kabı dış sıcaklığı aralığına göre seçilmesi uygun bulunmuştur.

Isıl analizler yapılırken gerçeğe uygunluk açısından bazı belirsizlikler mevcuttur. Bunlar:

- KNY' a ait bozunum ısı KNY' in reaktöre taze yakıt olarak ilk yüklendiği andaki zenginlik değeri, reaktör içerisinde bulunduğu süre ve yanma oranı değerlerine göre değişiklik göstermektedir [3], [43].
- KNY' nin etkin ısıl iletkenlik katsayısı teorik yaklaşımlarla doğrudan hesaplanamamaktadır. Bu değer ancak deneysel çalışmalar [40] ile belirlenebilmektedir. Bu çalışmalar söz konusu KNY' ların ulaşılabilirliğinin zorluğu göz önüne alındığında son derece az olup var olan verileri kullanmak ise bir belirsizlik faktörü yaratmaktadır.
- Ortam sıcaklığı yapılacak uygulamanın şartlarının iyi tahmin edilebilmesi ile elde edilebilecek bir veri olduğundan genellikle iç sıcaklık basamağı fonksiyonları ile jeolojik bertaraf tesisinin derinlik seviyesine göre belirlenebilir [44]. Yaşanacak olan ısı ve dolayısıyla sıcaklık birikimini tahmin etmekte ciddi bir hata oranı yaratmasa da sistem modellemesinde önem arz eden parametrelerdendir. Bu tezde iç sıcaklık basamağı fonksiyonunun üst dünya yer katmanı için analiz yapılacağı göz önüne alınarak lineer bir fonksiyon olduğu varsayılmıştır. Hesaplamaların güvenli olması açısından $25^{\circ}\text{C km}^{-1}$ [39] olarak kabul edilen değer $30^{\circ}\text{Ckm}^{-1}$ şeklinde hesaplamalara dahil edilmiştir.

Bütün bu etmenler göze alındığında kabul edilen limitlerin 5 °C aşağısında olan sıcaklık değerlerinin kullanılmasında fayda vardır.

4.SONUÇLAR ve TARTIŞMA

4.1. MONTEBURNS Analiz Sonuçları

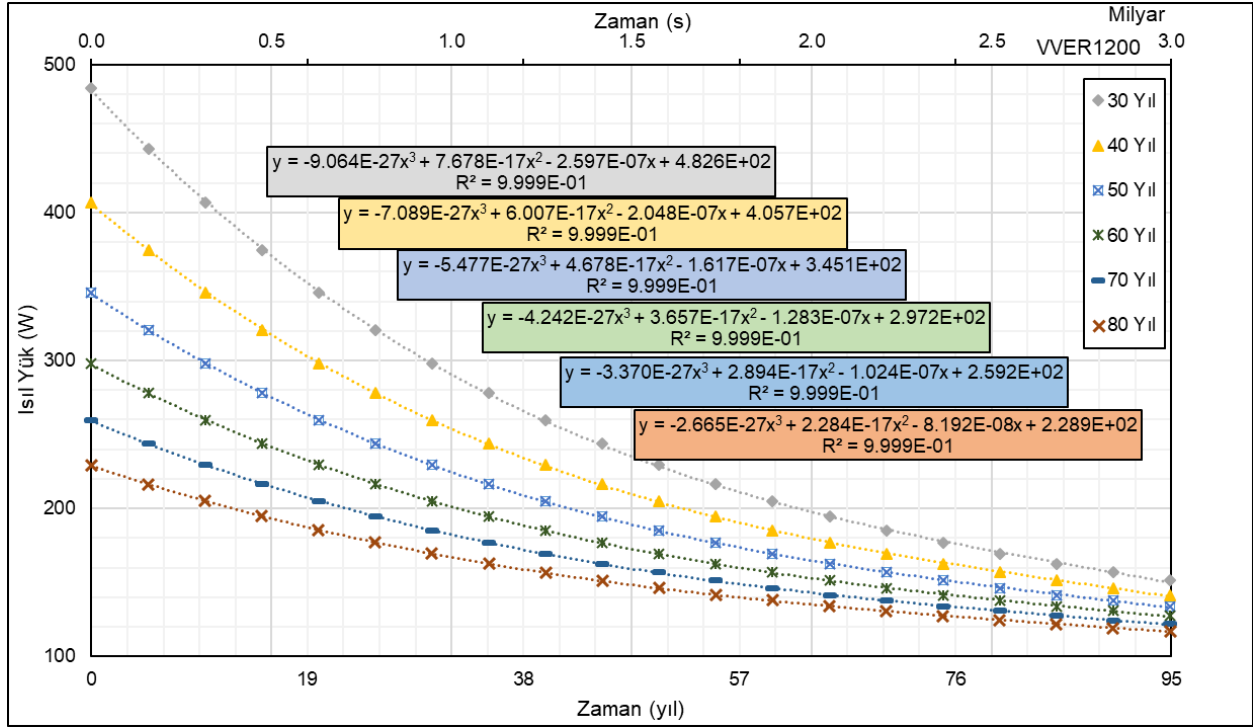
Birim hücre modellemelerinde öncelikle modeli geliştirilen reaktör tiplerinin tasarım bilgileri esas alınarak, tasarlanmış yanma oranı değerlerinin ve MONTEBURNS kodu ile elde edilen yanma oranlarının uyumluluğu için çalışmalar yapılmıştır. Bu aşamada elde edilen sonuçlar ve tasarım bilgilerine göre hata oranları Çizelge 4.1. 'de verildiği gibidir.

Çizelge 4.1. Birim Hücre Modeli Oluşturulan Reaktörler için Yanma Oranı Değerleri ve Hata Karşılaştırması.

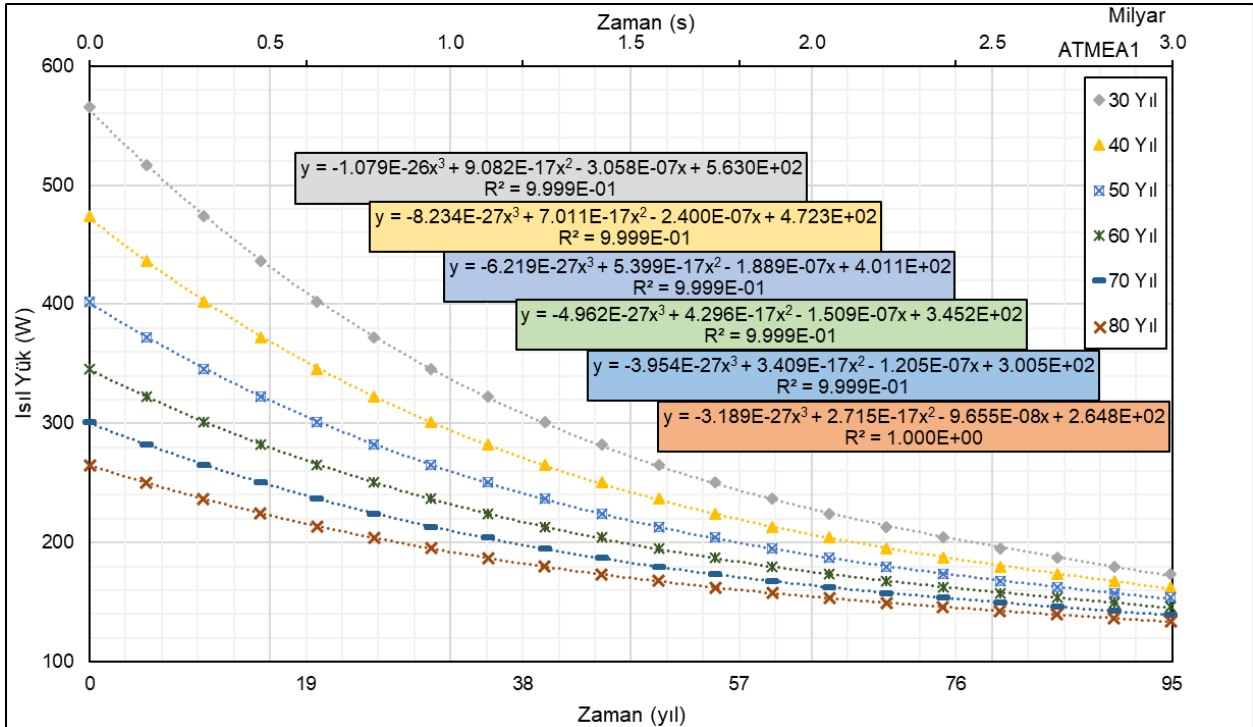
	Tasarlanmış Yanma Oranı(GW-gün/t)	Hesaplanan yanma oranı (GW-gün/t)	Hata Oranı (%)
VVER - 1200	55.00	54.48	0.95
ATMEA1	55.00	56.14	2.07

Hata oranlarına bakılacak olursa VVER – 1200 reaktörü için yanma oranı değerinin yüksek doğrulukla elde edildiği görülmektedir. ATMEA1 reaktörü için elde edilen görece daha yüksek hata oranı tasarım parametrelerine tam olarak ulaşamamasından kaynaklanmaktadır, ancak yine de kabul edilebilir seviyededir.

Yanma oranlarının uyumlu olduğu birim hücre modelleri KNY' ların ısı yük değerinin ön-soğutma süresine göre değişimini elde etmek için kullanılmıştır. Elde edilen ısı yük değerleri 30, 40, 50, 60, 70 ve 80 yıl ön-soğutma uygulanmış olan VVER – 1200 ve ATMEA1 KNYD 'leri için Şekil 4.1.ve 4.2. 'deki gibidir.



Şekil 4.1. Bir VVER – 1200 KNYD 'nin Isıl Yük Değeri.



Şekil 4.2. Bir ATMEA1 KNYD 'nin Isıl Yük Değeri.

Şekil 4.1. ve 4.2. 'de gösterilen grafiklerde mevcut olan denklemler elde edilen ısı yük verilerinden 3. dereceden polinom formunda eğilim fonksiyonları türetilerek elde edilmiştir. Bu fonksiyonların verilere yakınlık düzeyi grafiplerdeki R^2 değerlerinden gözlemlenebileceği gibi oldukça yüksektir.

Elde edilen bu ısı yük değerleri farklı atık kabı yükleme durumları için (4, 5 ve 6 adet KNYD içeren atık kabı) W/m^3 cinsinden hesaplanarak ANSYS 19.2 programında ısı üretim hızı olarak sisteme yansıtılmıştır.

4.2. ANSYS Analiz Sonuçları

Isıl hesaplamalar her KNYD yerleşim düzeni için bütün ön-soğutma süresi aralığı kullanılarak yapılmak yerine atık kabı dış yüzeyi sıcaklık değerinin hiç bir zaman $100^{\circ}C$ ' yi geçmemesi gerektiği ilkesine dayanılarak yapılmıştır. Çizelge 4.2., 4.3. ve 4.4. tüm atık kabı modelleri ve soğutma süreleri için atık kabı merkez sıcaklığı, dış yüzey sıcaklığı ve bentonit katman dış yüzey sıcaklığı değerlerini özetlemektedir. Çizelge 4.3. 'te görülebileceği üzere ısı analizler atık kabı dış yüzey sıcaklık değerlerinin bahsedilen limite yaklaştığı seviyeden daha sonrası için gerçekleştirilmemiştir. Bu analizler atık kaplarının birbirine olan uzaklığının sıcaklık üzerine olan etkisini inceleyebilmek için farklı uzaklık değerlerinde tekrarlanmıştır.

