

Article Arrival Date

18.11.2024

Article Type

Review Article

Article Published Date

20.12.2024

**NÜKLEER REAKTÖR ÇEŞİTLERİNDE KULLANILAN MALZEMELERİN
İNCELENMESİ: KAYNAR SU VE BASINÇLI SU REAKTÖRLERİ**INVESTIGATION OF MATERIALS USED IN DIFFERENT TYPES OF NUCLEAR
REACTORS: BOILING WATER AND PRESSURIZED WATER REACTORS**¹Dr. Öğr. Üyesi, Tuba DEMİREL**¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi,
Gaziantep, TÜRKİYE, ¹ORCID: [0000-0002-5760-3705](https://orcid.org/0000-0002-5760-3705)**^{2*}Furkan BOZDAĞ**^{2*}*Lisans 4. Sınıf Öğrencisi*, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Hasan
Kalyoncu Üniversitesi, Gaziantep, TÜRKİYE,*Sorumlu Yazar*, ^{2*}ORCID: [0009-0006-3583-8606](https://orcid.org/0009-0006-3583-8606),**³Tevfik TOPLAR**³*Lisans 4. Sınıf Öğrencisi*, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Hasan
Kalyoncu Üniversitesi, Gaziantep, TÜRKİYE, ³ORCID: [0009-0007-3305-416X](https://orcid.org/0009-0007-3305-416X),**⁴Furkan ŞEKER**⁴*Lisans 4. Sınıf Öğrencisi*, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Hasan
Kalyoncu Üniversitesi, Gaziantep, TÜRKİYE, ⁴ORCID: [0009-0004-7762-6471](https://orcid.org/0009-0004-7762-6471),**ÖZET**

Bu derleme çalışması, kaynar su (BWR) ve basınçlı su (PWR) reaktörlerinde kullanılan malzemelerin güvenlik ve verimlilik açısından önemini incelemektedir. Nükleer enerji, elektrik üretiminde düşük karbon salınımı gibi avantajlar sunarken radyoaktif atık yönetimi gibi riskler de içermektedir. BWR ve PWR reaktörlerinde malzeme seçimi, yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklılık, nötron yavaşlatma ve emme özellikleri ile çevresel etkiler dikkate alınarak yapılmaktadır. Beton ve çelik ise radyasyon koruması ve yapısal dayanıklılık sağlamaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi gibi mühendislik analizleri, bu reaktörlerin tasarımında malzemelerin performansını optimize etmek için kullanılmakta, güvenli ve uzun ömürlü bir işletim sağlanmaktadır. Türkiye'de planlanan nükleer santrallere yönelik kullanılacak malzemenin

araştırılması da sunulmaktadır. Nükleer enerji santrallerinde kullanılan farklı malzemelerin ve mühendislik yöntemlerinin, güvenlik, verimlilik ve çevresel etkiler açısından önemini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Reaktör Malzemesi, BWR ve PWR reaktörleri, Reaktör kap tasarımı.

ABSTRACT

This review study examines the significance of materials used in Boiling Water Reactors (BWR) and Pressurized Water Reactors (PWR) in terms of safety and efficiency. While nuclear energy offers advantages such as low carbon emissions in electricity generation, it also involves risks such as radioactive waste management. Material selection in BWR and PWR reactors is made considering factors such as resistance to high temperatures and pressure, neutron moderation and absorption properties, as well as environmental impacts. Concrete and steel are used for radiation shielding and structural durability.

Engineering analyses, such as the Finite Element Method, are employed to optimize the performance of materials in the design of these reactors, ensuring safe and long-lasting operation. The study also explores the materials to be used in nuclear power plants planned in Turkey. It comprehensively addresses the importance of various materials and engineering methods used in nuclear power plants in terms of safety, efficiency, and environmental impact.

Keywords: Reactor Materials, BWR and PWR Reactors, Reactor Vessel Design.

1. GİRİŞ

Nükleer enerji, günümüzde artan enerji talebini karşılamak ve enerji arz güvenliğini sağlamak adına kritik bir öneme sahiptir. Fosil yakıtlara kıyasla düşük karbon salınımı gibi çevresel avantajlara sahip olması, nükleer enerjiyi sürdürülebilir enerji kaynakları arasında önemli bir konuma yerleştirmektedir. Ancak radyoaktif atık yönetimi ve güvenlik gibi zorluklar, nükleer enerji santrallerinin güvenilir ve verimli çalışması için özel mühendislik çözümleri gerektirmektedir. Bu noktada, nükleer santrallerde kullanılan malzemelerin özellikleri ve seçim kriterleri, santral performansını ve güvenliğini doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir. **Reaktör** ve **santral** farklı kavramlardır, ancak nükleer enerji üretiminde birbirleriyle bağlantılıdır:

Reaktör

- **Tanım:** Nükleer fisyon reaksiyonlarının kontrollü bir şekilde gerçekleştirildiği sistemdir.

- **Görevi:** Atom çekirdeklerini parçalayarak büyük miktarda enerji açığa çıkarır. Bu enerji genellikle ısı şeklindedir.
- **Yer:** Reaktör, bir nükleer santral içinde yer alan ana bileşendir.
- **Örnek:** Akkuyu Nükleer Güç Santrali'ndeki reaktörler, enerji üretiminin çekirdeğidir.

Santral

- **Tanım:** Enerji üretimi için gerekli tüm sistemleri içeren tesis.
- **Görevi:** Reaktörün ürettiği ısıyı elektrik enerjisine dönüştürür ve dağıtım için hazırlar.
- **Yer:** Santral, reaktörün yanı sıra soğutma sistemleri, türbinler, jeneratörler ve kontrol odası gibi bölümleri de içerir.
- **Örnek:** Akkuyu Nükleer Güç Santrali, reaktörleri ve diğer destek sistemleriyle bir bütündür.

Fark: Reaktör, sadece fisyon reaksiyonunun gerçekleştiği birimdir. Santral ise bu enerjiyi kullanarak elektrik üreten ve dağıtan tüm tesisi ifade eder. Reaktör, santralin bir parçasıdır.

Nükleer santraller, reaktör çekirdeği, kontrol çubukları, soğutucular ve koruma bariyerleri gibi bir dizi bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerde kullanılan malzemeler, yüksek sıcaklık, basınç ve radyasyon gibi ekstrem çalışma koşullarına dayanıklı olmalı ve aynı zamanda uzun süreli kimyasal kararlılık sergilemelidir. Özellikle reaktör çekirdeğinde kullanılan yakıt malzemeleri, kontrollü fisyon reaksiyonlarının sürdürülmesinde kritik bir role sahiptir. Yakıt malzemeleri dışında, nötron yavaşlatıcılar, ısı transferini sağlayan soğutucular ve radyasyon sızıntısını önleyen koruma malzemeleri de nükleer santrallerin güvenilirliğini artıran önemli unsurlardır.

Nükleer reaktörlerin tarihsel gelişimi, 1940'lı yıllardan bu yana malzeme biliminde yaşanan ilerlemelerle paralel bir seyir izlemiştir. İlk reaktörlerin inşasından günümüzün gelişmiş reaktör tasarımlarına kadar, kullanılan malzemelerin dayanıklılığı ve verimliliği üzerine yapılan araştırmalar, nükleer enerjinin daha güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde üretilmesine olanak tanımıştır.

Son yıllarda nükleer santrallerde kullanılan malzemelerin tasarımında ve seçiminde, özellikle Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) gibi ileri mühendislik analizleri yaygınlaşmıştır. Bu yöntem, malzemelerin mekanik, termal ve radyasyon altındaki performanslarının simüle edilmesini sağlayarak güvenli enerji üretimine katkı sunmaktadır. Bu çalışmada, nükleer reaktörlerde

kullanılan reaktör gövdesi için kullanılacak malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile seçim kriterleri incelenmiştir. Bu kapsamda, malzeme seçim sürecinin nükleer enerji üretimindeki önemi ve güvenlik açısından taşıdığı kritik rol değerlendirilmiştir.

1.2. Nükleer Enerjinin Tanımı

Nükleer santraller, ısı kaynağı olarak nükleer reaktörlerin kullanıldığı termal enerji santralleridir. Üretilen ısı, buhar türbinlerini çalıştırarak elektrik üretir. Eylül 2023 itibarıyla dünya genelinde 32 ülkede 410 aktif nükleer santral bulunurken 57 santral inşa halindedir. Düşük işletme ve yakıt maliyetleri nedeniyle temel yük elektriği üretiminde tercih edilen bu santrallerin, inşa süresi genellikle 5-10 yıl olup, yüksek başlangıç maliyetleri gerektirir. Nükleer santraller, karbon ayak izi açısından yenilenebilir kaynaklara yakındır ve fosil yakıtlara göre oldukça düşüktür. Ayrıca, güneş ve rüzgar enerjisi santrallerine kıyasla en güvenli enerji üretim yöntemleri arasında yer almıştır [1].

1.3. Nükleer Enerjinin Kullanım Amacı

Nükleer güç reaktörlerinin su ile soğutulabilmesi için santralin su kaynaklarına yakın bir bölgede inşa edilmesi gerekir. Elektrik üretimi için en yaygın yöntem, nükleer fisyon reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyonlar atom çekirdeklerinin parçalanmasıyla ısı üretir, bu ısı suyu buhara dönüştürerek türbinleri çalıştırır ve elektrik üretir. Düşük karbon salınımlarıyla, iklim değişikliğiyle mücadelede fosil yakıtlara kıyasla çevreci bir alternatif sunarlar. Ana amaçları elektrik üretimi olmakla birlikte, ısıtma, deniz suyu arıtma ve endüstriyel süreçlerde de kullanılabilirler. Nükleer enerji, sürdürülebilir enerji politikalarında önemli bir yere sahiptir [1].

1.4. Dünya Genelinde Nükleer Enerji ve Kullanım Alanları

Nükleer enerji, günümüzde en çok tartışılan enerji kaynaklarından biridir. Kavram olarak dünya, nükleer reaksiyon ve atomik enerji terimlerini ilk kez İkinci Dünya Savaşı sırasında tanımıştır. 20. yüzyılın başlarında enerji üretimi üzerine başlayan nükleer çalışmalar, fizik ve tıp başta olmak üzere birçok disiplini etkilemiştir. Türkiye'de ise nükleer enerji 1962'de gündeme gelmiş, ancak çevresel itirazlar ve ekonomik engeller nedeniyle nükleer santral projeleri hayata geçirilememiştir [2].

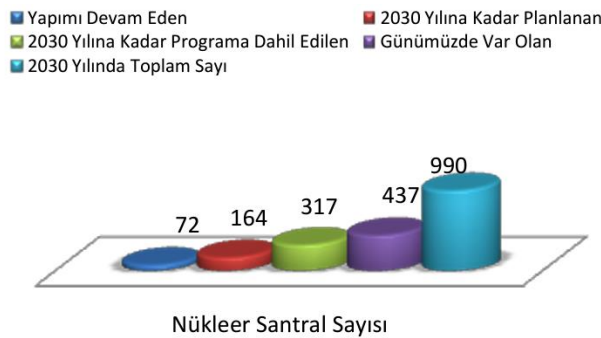
Fosil enerji kaynakları, başta petrol, doğal gaz ve kömür olmak üzere, çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılır. Fosil yakıtlar, termik santrallerde elektrik üretimi için ana enerji kaynağıdır. Benzin, dizel ve jet yakıtı gibi türevler ulaşım sektöründe yaygın olarak kullanılır. Çelik, kimya ve çimento gibi sanayi kollarında enerji sağlar ve hammadde olarak kullanılır. Doğal gaz, konutlarda ısıtma ve mutfak ihtiyaçları için tercih edilir. Fosil enerji kaynaklarının

rezervleri dünya genelinde eşit dağılmamıştır. Kanıtlanmış petrol rezervlerinin %48,4'ü ve doğal gaz rezervlerinin %43'ü Ortadoğu'da bulunmaktadır. Bilimsel tahminlere göre, fosil kaynakların ömürleri petrolde 54 yıl, doğal gazda 61 yıl ve kömürde 142 yıl olarak öngörülmektedir. Nükleer enerjinin temel ham maddesi uranyumdur [3-5].

Tablo 1. Dünya genelinde üretilen elektriğin oranı (%) [4, 5]

Enerji Kaynakları	Dünya Geneli (%)
Kömür	40,6
Doğalgaz	22,2
Hidrolik	16
Nükleer	13
Petrol	4,6
Diğer	3,7
Toplam	21.431 TWh

Türkiye'nin Aydın, Çanakkale, Giresun, Manisa, Uşak ve Yozgat gibi bölgelerinde toplamda 10 bin tonu aşan uranyum rezervi olduğu tahmin edilmektedir. Uranyum açısından zengin olmasına rağmen, bu rezervlerden yeterince faydalanılamamakta; çünkü Türkiye'de bu kaynakları kullanacak nükleer santraller bulunmamaktadır. Türkiye'nin yanı sıra Birleşik Arap Emirlikleri ve Belarus gibi ülkelerde toplam 16 ülkede 72 nükleer reaktörün inşaatı sürmektedir. Yapılan planlamalar, nükleer enerji kullanımının gelecekte de devam edeceğini göstermektedir. 2030 yılına kadar 164 yeni nükleer reaktörün inşa edilmesinin planlanması, bu öngörüğü desteklemektedir [4,5].



