

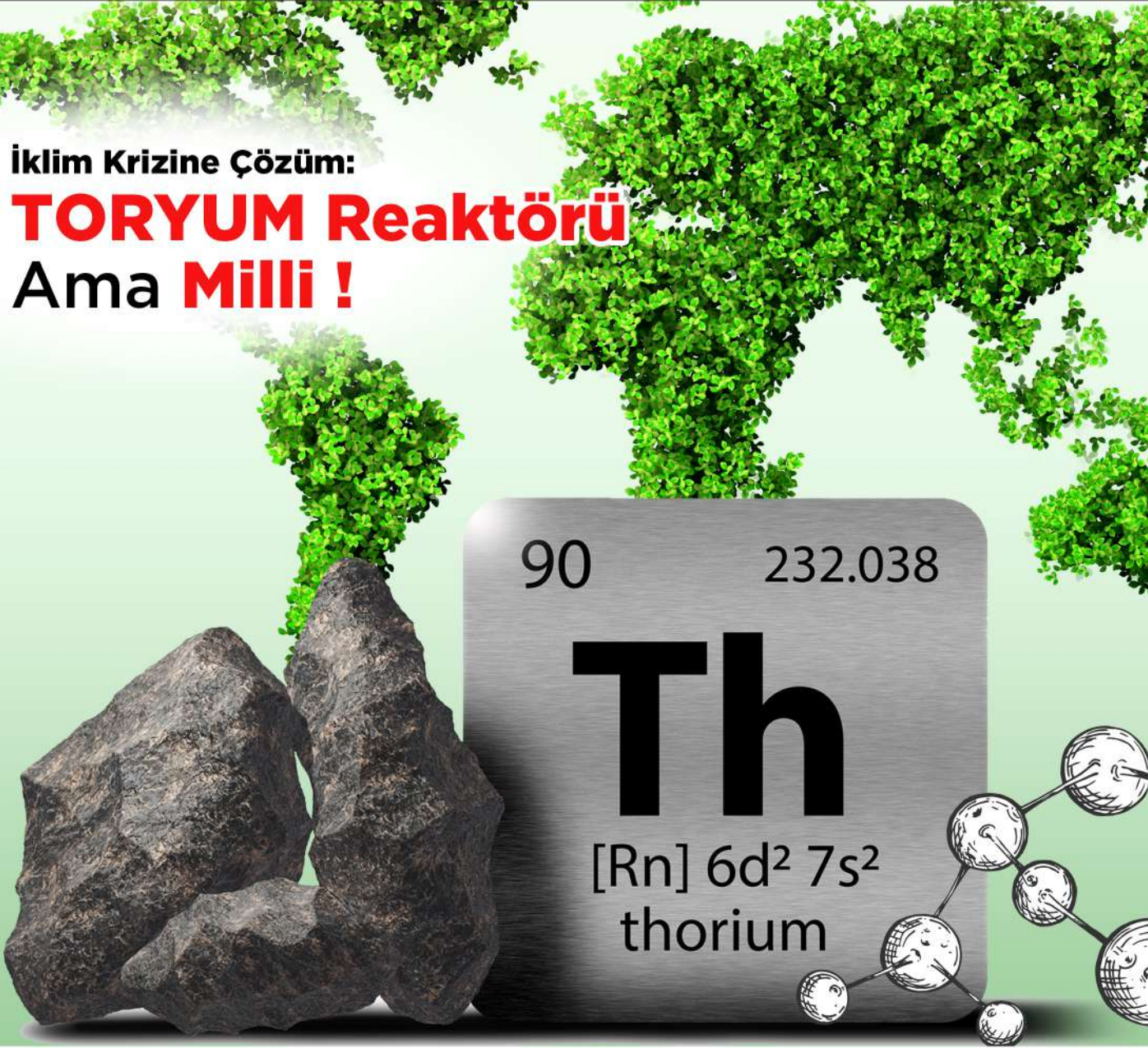
ARGE DERGİSİ

İLERİ MÜHENDİSLİK VE ARGE TEKNOLOJİLERİ DERGİSİ

2024 / Sayı: 35

İklim Krizine Çözüm:

TORYUM Reaktörü **Ama Milli !**

**<04**ERGİMİŞ TUZ
REAKTÖRLERİNDE
NÖTRONİK
HESAPLAMALAR**<12**ERGİMİŞ TUZ
REAKTÖRLERİNDE
YAPISAL MALZEMELER:
RADYASYON VE
KOROZYON**<18**ERGİMİŞ TUZ
REAKTÖRLERİNDE
TORYUM KULLANIMI**<40**NİATR YÖNETİM
KURULU BAŞKANI
SAYIN ALİKAAN ÇİFTÇİ
İLE ÖZEL RÖPORTAJ**<46**ANKARA SANAYİ
ODASI NÜKSAK
KÜMELENMESİ İLE
ÖZEL RÖPORTAJ



2024

*Mutlu
Yollar!*



FIGES
applied physics & mathematics



Kıymetli ARGE DERGİSİ Okurları,

İklim konferansları ve tartışmaları dünyanın ve ülkemizin gündeminden hiç düşmüyor. Hedef, sanayi kuruluşları tarafından havaya salınan karbondioksit gazının 2030 yılına kadar %45 oranında azaltılması ve 2050 yılına kadar da sıfırlanmasıdır, yani “net sıfır karbon”dur. Tarih-sel öneminden dolayı Türkiye bu hedefi 2053 olarak ifade etmektedir.

Konunun tarihçesine kısa bir göz atalım:

1992 yılında Rio de Janeiro’da 154 ülke tarafından imzalanan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ile başlayan iklim konferansları 1997 yılında Kyoto Protokolü ile devam etmiş ve 2015 yılında Paris İklim Anlaşması’nın imzalanması ile önemli bir aşamaya ulaşmıştır. Bu sözleşmenin 2016 yılında Türkiye Cumhuriyeti tarafından da imzalanmasıyla ülkemiz Paris İklim Anlaşmasını imzalayan 196 ülkeden biri olmuştur.

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı’nın ilk Taraflar Toplantısı COP1 (Conference Of Parties) 1995 yılında Berlin’de ve sonuncusu olan COP28 ise 30 Kasım-12 Aralık 2023 tarihleri arasında Dubai’de gerçekleştirilmiştir. 29uncu Taraflar Toplantısı olan COP29 ise gelecek yıl Azerbaycan’da düzenlenecektir.

COP28 sonuç bildirgesinde, 2050 yılına kadar net sıfır karbon hedefine ulaşabilmek için dünya nükleer enerji kapasitesinin 2050 yılına kadar 3 katına çıkarılması amaçlandığı beyan edilmiştir. Bu beyanat ile nükleer enerji olmadan iklim değişikliğini durdurmanın mümkün olamayacağı kabul edilmiştir. Nükleer teknolojilerdeki yeni gelişmeler de bu eğilimi güçlü bir şekilde desteklemektedir.

2011 yılında meydana gelen Fukushima nükleer santral kazası da dahil olmak üzere nükleer enerji tarihinde üç önemli kaza meydana gelmiştir. Dünya kamuoyunu derinden etkileyen bu kazalar, nükleer santrallerin tasarımında güvenlik önlemlerinin büyük ölçüde artırılmasına ve bunun sonucunda nükleer santral yatırım maliyetlerinin önemli bir oranda artmasına neden olmuştur.

1960’lı yılların başlarında Oak Ridge National Laboratory (ORNL)’de Alvin Weinberg tarafından “Molten Salt Reactor Experiment” adında bir proje başlatılmış ve bu reaktörün yapımı tamamlanarak 1965-68 yılları arasında başarıyla çalıştırılmıştır. İlk kez uygulanan Ergimiş Tuz Reaktörlerinin (ETR) konvansiyonel reaktörlerden farkı, yakıtın 650-700 derecelerde sıvı fazda bir tuz karışımı olması ve bu nedenle reaktör kuru içindeki ısı iletiminin su yerine sıvı fazda olan nükleer yakıt ile gerçekleştirilmesidir. Su soğutmalı reaktörlerin korunda olan 150 bar mertebesindeki basınç ETR’lerde su bulunmaması nedeniyle 1-2 bar mertebesinde-dir.

1970’li yıllarda ABD’de politik sebeplerden dolayı ETR projesi rafa kaldırılmıştır. 2000’li yılların başında nükleer reaktör teknolojisine sahip ülkeler mevcut III. Nesil reaktörlerin maliyet ve kurulum sürelerinin yüksek olmasından dolayı daha düşük maliyetle elektrik üreten, daha fazla pasif güvenlik sistemleri bulunan, nükleer silâh yapımına dirençli yeni reaktör teknolojileri arayışına girmiş ve sonuçta 6 nükleer reaktör tipi “IV. Nesil Reaktörler” olarak dünyaya ilân edilmiştir. Bu 6 reaktörden biri de Ergimiş Tuz Reaktörü olmuştur. 1960’ların teknolojisi tekrar raftan indirilmiş ve bu sefer sadece ABD’de değil, tüm dünyada geliştirilmesine devam edilmiştir.

ETR’lerde; reaktör içi basıncın yaklaşık normal hava basıncı seviyesinde olması, sıvı yakıt nedeniyle kor ergimesi diye bir kaza riskinin olmaması ve toryum kullanabiliyor olması bu reaktörleri günümüzde çevre dostu, güvenli ve maliyet etkin nükleer reaktörler olarak ön plana çıkarmaktadır.

Günümüzde bu alanda faaliyet gösteren, ABD ve Kanada’da; Terrestrial Energy, Exodys Energy, FLiBe Energy, Kairos Power, ThorCon ve TerraPower, Çin’de Sinap, Fransa’da; Aristos Power, Naarea ve Stellaria, Hollanda’da Thorizon, İngiltere’de Moltex ve CorePower, Danimarka’da Seaborg ve Copenhagen Atomics, Japonya’da Thorium Tech Solution ve Türkiye’de 2016 yılından beri bir FİGES kuruluşu olan ThorAtom şirketleri sayılabilir.

Türkiye’de 1 milyon tona yakın toryum cevher rezervinin varlığı ETR’lerin Türkiye’de geliştirilmesi ve kullanılmasını çok cazip hâle getirmektedir. ThorAtom AŞ, 2024 yılı sonunda ön prototip deneme çalışmalarına başlamayı ve 2030’da ise Nükleer Düzenleme Kurumu tarafından onaylanmış tam fonksiyonel prototipi devreye almayı hedeflemektedir.

İyi Okumalar ve Sağlıklı ve Mutlu Yeni bir Yıl diliyorum.

Dr. Tarık ÖĞÜT

İLERİ MÜHENDİSLİK VE ARGE TEKNOJİLERİ DERGİSİ

2024 / Sayı: 35

ISSN: 2147-9550

FİGES A.Ş. Adına Sahibi

Yönetim Kurulu Başkanı
Dr. Tarık ÖĞÜT

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Esra SEVİNÇ
esra.durmus@figes.com.tr

Yayına Hazırlayanlar

Esra SEVİNÇ

Yönetim Yeri:

İhsaniye Mah. İzmir Yolu Cad.
Efe Plaza No:116/12
16130 Nilüfer / BURSA
Telefon : 224 4428585
Faks : 224 4428586

www.figes.com.tr

TEKNİK HİZMETLER

Yayına Hazırlama ve Tasarım
FİGES A.Ş. Esra SEVİNÇ

Basım Yeri:

Everest Basım Matbaa Hiz. San.Tic.Ltd.Şti.
Sancaktepe Mah. 914. Sk.No:2/1 34200
Bağcılar / İSTANBUL
Tel :+90 212 434 51 34

Yayın Türü:

Yerel süreli Türkçe ve İngilizce Bilimsel Yayın

3 ayda bir yayımlanır

Dergide yayımlanan Yazı, Fotoğraf, Harita, İllüstrasyon ve Konuların Her Hakkı Saklıdır. Kaynak Gösterilmek Şartıyla Alıntı Yapılabilir. Yayımlanan Eserlerin Sorumluluğu Eser Sahiplerine Aittir.

Aksi Gösterilmedikçe Tüm Görseller:
ANSYS, MATHWORKS ve FİGES

Para ile satılmaz



İÇİNDEKİLER

- 04** | ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİNDE NÖTRONİK HESAPLAMALAR
- 12** | ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİNDE YAPISAL MALZEMELER: RADYASYON VE KOROZYON
- 18** | ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİNDE TORYUM KULLANIMI
- 24** | ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİ
- 30** | ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİNİN GÜVENLİĞİ VE GÜVENLİK ANALİZLERİ
- 37** | ORTA VADELİ PROGRAM'DA TÜRKİYE ENERJİ HEDEFLERİ AÇIKLANDI
- 40** | NIATR YÖNETİM KURULU BAŞKANI SAYIN ALİKAAN ÇİFTÇİ İLE ÖZEL RÖPORTAJ
- 46** | ANKARA SANAYİ ODASI NÜKSAK KÜMELENMESİ İLE ÖZEL RÖPORTAJ





ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİNDE NÖTRONİK HESAPLAMALAR



Dr. Öğr. Üyesi Ali TİFTİKÇİ

atiftikci@sinop.edu.tr

Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

Sinop Üniversitesi

ÖZET

IV.

Nesil reaktörlerden biri olan Ergimiş Tuz Reaktörleri (ETR) çeşitli avantajlarından dolayı birçok ülke tarafından gelecek vaat eden bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. ETR'ler aynı zamanda geleneksel su soğutmalı reaktörlere göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilir, bu da daha yüksek verimlilik ve üretilen ısıyı endüstriyel süreçler veya hidrojen üretimi için kullanma olasılığı anlamına gelmektedir. Ayrıca, bu reaktörlerin düşük basınçta çalışabilme özellikleri bir kaza sonucu büyük bir kırılma ve soğutucu kaybı riskini azaltarak reaktörün güvenliğini artırabilir. ETR'lerin önemli avantajlarından biri de içsel güvenlik özellikleridir. Sıvı yakıt, sıcaklık artışı durumunda genişterek fisyon reaksiyonlarını olasılığını otomatik olarak azaltır. Ayrıca, ETR'lerin toryum gibi daha bol bulunan yakıtları kullanma potansiyeli, nükleer enerjinin uzun vadeli sürdürülebilirliğine katkı sağlayabilir. Günümüzde birçok ülke farklı ETR konsept tasarımları geliştirmeye yönelik çalışmaktadır. Mevcut araştırma ve geliştirme çabaları, malzemeye ilgili sorunların çözülmesine, güvenlik özelliklerinin değerlendirilmesine, temel tasarım yöntemlerinin ve araçlarının geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu bağlamda, reaktör içerisinde hem yakıt hem soğutucu olarak görev yapan yakıt tuzları için nötronik hesaplamaların doğruluk düzeyinin artırılmasına yönelik yeni yöntemler ve araçlar geliştirilmeye devam edilmektedir. Özellikle son yıllarda nötronik ve ısıl-hidrolik hesaplamaları bir arada yapabilen kodların sayısının artması yakıt tuzunun reaktör içerisindeki sirkülasyonundan kaynaklı ısıl-hidrolik ve nötronik etkileri daha iyi modelleme yönündeki çabaların göstergesidir.

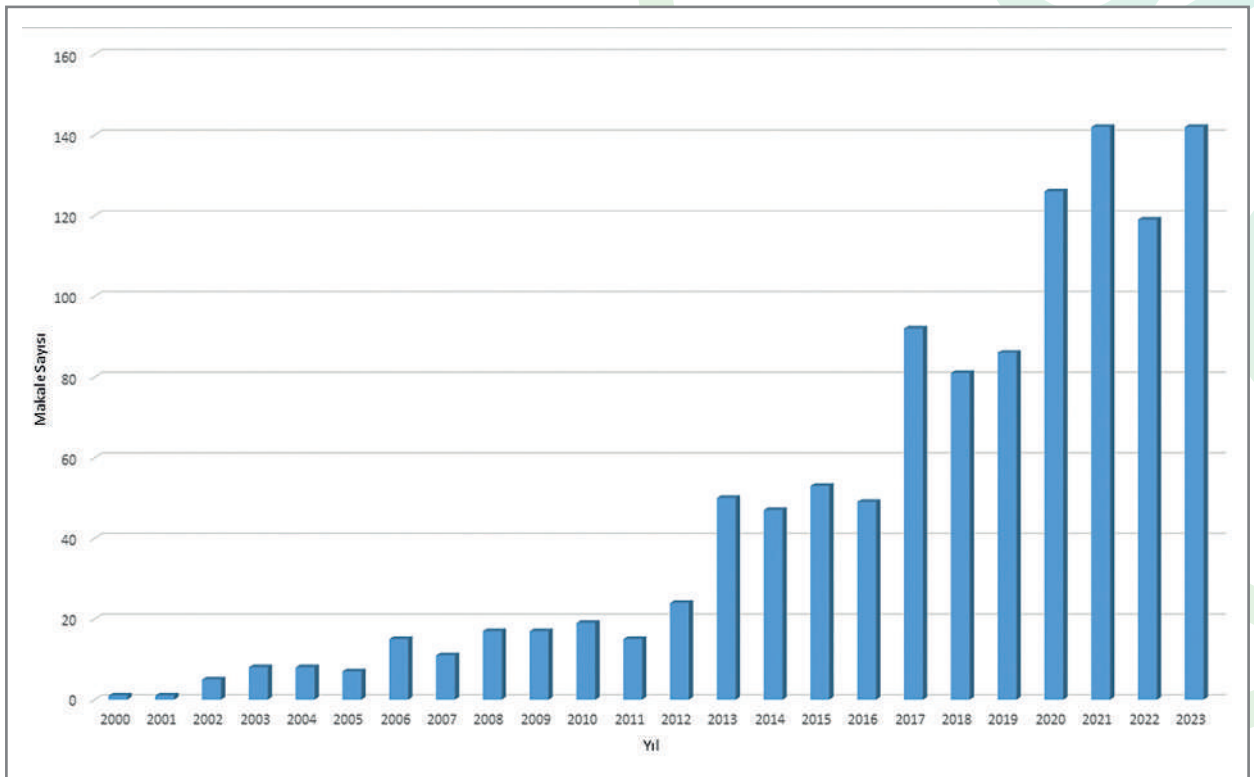
1. Giriş

Ergimiş Tuz Reaktörleri (ETR), 2002 yılında GIF (Generation IV International Forum) tarafından belirlenen altı IV. Nesil konsept reaktör tasarımından biridir [1]. Teorik olarak, GIF tarafından belirlenen dört ana hedefe (sürdürülebilirlik, ekonomi, güvenlik ve güvenilirlik, yayılma direnci ve fiziksel koruma) en iyi uyum sağlayan reaktörlerden biri olarak gösterilebilir. Pasif güvenlik sistemleri, yakıt verimi, yüksek sıcaklık ve düşük basınçta çalışabilme yeteneği, çevrimiçi yakıt işleme ve düşük hacimli atık üretebilmesi ile nükleer teknolojiye sahip ülkelerin ve bilim adamlarının ilgisini çekmektedir.

ETR'lerin geleneksel katı yakıtlı reaktörlerden en önemli farkı sıvı yakıt formuna sahip olması ve ergimiş yakıt tuzunun reaktör kuru içerisinde ve dışında hareket ediyor olmasıdır. Bu nedenle, ETR tasarımlarının büyük bir çoğunluğunda yakıt tuzu aynı zamanda soğutucu olarak da görev

yapmaktadır. Bu özellik ETR'lere teorik olarak birçok konuda üstünlük sağlasa da uygulama sürecinde zorluklar ve belirsizlikler mevcuttur. Bu belirsizliklerin başında yakıt tuzlarının termofiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için deneysel araştırma sürecinin henüz tamamlanmamış olması yer almaktadır. Aynı zamanda ETR'lerde kullanılacak malzemelerin nötron ışınlama ortamında dayanırlık testlerinin (erozyon, korozyon, radyasyon hasarı vb.) yapılması çalışmaları da devam etmektedir. Ek olarak trityum yönetimi, redoks kontrol teknolojileri, nötronik ve ısı-hidrolik model ve araçların geliştirilmesi konuları ETR'ler özelinde güncel araştırma konularıdır.

Fransa, Rusya, ABD, Çin, Kanada, Japonya, G. Kore, Çek Cumhuriyeti, Avustralya, Hindistan ve İsviçre, Danimarka, Hollanda ve İngiltere ETR teknolojisinin gelişimi için araştırma ve geliştirme çalışmaları yapan ülkelerin başında gelmektedir. Bunun yanı sıra dünyanın birçok ülkesinde ETR teknolojisinin gelişimi için akademik çalışmalar yapılmaktadır. Bu araştırma çalışmalarının büyük bir çoğunluğu ise ETR'lerin nötronik hesaplamaları üzerinedir. Şekil 1'de 2000 yılından bu yana ETR nötronik hesaplamaları ile ilgili yıllara göre SCI endeksli araştırma makalelerinin sayıları verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, özellikle 2013 yılından sonra makale sayılarında hızlı bir artış olmuştur. Akademik çalışmaların yoğunluğu bizlere ETR'lere olan ilginin artması ve nötronik hesaplamalar ile ilgili yapılabilecek eklentinin fazlalığını göstermektedir.