Çizelge 4.2. Atık Kabı Merkezi Sıcaklık Değerleri (°C).

VVER - 1200		Atık Kaplarının Birbirine Olan Uzaklıkları (m)									
KNYD	ÖS*	0.25	0.5	1	2	3	4	5	7	10	15
4	30	158.57	157.63	156.16	154.23	153.46	152.35	151.89	151.41	151.19	151.09
	40	138.52	137.73	136.50	134.87	133.89	133.28	132.89	132.49	132.30	132.21
	50	122.66	121.98	120.93	119.54	118.71	118.18	117.85	117.51	117.34	117.27
	60	110.18	109.59	108.69	107.49	106.77	106.32	106.03	105.73	105.59	105.52
	70	100.25	99.74	98.95	97.90	97.27	96.87	96.62	96.36	96.23	96.17
	80	92.31	91.85	91.15	90.23	89.67	89.32	89.09	88.86	88.74	88.69
5	30										
	40	152.35	151.36	149.88	147.85	146.63	145.86	145.38	144.81	144.57	144.45
	50	134.41	133.57	132.31	130.57	129.53	128.88	128.47	127.98	127.77	127.67
	60	120.30	119.58	118.49	116.99	116.09	115.53	115.17	114.75	114.57	114.48
	70	109.09	108.45	107.50	106.19	105.41	104.91	104.60	104.23	104.07	103.99
	80	100.11	99.55	98.71	97.55	96.86	96.42	96.14	95.81	95.67	95.60
6	30										
	40										
	50	146.77	145.76	144.18	142.10	140.86	140.07	139.94	139.04	138.79	138.67
	60	130.90	130.03	128.67	126.88	125.80	125.31	125.12	124.23	124.01	123.91
	70	118.34	117.58	116.39	114.82	113.88	113.48	113.28	112.51	112.31	112.22
	80	108.31	107.66	106.59	105.20	104.36	104.00	103.84	103.17	102.99	102.91
ATMEA1		Atık Kaplarının Birbirine Olan Uzaklıkları (m)									
KNYD	ÖS	0.25	0.5	1	2	3	4	5	7	10	15
4	30	170.50	170.30	167.90	165.81	164.54	163.76	163.26	162.74	162.49	162.39
	40	148.27	148.10	146.09	144.33	143.26	142.60	142.19	141.75	141.53	141.45
	50	130.82	130.68	128.96	127.46	126.55	125.99	125.64	125.26	125.07	125.00
	60	117.16	117.03	115.55	114.26	113.47	112.99	112.68	112.35	112.19	112.13
	70	106.19	106.08	104.79	103.66	102.97	102.55	102.28	101.99	101.85	101.79
	80	97.42	97.33	96.19	92.47	92.24	92.01	91.95	91.72	91.59	91.54
5	30										
	40	164.47	163.41	161.74	159.53	158.20	157.37	156.84	156.29	156.01	155.90
	50	144.55	143.65	142.23	140.35	139.22	138.51	138.06	137.59	137.35	137.26
	60	128.97	128.19	126.97	125.35	124.37	123.76	123.37	122.96	122.75	122.67
	70	116.53	115.84	114.78	113.37	112.51	111.97	111.64	111.27	111.09	111.02
	80	106.53	105.93	104.99	103.74	102.98	102.51	102.21	101.89	101.73	101.66
6	30										
	40										
	50	157.64	156.56	152.37	150.07	148.67	147.81	147.26	149.27	148.98	148.87
	60	140.24	139.31	135.70	133.72	132.51	131.76	131.29	133.02	132.77	132.67
	70	126.32	125.51	122.37	120.63	119.58	118.93	118.52	120.02	119.80	119.71
	80	115.21	114.49	111.72	110.19	109.26	108.68	108.31	109.64	109.44	109.36

Çizelge 4.3. Atık Kabı Dış Yüzey Sıcaklık Değerleri (°C).

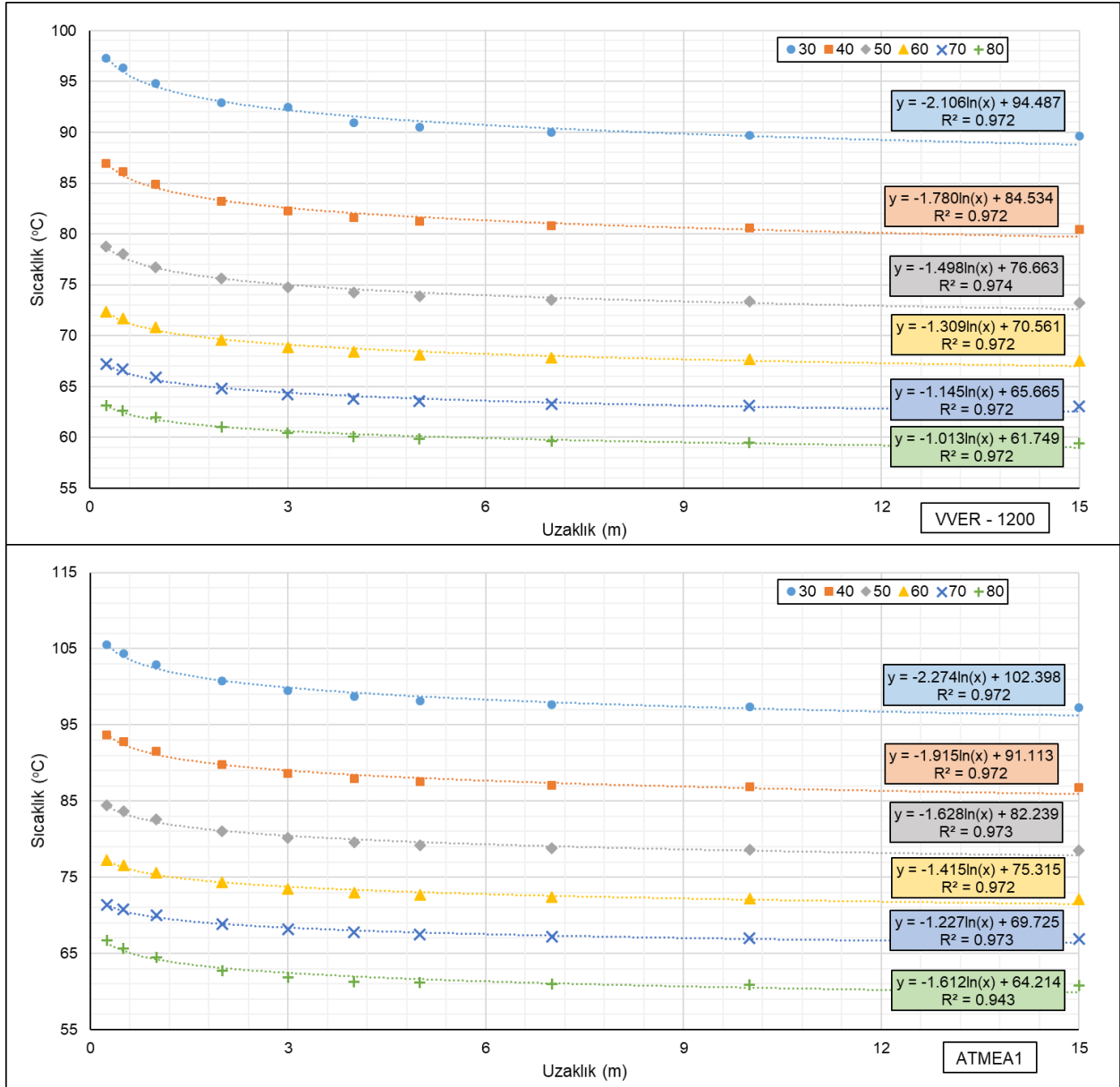
VVER - 1200		Atık Kaplarının Birbirine Olan Uzaklıkları (m)									
KNYD	ÖS	0.25	0.5	1	2	3	4	5	7	10	15
4	30	97.26	96.31	94.84	92.88	92.48	90.96	90.49	89.98	89.73	89.61
	40	86.93	86.13	84.89	83.24	82.25	81.62	81.22	80.80	80.59	80.48
	50	78.75	78.07	76.71	75.61	74.77	74.23	73.89	73.53	73.35	73.26
	60	72.32	71.73	70.82	69.61	68.88	68.42	68.13	67.81	67.66	67.58
	70	67.20	66.69	65.89	64.84	64.20	63.80	63.54	63.26	63.12	63.05
	80	63.11	62.65	61.95	61.02	60.45	60.10	59.87	59.62	59.50	59.44
5	30										
	40	100.48	99.49	97.90	95.95	94.72	93.94	93.44	92.85	92.58	92.45
	50	90.28	89.43	88.16	86.42	85.37	84.70	84.28	83.77	83.55	83.44
	60	82.25	81.53	80.43	78.93	78.02	77.45	77.08	76.64	76.45	76.35
	70	75.87	75.24	74.28	72.97	72.17	71.67	71.35	70.97	70.80	70.71
	80	70.77	70.21	69.36	68.20	67.50	67.06	66.77	66.43	66.28	66.20
6	30										
	40										
	50	101.99	100.98	99.40	97.31	96.05	95.25	94.41	94.20	93.93	93.79
	60	92.32	91.45	90.09	88.28	87.19	86.38	85.80	85.60	85.36	85.24
	70	84.66	83.90	82.71	81.13	80.18	79.48	78.88	78.79	78.58	78.48
	80	78.55	77.89	76.82	75.43	74.59	74.20	73.95	73.36	73.18	73.09
ATMEA1		Atık Kaplarının Birbirine Olan Uzaklıkları (m)									
KNYD	ÖS	0.25	0.5	1	2	3	4	5	7	10	15
4	30	105.51	104.32	102.89	100.77	99.48	98.69	98.17	97.62	97.34	97.22
	40	93.72	92.76	91.52	89.74	88.66	87.99	87.55	87.09	86.85	86.75
	50	84.46	83.62	82.59	81.08	80.15	79.58	79.22	78.82	78.61	78.53
	60	77.21	76.59	75.60	74.29	73.50	73.00	72.69	72.34	72.17	72.09
	70	71.39	70.78	69.99	68.85	68.15	67.72	67.45	67.15	66.99	66.93
	80	66.74	65.65	64.50	62.72	61.88	61.24	61.19	60.99	60.85	60.80
5	30										
	40	109.21	108.14	106.47	104.25	102.89	102.05	101.51	100.93	100.63	100.51
	50	97.61	96.70	95.27	93.39	92.24	91.52	91.06	90.56	90.31	90.20
	60	88.53	87.75	86.52	84.89	83.90	83.28	82.88	82.46	82.23	82.14
	70	81.28	80.59	79.52	78.10	77.24	76.70	76.35	75.98	75.78	75.70
	80	75.45	74.85	73.91	72.65	71.89	71.41	71.11	70.78	70.60	70.53
6	30										
	40										
	50	110.76	109.67	107.14	104.83	103.41	102.54	101.98	101.72	101.41	101.29
	60	99.86	98.92	96.74	94.74	93.53	92.77	92.29	91.98	91.71	91.60
	70	91.14	90.32	88.42	86.68	85.62	84.96	84.54	84.19	83.95	83.86
	80	84.17	83.45	81.77	80.24	79.30	78.72	78.35	77.97	77.76	77.67

Çizelge 4.4. Bentonit Katman Dış Yüzey Sıcaklık Değerleri (°C).