Şekil 1. Dünya genelindeki nükleer enerji santralleri [4,5]

Türkiye, nükleer enerji politikalarını hayata geçirmek amacıyla Mersin'in Akkuyu ilçesinde ve Sinop'ta nükleer reaktörler kurmayı planlamıştır. 12 Mayıs 2010 tarihinde Türkiye ile Rusya Federasyonu arasında Akkuyu bölgesinde bir nükleer santral kurulması ve işletilmesi amacıyla bir anlaşma imzalanmıştır. Akkuyu nükleer santralının enerji kurulum gücü 2500 megavat olarak belirlenmiştir. Yapılan anlaşmaya göre, Rus ASE şirketi, Mersin Akkuyu Sahası'nda toplam 4800 MW kapasiteli dört adet VVER 1200/491 tipi (AES-2006 tasarımı) nükleer güç

reaktöründen oluşan bir nükleer enerji tesisi kuracak ve ilk etapta tamamen Rus sermayesiyle işleyecektir. Sinop Nükleer Santrali'nin kurulumu için Japon Mitsubishi Heavy Industries (MHI) ve Fransız GDF SUEZ şirketleriyle 2011'de anlaşma yapılmıştır. Anlaşmaya göre, santral 2023'te enerji üretimine başlanılacak ve maliyeti 20 milyar dolar olacaktır. ATMEA-1 reaktör tipiyle inşa edilecek santral, 4480 MW kurulu güce sahip olacaktır. Toplamda her iki santralden 60 yıl boyunca enerji üretmesi hedeflenmektedir (Tablo 2) [4, 5].

Tablo 2. Türkiye'de kurulacak nükleer santral çeşitleri [4, 5]

Değerler	Akkuyu Nükleer Santral Projesi	Sinop Nükleer Santral Projesi
Yaklaşık Maliyet	20 milyar dolar	20 milyar dolar
Reaktör Tipi	VVER-1200 (AES-2006)	ATMEA-1
Ünite Sayısı	4 Ünite (1200 MW*4)	4 Ünite (1120 MW*4)
Kurulu Güç	4800 MW	4480 MW
İşletme Ömrü	60 yıl	60 yıl

Nükleer enerjinin birçok kullanım alanı bulunmaktadır ve bunların en önemlilerinden biri sağlık sektörüdür. Özellikle hastalıkların teşhisinde önemli bir rol oynar. Ayrıca, tedavi yöntemlerinde de nükleer enerjiden yararlanılır. Sağlıklı gıda üretimi de nükleer enerjinin faydalarından biridir; özellikle yiyeceklerdeki zararlı maddelerin arındırılması nükleer kaynaklar kullanılarak gerçekleşir. Tarımda da nükleer enerji kullanımı mevcuttur. Tarım ürünleri için zararlı olan böceklerin ve çeşitli haşerelerin yok edilmesinde yardımcı olur. Radyasyon sayesinde gıdaların işlenmesi sırasında zarar görmemesi sağlanır. Özetle, nükleer enerji, biyokimya ve biyoloji alanlarında, inşaat malzemelerinin üretiminde, petrol tanklarındaki sızıntıların izlenmesinde, bazı uzay teknolojilerinde, denizcilik ve havacılık sanayisinde de önemli avantajlar sunmaktadır [6].

2. NÜKLEER ENERJİNİN ETKİLERİ

Nükleer enerji santralleri, yakıt enerjisi açısından yoğun kaynaklardan biridir. Karbondioksit salınımı yapmadıkları için sera etkisi yaratmazlar; bu da çevre kirliliğini önler. Nükleer enerji sisteminde kullanılan yakıtlar, geri dönüşümlü özellikte olduğundan, tekrar kullanılabilirler. Nükleer enerji santrallerinin varlığı, ithal enerji bağımlılığını azaltma açısından da fayda sağlar. Ancak, faydalarının yanı sıra bazı zararları da bulunmaktadır. Nükleer enerjinin temel hammaddesi uranyumdur ve uranyumun çıkarılması ile işlenmesi ciddi radyoaktif kirliliğe yol

açabilir. Nükleer santralin düzgün çalışmaması, büyük çapta zararlar doğurabilir. Radyoaktif atıkların doğaya sızması kesinlikle engellenmelidir, çünkü bu atıklar hem çevreye hem de insan sağlığına ciddi zararlar verebilir [6].

Nükleer tehditler, nükleer malzemelerin parçalanması (filyon) veya iki atomun birleşmesi (füzyon), sonucu yıkıcı basınç dalgasının, kör edebilecek kuvvetli ışığın, öldürücü radyasyonun, yüksek ısının açığa çıktığı ve radyoaktif maddelerin kilometrelerce etrafa yayıldığı durumları ifade etmektedir. Çernobil Nükleer Santral kazası, INES kriterlerine göre 7. dereceden "büyük kaza" olarak sınıflandırılmıştır. Kazanın nedeni, uluslararası güvenlik standartlarının göz ardı edilmesi ve güvenlik önlemlerinin ihmalidir. İncelemelerde, reaktörde dış güvenlik kabuğu olmadığı ve çalışanların yeterli bilgiye sahip olmadığı belirlenmiştir. 1986'daki kaza, çevresel sorunlara yol açmış ve nükleer tesislerin güvenlik kriterlerinin yeniden gözden geçirilmesine neden olmuştur [7].

3. NÜKLEER ENERJİ SANTRALİNDE KULLANILAN MAKİNE ELEMANLARI

Nükleer santrali oluşturan parçalar, güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için birbirleriyle uyum içinde çalışmalıdır. Nükleer santrallerin temel parçaları şunlardır:

Reaktör Çekirdeği (Reaktör Kalbi): Nükleer filyon reaksiyonlarının gerçekleştiği, enerji üreten ana bileşendir. İçerisinde yakıt çubukları yer alır. Çekirdek, enerji üretiminin merkezi olup, içinde uranyum yakıt çubukları yer alır. Bu çubuklar filyon tepkimesine girerek büyük miktarda ısı üretir ve bu ısı, suyu buhara dönüştürerek türbinlerin çalışmasını sağlar [8].

Yakıt Çubukları: Uranyum veya plütonyum içeren, filyon reaksiyonunu başlatan ve enerji üreten çubuklardır [8].

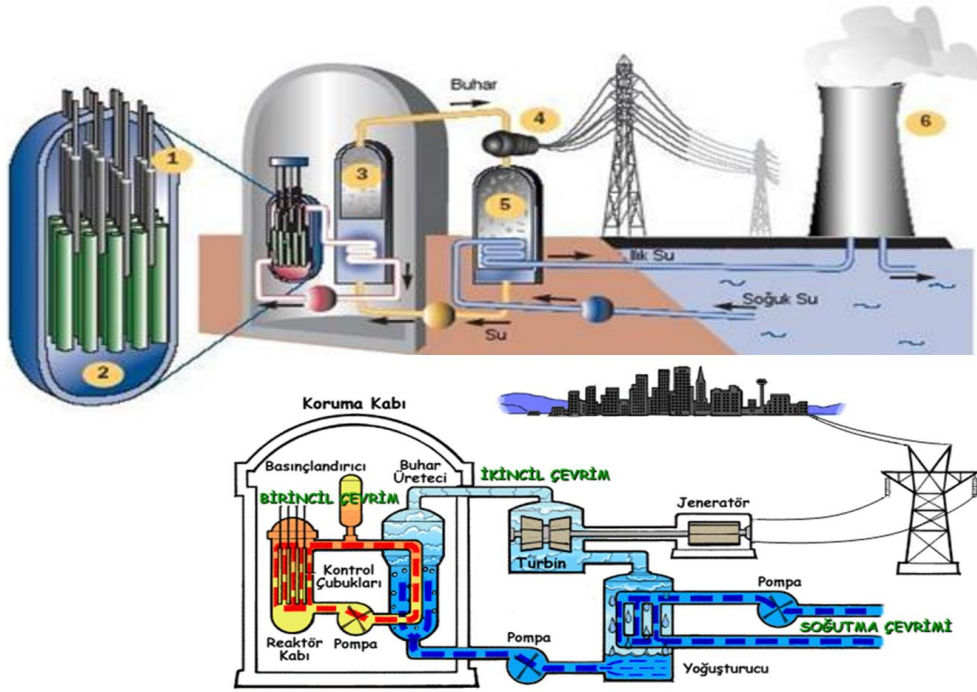
Kontrol Çubukları: Filyon reaksiyonlarını kontrol eder. Reaktörün güç çıkışını düzenler. Çekirdekteki filyon hızını düzenlemek için kullanılan kontrol çubukları, nötronları emerek çekirdekteki reaksiyonları kontrol altına alır. Böylece güvenli enerji üretimi sağlanır. Genellikle bor veya kadmiyum gibi elementlerden yapılırlar [8].

Soğutma Suyu: Reaktör çekirdeğindeki ısının alınarak türbinlere iletilmesini sağlayan sıvıdır (genellikle su, sıvı sodyum veya gaz kullanılabilir) [8].

Buhar Üretim Sistemi: Soğutma suyu tarafından ısıtılan suyu buhara dönüştüren sistemdir. Buhar türbini çalıştırır. Reaktör çekirdeğinde üretilen buhar, türbinleri döndürür ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren jeneratörleri çalıştırır. Türbinlerin döndürdüğü jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisi üretilmiş olur [8].

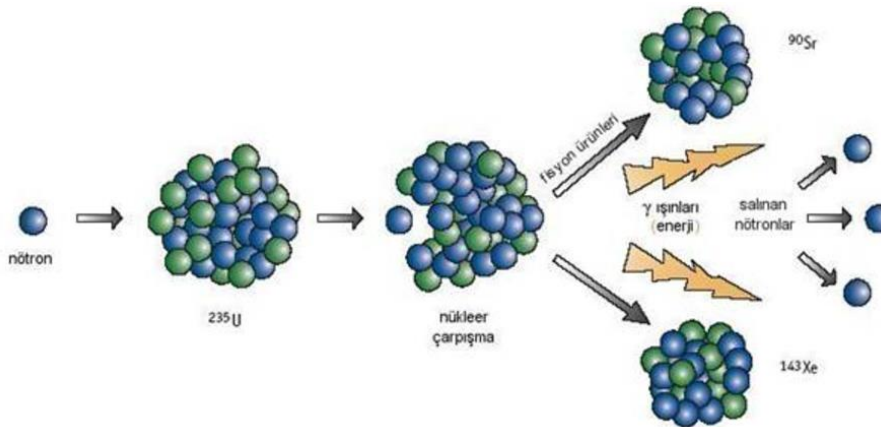
Türbinler ve Jeneratörler: Buharın hareketiyle türbinler döner ve elektrik üretmek için jeneratörlere güç sağlar [8].

Koruma Kabuğu (Containment): Reaktörü çevreleyen, radyasyon kaçışını engelleyen kalın beton ve çelikten yapılmış yapıdır. Nükleer santrallerde güvenliği sağlamak amacıyla kullanılan çok katmanlı bir yapıdır. Radyasyon sızıntısını engelleyen bu koruyucu yapı, beton ve çelikten yapılmış olup reaktörün etrafını çevreler [8]. **Basınç Kabı:** Reaktördeki yüksek basıncı tutan ve reaktörün güvenli çalışmasını sağlayan yapıdır [8]. **Soğutma Sistemi:** Reaktördeki ısının dışarı atılmasını sağlayan sistem, genellikle deniz veya göl suyu gibi su kaynaklarını kullanır. Bu sistem, reaktör çekirdeğinde üretilen aşırı ısının aktarılmasını ve çekirdeğin güvenli bir sıcaklıkta tutulmasını sağlar. Genelde su kullanılarak çekirdekten gelen ısı buhara dönüştürülür ve bu buhar, türbinleri döndürerek elektrik üretir [8]. **Radyoaktif Atık Depolama:** Filyon sonucu oluşan radyoaktif atıkların güvenli bir şekilde depolandığı alandır. Nükleer enerji üretimi sırasında ortaya çıkan radyoaktif atıklar, özel muhafaza yöntemleriyle saklanır. Kullanılmış yakıtlar, belirli bir süre soğutma havuzlarında saklanır ve ardından uygun depolama alanlarına taşınır. Bu sistem, çevre ve insan sağlığı açısından önem taşır [8]. Şekil 2'ye bakıldığında nükleer santralin çalışma prensibi sırasıyla anlatılmıştır [9]: Nükleer santral: Atom çekirdeklerinin parçalanmasıyla elde edilen ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren bir tesistir. Yakıt çubukları içindeki özel malzemeler, kontrol çubukları sayesinde kontrollü bir şekilde parçalanır ve ısı açığa çıkarır. Bu ısı, su tarafından emilerek buhara dönüştürülür. Buhar, türbini döndürerek elektrik üreten bir jeneratöre güç verir. Kullanılan buhar, soğutucu kuleler aracılığıyla soğutulup tekrar suya dönüştürülerek döngüye katılır.