▲ Şekil 1. ETR nötronik ile ilgili yıllara göre SCI makale sayısı

ETR'ler termal (yavaşlatıcı ortam içerisinde nötronların termal enerjilere $-0,0253$ eV yavaşladığı) ve hızlı (yavaşlatıcı ortama gerek duymayan) nötron spektrumları için tasarlanmıştır. 1965 yılında Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı denenen ilk ETR grafit yavaşlatıcılı termal bir reaktördü. İlerleyen yıllarda araştırmalar EVOL (Evaluation and Viability of Liquid Fuel Fast Reactor System) Proje tasarımı gibi hızlı ETR'ler üzerine yoğunlaşılsa da günümüzde termal ETR tasarımları için araştırma çalışmaları varlığını sürdürmektedir. FUJI-U3 (Japonya), ThorCon (ABD), Seaborg (Danimarka) gibi reaktör tasarımları termal ETR'lere örnektir. Ayrıca, ergimiş tuzun sadece soğutucu olarak kullanıldığı (Kairos Power-ABD) ya da sadece yakıt olarak kullanıldığı DFR-Almanya ETR tasarımları da mevcuttur. ETR'ler elektrik ihtiyacını karşılayacak büyük güç santrallerinden deniz araçlarına itki gücü sağlayacak mikro reaktör-lere kadar geniş güç aralığı bandında tasarlanabilmektedir. ETR tasarımlarındaki bu çeşitlilik nötronik hesaplamalar için yapılan araştırma çalışmalarının artmasını sağlayan etkenlerden biridir.

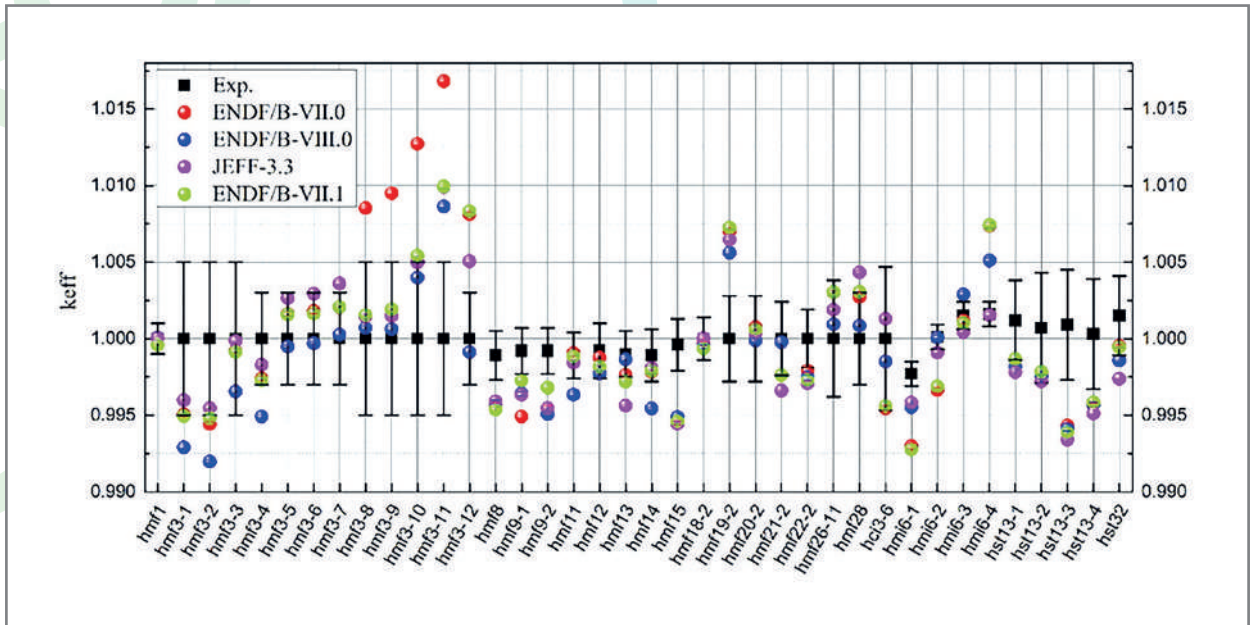
2. ETR'LERDE NÖTRONİK HESAPLAMALAR

Nükleer fiziğin bir dalı olan nötronik, bir nükleer reaktördeki nötronların davranışları ve etkileşimleriyle ilgilenir. ETR'ler özelinde nötronik hesaplamalar, nötronların reaktör koru içerisinde ve dışında taşınımalarının modellenmesi ve analiz edilmesini içerir. Nötronlar, bir fisyon zincir reaksiyonunun sürdürülmesi için gereklidir ve bunların özellikleri, reaktörün genel performansı açısından kritik öneme sahiptir.

ETR'lerde yakıt tuzunun sürekli ya da belli aralıklarla yeniden işlenmesi ve reaktör koru dışında da sistemde dolaşması gibi nedenlerle bu reaktörlerin nötronik hesaplamalarında izlenen yol geleneksel katı yakıtlı reaktörlere göre farklılık göstermektedir. Yanma süreci boyunca fisyon ürünü gazlar yakıt içerisinde alınmaktadır. Ayrıca, reaktör kontrolü açısından çok önemli olan gecikmiş nötron öncüleri (delayed neutron precursors) yakıt ile birlikte hareket etmektedir. Dolayısıyla, bu öncüler kısa yarı ömürlü olanları yakıt tuzu reaktör koru dışında dolaşırken bozunabilir ve reaktör kontrolü için gerekli katkıyı sağlayamayabilir. Bu durumda, gecikmiş nötronların reaktör kontrolüne etkisi azalır ve reaktör katı yakıtlı reaktörlere kıyasla ani (prompt) kritik duruma daha yakın hale gelir efektif gecikmiş nötron fraksiyonu (β_{eff}) değeri azalır. Bu nedenle, yakıt tuzunun sirkülasyonu sırasında reaktör koru içinde ve dışında harcadığı zaman, yeniden işleme süresi, fisyon ürünleri ve transuraniklerin reaktiviteye katkısı

gibi birçok parametrik incelemenin nötronik ve ısı-hidrolik hesaplamalarla yapılması gerekmektedir.

Nükleer reaktör içerisinde nötron etkileşimlerini modelleyebilmek için nötronların etkileşim olasılıklarını belirleyen tesir kesiti (cross section) adını verdiğimiz veriye ihtiyaç duyulur. Tesir kesitleri (makroskobik) etkileşim yapılacak malzemenin kompozisyonuna, yoğunluğuna ve gelen nötronun enerjisine bağlı olarak değişmektedir. Bu veriler, uzun yıllardan bu yana yapılan deneysel çalışmalarla belirlenmiş ve her bir izotop için belli enerjide tesir kesiti değeri sağlayan veri kütüphaneleri oluşturulmuştur. ENDF (Evaluated Nuclear Data File) [2], JEFF (Joint Evaluated Fission and Fusion File) [3], JENDL (Japanese Evaluated Nuclear Data Library) [4] en çok kullanılan tesir kesiti kütüphaneleridir. Kütüphanelerdeki tesir kesiti verileri yeni deneysel çalışmalar yapıldıkça güncellenir. Şekil 2, U-233 yakıtlı bir sistem için yapılan çok sayıda kıyaslama testleri için farklı kütüphaneler kullanılarak elde edilen çoğalma faktörü $keff$ değerlerini karşılaştırmaktadır [5]. Görüldüğü gibi, elde edilen değerler genel olarak bir hata kabulü içerisinde yer alsa da sapmaların olduğu kıyas durumları da mevcuttur. Dolayısıyla, nötronik hesaplamalar yapılırken tesir kesiti verilerinin alındığı kütüphanenin güncel olması ve farklı kütüphanelerle sonuçların karşılaştırılması önemlidir.



▲ Şekil 2. ²³³U yakıtlı sistem için $keff$ özdeğeri kıyaslamaları [5]

ETR ve diğer nükleer reaktör türlerinde nötron taşınımı hesaplamaları için kullanılan yöntemler deterministik ve stokastik (olasılıksal) yöntemler olarak ikiye ayrılır. Deterministik yöntemlerde nötron taşınım denklemleri ya da belirli kabullerle bu denklemin basitleştirilmiş hali olan nötron difüzyon denklemleri kullanılır. Reaktör içerisinde nötronlar fisyon olayı gerçekleştiği an ve bu olaydan belli bir süre sonra fisyon ürünlerinin çekirdeklerinden nötron yayımlayarak bozunması sonucu olmak üzere iki farklı şekilde doğarlar. Fisyon sonucu oluşan nötronlara ani (prompt) nötron ve fisyon ürünlerinin bozunması sonucu oluşan nötronlara ise gecikmiş (delayed) nötronlar denir. Bunların her ikisi de fisyon zincir reaksiyonunun sürdürülebilmesi ve kontrolü açısından çok önemlidir. Dolayısıyla, nötronik hesaplamalar yapılırken her ikisi de dikkate alınır. Denklemler 1 ve 2'de zamana bağlı, çok gruplu nötron ve nötron öncülü fisyon ürünleri için genel denklemler verilmiştir. Burada, grup belirli enerji aralıkları için nötron enerjilerini belirtmektedir. Denklem 2'deki son terim U hızında hareket eden nötron öncülleri için konveksiyon terimidir. Geleneksel katı yakıtlı reaktörlerde bu terim ihmal edilebilir çünkü katı yakıt içinde fisyon ürünleri neredeyse doğdukları yerde enerjilerini bırakıp dururlar. Fakat, ETRlerde yakıt tuzu sistem içinde hareket ettiğinden nötronik hesaplamalara bu terim dahil edilmelidir.

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = & S_g + \chi_{p,g}(1 - \beta) \sum_{g'=1}^G (v\Sigma)_{f,g'}(r) \phi_{g'}(r, t) \\ & + \sum_{j=1}^J \chi_{d,j,g} \lambda_j C_j(r, t) + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{g' \rightarrow g}(r) \phi_{g'}(r, t) \\ & - \Sigma_{t,g}(r) \phi_g(r, t) + \nabla \cdot D_g(r) \nabla \phi_g(r, t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_j(r, t)}{\partial t} = \beta_j \sum_{g'=1}^G (v\Sigma)_{f,g'}(r) \phi_{g'}(r, t) - \lambda_j C_j(r, t) - \nabla \cdot [U C_j(r, t)] \quad (2)$$

Nötron etkileşimlerinin doğasında bulunan rastgeleliği içerisinde barındırdığından Monte Carlo tekniği nötronik hesaplamalarda en çok kullanılan ve doğruluk derecesi yüksek olan olasılıksal bir yöntemdir. Monte Carlo yönteminde nötronların doğup sistem içerisinde etkileşimler sonucu ya da sistemden kaçarak yok olduğu ana kadar olasılıksal tekniklerle etkileşimler modellenir. Yüksek doğruluk derecesine ulaşmak için yeterli sayıda nötron grubunun örneklenmesi gerekir, bu da hesaplama zamanını uzatan ve bilgisayar gereksinimini artıran bir faktördür. MCNP, Serpent, OpenMC ve TRIPOLI gibi kodlar nötronik hesaplamaları Monte Carlo yöntemi kullanarak gerçekleştirirler [6-9]. ETR tasarımları incelenirken Monte Carlo tekniği içeren kodlar analiz amaçlı kullanılmıştır ancak bu çalışmaların çoğunda yakıt tuzunun durgun olduğu varsayılmıştır, çünkü bu kodlar yakıtın durağan olması durumunda geçerlidir. Bu kodların ETR'ler için yüksek hassasiyette çözüm verebilmesi için hesaplama algoritmalarına uygun bazı modüller (subroutine) eklenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde belli bir sapma ile sonuç elde edileceği bilinmelidir. Her bir zaman aralığı için Monte Carlo hesaplamalarını yeterli örnekleme seviyesinde gerçekleştirmek günümüz bilgisayar teknolojisi ile neredeyse imkansızdır. Bu nedenle, Monte Carlo yöntemi son yıllarda başlangıç sürecinde tesir kesiti üretmek amaçlı kullanılıp ETR sistemleri genellikle deterministik yöntemlerle modellenmeye çalışılmıştır.

3. ETR'LER İÇİN YAPILAN NÖTRONİK ÇALIŞMALAR

Daha önce bahsettiğimiz gibi son yıllarda ETR'lerin nötronik hesaplamaları ile ilgili akademik çalışmaların sayısı hızla artmıştır. Hesaplamalar için yeni yöntemlerin geliştirilmesi, çoklu fizik çalışmalarının yapılır düzeye gelmesi ve farklı ETR tasarımlarının araştırılması konuları bu dönemde yapılan çalışmaların büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Hızlı nötron spektrumuna sahip ETR tasarımlarında önerilen florür tuzlarının bazı dezavantajları göz önüne alınarak son zamanlarda klorür tuzları ile oluşturulan yakıt formlarının karşılaştırmalı nötronik analizleri de yapılmaktadır. Nasr ve ark. [10] tarafından yapılan kapsamlı çalışmada klorür tuzu kullanıldığında yakıt tuzu içerisinde nötron yavaşlatıcı özelliğe sahip hafif elementler

olmadığı için nötron spektrumunun daha hızlı olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmaya göre, klorür tuzunun geçirgen yapısı da göz önüne alındığında sistemden nötron kaçacağı olma ihtimali yükselmektedir. Bu nedenle, klorür tuzu kullanıldığında nötron kaçaklarını azaltmak için iyi bir reflektör (nötron yansıtıcı) malzemesi kullanılması ve aynı zamanda reaktör boyutunun artırılması gerekecektir. Florür tuzlu yakıtlara kıyasla klorür tuzlu yakıtta fisyon olasılığı düşük olduğu için klorürlü reaktörlerde akı daha yüksek olmaktadır. Klorürlü yakıtların bir diğer dezavantajı da, yine aynı sebebe bağlı olarak, fisil içerik gereksiniminin daha yüksek olmasıdır. Ayrıca, klorür tuzlarının korozyon yapısı ve yaklaşık 300 yıl yarı ömre sahip Cl-36 izotop oluşumu da klorür tuzlu sistemin dezavantajları arasında sayılabilir. Sonuç olarak, belirli avantaj ve dezavantajları göz önüne alındığında, florür ve klorür yakıt tuzları ETR tasarımları için birbiriyle yarışır durumdadır.

Nötron hesaplamalarında kullanılan kod, yöntem ve tesir kesiti verilerinin hesaplama doğruluk düzeyi için ne kadar önemli olduğundan bahsetmiştik. Clarno ve ark. [11] tarafından yapılan bir çalışmada SCALE, Serpent ve MCNP kodları ve kullanmış oldukları tesir kesiti kütüphaneleri deneysel ETR'nin sağladığı sıfır güç kritiklik sınama verileri ile karşılaştırılmıştır. Spesifik deneysel ETR kıyaslaması için, MCNP'nin orijinal Serpent hesaplamalarıyla tutarlı (<50 pcm) bir çözüm sağladığı gösterilmiştir, ancak her ikisi de deneysel ETR başlangıç kritikliğini %3 oranında fazla hesaplamıştır. Farklı ENDF/B nükleer veri kütüphaneleri kullanarak SCALE ve Serpent kodları kullanılarak kıyaslamalar yapılmıştır. ENDF/B-VII.0'dan ENDF/B-VII.1'e geçişin kritiklik tahmini üzerinde çok az etkisi olduğunu gösterilmiştir (<40 pcm), ancak ENDF/B-VII.1'den ENDF/B-VIII.0'a değişiklik, reaktivite tahmininde önemli bir artışa (~268 pcm) neden olmuştur.

Ergimiş yakıt tuzunun ETR sisteminde hareket ediyor olması nedeniyle nötronik hesaplamaların (nötron öncüleri ile beraber) ısıl-hidrolik hesaplamalarla birlikte yapılması gerektiği bilinmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu da bu tema üzerine yoğunlaşmıştır. Park ve Munk [12] nötronik ve ısıl-hidrolik kuplaj için Moltres kodunu kullanmıştır. Moltres çok gruplu difüzyon denklemini nötron öncülerini de dahil ederek çözümlemektedir. Bu çalışmada MOOSE modülü ısı transfer ve akış denklemlerini çözümlemektedir. Tesir kesiti

ti verileri belirli sıcaklık için Serpent-2 kodu ile hesaplanmış, sıcaklık değişimlerinin referans sıcaklığa göre makroskobik tesir kesitlerini ve difüzyon katsayısını orantısal etkilediği varsayılarak güncellenmiştir. Fiorino ve ark. [13] çok gruplu nötron difüzyon denklemi çözücüsü GeN-Foam kodu ile ısıl-hidrolik çözücüsü olan OpenFOAM kodunu hızlı ETR'nin zamana bağlı davranışını modellemek ve analiz etmek için birleştirmişlerdir. Burada, tesir kesitleri Serpent-2 kodu ile sağlanmakta, sıcaklık değişimi ile tesir kesiti değişimi lineer interpolasyon yöntemiyle güncellenmektedir. Yu ve ark. [14] tarafından geliştirilen ThorNEMFM-ANN kodu, sabit hızlı nötron öncüleri ile beraber nötron difüzyon denklemlerini yakıt yanması (depletion) modülü ile birleştiren bir koddur. Burada, yakıt tuzu mikroskobik tesir kesitleri geliştirilen yapay zeka modülü ile üretilmektedir. Bu yöntemle elde edilen sonuçların üretken ETR ve hızlı ETR kıyaslama verileriyle uyum içinde olduğu gösterilmiştir.

Farklı bir çalışmada, Cui ve ark. [15] TMSR3D kodunu kullanarak nötronik ısıl-hidrolik kuplaj işlemini gerçekleştirmiştir. Burada, tesir kesitleri DRAGON5 kodu ile üretilmiş, ısıl-hidrolik hesaplamaları için tek boyutlu kütle, momentum ve enerji denklemleri çözülmüştür. Zhou ve ark. [16] geliştirdiği FAMOS kodu ise TMSR3D koduna benzer özelliklere sahip olup tesir kesiti verisi OpenMC kodu kullanılarak üretilmiştir. Zhang ve ark. [17] tarafından geliştirilen GPU tabanlı ThorMOC kodu ise nötron öncüleri ile beraber nötron transport denklemlerini ETR özelinde çözümlemektedir. ThorMOC kodu nötron transport denklemlerini çözebilme kabiliyeti ile difüzyon çözücü kullanan diğer kodlardan ayrılmaktadır. ThorMOC ile nötronların açısal bağımlılıkları da nötronik hesaplamalara dahil edilmiş ve bu nedenle ETR nötronik hesaplamalarının doğruluk seviyesi olduğu varsayılmıştır, çünkü bu kodlar yakıtın durağan olması durumunda geçerlidir. Bu kodların ETR'ler için yüksek hassasiyette çözüm verebilmesi için hesaplama algoritmalarına uygun bazı modüller (subroutine) eklenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde belli bir sapma ile sonuç elde edileceği bilinmelidir.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME:

ETR teknolojisinin geleceği için yeni hesaplama araçları ve tekniklerin geliştirilmesinin yanı sıra doğrulanmış deneysel verilerin sayısının da artması gerekmektedir. Bu şekilde, yapılan nötronik hesaplamalar üzerindeki belirsizlik ve varsayım oranı azalacak ve daha güvenilir sonuçlar elde edilebilecektir.