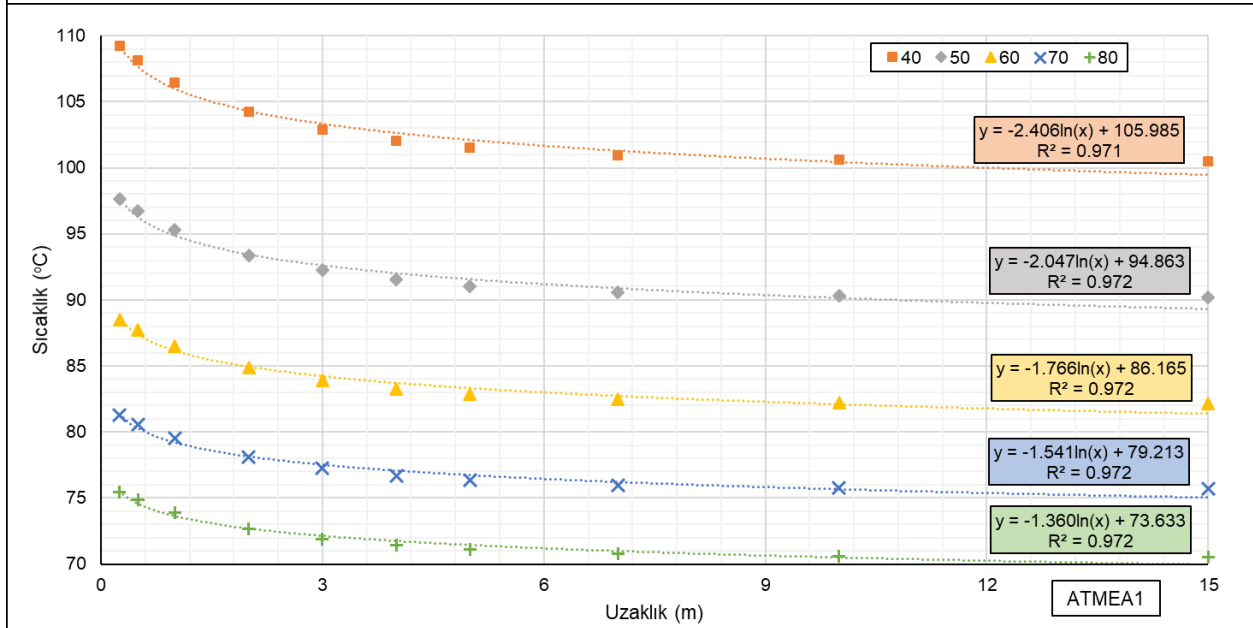
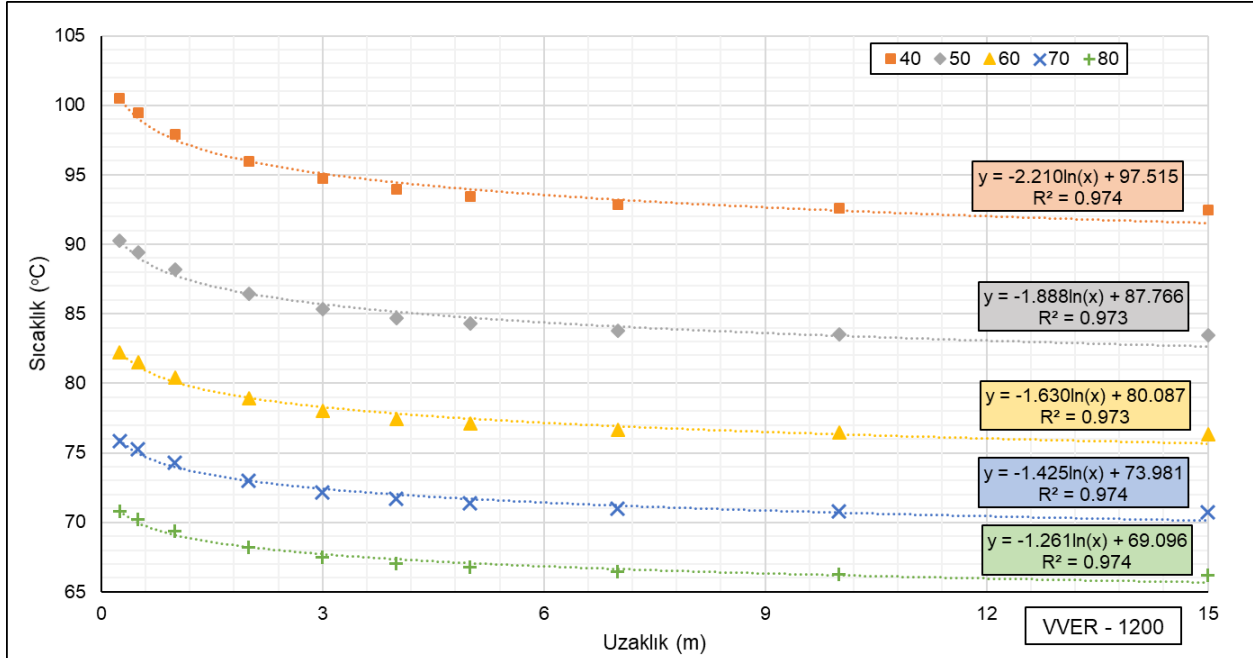
VVER - 1200		Atık Kaplarının Birbirine Olan Uzaklıkları (m)									
KNY	ÖS	0.25	0.5	1	2	3	4	5	7	10	15
4	30	69.85	69.09	67.86	66.22	65.38	64.56	64.11	63.67	63.44	63.28
	40	63.86	63.22	62.19	60.81	59.96	59.40	59.03	58.66	58.46	58.32
	50	59.12	58.57	57.70	56.52	55.80	55.32	55.00	54.69	54.52	54.41
	60	55.39	54.92	54.16	53.15	52.53	52.12	51.84	51.57	51.42	51.31
	70	52.42	52.01	51.35	50.46	49.92	49.56	49.32	49.08	48.95	48.80
	80	50.05	49.68	49.10	48.32	47.84	47.52	47.31	47.10	46.98	46.89
5	30										
	40	71.71	70.91	69.67	67.94	66.88	66.18	65.63	65.23	64.97	64.85
	50	65.79	65.12	64.06	62.59	61.69	61.09	60.70	60.28	60.06	59.85
	60	61.14	60.56	59.65	58.38	57.60	57.08	56.75	56.38	56.19	55.91
	70	57.44	56.93	56.14	55.03	54.35	53.90	53.61	53.29	53.12	52.99
	80	54.49	54.03	53.33	52.35	51.75	51.35	51.09	50.81	50.66	50.48
6	30										
	40										
	50	72.58	71.77	70.45	68.70	67.62	66.91	66.91	65.96	65.69	65.73
	60	66.97	66.27	65.14	63.63	62.70	62.26	62.09	61.27	61.03	60.99
	70	62.54	61.92	60.94	59.61	58.80	58.44	58.27	57.55	57.34	57.24
	80	58.99	58.46	57.58	56.41	55.69	55.38	55.22	54.59	54.40	54.25
ATMEA1		Atık Kaplarının Birbirine Olan Uzaklıkları (m)									
KNY	ÖS	0.25	0.5	1	2	3	4	5	7	10	15
4	30	77.42	77.00	75.28	73.48	72.36	71.66	71.18	70.70	70.41	70.33
	40	70.14	69.53	68.34	66.83	65.89	65.30	64.89	64.49	64.24	64.18
	50	64.42	63.92	62.89	61.60	60.81	60.30	59.96	59.61	59.41	59.35
	60	59.94	59.54	58.62	57.51	56.82	56.39	56.10	55.80	55.62	55.57
	70	56.35	55.90	55.20	54.23	53.63	53.25	52.98	52.73	52.58	52.53
	80	53.48	53.03	52.46	49.41	49.19	48.97	48.90	48.29	48.15	48.11
5	30										
	40	79.70	78.84	77.45	75.55	74.38	73.65	73.14	72.64	72.33	72.25
	50	72.54	71.81	70.62	69.01	68.02	67.39	66.96	66.53	66.27	66.20
	60	66.93	66.30	65.28	63.89	63.03	62.49	62.13	61.75	61.53	61.47
	70	62.45	61.90	61.01	59.80	59.05	58.58	58.26	57.93	57.74	57.68
	80	58.85	58.37	57.59	56.52	55.86	55.44	55.16	54.87	54.70	54.65
6	30										
	40										
	50	80.65	79.77	78.02	76.06	74.86	74.10	73.58	73.45	73.14	73.05
	60	73.92	73.16	71.65	69.97	68.93	68.27	67.82	67.71	67.44	67.37
	70	68.53	67.88	66.56	65.09	64.18	63.61	63.22	63.12	62.88	62.82
	80	64.23	63.65	62.49	61.19	60.39	59.89	59.54	59.45	59.25	59.19

*: Ön-soğutma süresi.

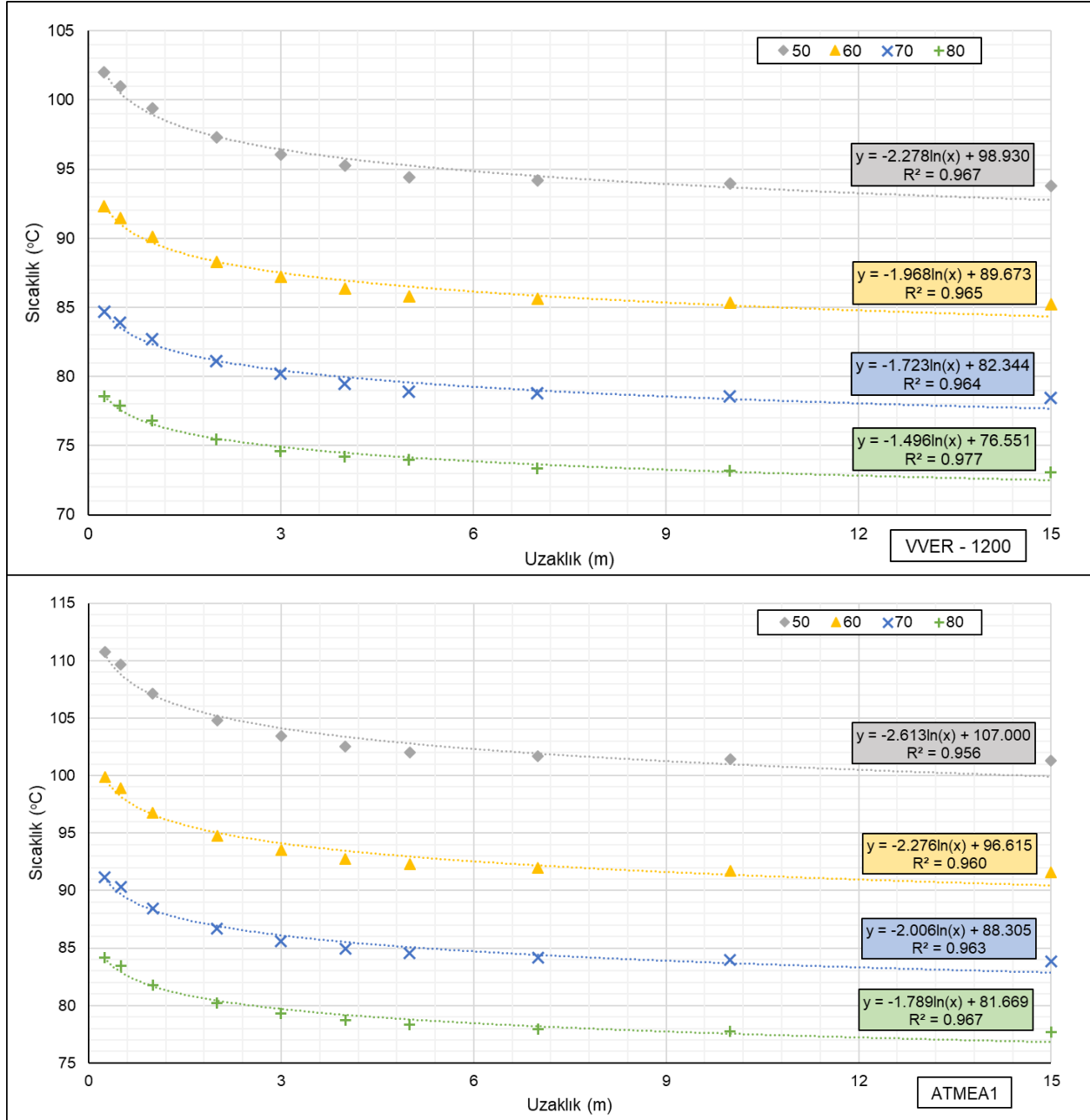
Çizelge 4.3 'te listelenen veriler en yüksek atık kabı dış yüzey sıcaklık değerinin atık kapları arasındaki uzaklıkla değişimi hakkında daha anlaşılır bir bilgi elde etmek için yeniden düzenlenmiştir. Veriler, reaktör tipi ve KNYD ön-soğutma süresi ile sınıflandırılarak grafik üzerinde gösterilmiş ve sıcaklığın uzaklıkla değişimi logaritmik karakteristiğe sahip bir fonksiyon ile ifade edilmiştir. Şekil 4.3., 4.4. ve 4.5. 'te bu grafikler ve değişim fonksiyonları tüm analizler için sunulmuştur.