Şekil 2. Nükleer Santralin çalışma sistemi [9]

Doğada bulunan veya yapay olarak üretilen bazı ağır elementler, kararsızdır ve nötron çarptığında çekirdekleri iki parçaya bölünür (fisyon). Bu bölünme sırasında enerji ve nötronlar açığa çıkar. Fisyon sonucunda oluşan parçalar, fisyon ürünleri olarak adlandırılır. Bu reaksiyon ürünlerinin toplam kütlesi, orijinal kütleden biraz daha azdır ve bu fark Einstein'ın $E=mc^2$ formülüyle açıklanır [9]. Nükleer terimi, atomun çekirdeği ile ilgili olan her şeyi ifade eder. Çekirdek, atomun merkezinde bulunan ve protonlar ile nötronlardan oluşan bölgedir.



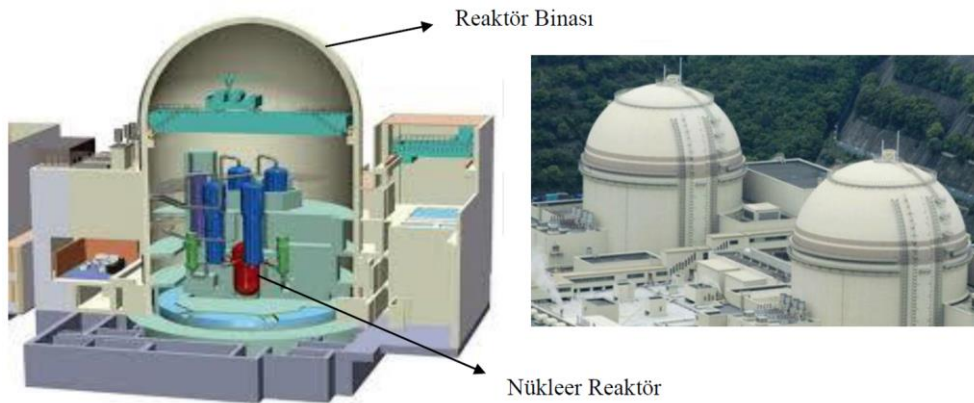
Şekil 3. Tipik bir fisyon (bölünme) reaksiyonu [9]

4. NÜKLEER REAKTÖRLER

4.1. Nükleer Reaktörün Tanımı

Reaktör, bir reaksiyonun başlamasını sağlayan ya da reaksiyonlar için gereken ortam, mekanizma veya yapılar olarak tanımlanabilir. **Nükleer reaktör**, çekirdek fisyonu (bölünmesi) reaksiyonunun gerçekleştiği ve enerji üreten mekanik yapıdır. Nükleer mühendislik açısından, reaktör, nötron üretimini dengeleyerek fisyon reaksiyonunu kontrol eder ve gerekli enerji miktarını üretir. Bu süreçte, reaksiyonun sürekliliği ve güvenliği titizlikle kontrol edilmelidir. Yüksek ısı enerjisinin kontrol altında tutulması ve radyasyon sızıntısının önlenmesi, reaktörlerin güvenli çalışması için kritik öneme sahiptir. Bu yüzden reaktörler, karmaşık mühendislik hesaplamaları ve ileri teknoloji gerektiren yapılar olarak inşa edilir. Nükleer santral ve reaktör binalarının duvar kalınlıkları genellikle 2-5 metre arasında değişir. Bu kalın duvarlar, radyasyon sızmasını önlemede etkili bir mekanizma sunar [9, 7]. Uranyumun fisyonu ile açığa çıkan ısı, suyu yüksek basınç altında buhara dönüştürür. Bu buhar, türbinlere gönderilir ve türbinin dönmesini sağlayarak elektrik üretir. Üretilen elektrik, iletim hatlarıyla kullanıcılara iletilir. Türbinden çıkan düşük sıcaklıklı buhar, yoğunlaştırıcıya gönderilip suya dönüştürülür ve tekrar ısı üretim bölümüne gönderilerek süreç devam eder. Bu işlem bir döngü şeklinde sürekli tekrarlanır (Şekil 4 ve 5) [10].

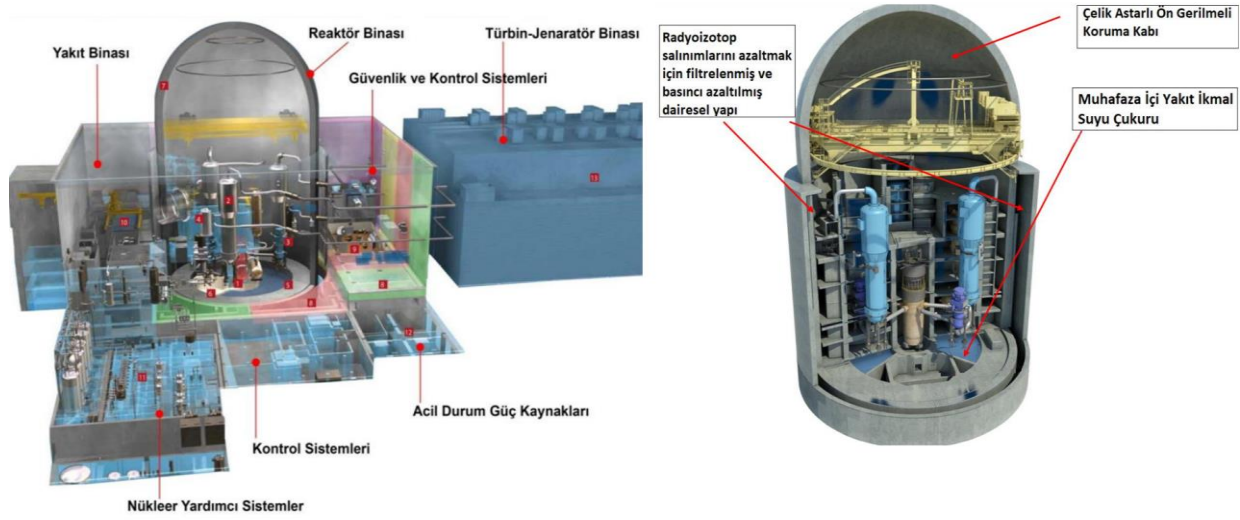
150



Şekil 4. Reaktör binası içindeki ekipmanları [7]

ATMEA 1 reaktör tasarımında, reaktör binası ve iç güvenlik sistemlerinin korunması amacıyla koruma binasına ek güçlendirmeler yapılmıştır. Bu koruma binası, yakıt ve acil durum güç kaynağı binalarıyla birlikte deprem, su baskını, kasırga, yangın gibi doğal afetlere ve füze saldırıları gibi terör tehditlerine karşı santralin güvenliğini temin etmektedir. ATMEA 1 tasarımında olası tüm soğutma suyu kaybı kazaları için gerekli olan ikmal suyu reaktör muhafazasının altında soğutma sistemlerini besleyen bir başka su depolama çukuru

bulunmaktadır. Tasarımda; yakıt havuzu santral işletimi ve yakıt varillerinin taşınması sırasında erişimi kolaylaştırmak amacıyla reaktör binası dışında özel bir binada yer almaktadır [11].



Şekil 5. ATMEA 1 reaktör tasarımında koruma eleman gösterimi [11]

ATMEA 1 Nükleer Güç Santrali tasarımının şematik diyagramında yer alan bileşenler şu şekilde sıralanabilir [11]: **Reaktör:** Fisyon reaksiyonlarının gerçekleştiği ve enerji üretiminin sağlandığı ana bileşen. **Buhar Jeneratörleri (Üreteçleri):** Reaktörün ürettiği ısıyı suya ileterek buhar üretir ve türbinleri çalıştırır. **Reaktör Soğutma Pompaları:** Reaktördeki ısıyı taşıyan soğutma sıvısının dolaşımını sağlayan sistem. **Gelişmiş Akümülatörler:** Reaktörün acil durumlar için enerji depolamasını sağlayan sistem. **İkmal Suyu Deposu Çukuru:** Soğutma sistemi için gerekli olan suyun depolandığı alan. **Kor:** Reaktör çekirdeğini çevreleyen, güvenlik ve koruma sağlayan yapı. **Muhafaza Kazanı:** Reaktörün güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayan, dış etkenlere karşı koruma sağlayan kabın adı. **Güvenlik Sistemleri:** Reaktörün ve santral tesislerinin güvenliğini sağlamak için tasarlanmış bir dizi önlem ve yapı. **Ana Kontrol Odası:** Santralin tüm işleyişi ve güvenlik sistemlerinin kontrol edildiği merkezi odadır. **Tüketilmiş Yakıt Çukuru:** Kullanılmış nükleer yakıtın depolandığı alandır. **Atık Yakıt Ünitesi:** Tüketilmiş yakıtın işlenmesi ve depolanması amacıyla kullanılan tesis. **Acil Durum Jeneratörleri:** Olası bir elektrik kesintisi durumunda santralin temel işlevlerini devam ettirmek için kullanılan jeneratörler. **Türbin Jeneratör Binası:** Buhar türbininin bulunduğu ve elektrik üretiminin yapıldığı bina. Bu bileşenler, ATMEA 1 Nükleer Güç Santrali'nin güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir şekilde çalışmasını sağlayan temel unsurlardır [11].

4.2 . Nükleer Reaktörün Gelişim Süreci

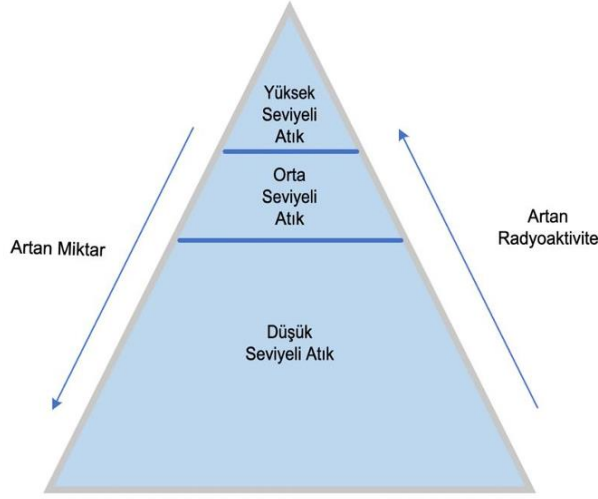
Dünyadaki ilk nükleer reaktör, 1942 yılında E. Fermi, L. Szilard, G. Anderson ve V. Zinn liderliğinde Chicago'da inşa edilmiştir. Bu reaktör, nükleer enerjinin sivil ve askeri amaçlarla

kullanımında dönüm noktası olmuştur. 1944 yılında ABD'de doğal uranyum yakıtı ve grafit yavaşlatıcıya sahip Argonne National reaktörü faaliyete geçmiştir. 1946'da ise IV. Kurchatov liderliğinde Sovyetler Birliği'nde uranyum grafit reaktörü kurulmuştur. Avrupa'da İngiltere 1947'de ilk reaktörünü devreye alırken, bunu 1948'de Fransa ve 1949'da Sovyetler Birliği takip etmiştir. 1951 yılında ABD'de faaliyete geçen "Breeder Reactor", deneme amaçlı da olsa ilk elektrik enerjisi üreten reaktör olma özelliğine sahiptir. 1955 yılında Sovyetler Birliği'nde işletilen BR-1 reaktörü de bu alandaki gelişmelerin bir diğer örneğidir. Bu yıllarda nükleer reaktörlerin öncelikli kullanım amacı askeri projeler olsa da, 1951'den itibaren elektrik üretimi ön plana çıkmıştır. 1959-1960 yıllarında İngiltere'de devreye alınan "Colder Hall" ve "Chapelcross" nükleer reaktörleri, ticari amaçlı nükleer güç reaktörlerinin başlangıcı kabul edilmektedir. 1956'dan itibaren reaktör teknolojileri hızla gelişmiş, "1. Nesil" ve "2. Nesil" reaktör tasarımları ortaya çıkmıştır. Bu süreçte dünya genelinde reaktör sayıları hızla artmış, nükleer enerji, küresel enerji üretiminde önemli bir rol üstlenmiştir. Özetle, 1942'de başlayan nükleer reaktör çalışmaları, 1950'lerden itibaren ticari elektrik üretimine odaklanmış ve teknolojik gelişim süreci bugünkü ileri düzey tasarımlara temel oluşturmuştur [12-15, 7].

4.3. Nükleer Reaktör Atığı

Radyoaktif atıklar, yapılarında radyonüklid bulunan veya bu maddelerle bulaşmış, radyoaktiflik seviyesi kabul edilebilir düzeyin üzerinde olan malzemelerdir. Katı, sıvı veya gaz formunda olabilir ve radyoaktiflik seviyeleri ile tehlike potansiyellerine göre düşük, orta ve yüksek seviyeli olarak sınıflandırılır. Nükleer santrallerde uranyumun parçalanması sırasında oluşan radyoaktif atıklar, çevreye kontrolsüz şekilde salındığında tehlikeli olabilir. İnsan sağlığına zarar verebilecek bu atıklar, işlem görerek daha güvenli hale getirilir ve depolanır. Yakıt çevrimi sırasında oluşan atıkların %95'i sıvı formda olup, %99'u sonradan katı hale dönüştürülür. Nükleer atıkların sıvıdan katıya dönüştürülmesi, atıkların güvenli bir şekilde depolanmasını sağlamak amacıyla uygulanan özel işlemleri içerir. Bu süreçte yaygın olarak kullanılan yöntemler şunlardır: **Buharlaştırma ve Kurutma**: Sıvı radyoaktif atıklar buharlaştırılarak içerisindeki su uzaklaştırılır. Geriye kalan yoğun radyoaktif madde, katı forma geçmesi için işlem görür. **Camlaştırma (Vitrifikasyon)**: Radyoaktif sıvılar yüksek sıcaklıkta cam tozu ile karıştırılır ve eriyik haline getirilir. Daha sonra bu karışım soğutularak katı, cam benzeri bir forma dönüştürülür. Bu yöntem, özellikle yüksek seviyeli radyoaktif atıklar için tercih edilir. **Çimento ile Katılaştırma (Solidifikasyon)**: Sıvı atıklar, çimento ve bağlayıcı maddelerle karıştırılarak katı bir blok haline getirilir. Bu yöntem, düşük ve orta seviyeli atıklar için yaygındır. **Polimerleştirme**: Sıvı atıklar, özel polimer malzemelerle karıştırılarak katı

forma dönüştürülür. Polimerler, atıkları stabilize ederek uzun süre güvenli şekilde muhafaza edilmesini sağlar. **Reçine Kullanımı:** Sıvı atıklar iyon değiştirici reçinelerle işlenir ve bu sayede radyoaktif maddeler ayrıştırılarak katı yapıya bağlanır. Bu işlemler sonunda elde edilen katı atıklar, uzun süreli depolama için özel tasarlanmış beton veya paslanmaz çelik kaplarda saklanır ve radyasyon sızıntısını önlemek için yeraltı depolarında muhafaza edilir [16].