Nötronik hesaplamalar ile ilgili yapılan çalışmalara baktığımızda, ETR'nin doğasında bulunan nötronik ile ısıl-hidrolik kuplaj çalışmalarının sayısının arttığı ve çok sayıda kod ve yöntem geliştirildiği görülmektedir. Nötronik hesaplamalarda olasılıksal yöntemlerin kullanımı (Monte Carlo yöntemi) zamana bağlı Monte Carlo algoritmalarının geliştirilmesine bağlıdır. Bu sürecin zorluğu nedeniyle hali hazırda çoklu fizik modellemeleri, deterministik yöntemler olan nötron difüzyon ve taşınım denklemlerinin çözümü ile gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda, nötron taşınım denklemleri ile hesaplama yapan kodların geliştirilmesi ve ısıl-hidrolik ile kuplajı çoklu fizik hesaplamalarının doğruluk derecesini ve güvenilirliğini artıracakı düşünülmektedir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Generation IV International Forum, "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. OECD Nuclear Energy Agency" (2002), www.gen-4.org, Erişim tarihi: 06.11.2023
- [2] D. A. Brown vd. "ENDF/B-VIII.0: The 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project cross sections, new standards and thermal scattering data", Nucl. Data Sheets 148(2018)1-142.
- [3] A. J. M. Plompen vd. "The joint evaluated fission and fusion nuclear data library, JEFF-3.3", Eur. Phys. J. A 56 (2020)181.
- [4] O. Iwamoto vd. "Japanese evaluated nuclear data library version 5: JENDL-5", J. Nucl. Sci. Technol. 60(2023)1-60.
- [5] L. Zheng, S. Huang, K. Wang, "Criticality benchmarking of ENDF/B-0 and JEFF-3.3 neutron data libraries with RMC code", Nucl. Eng. Design 52 (2020) 1917-1925.
- [6] M. E. Rising, J. C. Armstrong, S. R. Bolding, F. B. Brown, J. S. Bull, T. P. Burke, A. R. Clark, D. A. Dixon, R. A. Forster III, J. F. Giron, T. S. Grieve, H. G. Hughes III, C. J. Josey, J. A. Kulesza, R. L. Martz, A. P. McCartney, G. W. McKinney, S. W. Mosher, E. J. Pearson, C. J. Solomon Jr., S. Swaminarayan, J. E. Sweezy, S. C. Wilson, A. J. Zukaitis. MCNP® Code Version 6.3.0 Release Notes. Los Alamos National Laboratory Tech. Rep. LA-UR-22-33103, Rev. 1. Los Alamos, NM, USA. January 2023.
- [7] J. Leppänen, M. Pusa, T. Viitanen, V. Valtavirta, T. Kaltiaisenaho, "The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013". Annals of Nuclear Energy, 82 (2015) 142-150.
- [8] P.K.Romano, N.E.Horelik, B.R.Herman, A.G.Nelson, B.Forget, and K.Smith, "OpenMC: A State-of-the-Art Monte Carlo Code for Research and Development", Annals of Nuclear Energy, 82 (2015), 9097
- [9] F.X Hugot, Y. K. Lee, "A new prototype display tool for the Monte Carlo particle transport code TRIPOLI-4", Progress in Nuclear Science and Technology (PNST), Vol. 2, (2011) 851-854
- [10] M. A. Nasr, A. Zolfaghari, R. Akbari, A. Cammi, S. Amirkhosravi, "Neutronic and fuel cycle performance analysis of fluoride and chloride fuels in Molten Salt Fast Reactor (MSFR)", Nucl. Eng. Design 413 (2023) 112506.
- [11] K. T. Clarno, J. E. Barlow, T. Sawyer, J. Scherr, J. Hearne, P. Tsvetkov, "Evaluation of SCALE, Serpent, and MCNP for Molten Salt Reactor applications using the MSRE Benchmark", Annals of Nuclear Energy 194 (2023) 110092.
- [12] S. M. Park, M. Munk, "Verification of moltrcs for multiphysics simulations of fast-spectrum molten salt reactors" Annals of Nuclear Energy 173 (2022) 109111
- [13] C. Fiorina, D. Lathouwers, M. Aufiero, A. Cammi, C. Guerrieri, J. L. Kloosterman, L. Luzzi, M. E. Ricotti, "Modelling and analysis of the MSFR transient behaviour", Annals of Nuclear Energy 64 (2014) 485-498.
- [14] K. Yu, M. Cheng, X. Zuo, Z. Dai, "Improvement of a deterministic fuel management code using artificial neural network for liquid-fueled molten salt reactor", Annals of Nuclear Energy 193 (2023) 110034.
- [15] Y. Cui, J.G. Chen, J.H. Wu, C.Y. Zou, L. Cui, F. He, X. Z. Cai, "Development and verification of a three-dimensional spatial dynamics code for molten salt reactors", Annals of Nuclear Energy 171 (2022) 109040.
- [16] S. Zhou, W. S. Yang, T. Park, H. Wu, "Fuel cycle analysis of molten salt reactors based on coupled neutronics and thermal-hydraulics calculations", Annals of Nuclear Energy 114 (2018) 369-383.
- [17] A. Zhang, M. Dai, M. Cheng, C. Zou, J. Chen, "High-fidelity neutronics simulation of channel-type molten salt reactors", Nuclear Engineering and Design 401 (2023) 112063.

MILMAST

YÜKSELTEN TEKNOLOJİ



www.milmast.com





ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİNDE YAPISAL MALZEMELER: RADYASYON VE KOROZYON



Araş. Gör. Osman BİLEN

osmanbilen06@gmail.com

Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

Hacettepe Üniversitesi

ÖZET

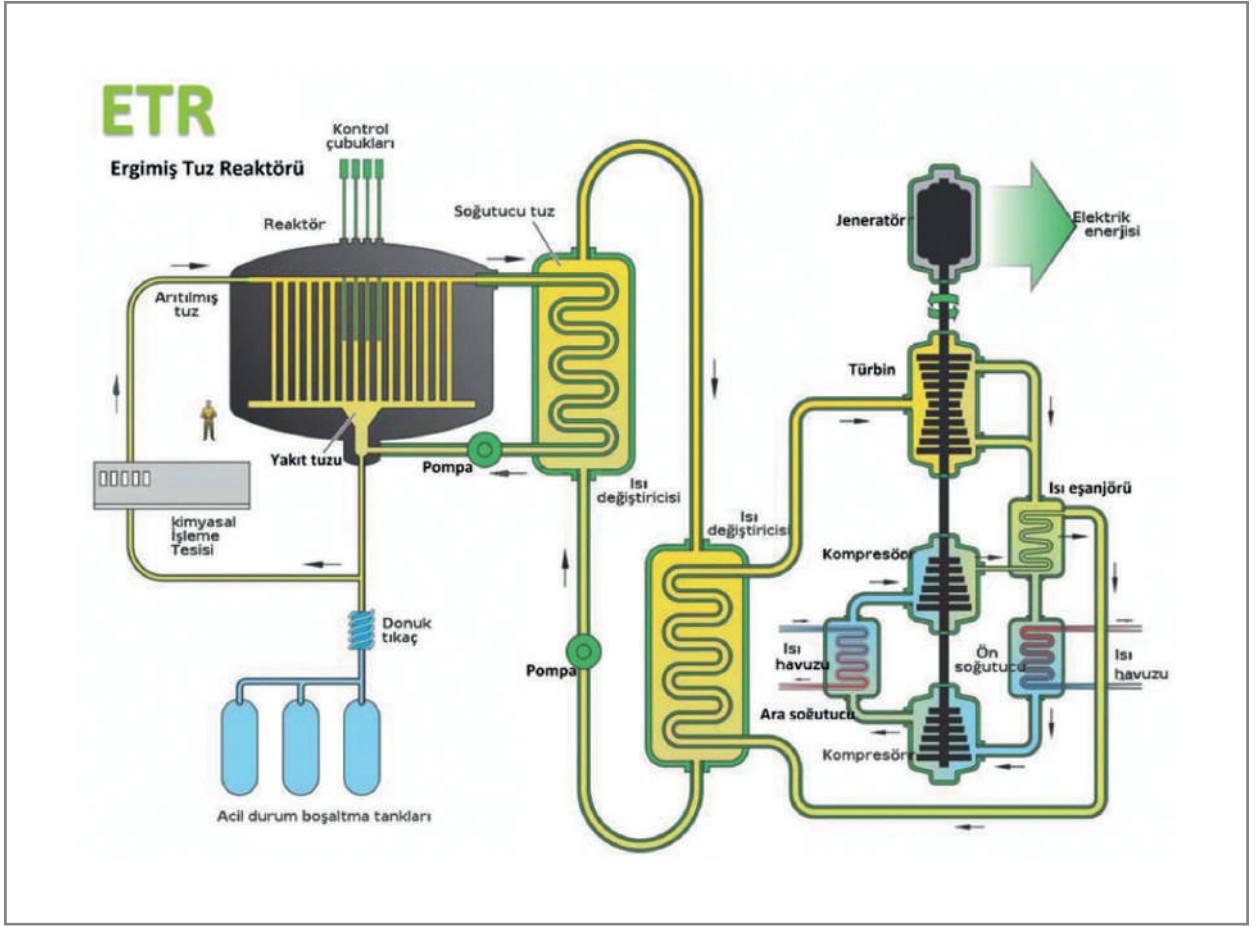
1 950'li yıllarla birlikte karşımıza çıkan, soğutucu ve/veya yakıt olarak ergimiş tuz bileşimlerini kullanan Ergimiş Tuz Reaktörleri (ETR) güvenlik, verimlilik, çok yönlü yakıt kullanma kabiliyeti ve nükleer silahsızlanma gibi alanlar dikkate alındığında geleneksel reaktör tasarımlarına göre avantajlar sunmaktadır. Ancak, ETR'lerin çalışma koşulları, özellikle yapısal malzeme seçimi konusunda zorluklar ortaya çıkarmaktadır.

Bu makalede korozif tuz, yüksek sıcaklıklar, yoğun nötron ve gama radyasyonu gibi faktörler altında çalışan ETR'ler için çalışma koşulları ve yapısal malzeme seçiminde karşılaşılan korozyon ve radyasyon hasarı özet olarak ele alınmaktadır.

ETR teknolojisinin hayata geçirilebilmesi için zorlu çalışma koşullarına dayanabilecek yapısal malzemelerin geliştirilmesi elzemdir. Bu malzemelerin geliştirilebilmesi için ise ETR özelinde radyasyon ve korozyon etkilerinin iyi araştırılması, malzeme dayanımını olumlu veya olumsuz etkileyebilecek farklı mekanizmaların sağlam bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Mevcut tuz bileşimleri ve yapısal malzeme adaylarının alternatifleri de değerlendirilmelidir.

1. GİRİŞ

Ergimiş Tuz Reaktörleri (ETR), ergimiş tuzu soğutucu ve/veya yakıt olarak kullanan, IV. nesil reaktörler arasında anılan ileri teknoloji nükleer reaktör tasarımıdır (bknz: Şekil.1). İlk olarak 1950'li yıllarda geliştirilmeye başlanmıştır. Sistem düşük basınçta çalışmaktadır ve bunun sonucu olarak büyük kırıklı soğutucu kaybı gibi kazaların gerçekleşme olasılığı düşüktür. Ayrıca, sistemin yüksek sıcaklıklarda çalışabilme potansiyeline sahip olması yüksek verimliliklere çıkılabilmesini sağlar. Atık açısından incelendiklerinde ETR tasarımlarının ürettikleri yüksek seviye atık miktarı günümüzde kullanılan ticari reaktörlere göre daha düşüktür. Yakıt olarak toryum-uranyum ve plutonyum-uranyum gibi farklı döngülere olanak sağlaması yakıt kaynağı çeşitliliğini artırmaktadır. Ek olarak, üretken (breeder) reaktör olarak veya nükleer atık transmutasyonu gibi farklı amaçlar için tasarlanabilmektedirler [1].



▲ Şekil 1: Basitleştirilmiş Örnek Bir Ergimiş Tuz Reaktörü Şeması [2]

2. ETR ÇALIŞMA ORTAMI VE MALZEME GEREKSİNİMLERİ

Genel olarak nükleer reaktörlerde kullanılan yapısal malzemeler; yüksek sıcaklık, yoğun nötron akısı ve gama radyasyonuna maruz kalmaktadırlar. Böyle ortamlarda kullanılmaya aday bir malzeme: mekanik olarak yüksek mukavemete sahip, yüksek gama radyasyonu ve nötron akısı altında stabil, düşük nötron yutma tesir kesitine sahip, temas ettiği etkenlerin korozyonuna karşı dirençli, üretimi kolay ve kabul edilebilir bir düzeyde maliyete sahip olmalıdır [3].

ETR özeline inildiğinde çalışma koşulları ticari reaktörlere oranla daha zorludur. ETR çalışma sıcaklıklarında (~500-750 °C) ergimiş tuzun kimyasal etkinliği fazladır. Bunun sonucu olarak korozyon oranı yüksektir. Ergimiş tuz ortamında korozyon, Gibbs serbest enerjisi gibi termodinamik faktörler, metal ve oksit kirleticiler, nem ve fisyon ürünleri nedeniyle de artmaktadır. Özellikle fisyon sonucu açığa çıkan Tellür (Te) metalik malzemeler ile Redoks tepkimesine girerek korozyona ve tanelerarası çatlamaya neden olmaktadır. Sıcaklık gradyanı ve galvanik korozyon ile birlikte söz konusu kirleticiler korozyon oranında artışa neden olmaktadır. Ayrıca, ergimiş tuz ortamında oksijen içeren ortamların aksine korozyon ürünleri kararsız ve tuz içinde kolaylıkla çözünmektedir. Tüm bunlara ek olarak, radyasyon hasarı korozyon hasarının daha da ileriye gitmesine sebep olabilir. Nötron ışıınımı nedeniyle ortamda Helyum (He) oluşmaktadır. He oluşumu yapısal malzemeler içinde baloncuk formasyonuna yol açarak malzemelerde şişme, yüzey pürüzlenmesi ve kabarcıklaşması gibi bozulmalara neden olur. Korozyon ve radyasyon hasarı birlikte ele alındığında, ETR'ler için en çok tartışılan malzemeler; ergimiş tuzda korozyona en az yatkın elementlerden biri olan Nikel tabanlı alaşımlar, yüksek entropili alaşımlar ve süper alaşımlardır [3, 4].

Özetle, uzun dönem işletme durumu da dikkate alınarak, yapısal malzemelerin ergimiş tuz ortamında kararlı, kimyasal reaksiyona girmeyen bir yapıda, yoğun nötron akısına dirençli, Te kırılma direncine karşı dayanıklı ve He oluşumuna karşı dirençli olması gerekmektedir.

3. KOROZYON VE ETKİLERİ

ETR'ler soğutucu ve yakıt olarak ergimiş tuz kullandığı için ETR yapısal malzemelerinde korozyon davranışı en önemli araştırma alanı olarak nitelendirilebilir. Korozyon mekanizması tuzun bileşenleri ve tuzun saflık oranı, malzeme bileşenleri, çalışma sıcaklığı, fisyon sonucu açığa çıkan ürünler gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Tuzun saflık oranındaki azalmalar ve fisyon ürünleri korozyon hızını artırabilmektedir.

Korozyon, ergimiş tuzların yapısal malzemelere difüzyonu, malzemenin gevrekleşmesine ve kütleli kayıplara neden olabilir. Bu da malzemenin mekanik özelliklerini ve bütünlüğünü olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, farklı mekanizmalar ile korozyon ürünlerinin malzeme yüzeyinde birikmesi ısı transferini engelleyebilir.

Korozyonu önlemek veya en aza indirmek için malzeme seçiminin yanı sıra tuzun bileşenleri de önem arz etmektedir. Bu bileşenler yüklemesi öncesi veya çalışma süresince değiştirilerek daha etkili sonuçlar elde edilebilir.

Ergimiş tuz seçimi nasıl yapılmalı [5]:

- 800 °C üzerinde kimyasal olarak stabil olmalı,
- Radyoaktif koşullarda stabil olmalı,
- Erime sıcaklığı ve uçuculuğu düşük olmalı,
- Yapısal malzemeler ile uyumlu olmalı,
- Düşük nötron yutma tesir kesitine sahip olmalı,
- Yeterli miktarda fertil ve fisil malzemeyi çözebilmeli.

Bu şartları çeşitli Florit ve Klorit tuz bileşimleri karşılamaktadır. Çalışmalar daha çok Florit tuzları üzerine yapılmıştır. Klorit tuzları üzerine literatürde bilgi birikimi yeterli olmasa da Florit tuzlarına göre korozyon açısından daha agresif oldukları belirtilmektedir [5].

4. RADYASYON ETKİLERİ

Fisyon sonucu oluşan yoğun nötron ve gama akıları yapısal malzemelerde hasara neden olmaktadır. Enerjik parçacıkların malzeme ile etkileşmesi sonucu atomlar kristal kafesteki durağan konumunu terk etmekte ve bunun sonucunda kafes bozukluğu oluşmaktadır. Radyasyon hasarı sonucunda fiziksel boyutlar, mukavemet ve kırılabilirlik, ısı iletkenlik ve korozyon dayanımı gibi malzeme özelliklerinde değişiklikler meydana gelmektedir.

Nötron ışıınımı dislokasyonu, malzemede değişme ve iyonlaşma etkilerine sebep olur. Bu etkiler nötron enerjisi ve akısı ile artmaktadır. Nötron ışıınımına maruz kalan malzemenin mikro yapısı ve özellikleri değişebilir. Nötron ışıınımı



sırasında, nötronlar ve malzeme atomları arasında elastik ve elastik olmayan saçılma meydana gelebilir. Elastik saçılma malzeme yapısını ve özelliklerini değiştirmez, ancak bir atomun kristal kafesindeki yerini değiştirebilir. Elastik olmayan saçılma ise atomlarda uyarılma ve iyonlaşmaya sebep olabileceği gibi nötron yakalanması sonucu değişme reaksiyonları tetiklenebilir. Bütün bunlar radyasyon hasarının temelini oluşturur [6]. Bu mekanizmaların etkinliği nötron spektrumu ve ısınanma sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca, atomik düzeyde gerçekleşen bu etkileşimlerin sonuçları düşünüldüğünde yapısal malzemelerde düşük sıcaklık ve hızlı nötron spektrumunda sertleştirme ve gevrekleştirme etkileri hakimken, orta sıcaklıklarda kavite genişlemesi ve ısınanma sünmesi dikkat edilmesi gereken noktalar. Isınanma ergimiş tuzun termodinamik özelliklerini değiştirdiği gibi tuz bileşenlerinin değişmesi ve serbest radikallerin oluşumunda da etkilere sahiptir, bu yönüyle ısınanmanın malzemeler üzerindeki kimyasal etkileşimlerde de tesiri bulunmaktadır. Isınanmanın başka bir etkisine örnek olarak nikel alaşımlarında tane sınırlarında, nikel ile termal nötronların etkileşmesi sonucu, helyum kabarcıkları oluşması verilebilir. Bu olay malzemenin gevrekleşmesine sebep olmakta ve uzun dönem kullanımını engellemektedir. Radyasyon, tuz ve malzeme arasındaki difüzyonu da etkileyerek malzeme dayanımını azaltabilmektedir.

Literatürde genel olarak ısınanmanın malzemelerde taneler arası korozyonu hızlandırıcı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ancak Keilholtz, Trauger, McDuffee ve diğerleri, Sisman ve diğerleri ve daha birçok araştırmacı ısınanmanın korozyon üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Dahası düşük akıllı ısınanma durumunda kendi kendini yenileme mekanizmaları sayesinde korozyon hızının azaldığı da belirtilmektedir. Radyasyonun korozyon hızını azaltma etkisi paslanmaz çelik malzemelerde Hastelloy-N'e göre daha belirgin olduğu da saptanmıştır. Karbürler ve silikon karbür için ısınanma gevrekleşmesinin de pratikte yok denecek kadar az olduğu keşfedilmiştir [5,7,8,9].

5. MALZEME GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI

ETR'ler için malzeme seçimi ilk olarak halihazırda mevcut alaşımların test edilmesi ile başlamıştır. Testler sonucunda

Hastelloy-B ve Hastelloy-W aday iki alaşım olarak belirlenmiştir. Ancak bu iki alaşımın ETR çalışma ortamında yüksek sıcaklıktan dolayı kırılğan hale geldiği görülmüştür. Testlerin devamında Nikel temelli bir alaşım olan Inconel-600'ün daha uygun olduğu görülmüş, ileri aşamalarda içeriğinde düşük seviyede Cr ve Fe içeren Ni-Mo alaşımlarının Inconel-600 gibi davranışa da korozyona daha dirençli olduğu belirlenmiş ve ilerleyen çalışmalar ile birlikte Hastelloy-N geliştirilmiştir [10].

Hastelloy-N umut vadeden bir alaşımdır, ancak fisyon sonucu oluşan Te elementinin varlığı tane sınırı gevrekleşmesine sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bu gevrekleşme Hastelloy-N'e Niyobyum (Nb) eklemesi ile azaltılabilmektedir. Kurchatov Instute'de (KI) gerçekleştirilen çalışmalar ile de Ni-Mo-Cr alaşımlarına Alüminyum ve Vanadyum ilavesinin radyasyon gevrekleşmesi üzerinde olumlu etkileri olduğu ortaya konulmuştur. Daha sonra ORNL (Oak Ridge National Laboratory) tarafından, %1-%2 oranında Nb elementi ilavesinin Te kaynaklı taneler arası çatlamaya karşı direnci artırdığı gözlemlenmiştir [10,11].

1977 yılında ORNL'de yapılan deneylerin bir sonucu olarak Inconel-601'in korozyona karşı dirençli olmayabileceği, 316 paslanmaz çeliğin Li₂BeF₄ tuzunda yüksek korozyona uğramasına karşın tuz içeriğine Be ilavesi ile korozyon hızının büyük oranda azaldığı, Cr eklenmiş Hastelloy-N alaşımlarında kütle kaybının Cr eklenti oranı ile aynı olduğu ve %3,47 Nb katkılı Hastelloy-N alaşımının standart Hastelloy-N kadar iyi olduğu gözlemlenmiştir [12]. Bu deneylere ilave olarak çok sayıda paslanmaz çelik, nikel tabanlı alaşım ve yüksek Cr oranlı alaşımlar test edilmiştir, Krom ve demir (Fe) eklentisinin korozyon üzerinde olumsuz etkileri gözlemlenmiştir. 2000'li yılların başına ait çalışmalarında Kurchatov Instute, Ti ve Al eklenmiş HN80MT alaşımının korozyon ve Te kırılğanlığına karşı dirençli olduğunu ortaya koymuştur [10].

EVOL [13] projesi kapsamında yapılan çalışmalar ile Hastelloy-N alaşımının bir diğer olumsuz yanı olan 750°C üzerinde mekanik özellikleri ve ısınlamaya karşı direncinin düşmesine karşı, molibden elementinin tungsten ile değiştirilmesinin mekanik özellikler açısından ve korozyon açısından olumlu etkilerinin olacağı öngörülmüştür.