Şekil 4.3. 4 adet VVER – 1200 ve ATMEA1 KNYD içeren Atık Kaplarının Dış Yüzey Sıcaklığı– Atık Kapları Arası Mesafe Değişim Grafiği.



Şekil 4.4. 5 adet VVER – 1200 ve ATMEA1 KNYD içeren Atık Kaplarının Dış Yüzey Sıcaklığı– Atık Kapları Arası Mesafe Değişim Grafiği.



Şekil 4.5. 6 adet VVER – 1200 ve ATMEA1 KNYD içeren Atık Kaplarının Dış Yüzey Sıcaklığı– Atık Kapları Arası Mesafe Değişim Grafiği.

Elde edilen uzaklığa bağlı olarak değişen sıcaklık değerleri kullanılarak atık kabı dış yüzeyinin ısı limitini geçmemesi için gereken minimum uzaklık değerleri KNY ön-soğutma süresi ve atık kabının içerdiği KNYD sayısına göre hesaplanmıştır. Hesaplanan atık kapları arası minimum uzaklıklar Çizelge 4.5 'te verilmiştir.

VVER - 1200		Isıl limit (°C)				ATMEA1		Isıl limit (°C)			
KNYD	ÖS	95	90	85	80	KNYD	ÖS	95	90	85	80
4	30	0.78	8.42			4	30				
	40			0.77	12.77		40	0.13	1.79		
	50				0.11		50			0.18	3.96
	60						60				
	70						70				
	80						80				
5	40	3.12				5	40				
	50		0.31	4.33			50	0.94	10.76		
	60				1.05		60		0.11	1.93	
	70						70				0.60
	80						80				
6	50	5.61				6	50				
	60		0.85	10.75			60	2.03	18.29		
	70			0.21	3.90		70		0.43	5.19	
	80						80			0.16	2.54

Çizelge 4.5. Farklı Sıcaklık Limitleri için Atık Kapları Arası Minimum Uzaklık Değerleri.

Çizelge 4.5. 'te, tüm atık kabı tasarımlarının farklı uzaklıkları için yapılan ısıl analizlerden elde edilen verilerden türetilen fonksiyonlarla hesaplanmış atık kapları arası minimum uzaklık verileri mevcuttur. Kullanılan fonksiyonun karakteristiğinden dolayı hiç bir zaman sıcaklık limitlerine ulaşmayacak senaryolar için atık kapları arası uzaklık değerleri çok küçük çıkmaktadır. Veri alınan en küçük uzaklık değerinin 0.25 m olduğu düşünüldüğünde bu değer altında tahmin için kullanılan fonksiyon yaklaşık sonuçlar vermeyecektir. Bu nedenle, 0.1 m ve altındaki minimum uzaklık değerlerinde ısıl limitler hiçbir zaman aşılamamaktadır. Bu değerler Çizelge 4.5. 'te mavi renk ile işaretlenmiştir. Söz konusu sıcaklık limitlerinin altına inmeyen uzaklıklar ise (<25 m) kırmızı renk ile işaretlenmiştir. Tasarımsal olarak jeolojik bertaraf tesisi için en uygun olacağı düşünülen minimum uzaklıkların elde edildiği KNYD sayısı, ön-soğutma süresi, ısıl limit kombinasyonları ise yeşil renk ile gösterilmiştir.

4.2.1. Elde Edilen Sıcaklık Verilerinin Değerlendirilmesi

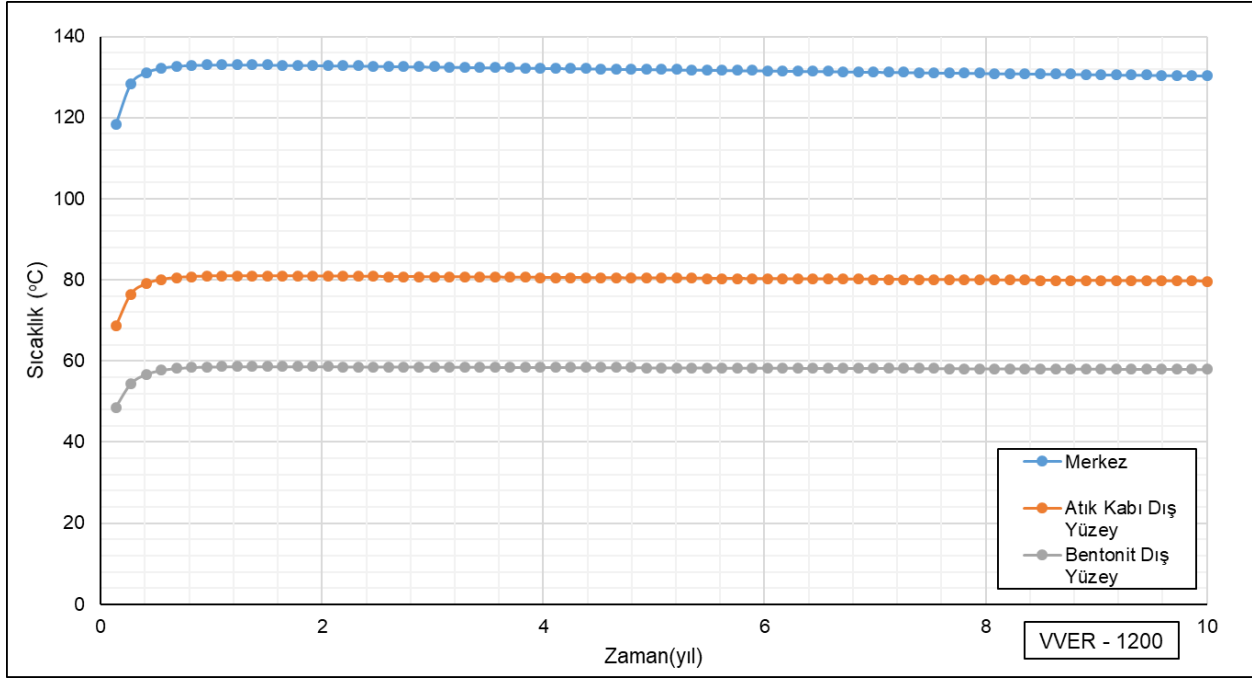
Çizelge 4.5.'de sıcaklık limitinin 80°C kabul edildiği jeolojik bertaraf tesisi tasarımında kullanılabilecek minimum uzaklık değerleri için ANSYS programında ısıl benzetimler tekrar edilmiştir. Analiz sonuçlarında Çizelge 4.6' da gösterildiği gibi söz konusu minimum uzaklıklar kullanıldığında ısıl limitin sağlandığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.6. 80 °C Sıcaklık Limiti için Elde Edilen Sonuçların Test Sonuçları.

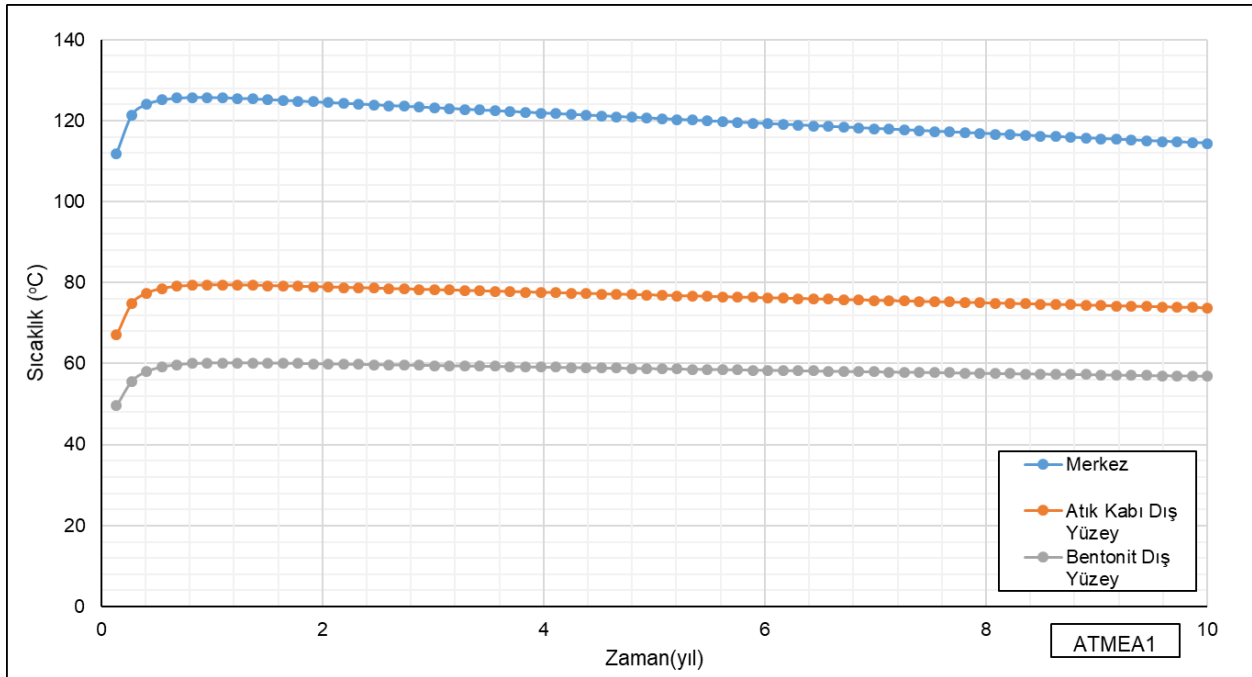
KNYD Sayısı	KNY ön-soğutma Süresi	Atık Kapları Arası Uzaklık (m)		Sıcaklık (°C)		
		Minimum	Kullanılan	Merkez	Dış Yüzey	Bentonit
4	40	12.77	12.80	132.22	80.50	58.36
5	60	1.05	1.10	116.73	78.67	58.17
6	70	3.9	3.95	113.31	79.60	58.27
ATMEA1						
4	50	3.96	4.00	125.99	79.58	60.30
5	70	0.6	0.65	115.48	80.23	61.61
6	80	2.54	2.55	109.63	79.68	60.71

Elde edilen sonuçlara göre sıcaklık değerinin $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar tahmin edilebildiği görülebilmektedir. Söz konusu senaryolar için 10 yıllık bir zaman aralığında elde edilensıcaklık – zaman değişim grafikleri Şekiller 4.6. ile 4.11. arasında verilmiştir.