Şekil 6. Nükleer atıklardaki işlem pramidi [16]

Radyoaktif atıkların geri dönüştürülmesi veya kullanımı, atığın türüne ve radyoaktivite seviyesine bağlıdır. Bazı nükleer atıklar, doğru işlemlerle yeniden kullanılabilirken, diğerleri yalnızca güvenli şekilde bertaraf edilebilir.

153

4.3.1. Geri Dönüşüm ve Yeniden Kullanım

Santrallerde güvenlik önlemlerinin yalnızca tasarım aşamasında değil, operasyon sırasında da etkin bir şekilde uygulanması gerektiği ifade edilmektedir. Gerekli tedbirlerin alınmaması durumunda, işçilerin maruz kalabileceği kazalar ve çevresel radyoaktif kirlilik büyük riskler oluşturabilir. Bu kapsamda, geçmişte meydana gelen nükleer kazalar örnek gösterilerek bu tür olayların sonuçları irdelenmiştir [17].

Kullanılmış Yakıtların Yeniden İşlenmesi: Kullanılmış nükleer yakıtların bir kısmı (%95'e kadar), plütonyum ve uranyumun geri kazanılmasıyla yeniden kullanılabilir. Bu maddeler, nükleer santrallerde yeniden yakıt olarak kullanılabilir veya yeni tür yakıtlar (örneğin MOX - Mixed Oxide Fuel) üretiminde değerlendirilir [17-20].

Araştırma ve Eğitim: Düşük seviyeli radyoaktif atıklar, bilimsel araştırmalarda, tıbbi radyoterapi cihazlarının geliştirilmesinde veya eğitim amaçlı olarak kullanılabilir [17-20].

4.3.2. Özel Kullanım Alanları

Sanayi Uygulamaları: Bazı düşük seviyeli radyoaktif atıklar, endüstriyel radyografi (kaynakların içyapısını incelemek için) veya tarımda zararlı organizmaların kontrolünde kullanılabilir [17-20].

Tıp Alanı: Tıbbi izotoplar, radyasyon tedavisi veya teşhis cihazlarının üretiminde değerlendirilir. Örneğin, kısa yarı ömürlü izotoplar tıbbi teşhis cihazlarında kullanılabilir [17-20].

4.3.3. Geri Dönüşümün Zorlukları

Radyoaktif atıkların geri dönüştürülmesi teknik olarak mümkün olsa da, aşağıdaki nedenlerle her zaman uygulanamaz [17-20]: **Radyoaktivite Seviyesi:** Yüksek seviyeli atıklar (örneğin, plütonyum) oldukça tehlikeli olduğundan, yeniden işlenmesi zordur ve yüksek güvenlik gerektirir. **Ekonomik Faktörler:** Yeniden işleme süreci, yeni yakıt üretiminden daha pahalı olabilir. Bu nedenle bazı ülkeler bu yöntemi tercih etmez. **Çevresel Riskler:** Yeniden işleme sırasında ortaya çıkan yan ürünler de radyoaktif olabilir ve ek bertaraf yöntemleri gerektirir.

4.3.4. Bertaraf Edilmesi Gereken Atıklar

Geri dönüştürülemeyen radyoaktif atıklar, güvenli depolama tesislerinde saklanır [17-20]: Derin yer altı depoları (özellikle yüksek seviyeli atıklar için). Yüzeyde beton ve çelik kaplarla korunan depolar (düşük ve orta seviyeli atıklar için). Sonuç olarak, bazı nükleer atıklar geri dönüştürülerek veya yeniden işlenerek değerlendirilebilirken, diğerleri güvenli şekilde depolanmalıdır. Geri dönüşüm, çevresel etkileri azaltmak ve enerji kaynaklarını daha verimli kullanmak için önemli bir stratejidir.

4.4. Nükleer Reaktör Sınıflandırılması

Nükleer reaktörler, tasarım özellikleri, çalışma prensipleri ve kullanım amaçlarına göre farklı kategorilere ayrılır. İşte nükleer reaktörlerin başlıca sınıflandırmaları [21 – 28]:

4.4.1. Kullanım Amaçlarına Göre [21 – 28]:

- **Enerji Reaktörleri:** Elektrik üretmek için tasarlanmıştır (örneğin, basınçlı su reaktörleri - PWR).
- **Araştırma Reaktörleri:** Bilimsel araştırmalar, izotop üretimi ve eğitim amaçlı kullanılır.

- **Askeri Reaktörler:** Denizaltılar ve uçak gemileri gibi askeri araçlara enerji sağlamak için kullanılır.
- **Üretim Reaktörleri:** Plütonyum üretimi veya özel izotopların elde edilmesi için tasarlanır.

4.4.2. Çekirdek Reaksiyonu Türüne Göre [21 – 28]:

- **Fisyon Reaktörleri:** Ağır çekirdeklerin (örneğin uranyum-235) bölünmesiyle enerji üretir.
- **Füzyon Reaktörleri (Geliştirme aşamasında):** Hafif çekirdeklerin (örneğin hidrojen izotopları) birleşmesiyle enerji sağlar.

4.4.3. Moderatör Malzemesine Göre [21 – 28]:

- **Grafit Moderatörlü Reaktörler:** Grafit, nötronların yavaşlatılması için kullanılır (örneğin, RBMK).
- **Su Moderatörlü Reaktörler:** Nötronların yavaşlatıcısı olarak normal veya ağır su kullanılır.
 - Hafif Su Moderatörlü (PWR ve BWR).
 - Ağır Su Moderatörlü (CANDU reaktörleri).

4.4.4. Soğutucu Türüne Göre [21 – 28]:

- **Su Soğutmalı Reaktörler:**
 - Basınçlı Su Reaktörü (PWR).
 - Kaynar Su Reaktörü (BWR).
- **Gaz Soğutmalı Reaktörler:** Karbon dioksit veya helyum gazı kullanılır.
- **Sıvı Metal Soğutmalı Reaktörler:** Sodyum veya kurşun kullanılır (örneğin, hızlı nötron reaktörleri).
- **Hava veya Diğer Soğutucular:** Nadiren kullanılır.

4.4.5. Nötron Spektrumuna Göre [21 – 28]:

- **Termal Reaktörler:** Yavaş (termal) nötronları kullanır.
- **Hızlı Reaktörler:** Hızlı nötronlarla çalışır ve genellikle plütonyum üretimi için kullanılır.

4.4.6. Yakıt Türüne Göre [21 – 28]:

- **Doğal Uranyum Yakıtlı Reaktörler:** Zenginleştirilmemiş uranyum kullanır.
- **Zenginleştirilmiş Uranyum Yakıtlı Reaktörler:** Zenginleştirilmiş uranyum kullanır.
- **MOX (Mixed Oxide) Yakıtlı Reaktörler:** Plütonyum ve uranyum karışımı yakıt kullanır.

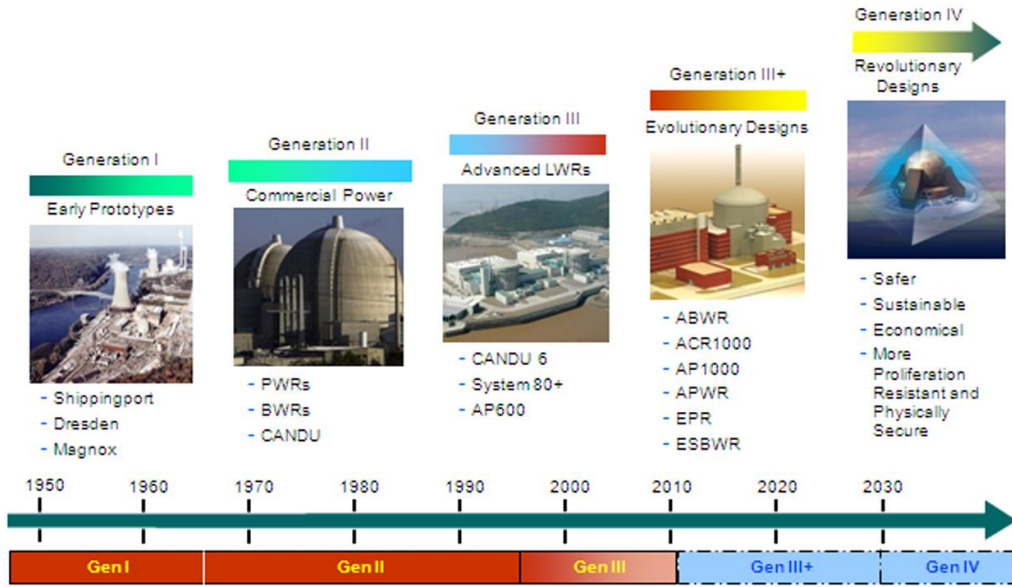
4.4.7. Nesillerine Göre [21 – 28]:

- **Birinci Nesil Reaktörler:** 1950'lerde geliştirilen ilk ticari reaktörlerdir.
- **İkinci Nesil Reaktörler:** 1960'lar ve 70'lerde ticari olarak yaygınlaşan reaktörler.
- **Üçüncü Nesil Reaktörler:** Daha yüksek verimlilik ve güvenlik önlemleri sunar (örneğin, ATMEA-1).
- **Dördüncü Nesil Reaktörler (Geliştirme aşamasında):** Yenilikçi ve sürdürülebilir tasarımlar.

4.4.8. Özel Tasarımlara Göre [21 – 28]:

- **Yüzer Reaktörler:** Gemilerde veya platformlarda kullanılan reaktörler.
- **Mobil Reaktörler:** Askeri ve uzak bölgeler için taşınabilir reaktörler.
- **Küçük Modüler Reaktörler (SMR):** Daha küçük boyutlu ve modüler tasarımlı reaktörler.

Her sınıflandırma, reaktörlerin çalışma koşullarını ve tasarımlarını anlamak için bir çerçeve sağlar. Seçim, kullanım amacı, güvenlik gereksinimleri ve ekonomik faktörlere bağlıdır (Şekil 7).



Şekil 7. Nükleer reaktör nesilleri [29 y]

Reaktörlerin nesillere ayrılması, teknolojik gelişim ve kullanım amaçları doğrultusunda gerçekleşmiştir [29, 8, 7]:

1. Nesil Reaktörler [29, 8, 7]:

- 1950'lerde geliştirilen ilk ticari reaktörlerdir.
- Basit tasarımlar ve düşük güvenlik önlemleriyle karakterizedir.
- Örnek: Calder Hall (İngiltere).

2. Nesil Reaktörler [29, 8, 7]:

- 1960-1980 arasında ticari olarak yaygınlaşmıştır.
- Daha yüksek verimlilik ve güvenlik sağlar.
- Örnek: Basınçlı Su Reaktörleri (PWR) ve Kaynar Su Reaktörleri (BWR).

3. Nesil Reaktörler [29, 8, 7]:

- 1990'lar sonrasında geliştirilmiştir.
- Uzun ömür, yüksek güvenlik ve gelişmiş yakıt verimliliği sunar.
- Örnek: ATMEA-1, AP1000.

4. Nesil Reaktörler (Geliştirme aşamasında) [29, 8, 7]:

- Sürdürülebilirlik, atık yönetimi ve yenilikçi soğutucu sistemler üzerine odaklanır.

- Örnek: Hızlı Nötron Reaktörleri, Tuz Ergitmeli Reaktörler.