Ayrıca oksitsizleyici elementlerin de eklenmesinin taneler arası çatlamanın önüne geçtiği belirlenmiştir (Örneğin Zr, Al). Yapılan çalışmalar sonucunda silikon eklenmiş olan EM819 alaşımı geliştirilmiştir [13].

Bahsi geçen alaşımlara ilave olarak yüzlerce alaşım/malzeme üzerinde testler yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Günümüz yönelimleri de dikkate alındığında genel olarak aday alaşımlar şöyledir:

- Nikel temelli alaşımlar
- Paslanmaz çelik alaşımlar
- Alüminyum alaşımları
- Titanyum temelli alaşımlar
- Silikon karbürler
- Seramik kompozitler
- Kaplamalı malzemeler
- Süper Alaşımlar

6. ÖNERİLER VE YORUMLAR

Yüksek sıcaklık, yoğun nötron akısı ve gama radyasyonu gibi ağır koşullarda uzun dönem özelliklerini ve bütünlüğünü koruyabilecek malzemelerin üretilmesi ETR teknolojisinin gelişmesinde en önemli ve en büyük adımlardan biri olacaktır.

Çalışmaların çoğunluğu metalik alaşımların geliştirilmesine odaklanmış ve florit tuzunda korozyon hasarı odağında kalmıştır. Radyasyon hasarı konusundaki çalışmalar yetersiz olduğu gibi birbirleri ile de çelişebilmektedir. Işınlanma ve korozyon etkisini bir arada inceleyen yeni çalışmaların gerçekleştirilmesi, metal alaşımlar dışında kalan malzemelerin araştırılması ve test edilmesi, farklı tuz kompozisyonlarının değerlendirilmesi ETR teknolojisinin geliştirilmesi ve ilerlemesinde önemli adımlar olacaktır.

7. KAYNAKÇA

- [1] IAEA, «IAEA International Atomic Energy Agency,» [Çevrimiçi]: <https://www.iaea.org/topics/molten-salt-reactors>. [Erişildi: 03 11 2023].
- [2] U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum«A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems,» 2002.
- [3] E. A. Wadham ve W. P. Bird, «Selection and Specification of Materials for Nuclear Applications» [Çevrimiçi] : <https://canteach.candu.org/Content%20Library/20040903.pdf>. [Erişildi: 3 11 2023].
- [4] IAEA, (Thorcon US, Inc.), 22 06 2020. [Çevrimiçi]: https://aris.iaea.org/PDF/ThorCon_2020.pdf. [Erişildi: 03 11 2023].
- [5] S. S. Raiman, D. Sulejmanovic, J. M. Kurley, J. Lee, C. G. Parker ve B. A. Pint, «Technical Assessment of Materials Compatibility in Molten Salt Reactors,» Oak Ridge National Laboratory, United States, 2021.
- [6] Y. Wu, «Neutron Irradiation and Material Damage,» Fusion Neutronics, Singapore, Springer, https://doi.org/10.1007/978-981-10-5469-3_4, 2017.
- [7] Z. Zhu, H. Huang, G. Lei, Y. Wu, C. Ren, A. Liu ve Z. Zhu, «Synergistic effect of irradiation and molten salt corrosion: Acceleration or deceleration? » cilt 185, no. 109434, 2021.
- [8] N. D. B. Ezell, S. S. Raiman, J. M. Kurley ve J. McDuffee, «Neutron irradiation of alloy N and 316L stainless steel in contact with a molten chloride salt,» cilt 53, no. 3, 2021.
- [9] D. Holcomb, «U.S.NRC,» Oak Ridge National Laboratory, 7-8 9 2017. [Çevrimiçi]: <https://www.nrc.gov/docs/ML1733/ML17331B117.pdf>. [Erişildi: 3 11 2023].
- [10] S. Guo, J. Zhang, W. Wu ve W. Zhou, «Corrosion in the molten fluoride and chloride salts and materials development for nuclear applications,» cilt 97, no. 0079-6425, 2018.
- [11] J. R. Keiser, «Status of Tellurium-Hastelloy N Studies in Molten Fluoride salts,» OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, USA, 1977.
- [12] J. R. Keiser, «Compatibility Studies of Potential Molten-Salt Breeder Reactor Materials in Molten Fluoride Salts,» Oak Ridge National Laboratory, USA, 1977.
- [13] «Final Report - EVOL (Evaluation and Viability of Liquid Fuel Fast Reactor System),» EVOL, France, 2015.
- [14] R. N. Wright ve T.-L. Sham, «Status of Metallic Structural Materials for Molten Salt Reactors,» Idaho National Laboratory, Idaho, 2018.



ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİNDE TORYUM KULLANIMI



Doç. Dr. Senem Şentürk LÜLE

senturklule@itu.edu.tr

Enerji Enstitüsü

İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖZET

Doğada özellikle de ülkemizde bol miktarda bulunan toryum fisil olmadığı için nükleer reaktörlerde direkt yakıt olarak kullanılamamaktadır. Ancak, doğurgan yapısı sayesinde fisil yakıtı dönüşebilmektedir: Katı yakıtlı reaktörlerin aksine sıvı yakıtının sağladığı avantajlar ile son yıllarda üzerindeki çalışmaların yoğunlaştığı ergimiş tuz reaktörleri özellikle toryum kullanımı için ideal reaktör tasarımı olarak değerlendirilmektedir. Bu yazıda toryumun ve ergimiş tuz reaktörlerinin özelliklerinin ardından ergimiş tuz reaktörlerinde toryum kullanımı konusunda bilgiler verilmiştir.

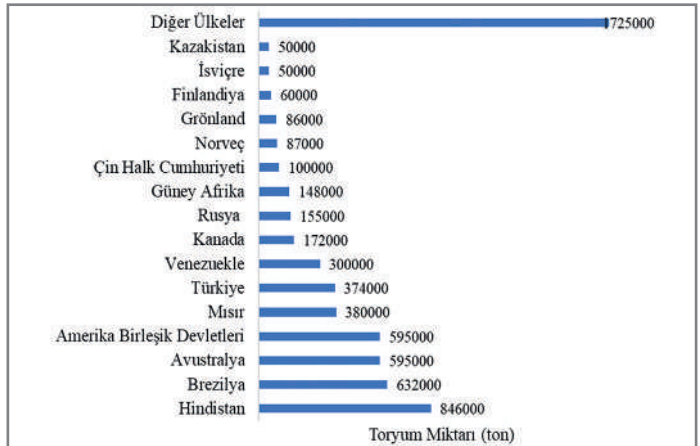
1. GİRİŞ

Saf toryum (Th), çoğu kaya ve toprakta küçük miktarlarda tek bir izotop ($^{232}_{90}\text{Th}$) olarak bulunan ve sonunda kurşuna ($^{208}_{82}\text{Pb}$) dönüşen gümüşü renkte radyoaktif bir metaldir. Mineral formundaki toryum, genellikle nadir toprak elementleri olan niyobyum ve tantal ile birlikte oksitler, silikatlar ve fosfatlar halindedir [1]. Toryumun en yaygın kaynağı Şekil 1'de gösterilen “monazit” olarak adlandırılan nadir toprak fosfat mineralidir.

Toryum doğada uranyumdan (U) üç ila dört kat daha boldur. Tahmini toryum kaynakları ülke bazında Şekil 2'de verilmiştir.



▲ Şekil 1. Monazit minerali [2]

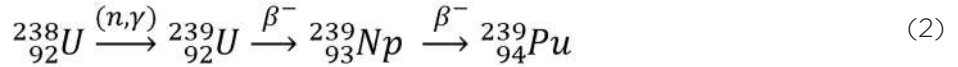
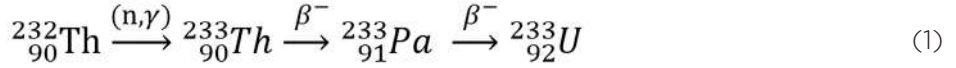


▲ Şekil 2. Toryum kaynakları [3]

Günümüzde toryum üretimi monazitten nadir toprak elementlerinin geri kazanımının bir yan ürünü olarak yapılmaktadır [3]. Monazitin sodyum hidroksit veya sülfürik asit içinde çözülmesi ve ardından organik fazlar kullanılarak çok aşamalı bir prosesin uygulanmasından sonra nükleer reaktörde kullanılabilecek olan toryum dioksit (ThO_2) elde edilmektedir [4].

2.NÜKLEER YAKIT ÇEVİRİMİNDE TORYUM

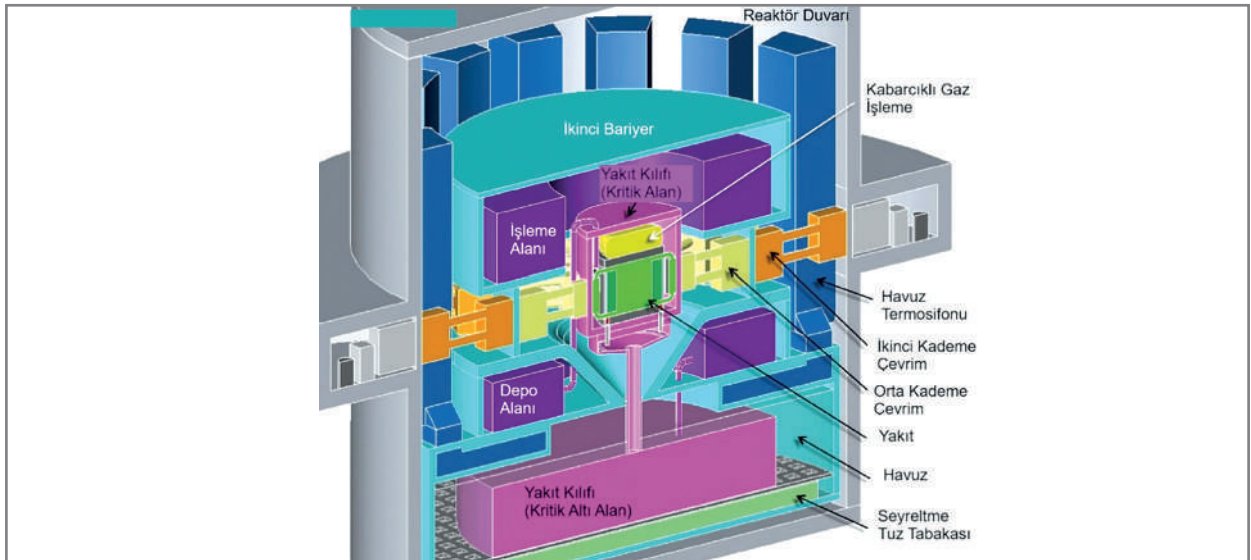
Nükleer santrallerde elektrik üretimi için nükleer yakıttaki fisyon (bölünme) reaksiyonu sonucu ortaya çıkan enerji kullanılmaktadır. Doğada bulunan tek nükleer yakıt malzemesi uranyumun $^{235}_{92}\text{U}$ izotopudur ve "fisil" olarak gruplandırılmaktadır. Öte yandan, $^{232}_{90}\text{Th}$ ve $^{238}_{92}\text{U}$ izotoplarının Denklem 1' ve 2'de gösterilen nükleer tepkimelere girmesi sonucu oluşan $^{233}_{92}\text{U}$ ve $^{239}_{94}\text{Pu}$ izotopları da fisildir. Bu bağlamda nükleer reaksiyona giren $^{232}_{90}\text{Th}$ ve $^{238}_{92}\text{U}$ izotopları nükleer yakıt malzemesine dönüşmeleri münasebetiyle "doğurgan" olarak gruplandırılmaktadırlar.



Ağırlıkça %0,71 oranında fisil $^{235}_{92}\text{U}$ izotopu içeren doğal uranyumun aksine, toryumun fisil izotopu yoktur, dolayısıyla yalnızca madenden çıkarılmış toryum ile herhangi bir fisyon reaksiyonu başlatmak imkansızdır. Bu noktada, toryuma dayanan herhangi bir nükleer güç santralinin başlangıçta ya madenden çıkartılan ya da uranyum sistemlerinde önceden üretilen fisil maddeye bağımlı olacağı açıktır.

Nükleer reaktörlerde toryum/fisil malzeme yakıt döngüsünün dört olası kombinasyonu vardır. Toryum, yüksek zenginleştirilmiş uranyum (HEU), düşük zenginleştirilmiş uranyum (LEU), $^{239}_{94}\text{Pu}$ veya $^{233}_{92}\text{U}$ ile birlikte kullanılabilir. Bu birliktelikler ile toryum hafif sulu reaktörlerde, gaz soğutmalı reaktörlerde, basınçlı ağır su reaktörlerinde, hızlı reaktörlerde ve ergimiş tuz reaktörlerinde kullanılabilir.

IV. Nesil Uluslararası Forumu (GIF) tarafından belirlenen altı reaktör teknolojisinden biri olan Ergimiş Tuz Reaktörü (ETR), yakıtı erimiş flor veya klor tuzu içinde çözünmüş halde olduğu için diğer reaktör tiplerinden ayrılmaktadır. Diğer tüm reaktör tiplerinde yakıt katı formdadır ve soğutucu ayrıdır. ETR'lerde yakıt tuzu (aynı zamanda soğutucu) içerisinde gerçekleşen fisyon reaksiyonu sonucu ısınan yakıt bir ısı eşanjörü aracılığıyla ısısını proses ısısı, ısı depolama veya elektrik üretimi için kullanılabilecek bir başka soğutucu tuza aktarmaktadır. Örnek bir ETR reaktörünün şeması Şekil 3'te gösterilmiştir.



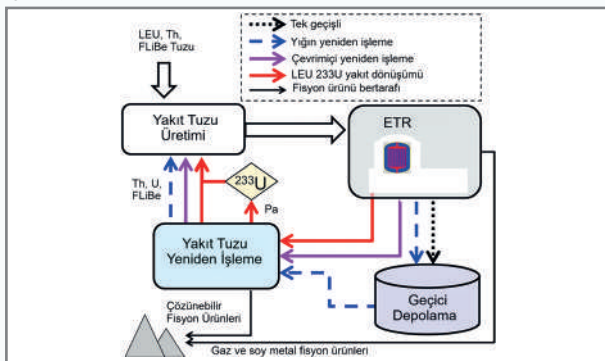
▲ Şekil 3. EVOL hızlı spektrum ETR şeması [5]

ETR'lerin yakıt kaynaklarının genişletilmesine olanak tanıyan çeşitli nükleer yakıt çevrimlerine uyum sağlayabilmesi de dikkat çekmektedir. Ancak yalnızca birkaç kombinasyonu üreme (breed) veya iso-üretme (iso-breeder) kapalı yakıt çevriminde sürdürülebilir çalışmaya izin vermektedir. Bunlar [6]:

- Th-U çevriminde termal spektrum florür tuzlu
- Th-U çevriminde hızlı spektrumlu florür tuzlu
- Th-U veya U-Pu çevriminde hızlı spektrumlu klorür tuzlu ETR'lerdir.

Bu kombinasyonları kullanan sistemlerde başlangıçta dışarıdan gelen fisil malzeme ile reaktör çalıştırılmakta ve giderek artan oranlarda fisil içerik (toryumdan) üretmektedir. Belli bir süre sonra ise (doubling time) artık dışarıdan fisil malzeme eklenmesine ihtiyaç duyulmadan sadece toryum eklentisi ile reaktör kendi yakıtını üretebilmektedir.

Yakıt çevrimi perspektifinden bakıldığında bakıldığında ETR'lerde tek geçişli, yığın yeniden işleme ve çevrimiçi yeniden işleme gibi farklı yakıt çevrimi seçeneklerinin değerlendirilmesi mümkündür (Şekil 4). Tek geçişli yakıt çevriminde, kullanılabilir ^{232}Th , ^{233}U ve taşıyıcı tuz ihtiva eden yanmış (kullanılmış) nükleer yakıt tuzu sistemden boşaltılarak ya geçici depolamaya alınır ya da yeniden işlenmeksizin nihai depolamaya gönderilir. Yığın yeniden işleme yakıt çevriminde hem mevcut ağır nüklidler hem de taşıyıcı tuz çevrim dışı olarak geri dönüştürülür. Ağır nüklidler ve taşıyıcı tuz kullanımına imkân vermesi ve tek geçişli çevrime göre radyoaktif atık salınımının daha düşük olması nedeniyle nükleer enerjinin sürdürülebilirliğini artıran bir çevrimdir. Çevrimiçi yeniden işleme yakıt çevriminde çözünabilir fisyon ürünleri bir kimyasal ayırma tesisi ile reaktör çalışırken yanmış yakıt tuzundan çıkarılmaktadır: Çevrimiçi yeniden işleme yığın yeniden işlemeye göre daha iyi bir nötron ekonomisi sağlamaktadır. Ek olarak, nötron yutucu ^{233}Pa sürekli olarak yakıt tuzundan çıkarıldığından Th-U dönüşümü de iyileştirilmektedir.



▲ Şekil 4. ETR'ler için olası yakıt çevrimi şemaları [7]

Toryum ihtiva eden işinlanmamış yakıt tuzunun işlenmesi nispeten kolay ve iyi bilinen bir süreçtir. Uygun yöntem ThO_2 'nin 250°C ile 550°C sıcaklıkta susuz hidrojen florür (HF) ile kademeli olarak hidroflorlanmasıdır. Nihai ürün olan oksitsiz toryum tetraflorür (ThF_4), ^7LiF - BeF_2 karışımına dayalı ETR taşıyıcı tuzunda çözünabilmektedir [8].

Özellikle Th-U yakıtlı, yavaş (thermal) nötron spektrumlu ETR'yi uzun süre işletmede tutabilmek için gerekli olan çevrimiçi yeniden işleme, yalnızca ksenon, kripton, lantanitler gibi tipik nötron zehirlerinin yakıt tuzundan uzaklaştırılmasına olanak sağlamakla kalmayıp ama aynı zamanda hem üretilen fisil ^{233}U izotopunun çok etkili bir şekilde çıkarılmasını hem de çıkarılan ^{233}U ile Th içeren yeni yakıtın reaktör sistemine sürekli olarak doldurulmasını sağlamaktadır. Ancak işinlanmış ETR yakıtının çevrimiçi olarak yeniden işlenmesi yakıtın yüksek radyoaktivitesi ve ısı üretimi ile reaktör kimyasının kendisiyle doğrudan bağlantılı olması nedenleriyle son derece zor ve karmaşık radyokimyasal bir işlem olarak değerlendirilmektedir [6]. Hızlı veya yavaş spektrumlu Th-U üretici ETR fisil ^{233}U ve doğuran ^{232}Th malzemelerin karıştırıldığı tek akışkanlı bir sistem olarak tasarlanabileceği gibi iki ayrı (fisil ve doğuran) tuza sahip iki akışkanlı olarak da tasarlanabilmektedir. İki durum için farklı yeniden işleme teknikleri kullanılmaktadır.

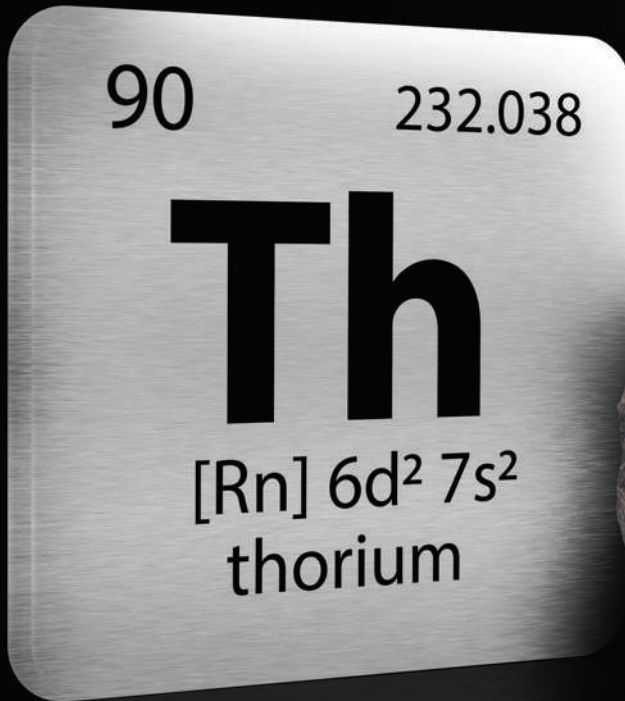
3.SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Hem toryum kullanımının hem de ETR reaktörünün avantajları ve zorlukları mevcuttur. Toryum yaygınlığı, yüksek dönüşüm oranı ile ^{233}U 'e dönüşümü, hızlı, epitermal veya yavaş spektrumlarda kullanılabilmesi, kimyasal kararlılığı, yüksek radyasyon direncine sahip olması gibi avantajlar sunarken Th-U yakıt çevriminin arka ucunda uzun süreli radyolojik etkiye sahip olabilecek ^{231}Pa , ^{229}Th , ^{230}U ve ^{232}U gibi radyonüklidlerin bulunması, ThO_2 'nin erime noktasının yüksek olması nedeniyle yüksek yoğunluklu ThO_2 üretmek için çok daha yüksek bir sinterleme sıcaklığı gerekmesi gibi zorlukları beraberinde getirmektedir. ETR'ler ise doğal güvenlik, katı yakıt montaj imalatının olmaması, çevrimiçi yakıt ikmali ve yeniden işleme, daha az yüksek seviyeli atık üretme, üretilen yüksek sıcaklıktaki ısının daha sonra elektrik üretimi ve diğer yüksek sıcaklıklı proses ısı uygulamaları için kullanılabilmesi, nükleer atık yakıcıları olarak tasarlanabilmeleri ve termal veya hızlı nötron spektrumunda çalışabilmeleri gibi avantajlar sunarken, yeniden işlemenin zor olması, yapısal

malzemelerin korozyonu, lityum kullanımı dolayısıyla oluşan trityumun kontrolü gibi zorlukları düşünmeyi gerektirmektedir.