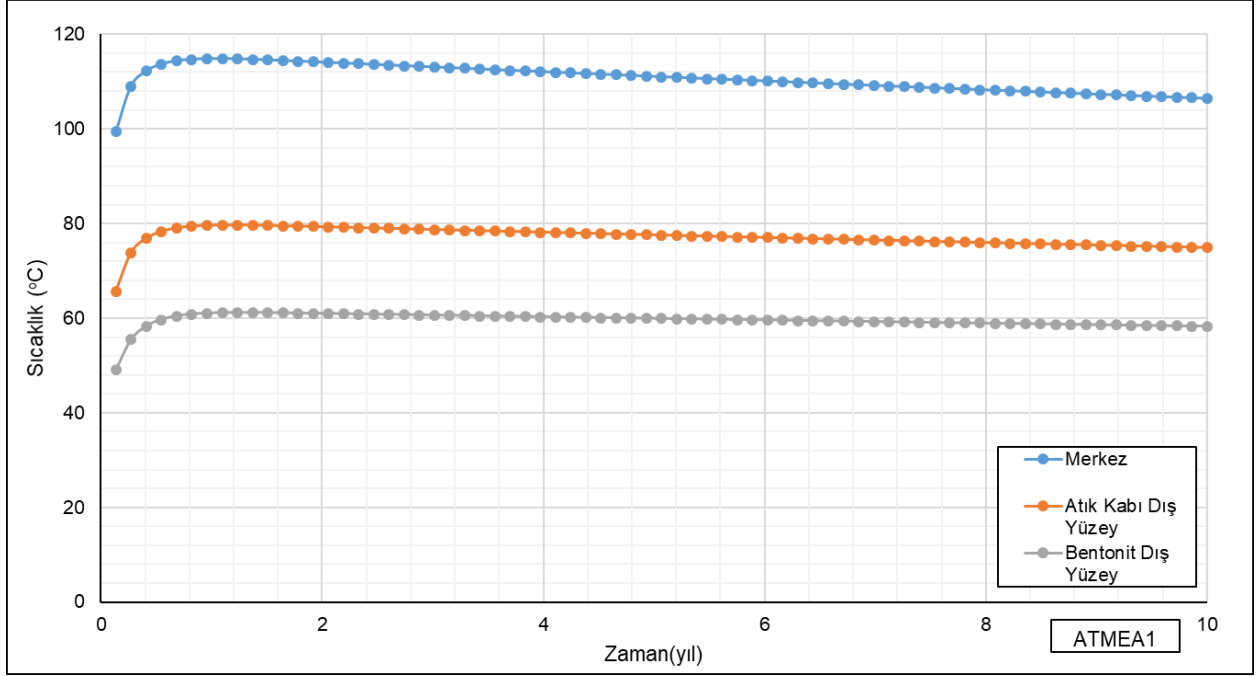
Sonuçlar içerisinde tahmin edilebilirlik kriteri belirli bir düzeyde sağlanmış olsa da 2 senaryonun 80 °C ısıl limit değerinin çok az üstünde kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun anlaşılabilmesi için 4 adet VVER – 1200 KNYD ve 5 adet ATMEA1 KNYD içeren atık kapları için sıcaklığın uzaklık ile değişimi için türetilen fonksiyonlar ile sıcaklık ilişkisi irdelenmiştir. Sonuçlar Ek - 1 bölümünde tartışılmıştır.



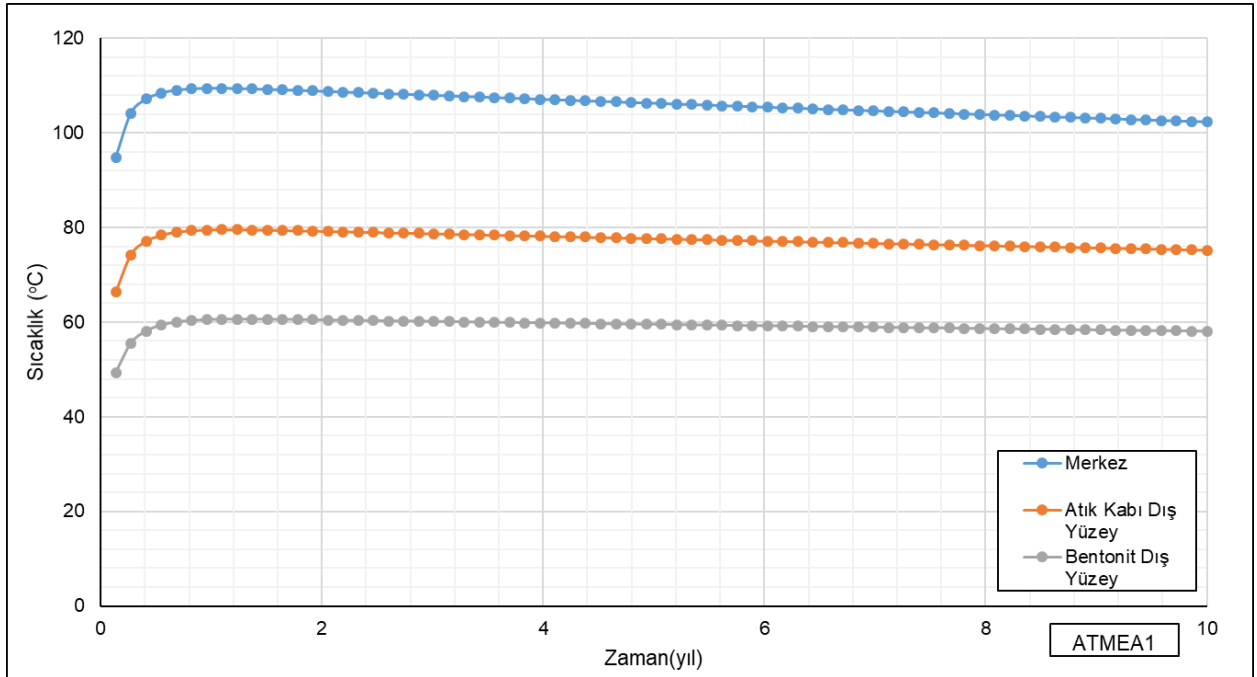
Şekil 4.6. 4 Adet VVER – 1200 KNYD İçeren Atık Kabı Sıcaklık – Zaman Değişim Grafiği.



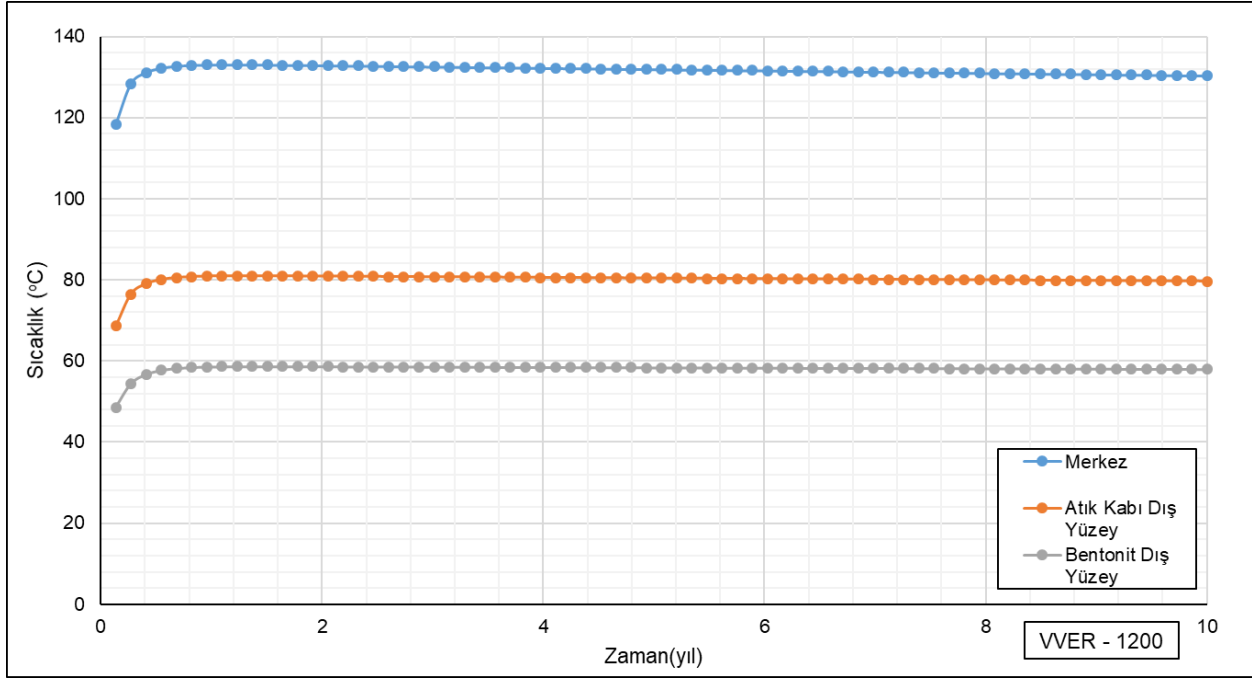
Şekil 4.7. 4 Adet ATMEA1 KNYD İçeren Atık Kabı Sıcaklık – Zaman Değişim Grafiği.



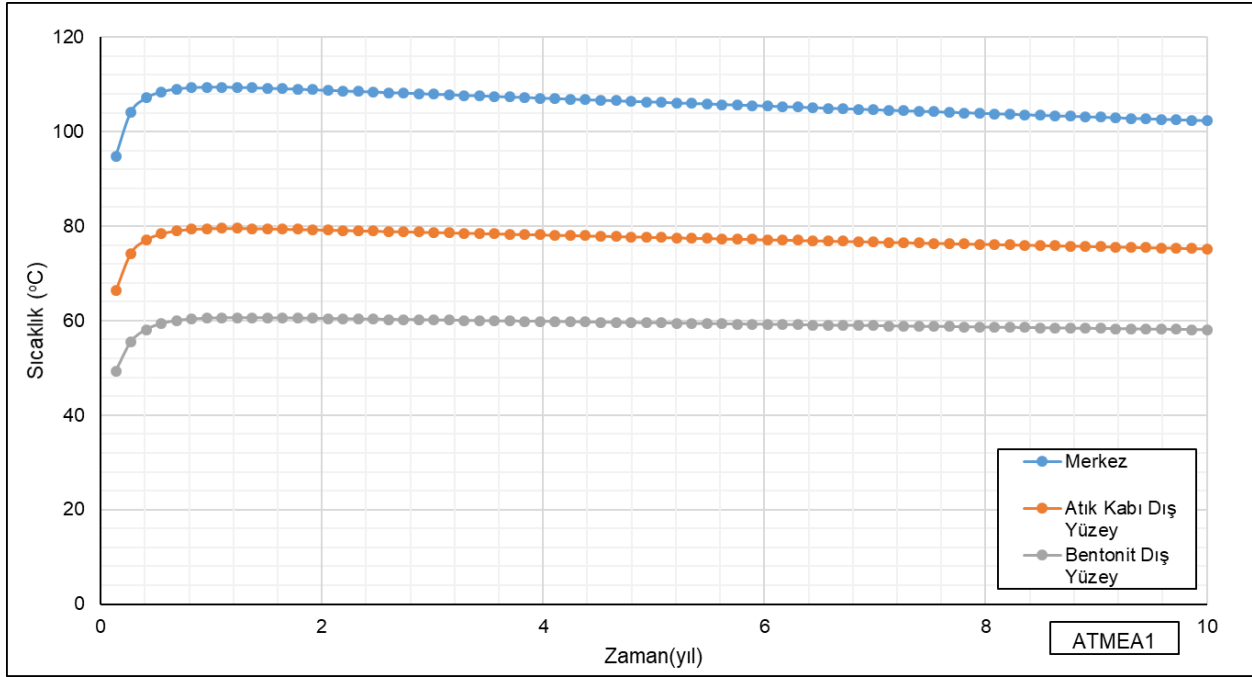
Şekil 4.8. 5 Adet VVER – 1200 KNYD İçeren Atık Kabı Sıcaklık – Zaman Değişim Grafiği.