Nükleer reaktör çeşitleri 6 tanedir. Hafif su reaktörlerinde, normal su hem yavaşlatıcı hem de soğutucu olarak kullanılır. En yaygın kullanılan nükleer reaktör tiplerine ise Basınçlı Su Reaktörü (PWR) ve Kaynar su reaktörü (BWR) örnek verilebilir. Nükleer reaktör çeşitleri aşağıdaki gibidir [30]:

- Basınçlı Su Reaktörü (Pressurized Water Reactor)
- Kaynar Su Reaktörü (Boiling Water Reactor)
- Basınçlı Döteryum Reaktörü (Pressurized Heavy Water Reactor)
- Gaz Soğutmalı Reaktör (Gas Cooled Reactor – Advanced Gas Cooled Reactor)
- Kurşun- Sodyum Soğutmalı Reaktör (Liquid-Metal Fast-Breeder Reactor)
- Florid-toryum Reaktör Çalışması (Molten Salt Reactor Experiment)

5. BASINÇLI SU (PWR) VE KAYNAR SU (BWR) REAKTÖRLERİ

Kaynar Su Reaktörleri (Boiling Water Reactors - BWR) ve Basınçlı Su Reaktörleri (Pressurized Water Reactors - PWR), *en yaygın kullanılan ticari nükleer reaktör türleridir*. Her iki reaktör tipi de, güvenlik sistemleri, enerji verimliliği ve ekonomik faktörler göz önüne alınarak farklı avantaj ve dezavantajlar sunar. PWR'ler dünya çapında en yaygın kullanılan tiptir, ancak BWR'ler de bazı ülkelerde yaygın olarak tercih edilmektedir [31].

158

Tablo 3. BWR ve PWR sistemleri [31]

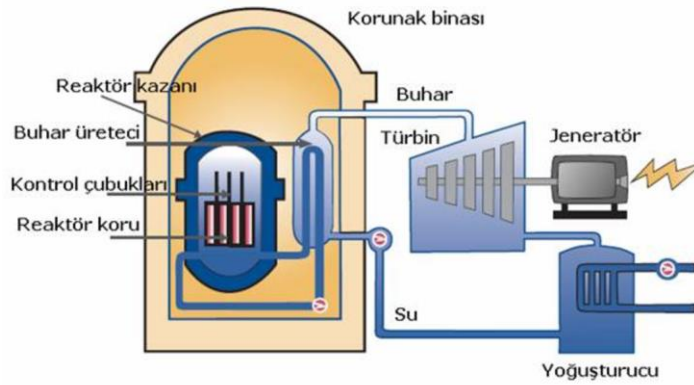
Özellik	BWR	PWR
Buhar üretimi	Çekirdek içinde	Isı değiştirici içinde
Devre sayısı	Tek	Çift
Güvenlik seviyesi	Düşük basınç, ancak radyoaktif türbin	Yüksek basınç, radyasyondan arınmış türbin
Maliyet	Daha düşük	Daha yüksek

Her ikisi de suyu soğutucu ve ısı transfer sıvısı olarak kullanır ancak çalışma prensiplerinde bazı farklılıklar vardır:

5.1. Basınçlı Su Reaktörü (PWR)

PWR tipi reaktörler, ticari elektrik üretimi için kullanılan ilk nükleer reaktörlerdir ve günümüzde dünyadaki nükleer santrallerin yaklaşık yarısını oluşturur. Çalışma prensibi, yüksek basınç altında birincil devrede suyun kaynamasını önleyerek ısı transferi sağlamaktır. Bu tasarımın avantajı, yüksek güvenlik seviyesi ve etkin enerji üretimidir. Dezavantajı ise yüksek basınçlı sistemlerin karmaşık ve maliyetli olmasıdır. Reaktör çekirdeğinde fisyon yoluyla açığa

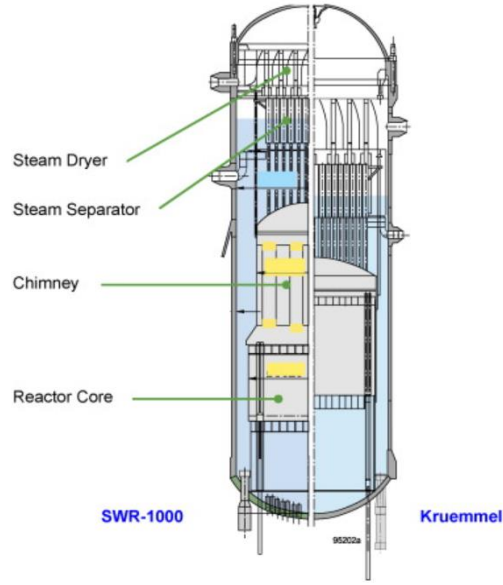
çıkan enerji, birincil devredeki soğutucu suya aktarılır. Bu yüksek sıcaklıktaki su, buhar jeneratörlerine yönlendirilerek ikincil devrede buhar üretilir. Buhar, türbinleri çalıştırarak elektrik üretimini sağlar. Birincil sistemdeki basınç yaklaşık 150-160 atm, su sıcaklığı ise girişte 290-300°C, çıkışta 320-330°C'dir. Bu koşullar, suyun kaynamadan yüksek sıcaklıklarda dolaşmasını sağlar. Birincil soğutma sistemi, iki, üç veya dört döngüden oluşur. Her döngüde bir buhar jeneratörü ve bir soğutucu pompası bulunur. Basınç dengeleyici, sistemde basıncı kontrol eder. Çekirdek, dayanıklı çelikten yapılmış bir basınç kabı içinde yer alır. Reaktör ve soğutma sistemleri, çelik bir koruma kabı ve dışındaki beton yapı ile güvence altına alınmıştır. Bu yapı, dış etkenlerden koruma ve radyasyon yayılımını önleme amacı taşır. Zincirleme fisyon reaksiyonunu sürdüren moderatör görevi gören su, hem ısıyı taşır hem de nötronları yavaşlatır. Basınç kabı, reaktörün ömrünü belirleyen kritik bir bileşendir [31, 21, 9, 7].



Şekil 8. Basıncılı su reaktörü (PWR) [31, 21, 9, 7]

Aktif çekirdek yüksekliği, tipik olarak 3.71 metreden 3.0 metreye düşürülmüştür (Şekil 9). Bunun sonucunda çekirdek, Reaktör Basınç Kabı (RPV- RPW) içinde daha aşağı bir seviyeye yerleştirilebilmiştir. RPV'nin toplam yüksekliği standart ile aynı kalırken (Şekil 9), ana buhar ve besleme suyu nozulları RPV'nin gövdesinde daha yüksek bir konuma yerleştirilmiştir. Bu düzenleme, kaza kontrolü için çekirdek üzerinde çok daha büyük bir su hacmi sağlamaktadır.

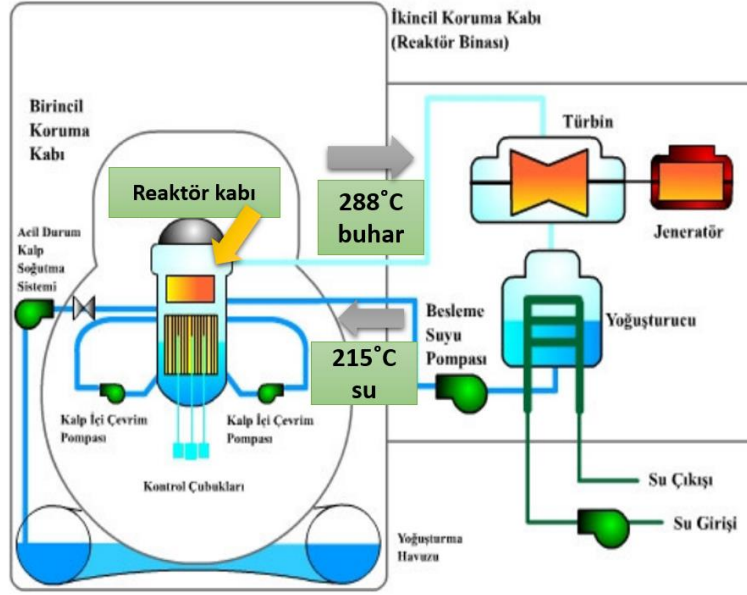
Çekirdek üzerindeki su hacmi o kadar büyüktür ki, kaza sonrası reaktör basıncının düşürülmesi sırasında RPV'ye aktif bir soğutucu beslemesi yapılmasına gerek kalmaz ve yakıt soğutması korunabilir. Etkin su hacmini daha da artırmak için, çekirdeğin üzerinde bir baca yerleştirilmiştir (Şekil 9). Bu baca, buhar-su karışımının borular yoluyla yönlendirilmesini sağlamaktadır [32].



Şekil 9. RPV (RPW) Karşılaştırması: SWR-1000 ve NPP Kruemmel [32]

5.2. Kaynar Su Reaktörü (BWR)

Kaynar su reaktörleri (Boiling Water Reactors - BWR), dünya genelinde basınçlı su reaktörlerinden (Pressurized Water Reactors - PWR) sonra en sık kullanılan reaktörlerdir. PWR ile birçok benzer özelliğe sahip olmasına rağmen temel fark, reaktör çekirdeğinde suyun kaynamasına izin verilmesidir. BWR sistemleri, çekirdek içinde üretilen buharı doğrudan türbinlere yönlendirme özelliğiyle öne çıkar ve bu nedenle doğrudan çevrim prensibiyle çalışır. **Ayrıca, bu reaktörlerde işletme basıncı PWR'lere göre daha düşüktür (yaklaşık 70 atmosfer), bu da basınç kabının daha ince yapılmasına olanak tanır.** Reaktör kabından 288°C buhar olarak çıkararak türbinlere gitmektedir. 215°C sıcaklığında yoğuşturucudan çıkarak reaktör kabına geri dönmektedir. Soğutucu, reaktörden aldığı ısı ile kaynayabilmesi için PWR'da kullanılan basınçtan daha düşük basınçta (7 MPa civarı veya 1000 psi) tutulur. Meydana gelen buhar elektrik üretmek için aynı şekilde türbin jeneratörlerine yollanır (Şekil 10) [31].



Şekil 10. Kaynar su reaktörü [31]

BWR'lerde, reaktör çekirdeğinde üretilen ısı, suyu doğrudan buhara dönüştürür. Buhar, türbinlere iletilerek elektrik üretilir. **Tasarım Özellikleri:** Reaktör çekirdeğindeki su, hem nötron moderatörü hem de soğutucu olarak işlev görür. Sadece bir devre vardır; çekirdekten çıkan buhar doğrudan türbinlere gider ve kondensere dönmeden önce bir buhar ayırıcısından geçer. **Avantajları:** Daha basit bir tasarım ve daha az ekipman gerektirir, bu da maliyetleri düşürebilir. **Dezavantajları:** Türbinler ve diğer bileşenler radyoaktif buhara maruz kalabilir, bu da bakım maliyetlerini artırabilir [32 - 36].

5.3. Basınçlı Su Reaktörleri (PWR) ve Kaynar Su Reaktörlerinin (BWR) Tasarımı

Basınçlı Su Reaktörü (PWR) Tasarımı [37]:

- **Çekirdek:** Reaktör çekirdeği, genellikle silindirik bir basınç kabının içine yerleştirilir ve bu kabın çevresi koruma yapı sistemleriyle güçlendirilmiştir. Yakıt çubukları, uranyum dioksit (UO_2) peletlerinden oluşur ve zirkonyum alaşımlarıyla kaplanır.
- **Birincil Devre:** Su, reaktör çekirdeğinde yüksek basınç altında ısıtılır ve bu ısı, buhar jeneratörlerine aktarılır. Birincil devre suyu, basınç nedeniyle kaynamaz.
- **İkincil Devre:** Buhar jeneratöründe ısıtılan su buhara dönüştürülerek türbinleri çalıştırır ve ardından yoğunlaştırıcıda soğutulur.
- **Basınç Kabı:** Yüksek basınçlı bir tasarıma dayanır ve genellikle çok dayanıklı çelikten üretilir. Sistemin uzun ömürlü olmasını sağlamak için korozyona dayanıklı materyaller kullanılır.

- **Güvenlik Sistemleri:** Pasif güvenlik özellikleri içerir; basıncı kontrol etmek için bir basınç dengeleyici (pressurizer) ve hızlı kapatma sistemleri bulunur.

Kaynar Su Reaktörü (BWR) Tasarımı [37]:

- **Çekirdek:** PWR'ye benzer bir yakıt yapısına sahiptir. Yakıt çubukları, suyun doğrudan kaynatıldığı çekirdekte bulunur.
- **Doğrudan Çevrim:** Çekirdekte kaynayan su, doğrudan buhar üreterek türbinlere yönlendirilir. Bu buhar, türbinleri döndürdükten sonra yoğunlaştırılarak tekrar reaktöre gönderilir.
- **Basınç Kabı:** Daha düşük basınç seviyeleri nedeniyle (yaklaşık 70 atm), PWR tasarımına göre daha ince basınç kabı yeterli olur.
- **Su Sirkülasyonu:** Su buhar-su karışımı olarak çekirdekte dolaşır. Buhar, çekirdek üzerindeki bir buhar ayırıcı sistemi ile türbine gönderilmeden önce nemden arındırılır.
- **Güvenlik Sistemleri:** BWR'de, pasif güvenlik sistemleri ve acil soğutma sistemleri kullanılarak kaza durumlarında yakıtın güvenliği sağlanır.