4.KAYNAKLAR

- [1] IAEA, "World Thorium Occurrences, Deposits and Resources", International Atomic Energy Agency, TECDOC-187, 2019, Vienna, Austria, 139p.
- [2] Micks A., "Thorium Reactors: An Improvement Over Uranium?"
<http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/micks2/> Son erişim: 01/11/2023
- [3] NEA & IAEA, "Uranium 2016: Resources, Production and Demand ('Red Book')", NEA No.7301, 2016, Issy-les-Moulineaux, 550p.
- [4] Salehuddin A.H.J.M, Ismail A.F., Aziman E. S., Mohamed N.A., Teridi M.A.M., Wan Idris M.R., "Production of high-purity ThO₂ from monazite ores for thorium fuel-based reactor", Progress in Nuclear Energy, Vol. 136, 103728, 2021,
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103728>
- [5] Europe - EVOL's Molten Salt Fast Reactor
<https://www.daretothink.org/europe-evols-molten-salt-fast-reactor/> Son erişim: 01/11/2023
- [6] IAEA, "Near Term and Promising Long Term Options for the Deployment of Thorium Based Nuclear Energy", IAEA-TECDOC-2009, International Atomic Energy Agency, 2022, Vienna, Austria, 174p.
- [7] Yu C., Wu J., Zou C., Cai X., Ma Y., Chen J., "Thorium utilization in a small modular molten salt reactor with progressive fuel cycle modes", International Journal of Energy Research, Vol. 43, 3628-3639, 2019, <https://doi.org/10.1002/er.4511>
- [8] Uhler J., "Prospects of Thorium-Fuel Reprocessing for Molten Salt Reactor Systems", Proc. of ICAPP '08, 8-12 June 2008, Anaheim, CA, USA.

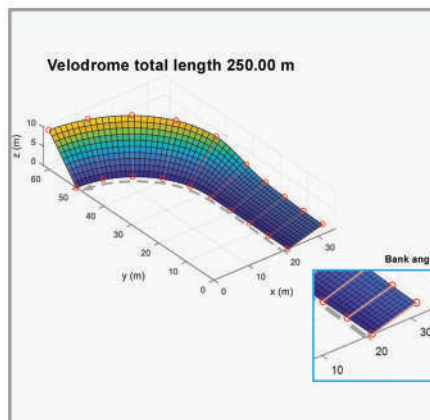


MATLAB AND SIMULINK FOR MICROMOBILITY DEVELOPMENT

**Model, simulate,
and develop batteries,
motors, and controllers
with Model-Based
Design**

MATLAB®, Simulink®, and Simscape™ enable engineers to front-load the development of Micromobility through the systematic use of data and models. You can use pre-built reference applications to lower the barrier for simulation. With MATLAB and Simulink, you can:

- Use Model-Based System Engineering to design complex micromobility architectures and optimize systems
- Model batteries and develop battery management systems (BMS)
- Model fuel cell systems (FCS) and develop fuel cell control systems (FCCS)
- Model traction motors and develop Motor Control Units (MCU)
- Deploy, integrate, and test control algorithms
- Use data-driven workflows and artificial intelligence (AI) in micromobility development





ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİ



Prof. Dr. Üner ÇOLAK

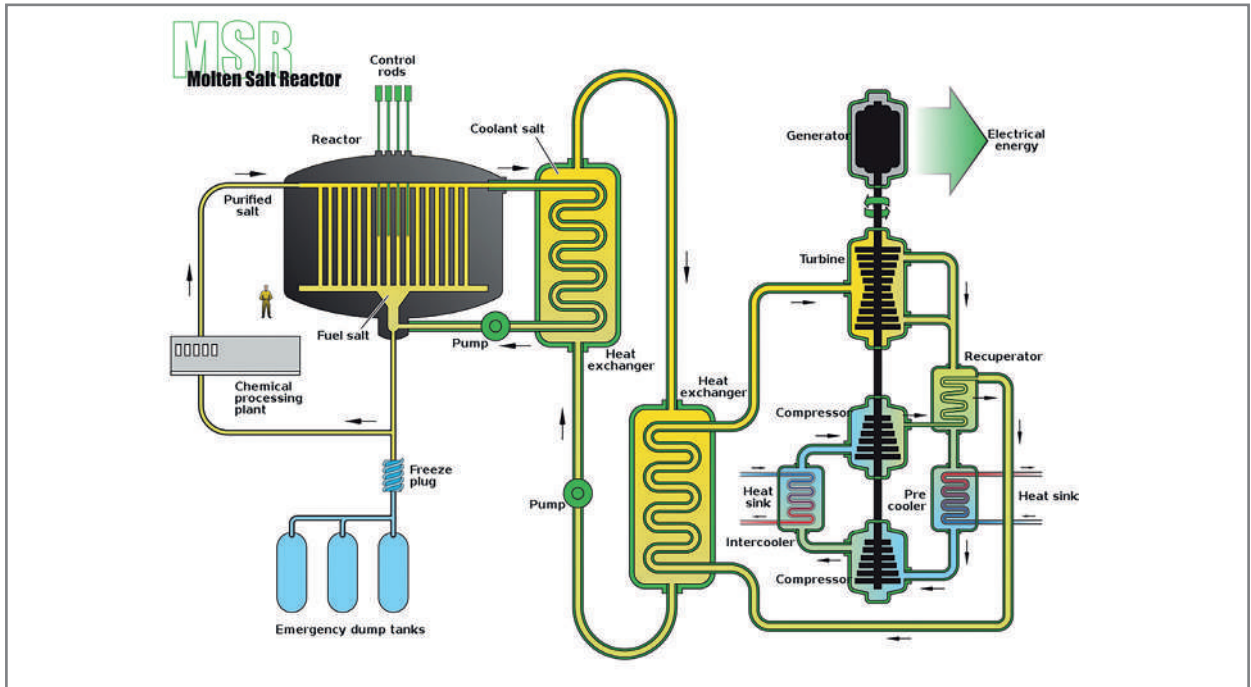
unercolak@itu.edu.tr

Enerji Enstitüsü

İstanbul Teknik Üniversitesi

Ergimiş Tuz Reaktörleri (ETR'ler), çoğu reaktörde kullanılan katı yakıt yerine yüksek sıcaklıkta florür veya klorür tuzu formundaki sıvı yakıtı kullanan nükleer reaktörlerdir. Yakıt tuzu sıvı olduğundan hem yakıt hem de soğutucu olabilir. Yavaş (termal), hızlı veya üretken reaktörler de dahil olmak üzere birçok farklı ETR türü vardır. Bazı ETR'lerde, toryum ve uranyum içeren ergimiş tuz yakıt ve soğutucu olarak kullanılırken bazı tiplerinde özellikle florür tuzları soğutucu işlevi görürken yakıt başka formlarda bulunabilirler. Aynı zamanda kullanılmış nükleer yakıtların ve yüksek seviyeli atıkları nötron bombardımanı ile yakılarak bertarafı için de ETR'ler kullanılabilir.

Ergimiş Tuz Reaktörleri, IV. Nesil reaktör tasarımları arasında yer alan bir örnektir. Seçilen bu reaktörler özellikle sağladıkları güvenlik özellikleri nedeni ile yeni nesil nükleer reaktörler olarak öne çıkmaktadırlar. Jenerik tasarımın şematik gösterimi Şekil 1'de gösterilmektedir.



▲ Şekil 1. GenIV kapsamındaki Ergimiş Tuz Reaktörü şematik görünümü
(Ref.: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42150/molten-salt-reactor-msr)

Sürdürülebilirlik, bir sistemin doğal kaynakları verimli kullanıp çevreyle uyumlu olarak kullanımı olarak nitelenebilir. Sürdürülebilirliğin çevresel, sosyal ve ekonomik bileşenleri olmak üzere üç boyutu vardır. Bu boyutların hepsini dikkate alarak değerlendirmek gerekir. ETR'ler nükleer yakıt kullanımında geleneksel reaktörlere göre çok yüksek kaynak verimliliğine sahiptir. Yakıtı verimli kullanırlar. Bu da daha az atık üreterek daha fazla enerji üretmek demektir.

Fisyon reaksiyonları sonucu ETR yakıtı yüksek radyoaktiviteye sahip fisyon ürünlerini içinde barındırır. ETR'lerde fisyon ürünleri çevrimiçi ayrıştırılabilir ve temizlenmiş yakıt tekrar sisteme dahil edilebilir. yakıtın tekrar reaktör koruna yönlendirilmesi sağlanır. Bu da nötronların yutulması engellenerek yakıtın daha verimli kullanılması sağlar.

Toryumun, uranyumun yanı sıra doğurgan bir yakıt malzemesi olarak ETR'lerde kullanım olanağı vardır. Toryum, yerkürede uranyumdan daha fazla bulunmaktadır ve atıklarının radyotoksitesi daha düşüktür. Toryum-232 izotopu nötron yutarak nihai olarak U-233 fisil izotopuna dönüşmekte ve fisyon reaksiyonlarının sürdürülebilirliği sağlanmaktadır.

Ergimiş tuz reaktörlerde, sıvı halde olan yakıt kor içinde serbest halde dolaşmaktadır. Bu nedenle hafif su reaktörlerinde olan kor yapısal malzemelerine gereksinim yoktur. Bu da işletme problemlerini azaltmakta ve kurulumu da basitleştirmektedir. Aynı zamanda geleneksel reaktörlerde var olan yapısal malzemeler aracılığıyla nötronların parazitik yutulması söz konusu olmamaktadır. İyileşen nötron ekonomisi ile verimlilik daha da artmaktadır.

Tasarımda basitlik, düşük sistem basıncı nedeniyle imalat kolaylığı ve artan verimlilik nedeniyle ETR'lerin birim kurulu güç başına maliyetlerinin geleneksel reaktörlerle rekabetçi olmaları beklenmektedir.

Bakım ve onarım çalışmaları dışında ETR'ler de yakıt yüklemek için reaktörü durdurmak gerekmemektedir. Çevrimiçi yakıt değişimi yapılabildiği için temizlenen yakıt reaktöre dönmekte ve gerekli olduğu durumlarda da yakıt eklemeleri yapılabilmektedir. Bu da kapasite faktörünü artıran bir faktördür. Sonuç olarak da işletme maliyetlerini aşağıya

çekmek için yararlı olmaktadır. Yakıtın sıvı halde olması da ayrı bir avantaj sağlamaktadır. Yakıt üretimi basitleşmekte ve pek çok işlem adımı ortadan kalkmaktadır. Özellikle hafif su reaktörlerinde nükleer yakıt imalatı hassas ve maliyetli bir süreçtir. ETR için ise kullanılacak kimyasal kompozisyon çerçevesinde çok daha basit bir süreçtir.

ETR'lerin işletme parametreleri dikkate alındığında yüksek basınç altında çalışma gereklilikleri bulunmamaktadır. Bu da diğer çoğu reaktör tasarımlarında var olan reaktör basınç bazı tasarım gerekliliklerini ortadan kaldırmaktadır. Bu da maliyetleri düşüme yönünde katkıda bulunan bir unsurdur.

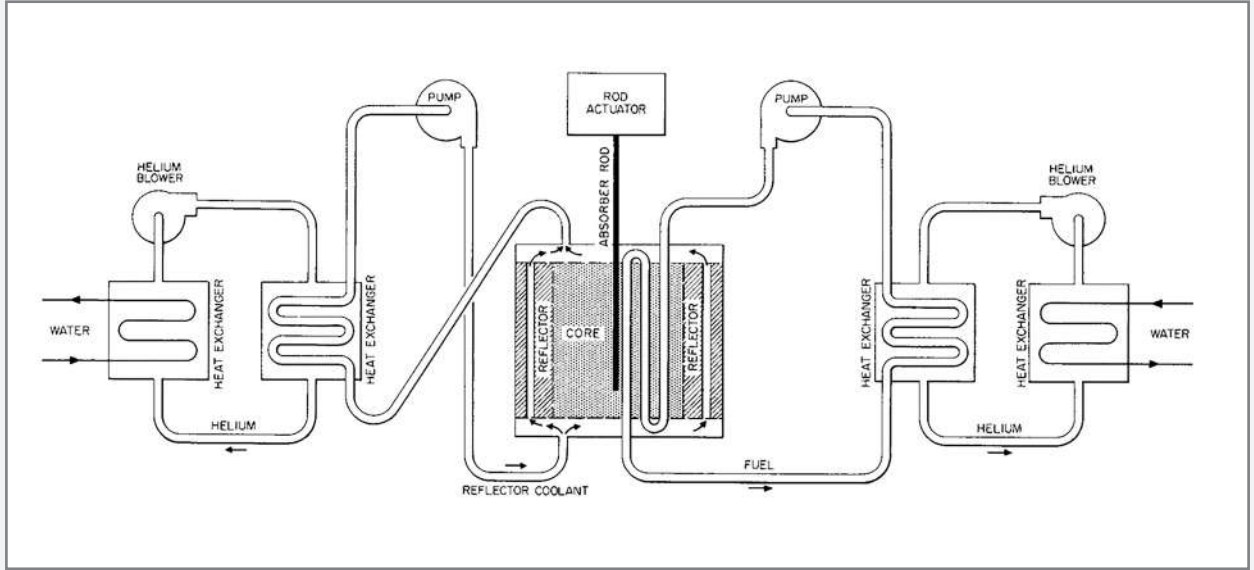
Çalışma sıcaklıkları olarak değerlendirildiğinde ETR'ler hafif su reaktörlerine göre önemli avantajlar sağlamakta ve yüksek çalışma sıcaklıkları nedeni ile yüksek termodinamik verimle elektrik üretimi sunmaktadır. Aynı zamanda bu sıcaklıklarda pek çok endüstriyel uygulama için proses ısısı sağlama potansiyeli yaratmaktadır. Bunun yanı sıra değişik teknolojilerle hidrojen üretimi ve uygun şekilde ölçeklenerek temiz içme suyuna ulaşmakta sorun yaşanan yerlerde deniz suyundan içme suyu üretimi konusunda ekonomik çözümler ETR ile mümkün olacaktır.

Nükleer reaktörlerin işletilmesinde en önemli gereklilik nükleer güvenlidir. Bu da reaktör sisteminin normal işletme ya da kaza gibi olası istenmeyen durumlarda çalışanlara ve topluma zarar verecek sonuçlar yaratmaması ilk nükleer güvenlik ilkesidir. Nükleer güvenlik koşullarını sağlamak için önemli bir koşul, reaktör koru içinde reaktörü kritik yapabilecek yakıt miktarından çok fazla yakıt bulundurmamaktır. Reaktörün işletilmesi sırasında reaktörü kritik yapacak düşüm miktardaki yakıtı çevrim içi yakıt yükleme mümkün olduğu için ETR'ler bu koşulu sağlamaktadırlar.

ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİ'NİN TARİHÇESİ

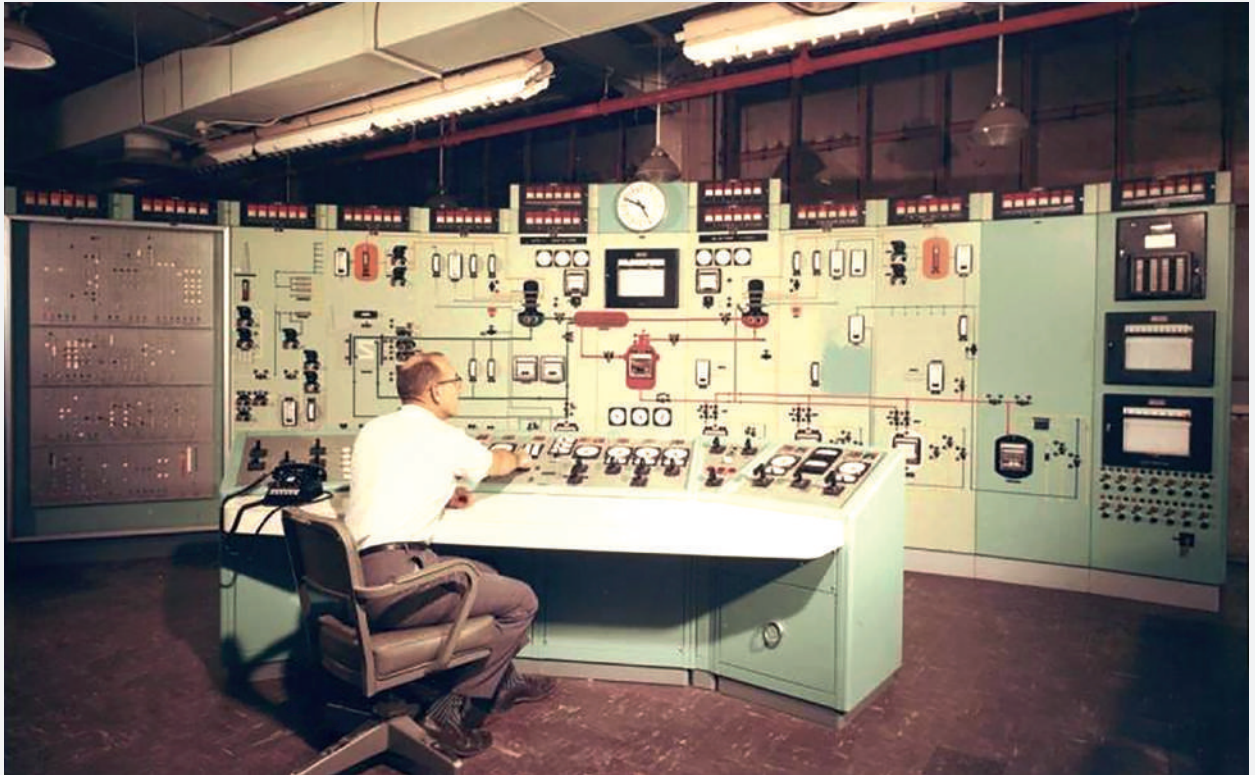
Dünya'da ilk ETR ilginç bir şekilde uçak için güç üretiminde kullanılmak üzere 1951 yılından başlayarak ABD Hava Kuvvetleri tarafından bir proje çerçevesinde ele alındı. ABD'nin ulusal laboratuvarlarından Oak Ridge National Laboratory (ORNL) ARE (Aircraft Reactor Experiment) olarak adlandırılan bu projeye ev sahipliği yaptı.

Bu proje çerçevesinde 1954'te 2,5 MW ısı güce sahip reaktör 1000 saat başarıyla çalıştırıldı. Bu proje kapsamında tasarımda kullanılan temel bilgiler elde edildi. Şekil 2'de ARE düzeneğinin şematik görünümü verilmiştir.



▲ Şekil 2. ARE projesi şematik görünümü

ARE ile elde edilen deneyim, bu teknolojinin sivil amaçla kullanımı konusunda da istek oluşturdu. ORNL bünyesinde 1956 yılında yilinda Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) projesi başlatılmıştır. Tasarım çalışmalarının tamamlanmasının ardından 1962 yılında 8 MW termal gücü olan deneysel reaktörün kurulum çalışmaları başlamıştır. Sonrası, 1965 yılında ilk kez kritik olan reaktör 1966 yılında tam güce ulaşmıştır. Aralık 1969'da kapatılana kadar toplam 13 172 saat etkin tam güç eşdeğer günlük işletme deneyimi sağlanmış ve %87 emre amadelik seviyesine ulaşılmıştır. MSRE kontrol odası Şekil 3'te gösterilmektedir.



▲ Şekil 3. MSRE Kontrol odası

(Ref.: <https://www.ornl.gov/blog/ornl-review/time-warp-molten-salt-reactor-experiment-alvin-weinberg-s-magnum-opus>)

ETR'LERİN TİCARİLEŞME POTANSİYELİ

Son yıllarda ergimiş tuz reaktörlerine ilgi giderek artmaktadır. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı UAEA'ya göre son zamanlarda çalışmaları sürdürülen 70'ten fazla ETR bazlı projeler Dünya'nın değişik ülkelerinde sürdürülmektedir. Bunların arasında izleyen listede bu projeleri yürüten ticari girişimler ve projelerin bazı özellikleri verilmektedir.

Copenhagen Atomics: Danimarka'da 2014 yılında başlayan çalışmalarla seri üretime uygun 100 MW ısı gücünde F⁷LiThPu ergimiş tuz yakıtı kullanan termal bir reaktör geliştirilmektedir. Elektriğin yanı sıra 560°C' de proses ısı da ürün olarak pek çok endüstriyel uygulamada kullanım bulacaktır. Yaklaşık 12 metre boyutunda bir konteyner içine sığacak şekilde tasarlanan bu reaktörler çoklu üniteler yan yana konularak çoğaltılabilecektir.