Şekil 4.9. 5 Adet ATMEA1 KNYD İçeren Atık Kabı Sıcaklık – Zaman Değişim Grafiği.



Şekil 4.10. 6 Adet VVER – 1200 KNYD İçeren Atık Kabı Sıcaklık – Zaman Değişim Grafiği.



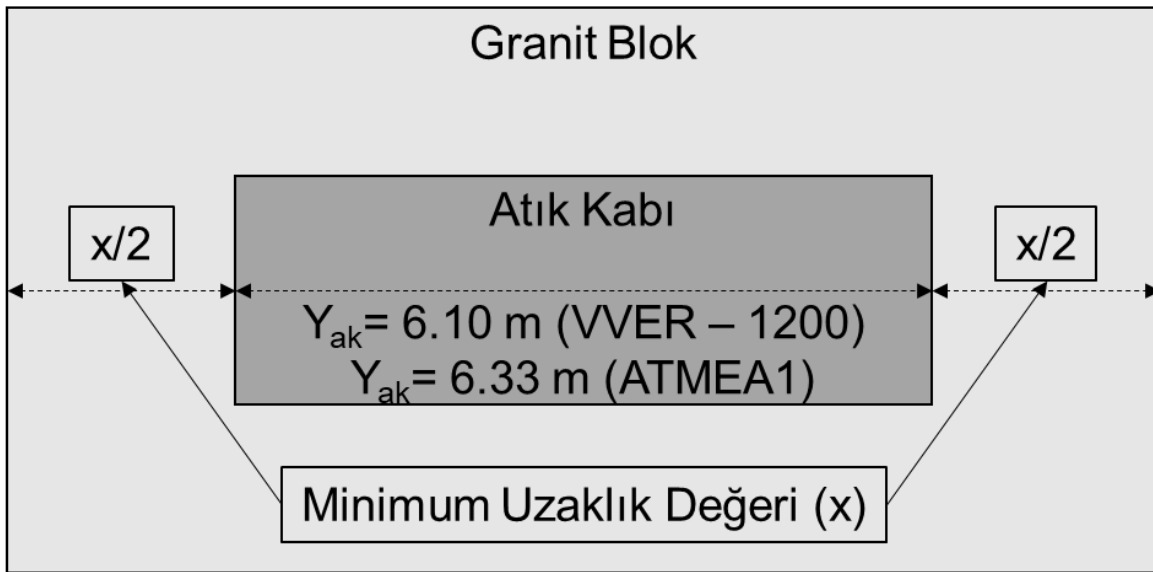
Şekil 4.11. 6 Adet ATMEA1 KNYD İçeren Atık Kabı Sıcaklık – Zaman Değişim Grafiği.

Atık kabı üzerindeki zamana bağlı sıcaklık değişim profili sıcaklık değerleri farklı olsa da aynı kalmaktadır. Bunun sebebi, yeryüzünde ortam sıcaklığında bulunan ve hiç ısıl yüke

maruz kalmamış bir atık kabına yüksek miktarda ısı yayan KNYD 'lerinin birden yüklenerek sıcaklık artışına sebep olmasıdır. Bu sıcaklık artışı KNYD' den yayılan ısı değerinin zamanla azalarak atık kabından dışarı yayılan ısı difüzyonu miktarı ile eşitlenmesine kadar devam etmektedir. Bu eşitlenme noktası 1 senelik bir süreden daha kısa sürede oluşsa da karakteristik bir ani yükseliş her yapılan KNYD yüklemesinde gözlemlenmektedir. Eşitlenme noktasından sonra ise sıcaklık değerleri yükselme süresine göre çok daha yavaş bir zaman diliminde azalmaktadır. Bu durumda, jeolojik bertarafatırsıl yükü belirleyen sıcaklık limitinin 1 yıl içerisinde aşılması ile atık kabının seneler boyunca ısını kaybederek soğumasının sağlanacağı söylenebilir.

4.2.2. Bertaraf Yoğunluğunun Hesaplanması

Bertaraf yoğunluğu, birim yüzeyde bertaraf edilebilecek atık miktarıdır. Ancak, analizler sonucunda bertaraf yoğunluğu değerinin atık kabının kesit alanı doğrultusundaki uzaklık ile (bertaraf tünelleri arasındaki mesafe) baskın bir şekilde değişmeyeceği görülmüştür. Bu yüzden, bertaraf yoğunluğu atık kabının tünele yerleştirildiği doğrultuda, Şekil 4.12 de gösterilen parametreler kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama kullanılan eşitlik aşağıdaki gibidir:



Şekil 4.12. Bertaraf Yoğunluğunun Hesaplanmasında Kullanılan Değişkenler.

$$\text{Bertaraf Yoğunluğu (KNYD/m)} = \text{KNYD Sayısı} / (\text{Y}_{\text{ak}} + x)(\text{m})$$

Hesaplanan atık bertaraf yoğunlukları Çizelge 4.7. 'de sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Atık Kapları Arası Minimum Uzaklık Hesaplanan Senaryolar için Bertaraf Yoğunluğu Değerleri.

VVER - 1200		Isıl limit (°C)				ATMEA1		Isıl limit (°C)				
KNYD	ÖS	95	90	85	80	KNYD	ÖS	95	90	85	80	
4	30	0.58	0.28			4	30					
	40			0.58	0.21		40	0.62	0.49			
	50				0.64		50				0.61	0.39
	60						60					
	70						70					
	80						80					
5	40	0.54				5	40					
	50		0.78	0.48			50	0.69	0.29			
	60				0.7		60		0.78	0.61		
	70						70				0.72	
	80						80					
6	50	0.51				6	50					
	60		0.86	0.36			60	0.72	0.24			
	70			0.95	0.6		70		0.89	0.52		

Bertaraf yoğunluğunun değeri ısı limitleri sağlayan ve anlamlı olarak seçilen senaryolar için en yüksek 0.95 m, en düşük 0.21 m olarak belirlenmiştir. Bu değerler birim uzunluk (m) başına bertaraf edilen KNYD sayısı şeklinde ifade edilebilir.

4.3. Sonuçların Değerlendirmesi

Bertaraf yoğunluğu dikkate alındığında VVER-1200 için en uygun tasarım 60 yıl ön-soğutma uygulanmış 5 KNYD içeren atık kabı, ATMEA1 için ise 70 yıl ön-soğutma uygulanmış 5 KNYD içeren atık kabıdır.

Ayrıca, VVER-1200 ve ATMEA1 KNY 'larının hesaplanan yatay jeolojik bertaraf yoğunlukları dikkate alınarak bertaraf öncesi yönetimlerine ilişkin stratejiler geliştirilebilir:

- Yeterince yeryüzü depolama imkanı mevcut ise: KNY 'lar yaydıkları ısı azalarak söz konusu sıcaklık limitleri önemsiz oluncaya kadar depolanabilirler. Bu noktadan itibaren bertaraf yoğunluğu maksimum değerde (0.95) olacak şekilde atık kapları 6 KNYD (geometrik olarak mümkün olduğu takdirde daha fazla) yüklenmiş bir şekilde ardışık olarak aralarında neredeyse hiç mesafe bırakılmadan bertaraf tünellerine yerleştirilebilir.
- Yüzeyde uzun süre depolama imkanı mevcut değilse: Çizelge 4.7 'de listelenen sıcaklık limiti değerleri doğrultusunda yeryüzü depolama imkanının tükenmesine dayalı bekleme süresi sınırlaması ile önerilen 3 farklı yerleşim kombinasyonundan biri veya birkaçı ile bertaraf işlemi gerçekleştirilebilir. Örneğin: Yeryüzü depolama imkanları 40 yıllık bir süreçte tükenme noktasına geliyorsa bir kısım KNYD 'i bu safhada gömülerek yeryüzü depolama imkanları artırılır ve süreç bu şekilde bütün KNYD 'lerinin bertaraf işlemi gerçekleştirilene kadar devam eder.
- Çok uzun süre bekleme imkanının olmadığı ve bütün KNYD 'lerinin bir anda bertaraf edilmesini gerektiren bir senaryoda ise bekleme süresi noktası ön planda olmak üzere en yoğun bertaraf düzeni seçilerek işlemin tamamlanması gerekmektedir. Böyle bir durum için en makul seçeneğin 5 KNYD yerleştirilen model olması beklenmektedir.

4.4. Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Bu tez çalışmasında, yeni nesil nükleer reaktörler arasında yer alan VVER – 1200 ve ATMEA1 tipi reaktörlerin KNY' larının yatay bertarafı için ısı analizler gerçekleştirilmiş ve atık bertaraf yoğunlukları belirlenmiştir. VVER – 1200 ve ATMEA1 KNY' larının tasarlanan yanma oranlarındaki ısı ve nötronik özellikleri MONTEBURNS 2.0 kodu kullanılarak birim hücre yaklaşımı ile belirlenmiştir. Hesaplanan KNY özellikleri kullanılarak ısı analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı ön-soğutma sürelerine sahip (30, 40, 50 ve 60 yıl) ve farklı sayılarda KNY demeti (4, 5 ve 6 adet) yüklenmiş atık kabı tasarımları için yatay jeolojik bertaraf yoğunlukları hesaplanmıştır.

Sonuçlar, birim tünel uzunluğunda bertaraf edilen KNYD miktarı dikkate alındığında, yatay jeolojik bertaraf için en uygun atık kabı tasarımlarının 60 yıl ön-soğutma uygulanmış

5 VVER-1200 KNYD içeren atık kabı ve 70 yıl ön-soğutma uygulanmış 5 ATMEA1 KNYD içeren atık kabı tasarımları olduğunu göstermiştir.