Tablo 4. Basınçlı su reaktörü, kaynar sulu reaktörler, basınçlı ağır su reaktörleri[37]

Özellikler	BWR	PWR	PHWR
Üretici	General Elektrik	Westinghouse	AECL
Sistem	BWR/6	Sequoyah	CANDU-600
Kor			
Eksen	Dikey	Dikey	Yatay
Yakıt Demetlerinin Sayısı			
Eksenel	1	1	12
Radyal	748	193	380
Demet Aralığı (mm)	152	215	286
Aktif Yakıt Yüksekliği (m)	3,81	3,66	5,94
Eşlenik Çap (m)	4,7	3,37	6,29
Toplam Yakıt (ton)	156	101	98,4
Reaktör Kazan			
İç Boyutlar (m)	6,05 Ç x 21,6 Y	4,83 Ç x 13,4 Y	7,6 Ç x 4 Y
Duvar Kalınlığı (mm)	152	224	28,6
Malzeme	paslanmaz ve zırfı karbon çelik	paslanmaz ve zırfı karbon çelik	paslanmaz çelik
Diğer Özellikler			
Ortalama güç yoğunluğu (kW/L)	54,1	105	12
Doğrusal ısı üretim oranı (kW/m)			
Kor ortalaması	19	17,8	25,7
Maksimum	44	42,7	44,1
Performans			
Yanma (Mwgün/ton)	27.500	27.500	7.500
Yakıt Değişimi			
Periyot	yılda 1/4	yılda 1/3	sürekli
Süre (gün)	30	30	--

Bu tasarımlar, her iki reaktörün operasyonel gereksinimleri, güvenlik öncelikleri ve enerji üretim teknolojisine olan katkılarına göre optimize edilmiştir. Basınçlı Su Reaktörleri (PWR), güvenlik ve sistem izolasyonu açısından avantajlıdır; Kaynar Su Reaktörleri (BWR) ise daha

basit bir sistem yapısıyla maliyet avantajı sunar (Tablo 5) [36, 38].

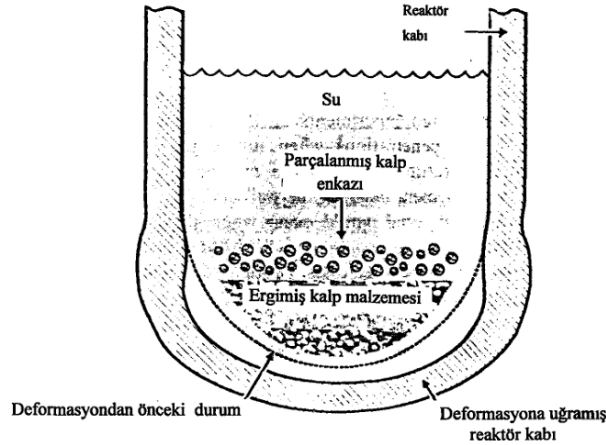
Tablo 5. Tasarımın teknik özellikleri karşılaştırması [36, 38]

Özellik	PWR	BWR
Çevrim Türü	Dolaylı (iki devre)	Doğrudan (tek devre)
Basınç Kabı Tasarımı	Daha kalın (150-160 atm)	Daha ince (70 atm)
Buhar Jeneratörü	Gereklidir	Gerekli değildir
Çekirdek Su Sirkülasyonu	Kaynamaz (yüksek basınçlı)	Çekirdekte doğrudan kaynar (alçak basınçlı)
Güvenlik Sistemleri	Birincil ve ikincil devre koruması	Tek devre üzerinde güvenlik önlemleri

Ayanoğlu'nun tez çalışması, Süper Kritik Su Soğutmalı Reaktörler (SCWR) üzerine odaklanmıştır. Bu reaktörlerde, çalışma koşulları kritik noktayı aşarak (25 MPa ve 500°C üzeri) hafif suyun, kaynama ve faz değişimi olmadan sıvı ve gaz özelliklerini bir arada sergilediği bir ortam sağlar. Kritik nokta altındaki kaynama olaylarının süper kritik koşullarda gerçekleşmemesi, termodinamik ve işletim açısından yüksek termal verimlilik ve sadeleştirilmiş soğutma sistemleri gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Tez kapsamında, standart paslanmaz çeliklere kıyasla daha yüksek oksitlenme direncine sahip östenitik paslanmaz çelikler incelenmiş ve radyasyon hasar parametreleri değerlendirilmiştir. Ayrıca SCWR'lerde kullanılması önerilen diğer aday zarf malzemeleri (Inconel 625, Inconel 718 ve S 316) ile karşılaştırma yapılmıştır. Elementlerin radyasyon hasar parametrelerine etkileri analiz edilerek, bu malzemelerin SCWR'ler için uygunlukları tartışılmıştır. Bulgular, östenitik paslanmaz çelik alaşımlarında nikel, alüminyum ve kromun radyasyon hasarı üzerinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Nikel oranının artışı, radyasyon hasarını artırırken, alüminyum miktarının yükselmesi ve kromun azalması deformasyon değerlerini düşürmüştür. Ancak bu değişiklikler, helyum ve hidrojen gazlarının üretimini etkilememiş; gaz üretiminin büyük ölçüde nikel konsantrasyonuna bağlı olduğu belirlemiştir [39]. Şiddetli reaktör kazası sırasında reaktörün "kalbinde" oluşan zarar, genellikle çekirdek erimesi (core meltdown) olarak adlandırılır ve bu, bir nükleer santralde meydana gelebilecek en ciddi durumlardan biridir. Erime sonucunda oluşan yüksek sıcaklık ve basınç, reaktörün basınç kabına zarar verebilir. Bu durumda radyoaktif maddeler çevreye sızabilir.

PWR tipi bir nükleer reaktörde, soğutma suyu devresinde oluşan herhangi bir arıza, reaktör kalbinde sıcaklığın aniden çok yüksek değerlere ulaşmasına neden olur. Bunun sonucunda reaktör kalbi eriyerek sıcaklığın bir anda artmasını sağlar. Normal çalışma koşullarında 350°C olan kalp sıcaklığının, kaza sırasında susuz bölgelerde 2200°C'a ulaştığı tahmin edilmektedir.

UO₂ seramik yakıtın erime sıcaklığı 2880°C'dır. Bu sıcaklıkta kalp malzemesi erimektedir. Belirtilen yüksek sıcaklıklara ulaşan kalp içerisinde eriyen zirkalay zarf ve UO₂ seramik yakıt sıvı bileşik haline gelir ve üç bileşenli U-Zr-O oluşur. Merkezdeki soğutucu akışkan kanallarından aşağı doğru akarak kalbin alt kısmında katılaşır ve yakıt çubuklarını saran su geçirmez bir tabaka oluşur (Şekil 11). Çelik malzemeden oluşan reaktör kabındaki sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Çelik reaktör kabının iç yüzey sıcaklığının 1700 K'de erimemektedir. Çelik reaktör kabının iç yüzey sıcaklığının 1700 K'de erimemesi, çeliğin erime noktası ve yüksek sıcaklıklarda dayanıklılığıyla ilgilidir. Tipik olarak nükleer reaktörlerde kullanılan çelik alaşımları, özellikle yüksek sıcaklıklara dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Karbon çeliği veya paslanmaz çelik gibi malzemelerin erime noktası 1450-1530°C (1723-1803 K) aralığındadır. Ancak nükleer reaktörlerde kullanılan çelik alaşımları, genellikle daha yüksek sıcaklık ve radyasyon dirençli özel formülasyonlarla üretilir. Feritik-martenzitik çelikler, östenitik paslanmaz çelikler veya Inconel alaşımları gibi özel malzemeler, erimeye karşı daha dirençlidir. 1700 K, kabın belirli bir bölgesindeki sıcaklık olabilir. Ancak bu sıcaklık, yüzey boyunca homojen şekilde dağılmamış olabilir ve kritik erime noktalarına ulaşmamış olabilmektedir [40].

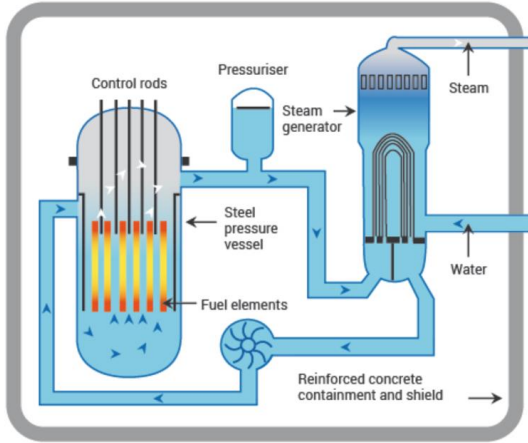


Şekil 11. Yüksek sıcaklık etkisindeki reaktör kabı geometrisindeki değişiklikleri [40]

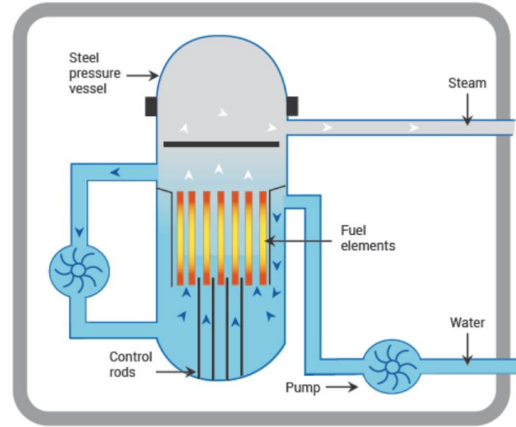
Bir PWR, çekirdeğin içinde dikey olarak düzenlenmiş 200-300 çubuktan oluşan yakıt düzeneklerine sahiptir ve büyük bir reaktörde 80-100 ton uranyuma sahip yaklaşık 150-250 yakıt düzeneği bulunur. Reaktör çekirdeğindeki su yaklaşık 325°C'ye ulaşır, bu nedenle kaynamasını önlemek için atmosfer basıncının yaklaşık 150 katı altında tutulması gerekir. Basınç, bir basınçlandırıcıdaki buharla sağlanır (şemaya bakın). Birincil soğutma devresinde su aynı zamanda moderatördür ve herhangi biri buhara dönüşürse fisyon reaksiyonu yavaşlar. Bu negatif geri besleme etkisi, türün güvenlik özelliklerinden biridir. İkincil kapatma sistemi,

birincil devreye bor eklemeyi içerir. İkincil devre daha az basınç altındadır ve buradaki su, buhar jeneratörleri olan ısı eşanjörlerinde kaynar. Buhar, elektrik üretmek için türbini çalıştırır ve daha sonra yoğunlaştırılarak birincil devreye temas halindeki ısı eşanjörlerine geri gönderilir. Kaynar su reaktörü (BWR) ise PWR ile birçok benzerliği vardır, ancak suyun daha düşük basınçta olduğu (atmosferik basıncın yaklaşık 75 katı) tek bir devre vardır, böylece çekirdekte yaklaşık 285°C'de kaynar. Reaktör, çekirdeğin üst kısmındaki suyun %12-15'inin buhar olarak çalışması için tasarlanmıştır ve dolayısıyla daha az düzenleyici etki ve dolayısıyla verimlilik vardır. BWR üniteleri, PWR'lerden daha kolay yük takip modunda çalışabilir. Buhar, çekirdeğin üstündeki daha kuru plakalardan (buhar ayırıcılar) geçer ve daha sonra doğrudan türbinlere gider, böylece türbinler reaktör devresinin bir parçasıdır. Bir reaktörün çekirdeğinin etrafındaki su her zaman radyonüklid izleriyle kirlenmiş olduğundan, türbinin korunması ve bakım sırasında radyolojik koruma sağlanması gerekir. Bunun maliyeti, daha basit tasarım nedeniyle tasarrufları dengeleme eğilimindedir. Sudaki radyoaktivitenin çoğu çok kısa ömürlüdür, bu nedenle türbin salonuna reaktör kapatıldıktan kısa bir süre sonra girilebilir [41].

Basınçlı su reaktörü (PWR)

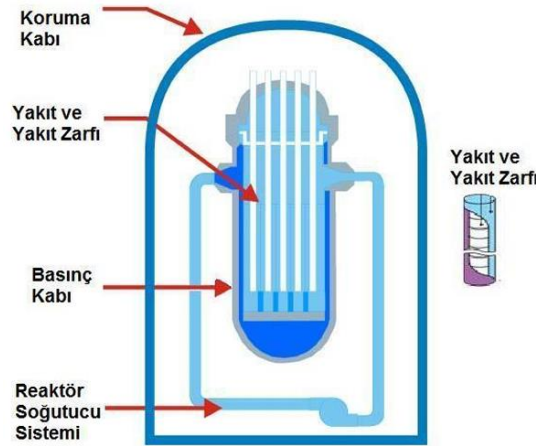


Kaynar su reaktörü BWR



Şekil 12. PWR ve BWR reaktörlerin karşılaştırılması [41]

Nükleer santral güvenliğinin temel ilkesi, tüm aşamalarda (tasarım, yer seçimi, inşaat, işletme ve söküm) uluslararası standartlar, kalite kontrol, lisanslama ve güvenlik prosedürlerinin uygulanmasıdır. Santraller, bu standartlara uygun olarak tasarlanır, inşa edilir ve işletilir. Radyasyonun santralin dışına çıkmasını önleyen bariyerler. Bu çok katlı bariyerler birbirlerinden bağımsızdırlar ve santralin güvenlik sistemleri bu bariyerleri korumak için tasarlanır [21].