Kairos Power: ABD'de geliştirilen KP-FHR adındaki reaktör düşük basınçta florit tuzu soğutucu olarak kullanmakta ve yakıt olarak grafit ile harmanlanan TRISO parçacıklardan oluşan küreler kullanılmaktadır. 140 MW elektrik gücündeki reaktörün birinci devre çıkış sıcaklığı 650°C düzeyindedir. Reaktör birinci devresi atmosferik basınçtayken ikinci devredeki basınç 19 MPa'dır. İkinci devreye taşınan ısı buhar türbini aracılığı ile elektriğe dönüştürülür.

Moltex Energy: Büyük Britanya için geliştirilen ve ergimiş tuz kullanan MoltexFLEX projesinde 60 MW ısı gücü ve 700°C çıkış sıcaklığı vardır. Üretilen elektriğin rüzgar enerjisi ile rekabet edebileceği iddia edilmektedir.

Moltex'in Kanada için geliştirdiği 300MW elektrik gücünde Stable Salt Reactor (Moltex-SSR) dizaynı da söz konusudur.

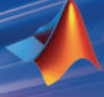
Seaborg Technologies: Genelde ergimiş tuz reaktörleri karasal uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilirken Danimarka kökenli Seaborg Technologies firması deniz uygulamalarına yönelik ergimiş tuz reaktörleri geliştirmeye odaklanmıştır. 800 MW elektrik gücü üreten ve gemi üzerinde kurulacak reaktör istenilen lokasyonlarda elektrik ve ısı sağlamak üzere tasarlanmaktadır. Ergimiş florit esaslı tuz yakıt ve soğutucu olarak kullanılmaktadır.

TerraPower: ABD'de ergimiş klorür esaslı yakıt kullanan hızlı nötron spektrumuna sahip Molten Chloride Fast Reactor (MCFR) tasarımı diğer farklı yenilikçi tasarımlarıyla beraber TerraPower tarafından yürütülmektedir.

Thorcon: ABD'de deniz esaslı mavnaya üzerine kurulacak, 500 MW ısı gücüne sahip, mobil, toryum bazlı ergimiş tuz kullanan, grafit yavaşlatıcılı termal bir reaktördür. Tasarımda flor bazlı tuz kullanılmaktadır. Ticarileşme sonrası elektrik fiyatı olarak kömürle rekabet edecek düzeyde olacağı iddia edilmektedir.

Ergimiş Tuz Reaktörleri basitliği, güvenlik özellikleri, maliyet unsurları ve toryum kullanımı gibi özellikleri nedeniyle gelecekte yaygınlaşması ve elektrik üretiminin yanı sıra deniz suyundan içme suyu üretimi, hidrojen ve amonyak üretimi ile denizcilik ve uzay sistemlerinde itki sistemleri olarak kullanım bulacaktır.



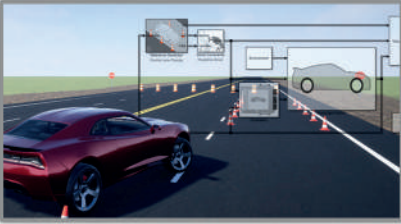


MathWorks®
Authorized Reseller



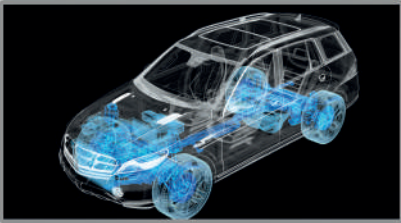
FIGES
applied physics & mathematics

Simulink ile SANAL ARAÇ MODELLEME ÇÖZÜMLERİ



Araç Dinamiği Sistemleri

MathWorks ürünlerinden Vehicle Dynamics Blockset araç dinamiklerinin modellenmesi ve simüle edilmesinde kullanılır. Farklı serbestlik seviyelerinde gövde, süspansiyon, tekerlek, fren modellerini ve 3D senaryo ortamlarına geçmek için gerekli eklentileri içermektedir.



Güç Aktarma Sistemleri

Powertrain Blockset™ ile içten yanmalı, hibrit ve elektrikli güç ve güç aktarma sistemlerini araç modelinize ekleyebilirsiniz. Motor alt sistemlerini, şanzıman sistemlerini, farklı araç motorlarını, pil paketlerini ve kontrolcü modellerini simüle etmek için detaylı bir kütüphanesi bulunmaktadır.



ADAS ve Otonom Sürüş Teknolojileri

ADAS ve otonom sürüş için algılama, planlama ve kontrol sistemlerini MATLAB ve Simulink ortamında tasarlayarak araç modelinize entegre edebilirsiniz. 3 boyutlu sanal ortamlarda test senaryoları ile kontrol algoritmalarının hem doğrulanmasını hem de otomatik kod dönüşüm araçları ile gömülü sistemlere aktarılmasını sağlar.

Sanal araç modelleme ve simülasyonunda tam bir entegrasyon platformu olma özelliği taşıyan MathWorks ürünleri hakkında daha detaylı bilgi almak için lütfen qr kodu okutunuz.



Bizi TAKİP Edin!





ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİNİN GÜVENLİĞİ VE GÜVENLİK ANALİZLERİ



**Dr. Veda Duman
KANTARCIOĞLU**
veda.duman@gmail.com
Uzman
Savunma Sanayi Başkanlığı



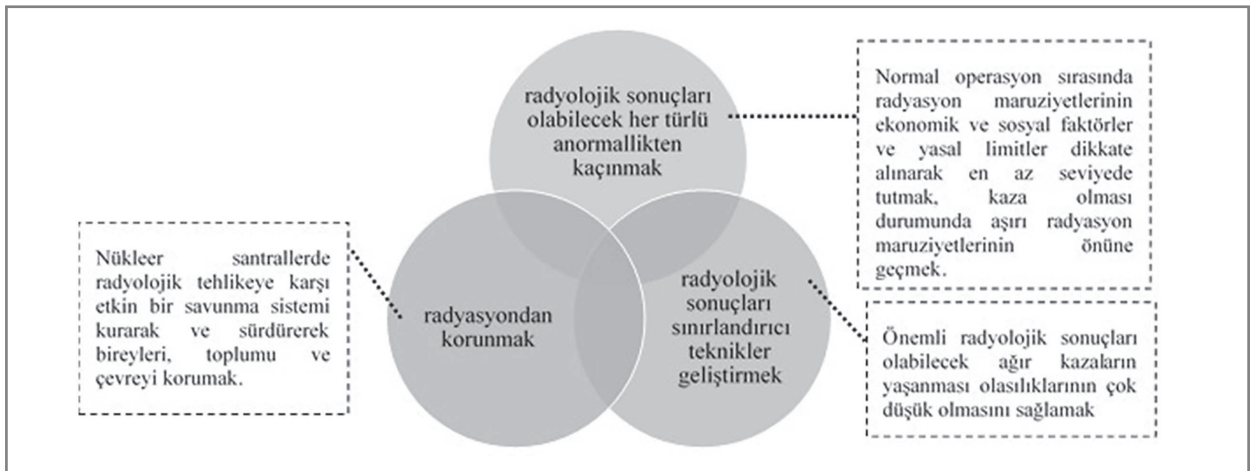
Prof. Dr. Şule ERGÜN
sulergun@hacettepe.edu.tr
Nükleer Enerji Mühendisliği
Bölümü
Hacettepe Üniversitesi

ÖZET

Bu makale, ergimiş tuz reaktörlerinin (ETR) nükleer güvenliğini ve güvenlik analizlerini ele almaktadır. Çalışmada, ETR'lerin güvenlik özelliklerini tanımlamak için, olası insan hataları ve mekanik arızaları telafi etmek amacıyla çeşitli koruma seviyelerine odaklanan derinlemesine savunma ilkesi anlatılarak, ETR'lerin kendiliğinden güvenli özellikleri sıralanmıştır. Bunların yanı sıra, ETR'lerin ticari olarak işletme halindeki reaktörlerden farklı güvenlik analizi ihtiyaçları anlatılmıştır. Bu çerçevede, ETR'lerin güvenlik değerlendirmelerini yapmak için detaylı tasarım kriterleri ve özel güvenlik önlemlerinin belirlenmesi gerektiği ortaya konmuştur. Sonuç olarak, bahsedilen kriterler ve önlemler belirlendikten sonra ETR'ler için deterministik güvenlik analizlerinin yapılmasında büyük bir zorluk olmadığı, olasılıklı güvenlik analizleri için ise güvenilirlik verilerine ve yeni metotlara ihtiyaç duyulacağı belirtilmiştir.

1. GİRİŞ

Nükleer güç santrallerinde (NGS) nükleer güvenlik, normal işletim koşullarının korunması, kazaların önlenmesi ve kazaların sonuçlarının hafifletilmesi yoluyla çalışanların, halkın ve çevrenin olması gerekenden fazla radyasyon maruziyetinden korunmasını amaçlar. Normal işletim sırasındaki radyasyon riskleri ile kaza veya olaylar nedeniyle oluşan radyasyon riskleri ve nükleer reaktörün, zincirleme reaksiyonun veya bir radyoaktif kaynağın kontrolden çıkması neticesinde oluşabilecek her türlü direkt etkiyi kapsamaktadır. Şekil 1'de nükleer güvenliğin temel hedefleri gösterilmektedir [1].



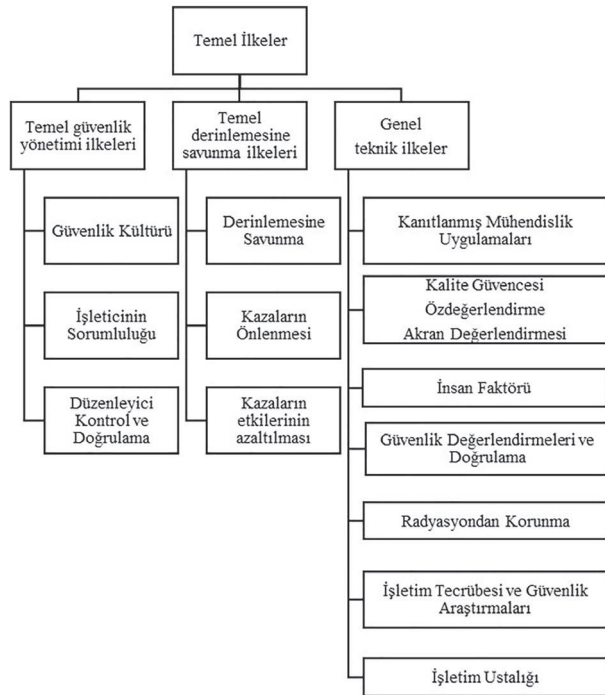
▲ Şekil 1. Nükleer Güvenliğin Temel Hedefleri

Şekil 1'de gösterilen temel hedefler arasında yer alan ve nükleer güvenliği sağlayan sistemler üç ana kategoriye ayrılabilir:

1. **Kendiliğinden:** Sistemin tasarımında temel fizik prensiplerine dayalı güvenlik özellikleri mevcuttur.
2. **Pasif:** Herhangi bir harekete geçirme mekanizması veya elektriksel güce ihtiyaç duymadan devreye giren güvenlik sistemleri geliştirilmiştir.
3. **Aktif (tasarım ürünü):** Elektriksel güçle çalışan ve özel olarak devreye alınması gereken sistemler geliştirilmiştir.

Nükleer güvenlik sistemleri incelendiğinde hem normal işletim koşullarında hem de ağır kaza yaşanması durumunda radyasyon maruziyetlerinin en aza indirilmesinin en birinci öncelik olduğu görülür.

Nükleer güvenliğin sağlanması için temel ilkeler Şekil 2'de gösterilmiştir [1].



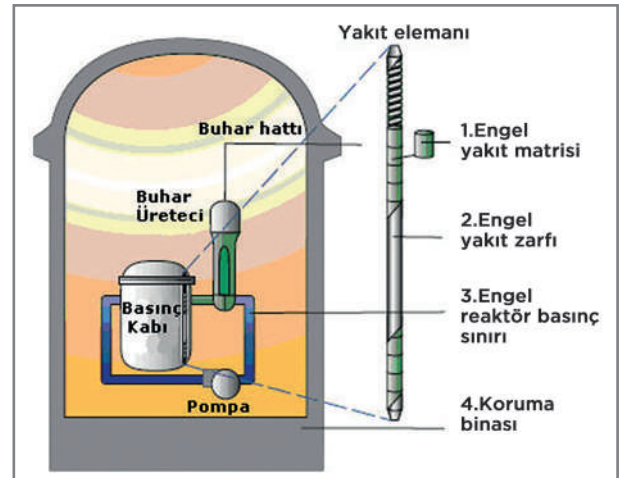
▲ Şekil 2. Nükleer Güvenliğin Temel İlkeleri

Şekil 2'de gösterilen temel ilkelerden derinlemesine savunma ilkesi özellikle nükleer güç santrallerinde güvenlik teknolojilerini işaret eder. Organizasyonel, davranışsal veya donanım bazlı tüm güvenlik önlemleri birbiri üzerine geçen koruma katmanları oluşturarak, bireyler ve geniş anlamda halk üzerinde bir zarar oluşturmadan bir arızanın veya aksaklığın düzeltilmesini veya üstesinden gelinmesini sağlarlar. İşte derinlemesine savunmanın merkezinde bu çok seviyeli koruma fikri bulunmaktadır. Derinlemesine savunmaya ilişkin ilkeler şunlardır:

1. **Derinlemesine savunma:** Bu kavram, potansiyel insan hataları ve mekanik arızaları telafi etmek için, radyoaktif maddenin çevreye salınmasını önleyen ardışık engeller de dahil olmak üzere çeşitli koruma seviyelerine odaklanan derinlemesine bir koruma yaklaşımını anlatmaktadır. Radyoaktif fisyon ürünlerinin çevreye salınmasını önleyen tüm fiziksel **"bariyerlerin"** bütünlüğünün korunmasını içerir. Kavram ayrıca, bariyerlerin tam olarak etkili olmadığı durumlarda halkı ve çevreyi zarardan korumak için alınacak ilave önlemleri de içerir. Bu bariyerler hafif sulu reaktörlerde, katı formdaki yakıtın kendisi, yakıt zarfı, nükleer maddeleri içinde bulunduran basınç kabı ve koruma kabıdır. Bahsedilen bariyerler Şekil 3'te gösterilmektedir. Bazı tasarımlarda reaktör binasına birkaç katman daha ilave edilerek bariyer sayısı artırılmaktadır.

2. **Kazaların önlenmesi:** Özellikle ağır kor hasarına neden olabilecek kazaların önlenmesi anlamına gelen birincil güvenlik önlemlerine ağırlık verilir.

3. **Kazaların etkilerinin azaltılması:** Mevcut olan saha içi ve saha dışı zarar azaltma önlemleri ile radyoaktif maddenin bir kaza nedeniyle koruma kabı dışına salınmasının zararlı etkileri önemli ölçüde azaltılacaktır.



▲ Şekil 3. Radyoaktif fisyon ürünlerinin çevreye salınmasını engelleyen fiziksel bariyerler (basıncılı su reaktörü için gösterilmiştir) [2]

2. NÜKLEER GÜVENLİK ANALİZLERİ

Nükleer güvenlik analizleri, nükleer santrallerde gerçekleşebilecek bir olay veya kaza durumunda radyoaktif maddelerin salınmasını engelleyen bariyerlerin bütünlüğünü koruması, güvenlik sistemlerinin kullanılabilirliği ve daha pek çok kabul kriterinin karşılanıp karşılanmadığının anlaşılması için yapılan analitik hesaplamalardır. İki temel güvenlik analizi yöntemi bulunmaktadır: Deterministik Güvenlik Analizleri (DGA) ve Olasılıklı Güvenlik Analizleri (OGA).

* Deterministik Güvenlik Analizleri (DGA)

Deterministik güvenlik analizleri, bir NGS'nin tasarıma esas kazalar için belirlenen arızalara ve tehlikelere dayanıklı olup olmadığının gösterilmesiyle güvenli işletim limitlerinin belirlenmesini hedeflemektedir. Bir başka deyişle NGS'nin varsayımlarda belirtilen başlangıç olaylarına tepkisini hesaplamaya çalışır. Bu amaçla çeşitli kurallar ve kabul kriterleri belirlenmiştir. DGA, nötronik, termal-hidrolik, radyolojik, termo-mekanik ve yapısal özelliklere odaklanır. Burada sayılan her bir alanın incelenmesi için farklı bilgisayar programları geliştirilmiştir. Hesaplamalar işletimin farklı süreçleri ve durumları için gerçekleştirilebilir:

- Önceden belirlenmiş çalışma modları ve durumları
- Tahmin edilen geçişler¹
- Gerçekleşebileceği öngörülen kazalar²
- Seçilmiş tasarım ötesi kazalar
- Kor hasarına neden olan ağır kazalar

Hesaplamaların sonuçları değerlendirilirken belirlenmiş kabul kriterleri üzerinde durulur. Bu kabul kriterleri genellikle sayısallaştırılmış değerlerdir. Bu kriterler, düzenleyici kurumlar tarafından belirlenmiş güvenlik limitleri ve güvenlik koşullarından oluşur. Aranılan temel kriterler şunlardır:

- Kaza sonucunda çalışanlar ve halkın aldığı bireysel doz değerleri, düzenleyici kuruluşlarca belirlenmiş güvenlik limitlerinin altında olmalıdır.
- Radyoaktif maddeler içeride tutmayı hedefleyen bariyerlerin bütünlüğü korunmalıdır.
- Güvenlik fonksiyonlarını icra eden sistemler ve çalışanların yetenekleri değerlendirilmelidir.
- Bazı tasarımlar için radyoaktif maddelerin erken dönemde büyük miktarlarda salınması önlenmelidir.

Bu temel kriterler çeşitli sayısal verilerle takip edilir. DGA sonuçlarında bu değerlerin istenen aralıklarda olup olmadığına bakılır. Bu sayısal kriterlerin en tipik örnekleri Tablo-1'de özetlenmiştir [1].

¹Beklenen işletimsel olaylardan kaynaklanan geçişlerdir. Beklenen işletimsel olaylar ise, santralin ömrü boyunca, bir veya daha fazla gerçekleşmesi beklenen tasarıma esas olaylar ve santral işletim koşullarıdır.

²Gerçekleşmesi beklenmese de normal ve tahmin edilen geçişler işletim durumlarına ek olarak sistemlerin, bileşenlerin ve yapıların tasarımlarında temel alınan kazalar ve olaylardır.

Tablo 1. Kabul Kriterleri Örnekleri

Tipik Kabul Kriterleri	Gösterge Değer Örnekleri
Hesaplanan değişkenlerin sayısal limitleri	* Zarf sıcaklığı pik sıcaklık değeri * Yakıt zarfı oksidasyonu
Santralin kaza sırası ve sonrası durumları	* Uzun dönem güvenli duruma ulaşılması * Kor içinden geçen soğutucu akışkana bağlı güç limitleri
Yapıların, sistemlerin ve bileşenlerin performans gereklilikleri	* Enjeksiyon debisi
Özel kaza ortamlarında hesaba katılan operatör eylemleri için gereklilikler	* Alarm sisteminin güvenilirliği * Hesaplamalarda kontrol edilen alanların yaşanabilirliği
Ağır kazalara yönelik (tasarıma esas kazalar) kriterler	* Kor hasar görme frekansı * Radyolojik sonuçları olan koruma kabı hasarlarının önlenmesi * Erken büyük salım frekansı * Saha dışı acil durum önlemlerini gerektirecek senaryoların olasılığı * Cs-137 gibi spesifik radyonüklitlerin salımının sınırlandırılması * Radyasyona en çok maruz kalan bireyler de doz limitleri ve riskleri

* Olasılıklı Güvenlik Analizleri (OGA)

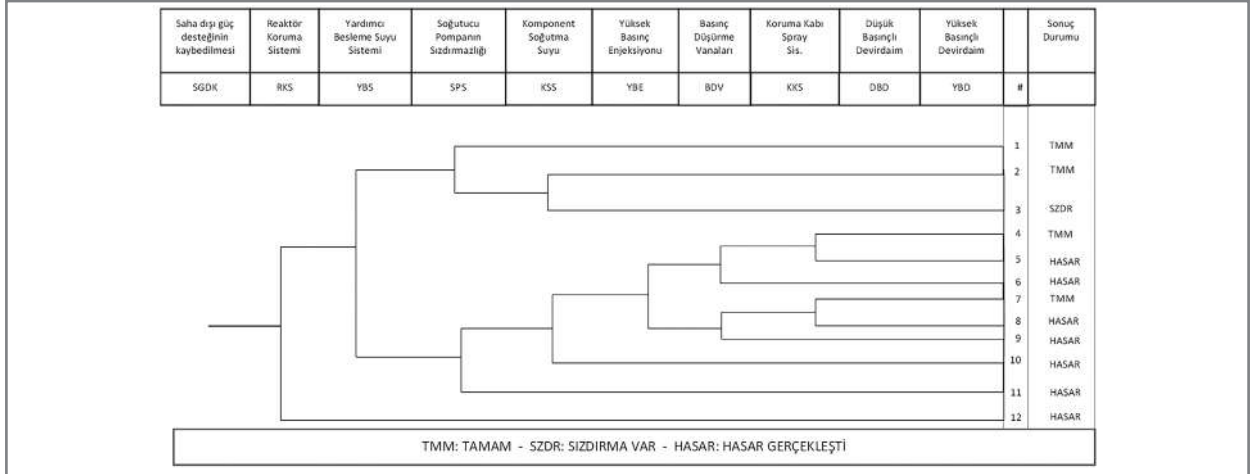
Nükleer santraller, toplum ve çevre üzerinde oluşturdukları risklerin kabul edilebilir limitler içinde olması temeline dayanarak tasarlanır. Kabul edilebilir limitler söz konusu olduğunda risk, her bir eylem için belirsizliklerin seviyesidir. Riskin kabul edilebilmesi, gerçekleşme olasılığının çok düşük olması veya radyolojik sonuçların sınırlılığı ile ilişkilidir. Risk değerlendirmesi yapılırken iki farklı durum değerlendirilir: Korunma önlemlerinden birinin uygulanmaması durumunda oluşacak potansiyel tehlikeler ve önlem alınsa da varlığını devam ettirebilecek tehlikeler. OGA ile araştırılan genellikle ikincisidir. Çünkü tehlikenin tam olarak ortadan kalkıp kalkmadığı belirlenemez. Güvenlik analizi prosedürlerinin kapsamı temelde olayların olasılıkları ve sonuçlarının bir arada değerlendirilmesini içerir.