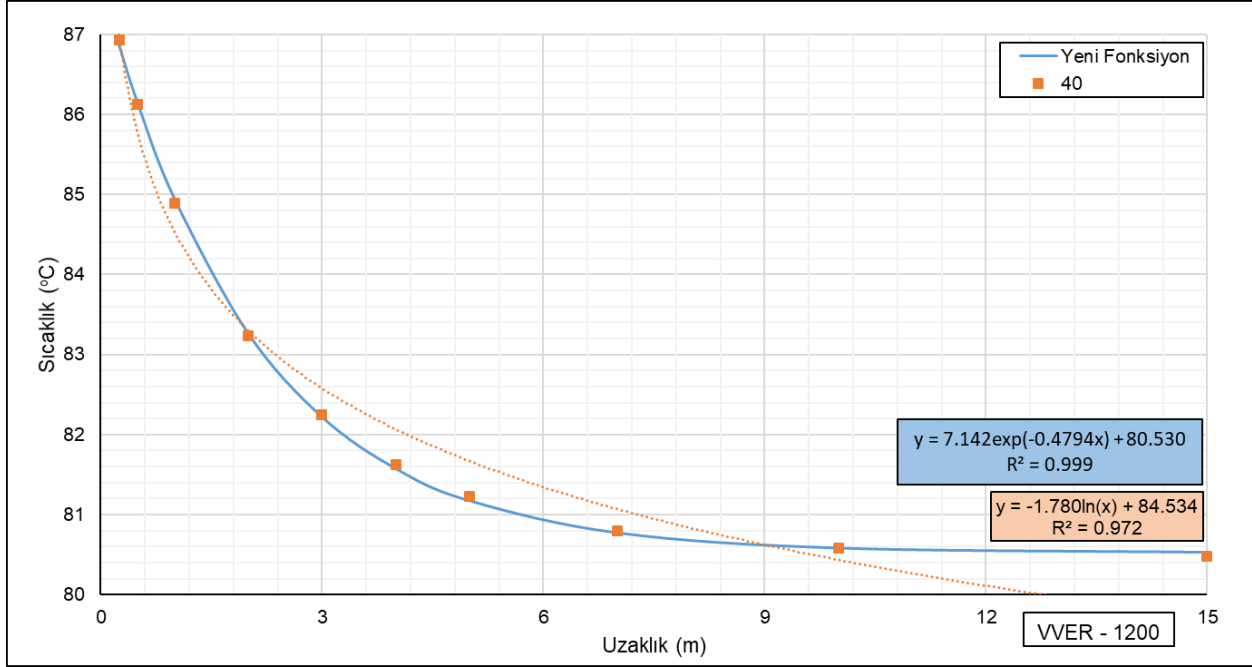
KNY yanma oranlarının değişmesi KNY' nin radyoizotop içeriği ve radyoaktif bozunum ısı miktarlarını değiştirmektedir. Gerçekleştirilen ısı analizler ve bertaraf yoğunluğu hesaplamaları söz konusu KNY' ların farklı yanma oranları için tekrar edilebilir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda KNYD' lerinin yatay jeolojik bertaraf edildiği varsayılmıştır. Benzer hesaplamalar VVER-1200 ve ATMEA-1 KNY' lerinin dikey jeolojik bertarafı için tekrar edilebilir. Bununla birlikte, söz konusu KNY' lerin yeniden işlenmesi ile oluşacak YAA' lar için atık kabı tasarımları geliştirilerek yatay ve dikey jeolojik bertaraf yoğunlukları hesaplanabilir. Böylece, söz konusu reaktörlerin KNY' larının güvenli olarak jeolojik bertarafı için uygun KNY yönetimi seçeneklerini belirlemek mümkün olacaktır.

5. EKLER

5.1 EK – 1

4 adet VVER – 1200 KNYD içeren atık kabı için dış yüzey sıcaklık değerinin minimum uzaklık ile değişimi incelenmiştir.

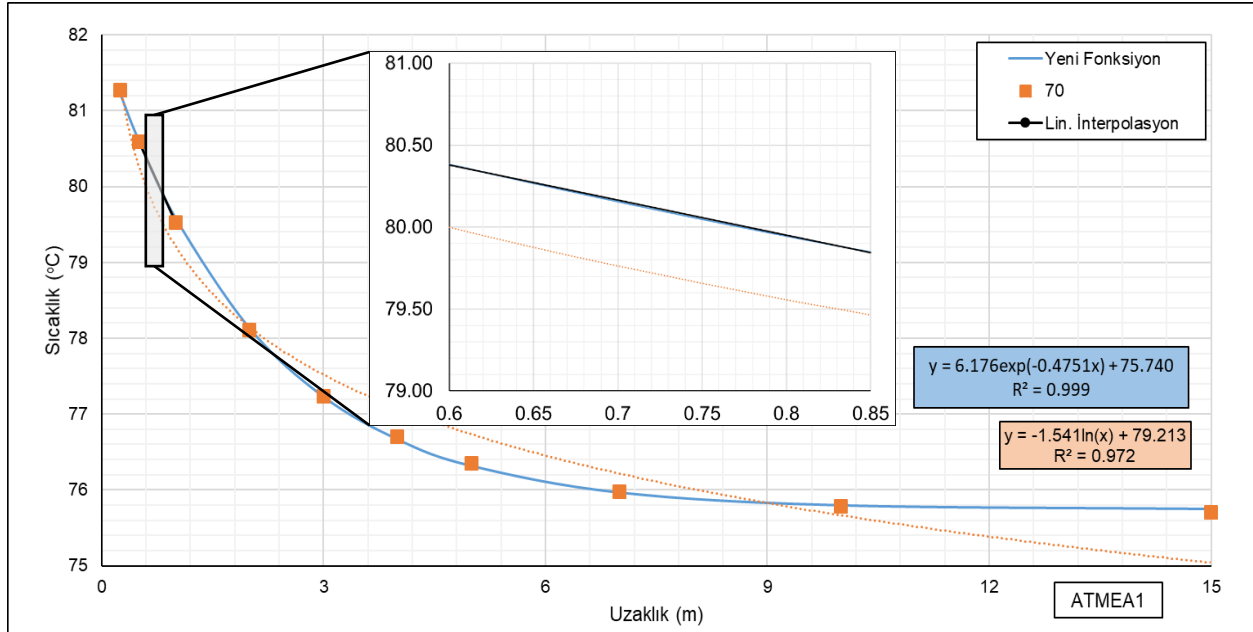


Şekil 5.1 40 Yıl Bekletilmiş VVER – 1200 KNYD ile Yüklenmiş Atık Kabı Dış Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Atık Kapları Arasındaki Mesafe ile Değişim.

Şekil 5.1 'de gösterilen grafiğe bakıldığında sıcaklık verilerinin değişim hızı uzaklık arttıkça azalmakla birlikte bu veriler yine uzaklık arttıkça 80 °C 'ye yakınsamaktadır. Uzaklık tahmini için kullanılan fonksiyonun sıcaklık tahmini için güvenilirliğinin tahmin edilmeye çalışılan uzaklık değeri arttıkça azaldığı görülmektedir. Bu fonksiyon daha yüksek doğruluklu bir tahmin için $\ln(x)+B$ formundan ziyade $A\exp(Bx)+C$ formunda elde edildiğinde grafik verilere daha uyumlu olmaktadır.

Yeni fonksiyonun güvenilirliği daha yüksek olmakla birlikte verilerin gösterdiği yakınsama özelliğini taşımaktadır. Bundan ötürü yeni fonksiyon ile 80 °C sıcaklık limitinin geçerli olacağı herhangi bir uzaklık değeri belirlenememiştir.

80 °C sıcaklık limitinin ulaşamadığı bir diğer senaryo ise 5 ATMEA1 KNYD içeren atık kabıdır. Bu senaryo için atık kapları arası minimum uzaklık değeri fonksiyon için 0.60 m olarak belirlenmiş, 0.65 m olarak simülasyon programında denenmiştir. Kullanılan ek mesafeye rağmen atık kabı dış yüzey sıcaklığının 80.23 °C olarak bulunması üzerine bu senaryo için minimum uzaklık değeri lineer interpolasyon yöntemi ile tekrar hesaplanarak 0.82 m olarak değiştirilmiştir. 0.85 m değeri için bu senaryo üzerinden yapılan simülasyon sonucunda aynı sıcaklık değeri 79.809 °C olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.2 70 Yıl Bekletilmiş ATMEA1 KNYD ile Yüklenmiş Atık Kabı Dış Yüzey Sıcaklık Değerlerinin Atık Kapları Arasındaki Mesafe ile Değişimi.

Bütün bu bulgular üzerinden şu çözümlere ulaşılabilir. Herhangi bir mühendislik problemi için ısı yükü ile alakalı bir atık yoğunluğu hesaplaması yapılmak istendiğinde elde edilen verilerin sayısının mümkün olduğunca fazla olmasına (mevcut olan hesaplama gücünün izin verdiği ölçüde) dikkat edilmelidir. Veri noktalarının fazlaşması elde edilen bulguların ve dolayısıyla üzerinden ilişki kurulabilecek fonksiyonun doğruluk oranını büyük oranda artıracaktır. Bunun yanında, fonksiyon türünün mümkün olduğunca veri trendine uyum sağlayacak bir formatta olmasına dikkat edilmelidir. Bu tez için yapılan çalışmalarda sıcaklık – uzaklık mesafesinin belirlenmesi için öncelikle hesaplanabilirliği de göz önüne alınarak $A \ln(x) + B$ formu seçilmiş daha sonra süreç ilerledikçe $A \exp(Bx) + C$ formunun elde

olan verilerle daha iyi çalışabildiği tespit edilmiştir. Bu gelişmeye rağmen her iki fonksiyon da 0.25 m 'den önceki değerler için matematiksel karakteristiği doğrultusunda tam olarak doğru çalışmamaktadır.

5.2. Ek – 2

Tez içeriğinde yapılan çalışmalar içerisinde MONTEBURNS 2.0 ve ANSYS Mechanical APDL programlarının kullanıldığı kısımlar en çok zaman ve altyapı (işlemci/bilgisayar) gerektiren nümerik analiz metodlarıyla hesaplama yapılan kısımlar olmuştur. Bu hesaplamalar için kullanılan işlemci altyapısı RAM bilgisi ile birlikte olmak üzere senaryo başına zaman maliyeti ile aşağıda verilmiştir.

MONTEBURNS 2.0 // AMD Phenom(tm) II X4 965 3.40 GHz – 4/4 İşlemci/İş Parçacığı,
8 GB DDR3 Ram 10 Saat/4 İşlemci - İhtiyaç: 36 Senaryo

ANSYS Mechanical APDL // Intel i7 – 7700HQ 3.80 GHz – 4/8 İşlemci/İş Parçacığı,
16 GB DDR4 Ram 1 Saat/8 İşlemci - İhtiyaç: 300 Senaryo

Bu tablo esas alındığında bütün başarılı senaryoların simülasyonunun zaman maliyeti toplam 460 saat (~28 gün) olarak belirlenmiştir.