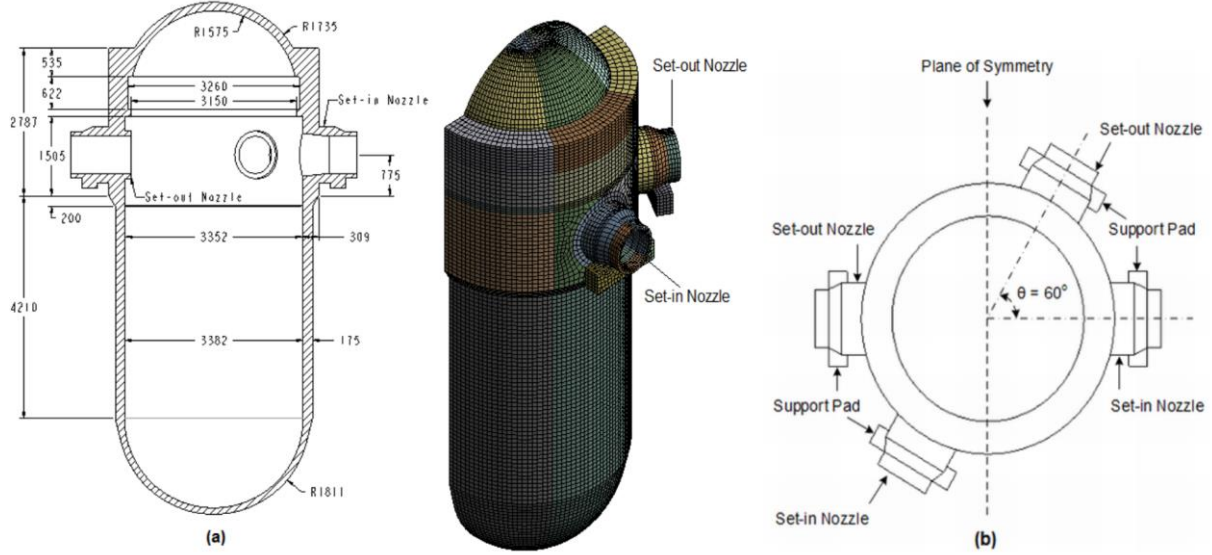
Şekil 13. Koruyucu Reaktör kap tasarımı [21]

Lindgren ve ark., devre dışı bırakılmış bir kaynar su basınç reaktör (BWR) kabındaki zorlu çalışma koşulları altında, özellikle yüksek sıcaklık ve radyasyon etkisiyle Ni ve Mn elementlerinin kaynak metalindeki dağılımının malzeme dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Ni ve Mn'nin malzeme içinde dağılımı, kaynak metalinin uzun süreli dayanımını etkileyen kritik bir faktördür. Radyasyonun ve termal etkilerin, elementlerin yeniden dağılımına ve mikro-yapısal değişimlere neden olduğu gözlemlenmiştir. Nükleer reaktör basınç kabı malzemelerinin güvenliği ve ömrünü anlamak için önemli bir katkı sağlar. Özellikle, yüksek Ni ve Mn içeren malzemelerin dayanıklılığını artırma ve bu tür yapıların uzun vadeli performansını iyileştirme açısından önemlidir [42].

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), mühendislikte karmaşık fiziksel problemlerin çözümü için kullanılan bir sayısal analiz tekniğidir. Bu yöntemde, analiz yapılacak yapı, birçok küçük ve birbirine bağlı elemanlara ayrılır. Her elemanın hareket ve gerilme davranışları hesaplanarak, tüm yapı için genel bir çözüm elde edilir. SEY, gerilme, sıcaklık ve akış gibi fiziksel büyüklüklerin çözümlenmesinde yaygın olarak kullanılır. **SEY süreci şu adımlardan oluşur:**

Geometrik Tasarım: Modelin şekli ve boyutları belirlenir, malzeme özellikleri tanımlanır. **Eleman Seçimi:** Modeldeki elemanlar bir, iki veya üç boyutlu olabilir. **Denklemler Sistemi:** Elemanların denge denklemleri oluşturulur ve yük taşıma özellikleri belirlenir. **Montaj:** Elemanlardan gelen veriler birleştirilerek genel çözüm elde edilir. **Sonuçların Yorumlanması:** Çözümde elde edilen veriler analiz edilir ve grafik veya tablo halinde raporlanır. Bu yöntem, mühendislik problemlerinin daha doğru ve verimli bir şekilde çözümlenmesine olanak tanır. Sonlu elemanlar yöntemi (FEY) gibi gelişmiş analiz tekniklerini kullanarak, malzeme özelliklerini, yüklenme koşullarını ve reaktör çevresel etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde inceleyen bir yöntemdir. PWR reaktör basınç kabının tasarımında daha fazla doğruluk sağlamak için kullanılır. Bu yöntem, farklı yük ve sıcaklık koşullarındaki reaktör basınç kabının davranışını simüle ederek tasarımda yüksek güvenlik standartlarına ulaşılmasını sağlar. Özellikle yüksek basınç ve sıcaklık koşullarındaki reaktörler için daha güvenli ve optimizasyon sağlanmış tasarımlar önerilmektedir. **SA-508 Gr.3 Cl.1** malzemesinden yapılan RPV veya RPW (Reaktör Basınç Kabı)

tasarımını ‘tasarım yoluyla analiz’ ve ‘formülle tasarım’ kuralları kullanarak karşılaştırdık. Karşılaştırmalı çalışmadan şu sonuçlara ulaşılabilir: ‘Tasarım yoluyla analiz’ uygulaması, ‘formülle tasarım’ yaklaşımının neden olduğu gereksiz temkinliliği ortadan kaldırmaktadır. ‘Tasarım yoluyla analiz’ kuralları kullanılarak yapılan RPV tasarımında, maksimum izin verilen basınçta %17,70’lik bir artış önerilmektedir (Şekil 14) [43].



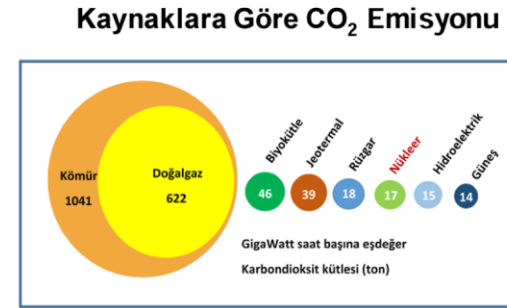
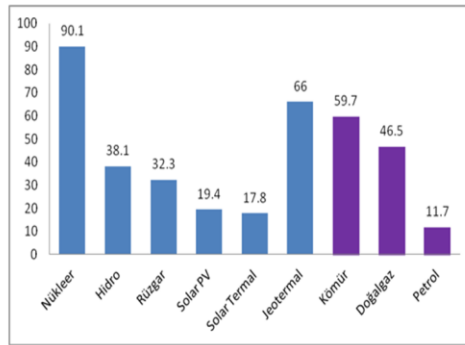
Şekil 14. 3D 186 nodlu sonlu elemanlar modeli [43]

Nükleer enerji santrallerinde malzeme seçimi, hem güvenlik hem de verimlilik açısından büyük öneme sahiptir. Her bir bileşen, reaktörün işleyişinde kritik bir rol oynar ve malzemelerin özellikleri, nükleer fisyonun etkili ve güvenli bir şekilde gerçekleşmesi için dikkatlice belirlenir. Toryumun yakıt olarak kullanıldığı yüksek sıcaklık reaktörleri prototip aşamasında olup bu reaktörlerin amacı, elektrik üretimi yanında endüstri için proses ısı da sağlamaktadır. Toryum yakıtlı reaktörler çok daha az atık çıkarmaktadır. Toryum kullanılması nükleer silahların yayılmasının önlenmesi açısından da çekicidir. Bu üstün özellikleri toryumu, 21. yüzyılın aday nükleer yakıtı olarak gündeme getirmektedir [44].

Nükleer reaktörler, yüksek enerji yoğunluğu ve düşük karbon emisyonları nedeniyle enerji üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Mersin Akkuyu Nükleer Santrali, Türkiye'nin enerji altyapısını güçlendirmek ve yenilikçi enerji çözümlerine geçişte önemli bir adım olarak görülmektedir. Akkuyu Nükleer Santrali, Türkiye'nin ilk nükleer enerji santrali olup Rusya ile yapılan iş birliği sonucu hayata geçirilmektedir. Reaktör tipi VVER-1200 olan bu santral, modern ve güvenlik standartlarına uygun bir Basınçlı Su Reaktörüdür. 4800 MW toplam kurulu güce sahiptir ve Türkiye'nin elektrik ihtiyacının yaklaşık %10'unu karşılaması planlanmaktadır. Türkiye'nin enerji arz güvenliğini artırmak, dışa bağımlılığı azaltmak ve temiz enerji üretimini desteklemek. Santral, son teknoloji güvenlik sistemleriyle donatılmıştır. Deprem, tsunami gibi doğal afetlere dayanıklı tasarlanmıştır [45].

ATMEA 1 reaktöründe buhar üreticileri; dikey, doğal sirkülasyonlu, entegre nem ayırma ekipmanına sahip U-borulu ısı değiştiricilerinden oluşmaktadır. Ayrıca yüksek buhar basıncının sağlanması ve verimi artırması için aksenel ekonomizer tasarıma dahil edilmiştir. Tasarıma aksenel ekonomizer eklenmesi; birinci ve ikinci döngü arasındaki ısı değişimi verimliliği ile eşit boru yüzeyine sahip bir buhar üretici ile karşılaştırıldığında çıkış buhar basıncının artırılmasını sağlamaktadır. Kazan devresinin bir parçası olan buhar üreticilerinde, dünya çapında yaygın olarak kullanılan ve korozyona karşı oldukça dirençli bir yapıya sahip olan alaşım 690 TT malzemesi tercih edilmiştir (Şekil 15). Nükleer santrallerin atık miktarı fosil yakıtlara göre çok daha azdır. (Örneğin, 1 kg uranyumdan elde edilen enerji için, 3.000.000 kilogram kömür veya 2.700.000 litre petrol gerekmektedir.) [46, 11].

Enerji Kaynaklarına Göre Kapasite Faktörleri (2013)



Şekil 15. Enerji kaynaklarına göre CO₂ emisyon değerleri [46]

Grafit, nötron moderatörü olarak kullanılan bir malzemedir ve geleneksel nükleer reaktörlerde yaygın bir şekilde tercih edilir. Nötron moderatörleri, nükleer fisyon reaksiyonları sonucu hızla hareket eden nötronları yavaşlatmak için kullanılır. Hızla hareket eden nötronlar, fisyon reaksiyonlarını sürdürebilmek için belirli bir hızda olmalıdır; bu nedenle, moderatörler, nötronların hızını düşürerek fisyon reaksiyonunun verimli bir şekilde devam etmesini sağlar. Grafit, yüksek sıcaklıklara dayanıklı, stabil ve çok iyi bir nötron yavaşlatıcıdır. Nötronları etkin bir şekilde yavaşlatma yeteneği, grafitin atomik yapısından kaynaklanır. Grafitteki karbon atomları, nötronlarla çarpışarak onların hızını düşürür ve bu sayede nötronlar daha düşük enerjilerle reaktör çekirdeğinde gezinmeye devam eder. Bu da reaktörün verimliliğini artırır. Grafit, özellikle yüksek sıcaklık koşullarına dayanıklı olması nedeniyle tercih edilir. Bu özelliği, reaktörlerdeki yüksek sıcaklık ortamlarında stabilitesini korumasını sağlar. Ayrıca, grafit, diğer bazı malzemelere göre daha az nötron absorbe ettiği için reaktörlerdeki nötron

verimliliğini düşürmez. Bu nedenle, grafit, tarihsel olarak birçok gaz soğutmalı reaktör (GCR) ve grafit moderatörlü reaktörlerde kullanılmıştır [46].

Nükleer enerji santrallerinde malzeme seçimi, enerji verimliliği, güvenlik, çevresel etki ve yapısal dayanıklılık gibi faktörlere dayanır. Reaktörlerde kullanılan malzemeler, güvenliği artırırken verimliliği ve ömrü de etkiler. Soğutucular, yüksek ısıyı taşımada kritik öneme sahiptir. Helyum yüksek sıcaklıklarda çalışan etkili bir soğutucudur, su ise en yaygın ve etkili soğutucudur. Beton, radyasyonu engelleyen en yaygın malzeme olup, çelik ise yapısal dayanıklılık ve radyasyona karşı koruma sağlar. Kontrol çubukları fisyon reaksiyonlarını düzenler, bor ve kadmiyum nötronları emerek bu işlemi kontrol eder. Reaktörlerde uzun ömür için zirkonyum gibi yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı malzemeler kullanılır [47].

6. Bulgular ve Tartışma

Nükleer Basınç Reaktörünün içinde çekirdek, kontrol çubukları, soğutma sistemleri ve güvenlik önlemleri bulunan büyük bir sistemdir. Reaktör basınç kabı, reaktörün içindeki yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalan sıvıyı (genellikle su veya su buharı) taşıyan, genellikle çelikten yapılmış bir yapıdır. Basınç kabı, nükleer reaktörün güvenli bir şekilde çalışabilmesi için çekirdek bölgesi ile soğutma sisteminin arasındaki bariyer görevi görür. Bu, reaktörün merkezindeki çekirdek kısmının bulunduğu, yüksek basınca dayanıklı çelik bir kabı ifade eder. Kısacası, nükleer basınç reaktörü, reaktörün enerji üretim sürecini gerçekleştiren ana yapı iken, reaktör basınç kabı, bu enerjiyi güvenli bir şekilde taşıyan ve basınç altında tutan koruyucu bir yapıdır.