OGA, tasarımın farklı özellikleri ve farklı işletim prosedürleri veya bunlarda yapılacak değişiklikler için risk seviyelerini araştırmak ve santralde meydana gelebilecek anormal olayların değerlendirilmesi ve yine bunlardan kaynaklı risk seviyelerinin belirlenmesi için kullanılabilmektedir.

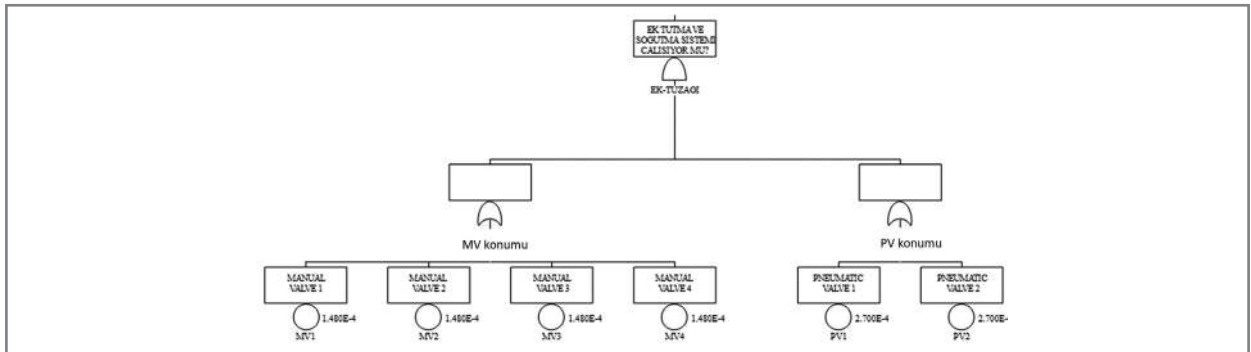
OGA için öncelikle kazaların başlamasına neden olan tetikleyici olayların belirlenmesi gerekir. Tetikleyici olaylar belirlendikten sonra bu olayları takip eden kazanın ilerleme senaryoları olay ağaçları çizilerek gösterilir. Olay ağacında yer alan ve devreye girip girmediği senaryoların olay ağaçlarında gösterildiği sistemlerin devreye girmeyeceği durumları gösterecek şekilde hata ağaçları çizilir. Hata ağaçlarında, bir sistemin devreye girmeme sıklığının belirlenmesi için hata ağacında yer alan tüm temel hataların gerçekleşme sıklığına dair güvenilirlik verilerinin bilinmesi gerekir.

Şekil 4'te bir basınçlı su reaktörü için hazırlanan ve şebekeden çekilen elektriğin kesilmesine ait örnek bir olay ağacı gösterilmektedir. Şekil 5'te ise Eriyik Kor Tutma ve Soğutma Sistemi için çizilen Hata Ağacı örnek olarak gösterilmektedir.

OGA, NGS'nin güvenlikle ilgili tüm sistemlerini içeren devasa bir model oluşturmayı gerektirir. Bu modelin içinde muhtemelen binlerce bileşen yerini alır. Tüm bileşenlerin güvenilirlikleri, bir araya geldiklerinde kor hasarına neden olabilecek mantıklı olay serileri içinde değerlendirilir. OGA'nın tipik boyutları binlerce sayfa dokümanı içermektedir.



▲ Şekil 4. Örnek olay ağacı - Tetikleyici olay: şebekeden çekilen elektriğin kesilmesi [1]



▲ Şekil 5. Eriyik Kor Tutma ve Soğutma Sistemi için çizilen Hata Ağacı [1]

3. ERGİMİŞ TUZ REAKTÖRLERİNDE GÜVENLİK

Daha önce, nükleer güvenliğin radyoaktif fisyon ürünlerinin fiziksel bariyerlerin içinde tutulmasını hedeflediğinden bahsedilmişti. Bu fiziksel bariyerlerden yakıt ve yakıt zarfının Ergimiş Tuz Reaktörlerinde (ETR) hali hazırda katı olmaması, nükleer güvenliğin sağlanmasını ve nükleer güvenlik değerlendirmelerinin yapılmasını oldukça farklı bir kapsama çekmektedir.

Nükleer reaktörler için güvenlik değerlendirmeleri yapılırken, üretilen gücün artmasına, soğutma yeterliliğinin azalmasına ve radyoaktif fisyon ürünlerinin yakıt dışına kaçmasına neden olabilecek olay ve kazalara ve reaktörü dışından etkileyecek deprem, patlama ve yangın gibi olaylara ait değerlendirmeler yapılır. ETR'lerin güvenlik özelliklerinin de bu başlıklar altında değerlendirilmesi gerekir.

Günümüzde, birçok düzenleyici kuruluşun yayınladığı güvenlik kılavuzlarının neredeyse tamamının su soğutmalı reaktörler için ayrıntılı güvenli işletme ve kaza limitleri belirlediği göz önünde bulundurulduğunda, ETR'ler için güvenlik kavramının daha genel güvenlik standartları ve temel kavramlarla incelenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bu temel kavramlar, santralde bulunan sistem, yapı ve bileşenlerinin santralin farklı işletme durumundaki işlevlerinin sorgulanmasını içerebilir. Örneğin sistem, yapı ve bileşenlerin, normal işletme, beklenen işletme geçişleri, yakıt yükleme veya kapatma sırasındaki işlevleri değişebilir. Ayrıca, yine temel kavramlar olarak radyoaktif fisyon ürünlerinin sistemde nerede olduğu ve bir kaza durumunda nerede olabilecekleri, veya reaktif kimyasalların ya da basınçlı ekipmanın sistemin neresinde olduğu gibi sorulara yanıt aranması gerekebilir [3].

Reaktördeki sistemlerin, yapıların ve bileşenlerin işlevlerine bakıldığında, ETR'lerin pasif güvenliği sağlayan özellikler içerdiği görülebilir. Örneğin, Fukushima Daiichi kazasında olduğu gibi bir santral kararması (station blackout) kazası durumunda, sıcaklığı arttıkça genleşen yakıt tuzunun doğal konveksiyona neden olması sonucu pasif soğutma gerçekleşir. Bu özelliği ETR'lerin güvenilirliği yüksek olması gereken aktif sistemlere ihtiyaç duymamasını sağlar. Ya da yakıtın sıcaklığı arttığında, sıvı yakıtın tahliye edilmesini sağlayacak şekilde eriyerek açılan tıplar da ETR'lerin pasif güvenlik özelliklerine bir örnek olarak verilebilir.

Tüm dördüncü nesil reaktör tasarımları için hedeflendiği şekilde ETR bileşenlerinin

kendiliğinden güvenli olma özelliği vardır. Yukarıdaki paragrafta anlatıldığı gibi, ısınan yakıtın genleşmesi, fisyon reaksiyonlarının hızının azalmasına neden olur, böylece yakıtın ısınmasına neden olan bir hata ya da arıza gerçekleştiğinde, reaktörün ısı üretimi kendiliğinden azalmış olur. Bu da sıvı yakıtın reaktör kabından sızması ya da reaktörün diğer bileşenlerinin artan sıcaklık yüzünden bütünlüğünü kaybetmesi olasılığını azaltır. Ayrıca sıvı yakıt, sıvının üretilen ısıyı dağıtması nedeniyle bölgesel sıcaklık artışlarını, dolayısıyla bu sıcaklık artışının neden olabileceği güç üretimi ile ilgili ya da termal-hidrolik sorunların ortaya çıkmasını kendiliğinden engellemiş olur.

Sıvı yakıtlı reaktörlerde, yakıtla ilgili işlemler (yakıt yükleme, taşıma gibi) sırasında da radyoaktif fisyon ürünlerinin yakıttan salımı söz konusu olabilir. ETR'lerde yakıt yükleme ya da yakıt çıkarma işlemi, basitleştirilmiş bir şekilde işletme sırasında yapılabildiği için, burada bahsedilen salımların gerçekleşmesi olasılığını azaltmış olur. Benzer şekilde, ETR'lerde uzun yarı ömürlü radyoaktif fisyon ürünlerinin üretimi az olduğu için uzun vadeli atık yönetiminde bu fisyon ürünlerinin salımından kaynaklanacak radyolojik riskler azaltılmış olur.

ETR'lerde yüksek basınçta çalışan ekipman olmadığından ve hafif sulu reaktörlerde ağır kaza koşullarında patlamaya neden olabilecek hidrojen üretimi olmadığından, ekipmanın basınç altındaki davranışlarının ya da hidrojen patlamasının oluşturacağı güvenlik sorunlarının değerlendirilmesi anlamsızdır.

Burada sıralanan temel güvenlik özellikleri, ETR'lerin nükleer güvenlik açısından avantajlarını göstermiş olsa da ergimiş tuzun aşındırıcı etkilerinin olması, radyoaktif fisyon ürünü gazların ve reaktif kimyasalların reaktörün farklı işletme koşullarında sistemin neresinde olduğunun değerlendirilmesi gerekir.

ETR'lerde reaktif kimyasalların Gibbs serbest enerjisi düşüktür. Buna rağmen bu kimyasalların koruma kabı içinde serbest kalmasının mutlaka değerlendirilmesi gerekir.

ETR'lerde işletme sırasında trityum üretiliyor olması, beta salın ve su buharındaki hidrojenle kolayca bağlanan bu izotopun çevreye salınmasının önlenmesini nükleer güvenlik açısından önemli kılmaktadır. İçsel ışınlama açısından tehlikeli olan trityumun, ağır su reaktörlerinde de üretildiği ve bu trityumun

çevreye salımını önleyen tedbirler bilindiği için, ETR'ler için aşılamaz bir sorun olmadığı ifade edilmektedir [4].

Radyoaktif fisyon ürünleri ile ilgili bir diğer nükleer güvenlik sorunu da işletme sırasında sürekli olarak ergimiş yakıt tuzundan nötron yutan fisyon ürünlerinin uzaklaştırılması sırasında, bu fisyon ürünlerinin salımının önlenmesidir. Bu fisyon ürünleri hafif su soğutmalı reaktörlerin katı yakıtlarında tutulduğu ve 18 ya da 24 ayda bir yapılan yakıt yenileme işlemi sırasında kullanılmış yakıtın içinde kaldıkları için ayrı bir işleme tabi tutulmazlar. Ancak ETR 'lerde bu işlem çevrim içi yapılabilir. Bu durumda izotopların yakıttan sürekli çekilmesi ihtiyacı ortaya çıkar ve önemli bir nükleer güvenlik problemi oluşur. Bu nedenle çevrim içi yakıt temizliği ihtiyacı olan ETR'lerde bir kimyasal işleme tesisinin tasarlanması gerekmektedir. Bu tesisin sistem ve bileşenlerinden aşınma gibi sebeplerle radyoaktif fisyon ürünü gazların salımını önleyecek tedbirlerin tasarım ve işletme aşamasında alınması ve güvenlik değerlendirmelerinin bu sistemleri de içermesi gerekir.

*** Fiziksel Bariyerlerden radyoaktif fisyon ürünü salımı ile sonuçlanabilecek tetikleyici olaylar[5]**

Yazının bu kısmında, bir olasılıklı güvenlik analizi sonucu belirlenen ve radyoaktif fisyon ürünlerinin reaktör kabı ve koruma kabından salımına sebep olabilecek tetikleyici olaylar listelenmiştir. Tetikleyici olayların listesi, güvenlik analizlerinde ele alınacak senaryoları ve hangi sistem, yapı ve bileşenin güvenilirliğinin artırılması gerektiğini göstermesi açısından önemlidir.

Olasılıklı güvenlik analizi sonucu belirlenen ve reaktör kabından salıma neden olabilecek tetikleyici olaylar:

- Buhar üreticinde tüp kırılması
- İkincil tuzun akışının tamamen durması
- Şebekeden çekilen elektriğin kesilmesi
- Isı değiştiricide tüp kırılması

Bu tetikleyici olaylar sonucunda, koruma kabından salımı engellemek için güvenilir bir şekilde tasarlanması gereken sistem, yapı ve bileşenler ise aşağıda sıralanmıştır:

- Yüksek sıcaklığa dayanıklı olması gereken koruma kabı
- Acil durum tahliye tankı
- Acil durum tahliye tankı soğutma sistemi
- Yedek atık gaz sistemi
- Atık gaz odası

*** ETR'ler için Güvenlik Analizleri**

ETR'ler için güvenlik analizlerinin yapılması amacıyla, ETR'lere özel tasarım kriterlerinin oluşturulması gerekir. Düzenleyici kuruluşların bu kriterleri belirlediği düzenleyici dokümanlarında yer vermesi beklenmektedir. Daha ziyade hafif su reaktörleri göz önünde bulundurularak belirlenen genel tasarım kriterlerinin ETR'lere uyarlanması oldukça muhafazakar bir yaklaşım olacaktır. Minimum kabul edilebilir tasarım kriterlerinin belirlenmesi için çok sayıda çalışmanın yürütülmesini gerektirmektedir.

Bahsedilen kriterler ve deneysel çalışmalarla doğrulanmış fiziksel modeller, ETR'ler için deterministik analizlerin doğru yapılması için yeterli olacaktır. Özellikle bozunma ısısının doğru modellenmesi için gelecekte çalışmalar yapılmalıdır. ETR'ler için yapılacak deterministik analizlerde nötronik ve termal-hidrolik hesaplamaların birlikte yapılması önemlidir. Deterministik analizler için eriyik koru (corium) modelleyen yazılımlara dayalı tecrübenin varlığı, ETR'ler için yapılacak analizlerde nümerik modellemeyi kolaylaştıracaktır.

ETR'ler için olasılıklı güvenlik analizlerini yapmak daha büyük zorluklar içermektedir. ETR'lerde işletme tecrübesi az olduğu için, güvenilirlik ve olay ağaçlarına ait verilerin az olması bu zorluklardan biridir. Ayrıca, güvenlik sistemlerinin işlevlerini kısmen yerine getirmesinin güvenliği sağlamada yeterli olduğunun düşünüldüğü durumlar için yeni olasılıklı analiz teknikleri geliştirilmeli ve sınanmalıdır.

4. REFERANSLAR

- [1] Veda Duman Kantarcıoğlu, Nükleer Güç Santrallerinde Ağır Kazalar için 3+ Seviye Olasılıklı Güvenlik Analizi Yönteminin Geliştirilmesi ve Akkuyu Nükleer Güç Santrali için Uygulanması, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, 2018.
- [2] <https://www.tenmak.gov.tr/2016-06-09-00-43-55/135-gunumuzde-nukleer-enerji-rapor/835-bolum-05-nukleer-guvenlik.html>, TENMAK, son erişim, 10.11.2023
- [3] https://gif.jaea.go.jp/webinar/Series44/gen_iv_webinar_series_44_mr_david_holcomb_26_august_2020_final.pdf, son erişim, 10.11.2023
- [4] Araştırma Raporu, Early Phase Molten Salt Reactor Safety Evaluation Considerations, Oak Ridge National Laboratory, 2020.
- [5] Dimitri D. A. Pyron, Safety Analysis for the Licensing of Molten Salt Reactors, Yüksek Lisans Tezi, Yüksek Lisans Tezi, Paul Scherrer Institut, 2016.

ORTA VADELİ PROGRAM'DA TÜRKİYE ENERJİ HEDEFLERİ AÇIKLANDI



Orta Vadeli Program boyunca elektrikli araçların yaygınlaştırılması amacıyla şarj istasyon ağı geliştirilerek özellikle yerli elektrikli araçların kullanımı desteklenecek.

Sibel ACAR-ANKARA/ Türkiye ekonomisinin 3 yıllık hedef ve politikalarının yer aldığı Orta Vadeli Program'ın (OVP) onaylanmasına ilişkin Cumhurbaşkanı Kararı, dün Resmi Gazete'nin mükerrer sayısında yayımlandı.

Hazine ve Maliye Bakanlığı ile Strateji ve Bütçe Başkanlığınca hazırlanan ve 2024-2026 dönemini kapsayan OVP ile temel ekonomik büyüklükler ve hedefler belirlendi.

“YENİ DÖNEMDE ENERJİ POLİTİKAMIZIN ANA HEDEFLERİ DOĞRULTUSUNDA ALT YAPI OLUŞTURACAĞIZ”

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanı Alparslan Bayraktar, Cumhurbaşkanı Recep Tayyip Erdoğan'ın himayesinde açıklanan, 2024-2026 dönemini kapsayan Orta Vadeli Program'a (OVP) ilişkin olarak sosyal medya hesabından paylaşımında bulundu.

Bayraktar, yaptığı paylaşımında;“Cumhurbaşkanımız Sayın Recep Tayyip Erdoğan, Türkiye ekonomisinin önümüzdeki 3 yıllık yol haritası niteliğinde olan Orta Vadeli Programı açıkladı. Bu üç yıllık dönemde

enerji politikamızın ana hedefleri, arz güvenliğini güçlendirmek, yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimdeki payını en üst seviyeye çıkarmak, enerji verimliliğini artırmak ve 2053 karbon nötr hedefi doğrultusunda gerekli alt yapıyı oluşturmak olacaktır” değerlendirmesinde bulundu.

YEŞİL TEKNOLOJİLERİN KULLANIMI YAYGINLAŞTIRILACAK

7 temel alanda reformun hedeflendiği Orta Vadeli Program'da yeşil ve dijital dönüşüm, büyüme ve ticaret, fiyat istikrarı ve finansal istikrar, beşeri sermaye ve istihdam, afet yönetimi, kamu maliyesi, iş ve yatırım ortamı başlıklarında hedefler belirlendi.

2024-2026 yıllarına ilişkin OVP'den yapılan derlemeye göre, enerji sektörü özelinde fiyatlama davranışlarını etkileyerek iç talebi dengelemesi beklenen sıkı parasal duruş, enflasyonun arz yönlü nedenlerine yönelik yapısal politikalarla desteklenecek. Bu bağlamda, girdi maliyetlerini düşürücü ve arzı artırıcı uygulamalar sürdürülecek.



Haberin tamamına ulaşmak için lütfen kodu okutunuz

FİGES HAVACILIK VE SAVUNMA KONFERANSI

08 Kasım 2023 tarihinde Bilkent Otel ve Konferans Salonu'nda organize ettiğimiz FİGES Havacılık ve Savunma Konferansı'nı başarıyla tamamladık!



500'den fazla katılımcının yer aldığı etkinlikte, açılış konuşmaları, savunma, havacılık ve haberleşme alanlarındaki teknolojik gelişmeleri konu alan iki farklı panel oturumu, üç ayrı salonda gerçekleşen teknik oturumlarda birbirinden farklı sunum ve demo gösterimleri ile dolu dolu bir gün geçirdik.





Konferansı İzlemek
İçin QR Kodu Okutun!





» **Alikaan ÇİFTÇİ**
Yönetim Kurulu Başkanı
NIATR



NIATR
NUCLEAR INDUSTRY
ASSOCIATION

NIATR YÖNETİM KURULU BAŞKANI SAYIN ALİKAAN ÇİFTÇİ İLE ÖZEL RÖPORTAJ

• ARGE DERGİSİ : Sayın Çiftçi, Nükleer Sanayi Derneği'ni bize kısaca tanıtır mısınız? Misyon ve vizyonundan bahsedebilir misiniz?