6. Kaynakça

- [1] M. Benedict, T. H. Pigford, and H. W. Levi, Nuclear Chemical Engineering, 2. Baskı. 1981.
- [2] The Disposal of Radioactive Waste on Land. Washington, DC: The National Academies Press, 1957.
- [3] B. B. Acar, "Back - End Nuclear Fuel Cycle Options: Effects on High Level Waste Management and Disposal, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013
- [4] Nuclear Science and Technology, "EUR-9909 Design Study on Containers for Geological Disposal of High Level Radioactive Waste," 1985.
- [5] R. Commission of the European Communities. Directorate-General for Science, Centre d'étude de l'énergie nucléaire (Belgium), and Euratom., EUR-8179 Admissible thermal loading in geological formations : consequences on radioactive waste disposal methods,1982.
- [6] A. E. Ringwood, "Safe Disposal of High Level Radioactive Wastes: A New Strategy," 1978.
- [7] A. E. Ringwood, "Safe Disposal of High Level Radioactive Wastes," 1980.
- [8] R. J. Hopkirk and W. H. Wagner, "Thermal loading in the near field of repositories for high and intermediate level nuclear waste." 1986.
- [9] T. Sasaki, K. Ando, H. Kawamura, J. W. Schneider, and I. G. McKinley, "Thermal Analysis of Options for Spent Fuel Disposal in Switzerland," vol. 465, no. 2, pp. 1133–1140, 1997.
- [10] G. D. Sizgek, "Three-dimensional thermal analysis of in-floor type nuclear waste repository for a ceramic waste form," Nucl. Eng. Des., vol. 235, no. 1, pp. 101–109, 2005.
- [11] K. Ikonen and H. Raiko, "Thermal Analysis of KBS-3H Repository," vol. 31, no. May, 2015.
- [12] J. O. Lee, H. Choi, and J. Y. Lee, "Thermal conductivity of compacted bentonite as a buffer material for a high-level radioactive waste repository," Ann. Nucl. Energy, vol. 94, pp. 848–855, 2015.
- [13] M. Plötze, U. Schärli, A. Koch, and H. Weber, "Thermophysical properties of bentonite," Clays Nat. Eng. Barriers Radioact. Waste Confin., vol. International, pp. 579–580, 2007.
- [14] L. Moreno and B. Gylling, "Equivalent flow rate concept used in near field transport model COMP23 - Proposed values for SR 97." 1998.
- [15] J. Bruno, D. Arcos, and L. Duro, "Processes and Features Affecting the Near Field Hydrochemistry. Groundwater Bentonite Interaction, SKB Technical Report TR-99-

- 29,” SKB, 1999.
- [16] M. Laaksoharju, Groundwater Characterisation and Modeling: Problems, facts and possibilities, SKB Technical Report TR-99-42, SKB, 1999.
 - [17] M. Laaksoharju et al., Hydrogeochemical evaluation of the Simpevarp area , model version 1 . 1, 2004.
 - [18] M. Lindgren and M. Lindgren, SR-97 Radionuclide Transport Calculations, SKB Technical Report TR-99-23, 1999.
 - [19] L. Börgesson and B. Fälth, Water Saturation Phase of the Tunnel Backfill in the KBS-3V Concept and its Influence on the Wetting of the Buffer, 2006.
 - [20] M. Hartley, L., Cox, I., Holton, D., Hunter, F., Joyce, S., Gylling, B., Lindgren, Groundwater Flow and Radionuclide Transport Modeling Using CONNECTFLOW in Support of the SR Can Assessment, SKB Technical Report R-04-61, SKB, 2004.
 - [21] D. Arcos, F. Grandia, and C. Domènech, Geochemical evolution of the near field of a KBS-3 repository, TR-06-16, 2006.
 - [22] T. Tarandi, Calculated temperature field in and around a repository for spent nuclear fuel, 1983.
 - [23] R. Thunvik and C. Braester, Heat propagation from a radioactive waste repository. SKB 91 reference canister. 1991.
 - [24] P. Ageskog, L., Jansson, TR-99-10 Aspo Hard Rock Laboratory Annual Report 1998 Aspo Hard Rock Laboratory, 1999.
 - [25] C. G. Herrick, P. V. Brady, S. Pye, B. W. Arnold, J. T. Finger, and S. J. Bauer, Reference design and operations for deep borehole disposal of high-level radioactive waste, 2011.
 - [26] E. Thurner, S. Pettersson, M. Snellman, and J. Autio, KBS-3H. Development of the Horizontal Disposal Concept, TopSeal 2006, 2006.
 - [27] Posiva Oy, KBS-3H Disposal Facility Description, vol. 31, no. March. 2016.
 - [28] Hidropress, Status report 108 - VVER-1200 (V-491), Vol. 1200, 2011.
 - [29] S. A. Nikulin, A. B. Rozhnov, V. A. Belov, E. V. Li, and V. S. Glazkina, Influence of chemical composition of zirconium alloy E110 on embrittlement under LOCA conditions – Part 1: Oxidation kinetics and macrocharacteristics of structure and fracture, J. Nucl. Mater., vol. 418, no. 1–3, pp. 1–7, 2011.
 - [30] IAEA, Status Report for Advanced Nuclear Reactor Designs - ATMEA1, IAEA Status Rep. Adv. Nucl. React. Des. - Rep. 99, vol. 1, pp. 1–19, 2011.
 - [31] EDF, Areva, and UK EPR, Epr Gda: Epr Design Description, vol. 1, no. 185, 2007.
 - [32] TVO, Nuclear Power Plant Unit: Olkiluoto 3, 2010.
 - [33] V. Uffelen, Development of M5 Cladding Material Correlations in the TRANSURANUS Code. 2016.
 - [34] X - 5 MCNP Team, MCNP User Manual, Version 5, vol. 836, pp. 1–416, 2008.

- [35] R. Holly, I. David, and H. R. Trelue, USER'S MANUAL, VERSION 2.0 FOR MONTEBURNS, VERSION 5B, vol. 836.
- [36] Outline Design for a Reference Repository Concept for UK High Level Waste/Spent Fuel, 2005.
- [37] J. Taler and P. Ocloń, Finite Element Method in Steady-State and Transient Heat Conduction, in Encyclopedia of Thermal Stresses, 2013, pp. 1604–1633.
- [38] H. Raiko, Disposal Canister for Spent Nuclear Fuel – Design Report, vol. 2005–02, no. July. 2005.
- [39] R. P. Lowell, K. Kolandaivelu, and P. A. Rona, Hydrothermal Activity, no. 3. Elsevier Inc., 2014.
- [40] H. J. Choi and J. Choi, Double-layered buffer to enhance the thermal performance in a high-level radioactive waste disposal system, Nucl. Eng. Des., vol. 238, no. 10, pp. 2815–2820, 2008.
- [41] R. Poškas, V. Šimonis, P. Poškas, and A. Sirvydas, Thermal analysis of CASTOR RBMK-1500 casks during long-term storage of spent nuclear fuel, Ann. Nucl. Energy, vol. 99, pp. 40–46, 2017.
- [42] D. Justinavicius, A. Sirvydas, and P. Poskas, Thermal analysis of reference repository for RBMK-1500 spent nuclear fuel in crystalline rocks, J. Therm. Anal. Calorim., vol. 118, no. 2, pp. 767–773, Nov. 2014.
- [43] B. Bulut Acar and H. O. Zabunoğlu, Comparison of the once-through and closed nuclear fuel cycles with regard to waste disposal area required in a geological repository, Ann. Nucl. Energy, vol. 60, pp. 172–180, 2013.
- [44] D. N. NJOLNBI, A New Approach for Estimating the Geothermal Gradient and Deep Subsurface Temperature Distribution in Turkey, ACM Press, New York, USA, 2017.



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 20/06/2019

Tez Başlığı / Konusu: Kullanılmış Nükleer Yakıtın Yatay Jeolojik Bertarafının Isıl Analizleri

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 58 sayfalık kısmına ilişkin, 18/06/2019 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 1 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.


20.06.2019
Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Gürel Özeşme
Öğrenci No: N14325960
Anabilim Dalı: Nükleer Enerji Mühendisliği
Programı: Nükleer Enerji Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.



Dr. Öğr. Üyesi Banu Bulut ACAR



Gürel Özeşme

İstanbul, Türkiye
İstanbul Teknik Üniversitesi
Enerji Enstitüsü

gurelozesme@itu.edu.tr

+905546175045

http://gurelozesme.wordpress.com

Akademik Deneyim

Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Enerji Mühendisliği, YL (ORT: 3.50/4.00 Eylül 2015 – Haziran 2019)

- Tez Konusu: Kullanılmış Nükleer Yakıtların Yatay Jeolojik Bertarafının Isıl Analizleri

Özyeğin Üniversitesi, Makina Mühendisliği, YL (ORT: 3.01/4.00 Eylül 2015 – Şubat 2018 (Terk))

- Özyeğin Üniversitesi Çekmeköy Kampüsü Rüzgar Analizi,
- Tez Konusu: Dozaj süreçleri için Dişli Pompaların Testi ve Analitik Hesaplar ile Doğrulanması,
- Pompa Test Düzenineğinin Tasarımı ve Yapımı.

Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Enerji Mühendisliği (ORT: 2.78/4.00) – 2015 Lisans Mezunu

- Mezuniyet Projesi: 1 Boyutlu Şok Tüpü Probleminin FLUENT ile 3 Boyutlu Uygulanması,
- 100MWe Nükleer Reaktör Konsept Tasarımı.

Profesyonel Deneyim

Temmuz 2018 - Devam

Araştırma Görevlisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü

Temmuz 2018 – Mayıs 2018

Görevlendirme – Araştırma Görevlisi, Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

Eylül 2015 – Şubat 2018

Araştırmacı – Tübitak 1003 Projesi , Özyeğin Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü

Stajlar

- Stajyer (HAD Çalışmaları), IOG Enerji, Ankara/ Türkiye (Ağustos 2014 – Eylül 2014)
- Stajyer, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, İstanbul / Türkiye (Eylül 2013)
- Üretim Stajyeri, Eczacıbaşı – Monrol Nükleer Ürünler A.Ş., Ankara / Türkiye (Haziran 2013)
- Stajyer, EÜAŞ 18 Mart Çan Termik Santrali, Çanakkale / Türkiye (Haziran 2012)

Serbest Deneyim

Veri Giriş Elemanı, Sosyal Medya
Motoruma.com,
Avciarchitects.com,
Bodrumcini.com, Summa.com,
Erketasarim.com,
Galataadvisors.com

Sosyal

- Öğrenci Temsilcisi – ÖZÜ Fen Bilimleri Enstitüsü (Aralık 2016 – Şubat 2018)
- Denetçi – Ozu Hayal Okulu (Aralık 2016 – Eylül 2017)
- Öğrenci Temsilcisi – HÜ Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü (Kasım 2014 – Haziran 2015)
- Yönetim Kurulu Üyesi – HÜ Enerji Topluluğu (Aralık 2014 – Haziran 2015)
- Eğitmen – HÜ Dans Sporları Topluluğu (Eylül 2014 – Haziran 2015)
- Dans Sporcusu – HÜ Spor Klübü (Aralık 2011 – Eylül 2014)
- Yardımcı Öğitmen – HÜ Dans Sporları Topluluğu (Aralık 2011 – Eylül 2014)

Ödüller ve Yayınlar

- 1.'lik – Otomotiv Komponent Tasarım Yarışması'18 Profesyonel Kategori
- Adblue Dozaj Sistemi için Dişli Pompaların Analitik ve Deneysel Performans Testleri ve Karşılaştırması OTEKON'18

Bilgisayar ve Kod Bilgisi

- MCNP, MONTEBURNS COBRA, ZEBRA
- ANSYS, Star – CCM+
- FORTRAN, MATLAB
- Autodesk Çizim Programları
- MS Office, Linux
- Arduino ile sistem tasarımı

Sertifikalar

- Etik Liderler Akademisi'16
- Hata Türleri ve Etkileri Analizi Eğitimi (Process FMEA)
- Nükleer Bilimler ve Uygulamaları Eğitimi'16
- Teknoloji Girişimciliği
- Üretimi
- Toplam Kalite Yönetimi

Referanslar

İstek doğrultusunda sağlanacaktır.