Reaktör kaplarının malzemeleri, aşırı yüksek sıcaklıklar, radyasyon etkileri ve mekanik yükler gibi zorlu koşullara dayanacak şekilde seçilir. Çelik alaşımları, zirkonyum alaşımları ve diğer dayanıklı malzemelerin özelliklerini ele alarak, bu malzemelerin mekanik dayanım, termal kararlılık, korozyona dayanıklılık ve uzun ömürlülük açısından karşılaştırmasını yapabilirsiniz. Ayrıca, yeni geliştirilen malzemelerin bu alanlarda sağladığı iyileştirmeler tartışılabilir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY veya FEM), reaktör kaplarının tasarımında ve analizinde kritik bir rol oynamaktadır. Reaktör kaplarının güvenli tasarımında FEM analizlerinin nasıl bir öngörü sağladığı, Çeşitli yükleme koşulları altında FEM simülasyonları ile elde edilen sonuçlar, Deneysel çalışmalarla simülasyon sonuçlarının nasıl doğrulandığı gibi detayları açıklayabilirsiniz.

7. BİLGİLENDİRME

4. Sınıf öğrencilerin bitirme projesinden türetilmiştir.

8. ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9. KAYNAKÇA

[1] Wkipedia, Nükleer Enerjinin Tanımı, (Son Erişim Tarihi: 10.12.2024)

https://tr.wikipedia.org/wiki/N%C3%BCkleer_enerji

[2] Özdemir, N., Çobanoğlu, N.O., 2008. Türkiye’de Nükleer Santrallerin Kurulması ve Nükleer Enerji Kullanımı Konusundaki Öğretmen Adaylarının Tutumları, Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 34(34), 218-232.

[3] Bayraç, H.N., 2009. Küresel Enerji Politikaları ve Türkiye: Petrol ve Doğal Gaz Kaynakları Açısından Bir Karşılaştırma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 10(1), 115 – 142.

[4] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar bakanlığı, (2014a), Nükleer Santraller ve Ülkemizde Kurulacak Nükleer Santrale İlişkin Bilgiler, Nükleer Enerji Proje Uygulama Dairesi Başkanlığı, Yayın No:1, 1-61.

[5] Çelik, İ., Çeker, A., Belge, R., 2015. Nükleer Enerji: Türkiye ve Dünya Ölçeğinde Bir Değerlendirme, Yeni Fikir Dergisi, Cilt 7, Sayı 15, 2015, 55 – 68.

[6] İncitaş, Nükleer Enerji, (Son Erişim Tarihi: 10.12.2024)

[https://www.incitas.com.tr/bilgi-merkezi/blog/nukleer-enerji-nedir-nukleer-enerji-kullanim-
alanlari-nelerdir](https://www.incitas.com.tr/bilgi-merkezi/blog/nukleer-enerji-nedir-nukleer-enerji-kullanim-alanlari-nelerdir)

[7] Yurt, S., 2021. Nükleer Reaktör Çeşitlerinin Araştırılması ve VVER-1200 Reaktör Tipinin Çalışma Prensibi, Muş Alparslan Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 83 s., Muş.

[8] Giraldo, J.S., Gotham, D.J., Nderitu, D.G., Preckel, P.V., Mize, D.J., December 2012. Fundamentals of Nuclear Power, State Utility Forecasting Group, 76 pp.

chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.purdue.edu/discoverypark/sufg/docs/publications/SUFG%20nuclear%20report.pdf

- [9] Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) <https://www.tenmak.gov.tr/2016-06-09-00-43-55/135-gunumuzde-nukleer-enerji-rapor/838-bolum-02-nukleer-enerjinin-temel-prensipleri.html>
- [10] Güngör, Ö., 2021. Nükleer Güç Santrallerinin Ulusal Güvenlik Unsurları Yönünden İncelenmesi ve Nükleer Güç Santrallerinde Kolluk Uygulamaları, Muş Alparslan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 34 s., Muş.
- [11] Karagülle, E.C., 2021. Sinop Nükleer Güç Santralının Ulusal Güvenlik İlkelerinin Belirlenmesi: Tasarım, İşletim ve İşletimden Çıkarılması, Sinop Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sinop, 125 s.
- [12] Mandi, M., Popov, R., Pioro, I. And Asme., 2018, Research On Thermal Efficiencies Of Various Power Cycles For Gfrs And Vhtrs, Amer Soc Mechanical Engineers, 2018 26th International Conference on Nuclear Engineering New York. DOI: 10.1115/ICONE26-81618
- [13] K. F. Galiev, S. V. Yaurov, Y. V. Goncharov and A. S. Volnov, 2017. Experience of Commissioning of the V-392M Reactor Plant Passive Heat Removal System, Nuclear Energy and Technology, 3(1), 291-296.
- [14] Yılmaz, M. 2012. Türkiye'nin Enerji Potansiyeli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Açısından Önemi, Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, 2, 33-54.
- [15] Topaloğlu, F., 2024. Analytic Network Process (ANP) Based Decision Support Tool for Nuclear Power Plant Location and Reactor Type Selection, Nuclear Engineering and Technology, <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.09.031>
- [16] Hakkıoğlu Tüylüoğlu, E., Türkan, N., 2023. Nükleer Güç Santrallerinin Türkiye'de ve Dünyada Çevresel Etkileri, OHS Academy İş Sağlığı ve Güvenliği Akademi Dergisi, 6(1), 50-58.
- [17] Kahraman, Z., Yürüten Özdemir, K., 2022. Nükleer Enerjinin Riskleri ve Nükleer Santrallerde İş Sağlığı ve Güvenliği, Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi, 6(1), 53-65. DOI: 10.33720/kisgd.1090500
- [18] Alwaeli, M., Mannheim, V., 2022. Investigation into the Current State of Nuclear Energy and Nuclear Waste Management—A State-of-the-Art Review, Energies, 15(12):4275, 1-15. DOI: 10.3390/en15124275
- [19] Fernández-Arias, P., Vergara, D., Sancho, Á.A., 2023. Global Review of International

Nuclear Waste Management, Energies, 16(17), 6215. DOI: 10.3390/en16176215

[20] Terranova, M.L., Tavares, O.A.P., 2024. Trends and Perspectives on Nuclear Waste Management: Recovering, Recycling, and Reusing, Journal of Nuclear Engineering, 5(3), 299-317. DOI: 10.3390/jne5030020

[21] Nükleer Enerji Raporu, 2011. TMMOB FİZİK MÜHENDİSLERİ ODASI, Ankara, (Son Erişim Linki: 07.12.2024)

chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.fmo.org.tr/wp-content/uploads/2015/02/FMO_Nuk_Enr_Rap_2011_aralik_son.doc1_.pdf

[22] TENMAK, Nükleer Enerjinin Temel Prensipleri, (Son Erişim Linki: 07.12.2024)

<https://www.tenmak.gov.tr/2016-06-09-00-43-55/135-gunumuzde-nukleer-enerji-rapor/838-bolum-02-nukleer-enerjinin-temel-prensipleri.html>

[23] Khan, B., et al., 2024. Various Types Of Nuclear Reactor Analysis, Thesis, DOI: 10.13140/RG.2.2.23714.03529

[24] Murakami, T., 2021. A Historical Review and Analysis on The Selection of Nuclear Reactor Types and Implications to Development Programs for Advanced Reactors; A Japanese study, Energy Reports, 7(11), 3428-3436. DOI: 10.1016/j.egy.2021.05.049

[25] Kornecki, K., Wise, C.F., 2024. The Role of Advanced Nuclear Reactors and Fuel Cycles in A Future Energy System, PNAS Nexus, 3(2), 1-12. DOI: 10.1093/pnasnexus/pgae030

[26] Frepoli, C., et al., 2023. A Demonstration of the Risk-Informed NEI 18-04 Design Evaluation Model for the Modular High Temperature Gas Reactor, 20th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-20), Washington, D.C., DOI: 10.13182/NURETH20-40251

[27] Cheng, J., Liu, J., Chen, S., Li, Y., Wang, J., Wang, F., 2022. A New Method for Safety Classification of Structures, Systems and Components By Reflecting Nuclear Reactor Operating History Into Importance Measures, Nuclear Engineering and Technology, 54(4), 1336-1342. DOI: [10.1016/j.net.2021.09.039](https://doi.org/10.1016/j.net.2021.09.039)

[28] Gebremichael, D.D., Jung, Y., 2020. Structuring Facility Classification for a Nuclear Power Plant's (NPP's) Life-cycle Management, The 26th Winter Conference of Society for Computational Design and Engineering, JEJU, Conference Paper, South Korea, 1-5.

[29] Evolution of nuclear power. (Son Erişim Tarihi: 07.12.2024)

<http://www.gen-4.org/Technology/evolution.htm> 12/18/12

[30] Nükleer Reaktör Nedir?, (Son Erişim Tarihi: 07.12.2024)

<https://www.encyzip.com/bilgi/enerji/nukleer-reaktor-nedir>

[31] Tüysüz, H., 2006. Nükleer Reaktör Malzemelerinin Araştırılması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ve Fizik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 66 s.

[32] Stosic, Z.V., et al. 2008. Boiling Water Reactor With Innovative Safety Concept: The Generation III+ SWR-1000, Nuclear Engineering and Design, 238(8), 1863-1901. Doi: 10.1016/j.nucengdes.2007.12.014

[33] Nükleer güç reaktörlerinin tanımı (Son Erişim Tarihi: 07.12.2024)

<https://world-nuclear.org/information-library/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Power-Reactors/Nuclear-Power-Reactors>

[34] Reza, S., 2022. Pressurized Water Reactor (PWR) Nuclear Engineering report Pressurized Water Reactor (PWR), American International university, Thesis, bangladesh, DOI: 10.13140/RG.2.2.34700.18562

[35] Yixin, S., 2023. Discussion on The Development of Nuclear Energy and Nuclear Power Plants, Theoretical and Natural Science, 13(1), 181-186. DOI: 10.54254/2753-8818/13/20240839

173

[36] Vogt, D.K., 2024. Nuclear Fission Reactors: Boiling Water and Pressurized Water Reactors, Encyclopedia of Energy, 4(1), 333-340.

[37] Öngü, S., 2014. Nükleer Reaktörler, Yakıt Tipleri ve Mersin Akkuyu Nükleer Santrali, Niğde Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Fizik Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 100 s.

[38] Sayyaadi, H., Sabzaligol, T., 2009. Various approaches in optimization of a typical pressurized water reactor power plant, Applied Energy 86 (2009), 1301–1310. Doi: 10.1016/j.apenergy.2008.10.011

[39] Ayanoglu, M., 2013. Süper Kritik Su Reaktörlerinde Alumina Oluşturan Östenitik Çelik Yakıt Zarf Malzemesinin Radyasyon Hasar Parametrelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 74 s.

[40] Emanet, H., 1998. Bir Basıncılı Su Reaktöründe Kaza Sırasında Reaktör Kabında Oluşan Kalp Enkazının Soğumasının Sayısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik

Üniversitesi, İstanbul, 82 s.

[41] PWR ve BWR reaktörlerinin Karşılaştırılması, (Son Erişim Linki: 07.12.2024)

<https://world-nuclear.org/information-library/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Power-Reactors/Nuclear-Power-Reactors>

[42] Lindgren, K., Efsing, P., Thuvander, M., 2023. Elemental Distribution in A Decommissioned High Ni and Mn Reactor Pressure Vessel Weld Metal From a Boiling Water Reactor, Nuclear Materials and Energy, 36 (101466), 1-15.

[43] Murtaza, U.T., Javed Hyder, M., 2015. Design by Analysis Versus Design by Formula of a PWR Reactor Pressure Vessel, Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists 2015 Vol II,IMECS 2015, March 18 - 20, 2015, Hong Kong.

https://www.researchgate.net/profile/M-Hyder/publication/282376109_Design_by_Analysis_versus_Design_by_Formula_of_a_PWR_Reactor_Pressure_Vessel/links/57cfcc9d08ae582e0693e170/Design-by-Analysis-versus-Design-by-Formula-of-a-PWR-Reactor-Pressure-Vessel.pdf

[44] Prof. Dr. Meral Eral, Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Nükleer Teknoloji Anabilim Dalı 12/1/2015. (Son Erişim Linki: 07.12.2024)

chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.kmo.org.tr/resimler/ekler/1423037b0f99b51_ek.pdf

[45] Öngü, S., 2014. Nükleer Reaktörler, Yakıt tipleri ve Mersin Akkuyu Nükleer Santrali, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, Niğde, 100 s.

[46] Doç. Dr. Şule Ergün, Nükleer enerji ve nükleer santraller, Nükleer Mühendisler Derneği;

chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://enerji.mmo.org.tr/wp-content/uploads/2019/02/Do%C3%A7.-Dr.-%C5%9Eule-Erg%C3%BCnHacettepe-%C3%9Cniv.-Enerji-M%C3%BCh.BI_-

%C3%96%C4%9Frt.%C3%9CyesiN%C3%BCKleer-M%C3%BChendisler-Derne%C4%9Fi-Y.K.%C3%9CyesiN%C3%BCKleer-Enerji-ve-N%C3%BCKleer-Santrallar.pdf

[47] Kahraman, Z., Yürüten Özdemir, K., 2022. Nükleer Enerjinin Riskleri ve Nükleer Santrallerde İş Sağlığı ve Güvenliği, Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi, 6(1), 53-65.