Alikaan ÇİFTÇİ : Nükleer Sanayi Derneği (NSD), Türkiye'ye nükleer enerji alanında yatırım yapmak isteyen küresel firmalarla bu yatırımları iş fırsatı gören ve bu sektörden pay almak isteyen Türk sanayicisini bir araya getirip yerleştirmek, teknoloji ve bilgi transferleri hususlarında toplumsal fayda sağlamak amacıyla 2020 yılında, Türk sanayiciler tarafından kuruldu. NSD, Ortadoğu'da yapılması planlanan 16 adet nükleer enerji santral projesinde Türk firmaların paydaş olabilmesi için de bir şemsiye kuruluş pozisyonunda. Dernek olarak dünyadaki birçok nükleer sanayi derneği veya kümelenmesiyle iyi niyet anlaşması yapıyoruz. Bu anlamda iyi bir noktaya geldik. Şu anda aralarında İngiltere, Kanada, ABD ve İtalya'nın da olduğu ülkelerle Memorandum of Understanding (MoU) yani İyi Niyet Anlaşmalarımız var. İyi Niyet Anlaşması sayımız 17'ye ulaştı. Daha da artması için çalışıyoruz. Türk sanayicisine nükleer enerjinin ve alt dinamiklerinin ne kadar büyük ve sürdürülebilir olduğunu, ekonomik katma değer açısından ne kadar tatminkar bir sektör olduğunu konusunda farkındalık yaratmak üzere çalışıyoruz. Üyelerimizin, yurt içi ve yurt dışında benzer alanlarda çalışan diğer kuruluşlarla ilişki kurmasıyla Türk sanayisinin nükleer enerji sektöründe aktif olması için projeler yapıyor ve etkinlikler düzenliyoruz.

Çalışma guruplarımız yoluyla, Türk sanayisinin nükleer enerji sektöründe aktif olması için ayrıntılı inceleme ve çalışmalar yapıyoruz. Ülkemizdeki sanayi ve üretim yapan şirketleri bünyesinde bulunduran ilgili sivil toplum kuruluşları, üniversiteler, üye firmalarımız, hükümet, ticaret, sanayi odaları, organize sanayi bölgelerinin desteğiyle ortak projeler üretiyoruz.

• ARGE DERGİSİ : Nükleer Sanayi Derneği Başkanı olarak, ülkemizde ve dünyadaki nükleer çalışmaları nasıl değerlendiriyorsunuz? Ülkemizde geliştirilmesi gereken hangi konular mevcuttur?

Alikaan ÇİFTÇİ : Dünyada enerji politikaları alanında ciddi dönüşüm yaşanıyor. Bu kapsamda enerji politikalarındaki en öncelikli konuların başına arz güvenliği yerleşti. Bu alandaki en kritik bir diğer başlık ise net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak. Ülkeler, enerji arzlarını güvence altına almak ve enerji kaynaklarını daha çevreci alternatiflerle çeşitlendirmek amacıyla, nükleer enerjiyi enerji karmalarının önemli bir oyuncusu yapmak için daha istekli bir tutum belirlemeye başladı.

Ülkemizde de enerjinin sürekli, kaliteli, sürdürülebilir, güvenli ve karşılanabilir maliyetlerle arzının sağlanması hedefleniyor. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından hazırlanan ve TBMM Genel Kurulu'nda kabul edilen 12. Kalkınma Planı'nda da enerjide kaynak çeşitlendirmesinin artırılması ve 2053 yılı net sıfır emisyon hedefini esas alarak yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının



üst seviyeye yükseltilmesinin yanı sıra nükleer teknolojiyi elektrik üretiminde kullanan, enerji verimliliğini artıran, enerji teknolojilerinde yerleşmeyi önceleyen, yeni teknolojileri entegre eden, uluslararası enerji ticaretinde stratejik konumunu güçlendiren rekabetçi bir yapıya ulaşılması hedefleniyor.

◆ **ARGE DERGİSİ : Yılda bir düzenlenen yerli ve yabancı firmaların ağırlandığı, Nükleer Santraller Fuarı ve Nükleer Santraller Zirvesi'nin (NPPES) ülkemize sağladığı katkılardan bahsedebilir misiniz? Böyle bir etkinliğin düzenlenmesi fikri nasıl ortaya çıktı? Önceki yıllarla karşılaştırıldığında, son yıllardaki ilgiyi nasıl değerlendirirsiniz?**

Alikaan ÇİFTÇİ : Nükleer Santraller Fuarı ve Nükleer Santraller Zirvesi (NPPES) dünyanın üçüncü büyük nükleer enerji etkinliğidir. Ülkemizde şimdilik yalnızca Akkuyu Nükleer Güç Santrali (NGS) bulunuyor ve o da henüz inşaat halinde. Buna rağmen, NPPES dünyanın üçüncü büyük nükleer etkinliği haline geldi. Dünyanın en büyük nükleer fuarı Fransa'da ve bu ülkede 58 nükleer reaktör bulunuyor. İkinci büyük etkinlik Rusya'da ve Rusya'da 38 tane nükleer enerji santrali var. NPPES ile amacımız dünyanın en prestijli sektörü olan nükleer enerjiyi Türk sanayicisine tanıtmak, nükleer enerji sektörünün Türkiye ekonomisine katkısını ortaya koymak, Türk sanayicisinin Akkuyu NGS'den daha fazla iş alabileceği bir ortam oluşturmaktır. Bunu çok iyi şekilde başarıyoruz. Türkiye'de yapılması planlanan Sinop ve İğneada Nükleer Santrallerinin hangi devletler ve firmalar tarafından yapılacağını netleşmesiyle NPPES etkinliğini artıracaktır. Son olarak NPPES, Türkiye'de nükleer enerjinin algıda tutundurulmasında ve nükleer enerjinin iletişim stratejilerine önemli katkılar sağlamakta ve destek olmaktadır.

◆ **ARGE DERGİSİ : Dünyada aktif olarak kaç tane nükleer reaktör işletme vardır ve ülkemizde kurulması planlanan nükleer santrallerin hedeflenen tarihleri hakkında bilgi verebilir misiniz?**

Alikaan ÇİFTÇİ : Dünya Nükleer Birliği'nin güncel verilerine göre, dünya çapında 32 ülkede 440 nükleer reaktör faaliyet gösteriyor. ABD 93 ünite ile faaliyette olan en fazla sayıda nükleer güç reaktörüne sahip ülke. Bu reaktörler 2022 yılında 2545 TWh elektrik sağladı, bu da dünya elektriğinin yaklaşık yüzde 10'u anlamına geliyor.

Dünya genelinde yaklaşık 60 reaktör yapım aşamasında. Ayrıca 110 reaktörün daha inşa edilmesi planlanıyor. Yapım aşamasında olan ya da planlanan reaktörlerin çoğu Asya'da bulunuyor. Son yıllarda devreye giren yeni santraller büyük ölçüde eski santrallerin emekliye ayrılmasıyla dengelendi. Son 20 yılda 108 reaktör emekliye ayrılırken 97'si faaliyete geçti.

Sorunuzun ikinci kısmına gelecek olursak ülkemizde kurulması planlanan nükleer santraller arasında Akkuyu NGS'nin inşaatı devam ediyor. Akkuyu NGS'de çok ciddi bir şekilde çalışmaların devam ettiğini biliyoruz. Yalnız çok büyük maliyetli yatırımlar olduğu için nükleer enerji santrallerinin tamamlanmasında hedeflenen zamanlarda sarkmalar olabilir. Uluslararası siyaset, uygulanan ambargolar veya iki ülke arasındaki siyasi ilişkilerdeki beklenmedik gelişmeler, savaşlar bu gibi yapıyı yüksek teknoloji gerektiren büyük yatırımların gecikmesine sebep olabilir. İngiltere ve Fransa'da inşaatı devam eden santraller için de bu sebepler geçerlidir.

Türkiye'de Sinop ve İğneada 'da nükleer santral kurulması konusu konuşulmakta. Bu iki projenin yapımı için Çin, Rusya ve Güney Kore'nin ismi geçmektedir.



• **ARGE DERGİSİ : Hâlihazırda kurulumu devam eden Akkuyu Nükleer Güç Santrali çalışmaları hakkında bilgi verebilir misiniz? Santral tamamlandığında ülke ekonomisine katkısının ne olacağından bahseder misiniz?**

Alikaan ÇİFTÇİ : Akkuyu NGS, Türkiye'nin bugüne kadar gerçekleştirdiği en büyük doğrudan yatırım projesi. Türkiye'nin enerji arzını çeşitlendirecek, enerjide dışa bağımlılığını azaltacak bir proje. Akkuyu NGS'nin ilk ünitesi için ilk parti taze nükleer yakıt 27 Nisan 2023 tarihinde teslim edildi. Yakıtın teslim edildiği andan itibaren Türkiye, Cumhuriyet'in 100. yıldönümünde nükleer enerjiye sahip bir ülke olarak yeni yüzyıla girdi ve nükleer kulübün yeni bir üyesi olarak tarihe geçti.

Akkuyu, aynı zamanda dünyanın "Yap, Sahip Ol, İşlet" modeliyle hayata geçirilen ilk nükleer santral projesi olma özelliği taşıyor. Her biri 1200 MW elektrik üretme kapasitesine sahip 4 üniteden oluşan Akkuyu NGS'nin toplam kapasitesi 4800 MW. Akkuyu NGS'nin planlanan 60 yıllık hizmet ömrü 20 yıl uzatılabilecek. Akkuyu NGS, İstanbul gibi büyük bir şehrin tüm elektrik ihtiyacını karşılayabilecek kapasiteye sahip olacak. Akkuyu NGS'nin inşaatı hızla devam ediyor. Çalışmalar, yüzde 80'i Türk vatandaşı olan en az 25 binden fazla kişinin bulunduğu dev bir ekiple 4 ünitelerde eş zamanlı olarak sürüyor. Sosyal Güvenlik Kurumu'na (SGK) göre Akkuyu NGS şu anda Mersin'deki en büyük işveren konumunda. Yaklaşık 200 Türk şirketi de Türkiye'nin uzun yıllara dayanan nükleer santral rüyasını gerçekleştirmek için var gücüyle çalışıyor. Akkuyu aynı zamanda 6,5 milyar dolarlık potansiyeliyle başarılı bir yerelleşme örneği.

Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında, Türkiye'nin karbonsuz sanayiye ulaşmasında Akkuyu NGS ilk ve örnek projedir. Bu anlamda Türkiye'nin ilk nükleer santrali, Akkuyu NGS, Türk firmaları için "gurur ve deneyim" projesine dönüştü. Projede bugüne kadar 4,3 milyar dolar tutarlık sipariş Türk firmalarla sözleşmeye bağlanmış veya imzalanma aşamasında bulunuyor. Akkuyu sayesinde Türk şirketleri nükleer alanda hangi malzemelerin nasıl üretilmesi gerektiği konusunda büyük deneyim kazanıyor. Böylece Akkuyu NGS sadece istihdama katkıda bulunmakla kalmıyor, Türk nükleer enerji sektöründe 'know-how' sağlıyor.

• **ARGE DERGİSİ : İklim değişikliği ile mücadelede konusunda nükleer enerjinin konumunu nasıl değerlendirirsiniz?**

Alikaan ÇİFTÇİ : Dünya yüksek karbon salınımıyla mücadele ederken nükleer enerjinin önemi daha fazla anlaşıldı. Tüm dünyada iklim değişikliğiyle mücadele için nükleer enerji yatırımlarının artarak devam edeceğini düşünüyoruz. İklim değişikliğiyle mücadelede nükleer enerjinin rolü kaçınılmaz. Rüzgâr ve güneş santralleri gibi nükleer santraller de karbondioksit salınımı yapmadığı için iklim değişikliğiyle mücadelede en önemli itici güçtür. Avrupa Birliği, Avrupa Yeşil Mutabakatı ile Ortadoğu ve Asya ülkelerinde iklim değişikliğiyle mücadelede daha fazla nükleer enerji yatırımı olacaktır. Bu mutabakat ile karbondioksit salımı olan ülkelerde, karbondioksit salımı yoğun olan sanayilerde üretilen ürünlerin Avrupa'ya girişi zorlaşacaktır. Bu sebeple özellikle küçük nükleer santral yatırımlarının organize sanayi bölgelerinin etrafına kurulup o bölgelerin ciddi anlamda itici gücü olacağını düşünüyoruz. Karbonsuz bir yaşam için de Türkiye'nin nükleer enerji santrallerinin sayısını artırması gerekiyor. AB Yeşil Mutabakatı ile nükleer enerji yeşil enerji olarak kabul edildi. Yeşil mutabakat ile bir sanayici Avrupa'ya bir ürün vermek istiyorsa, ürünün çıktığı fabrikanın karbon sıfır olması gerekir. Bu durum dünyadaki birçok denklemi değiştirdi. Bu, Türkiye için Türk sanayicisi için bir fırsat olabilir. Bu anlamda da Akkuyu NGS çevreye zararlı sera gazı emisyonuna yol açmadan, sıfır emisyonla kesintisiz elektrik üretebilecek olan santral, Türkiye'nin "2053 net sıfır emisyon" hedefine katkısıyla da öne çıkıyor.

◆ **ARGE DERGİSİ** : Son yıllarda popülaritesi artan Small Modular Reactors (SMR - Küçük Modüler Reaktörler) teknolojisi hakkında ne düşünüyorsunuz? SMR'lerin Türkiye'nin enerji portföyünde yer edinmesi olası mıdır?

Alikaan ÇİFTÇİ : Ülkemizin nükleer enerjideki ilk yatırımı olan Akkuyu NGS'nin üretime geçmesine az kaldı. Türkiye'nin nükleer enerji hamlesinin istikrarlı büyümesini yeni nükleer santraller ile SMR'lar ile sürdürmesini bekliyoruz. Türkiye bu konuda dünyadaki küresel oyuncularla görüşme halinde.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanımız Sayın Alparslan Bayraktar yaptığı açıklamada, “Hem enerji arz güvenliğimiz hem de 2053 karbon nötr hedefine ulaşabilmemiz için yeni dönem enerji stratejimiz içinde nükleer enerji önemli bir yer tutuyor. Yenilikçi tasarımları, modüler yapıları ve küçük boyutlarıyla SMR'ların da bu hedefin gerçekleşmesinde önemli bir yer tutacağını öngörüyoruz. Rolls-Royce Group ile de bu alanda olası işbirliklerini değerlendirme fırsatı bulduk” ifadelerini kullandı.

Türkiye artan enerji ihtiyacı ve karbon sıfır yol haritası nedeniyle SMR yatırımlarının artacağını öngörüyoruz. SMR'ler Türkiye'nin bir üretim üssü olmasını sağlayacak. AB, Çin ve Hindistan gibi kömüre dayalı ekonomilerden AB Yeşil Mutabakatı nedeniyle ürün almayacak, alsa bile gümrük vergisi uygulayacak. Bu sebeple Türkiye'de SMR yatırımları artacaktır. Diğer yandan Türkiye'de şu anda elektrikli araç yatırımları gündemde ve bu konuda devlet ciddi yatırım yapıyor. Elektrikli araç üretimi yapan firmalar da Türkiye'yi büyük bir pazar olarak görüyor. Bu durum Türkiye'nin elektrik ihtiyacını artıracak, elektrik altyapısının güçlenmesini sağlayacak. Bu sebeple SMR yatırımlarının ciddi şekilde ivmeleneyeceği düşünülmektedir.



◆ **ARGE DERGİSİ** : Yakıt çevriminde Toryumu da kullanabilen IV. Nesil reaktörlerden Ergimiş Tuz Reaktörleri (ETR) hakkındaki düşünceleriniz nedir?

Alikaan ÇİFTÇİ : Nükleer enerjinin geleceğinde IV. Nesil reaktörler de önemli söz sahibi olacak. Nükleer enerjiye geçişte maliyet-etkin bir strateji izlemek isteyen ülkeler; IV. Nesil enerji reaktörleri ile küçük modüler reaktörlere ilgi gösteriyor. Bu reaktörler, enerji sektörünün gelecek taleplerini karşılamada büyük bir potansiyele sahip.

Ergimiş Tuz Reaktörleri (ETR) konusunda da ülkemizde uzun yıllara dayanan bir çalışma geçmişi bulunuyor. Yakıt olarak toryum gibi kaynakları kullanabilen ETR'ler, Türkiye için cazip bir seçenek olarak öne çıkıyor. Ülkemiz toryum kaynakları açısından dünya çapında önemli bir potansiyele sahip, kendi kaynaklarımızı kullanarak üretim yapmak bize önemli bir stratejik güç kazandıracak.

Bu yeni nesil reaktörlerin güvenli, sürdürülebilir ve düşük maliyetli enerji üretimi sağlaması gibi birçok önemli avantajı da bulunuyor. İhtiyaca göre esnek ölçeklenebilirlikleri de çok kıymetli. Elektrik enerjisi ve ısı gibi ihtiyaçlar için gerektiği yere kolaylıkla kurulabilen bu reaktörler, konutlardan fabrikalara ve organize sanayi bölgelerine kadar geniş bir alanda enerji sağlama potansiyeline sahip. Ayrıca kurulum maliyetlerinde sağladıkları ekonomik avantajın yanı sıra düşük bakım maliyetleriyle de dikkat çekiyorlar. Türkiye'nin bu teknolojiyle 2030 yılında buluşmasını bekliyoruz ve bu adımın ülkemize önemli faydalar sağlayacağına inanıyoruz. Bu noktada Nükleer Sanayi Derneği olarak Figes Grubu'nun ThorAtom projesini heyecanla takip ediyoruz.





NPPES

NUCLEAR POWER PLANTS V. EXPO & IX. SUMMIT

21-22 JUNE, 2023 ISTANBUL



NIATR

NUCLEAR INDUSTRY
ASSOCIATION OF TURKEY



Ankara Sanayi Odası

Nükleer Sanayi Kümelenmesi
ASO



Ankara Sanayi Odası



ASO NÜKSAK

ANKARA SANAYİ ODASI NÜKSAK KÜMELENMESİ İLE ÖZEL RÖPORTAJ

• **ARGE DERGİSİ :** Öncelikle okuyucularımıza Ankara Sanayi Odası (ASO) ve nükleer teknolojiye dair çalışmalarından kısaca bahseder misiniz? Nükleer sanayi konusunda misyon ve vizyonunuz nedir?

ASO : ASO, 2017 yılından bu yana Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın Kümelenme Destek Programı kapsamında NÜKSAK Nükleer Sanayi Kümelenmesi Projesi'ni (ASO NÜKSAK) hayata geçirmiştir.

ASO NÜKSAK, Türkiye'de nükleer sanayi konusunda ilk ve tek nükleer küme olup 'milli küme' olarak adlandırılan özel bir konsepte sahiptir. 'Milli küme' tanımı ile kümemizin üyelerinin sadece Ankara firmaları ile sınırlı olmayıp, Türkiye'nin en büyük sanayi kentleri olan İstanbul, Kocaeli, Bursa, Adana, Mersin ve hatta Gaziantep'ten üyelerimizin olduğunu da altını çizmek isteriz. ASO NÜKSAK Türkiye'nin sanayide lider illerinden 75'ten fazla şirketin katılımıyla temsil edilmektedir.

Kümelenmenin temel amacı, Türkiye'de devam etmekte olan nükleer enerji santrali projelerinde yer alabilecek yerli ürünler konusunda Türk sanayisinin üretim kabiliyetini arttırmaktır.

2023 yılı Aralık ayında Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Kümelenme Destek programı yeni çağrı döneminde başvurusu yenilenen NÜKSAK Projesinin yeni dönem Misyonu, "NÜKSAK çatısı altındaki firmaların kümelenme ile edindikleri tecrübeleri, yerel ve küresel tedarik zincirlerinde kullanmak" Vizyonu ise "İklim değişikliği ile mücadelede nükleer enerjinin rolünü benimsemiş, nükleer tedarik zincirinde pay sahibi sanayi ile teknoloji transferi için öncülük etmek" olarak belirlenmiştir.

• **ARGE DERGİSİ :** Türkiye'nin Nükleer alanındaki çalışmalarını nasıl buluyorsunuz? Dünya da yapılan çalışmalar ile kıyasladığımızda hangi konularda ilerlememiz gerekmektedir?

ASO : İstikrarlı enerji üretimi, enerji arzının güvenilirliğini artırmakta, böylece ülkelerin enerji ihtiyaçlarına sürdürülebilir çözümler sunabilmektedir. Ayrıca, nükleer tedarik zincirinde sanayinin stratejik konumu ve aktif rolü, küresel enerji dönüşümünde öncü olmak için önemlidir. Bu aynı zamanda, yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesinde ve anılan teknolojilerin transferinde liderlik yapma imkanı da kazandırmaktadır. Bu liderlik sadece ulusal düzeyde değil, aynı zamanda uluslararası işbirlikleri ve ortaklıklar aracılığıyla da gerçekleşmelidir.

Türkiye yakın zamanda ilk nükleer güç santralini devreye alacak ve böylelikle küresel nükleer pazarda konumunu pekiştirecek. Mevcut sahaya ek olarak ikinci ve üçüncü nükleer güç santrallerinin de Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın açıklamaları doğrultusunda ülkemizin hedefleri arasında olduğu biliniyor. Bu çerçevede ülkemizdeki santrallerde yerli tedarikin artması ve tedarikçi firmalarımızın uluslararası işbirliklerinin geliştirilmesi önümüzdeki dönemlerde daha da önem arz edecektir.

• **ARGE DERGİSİ : Toryum Yakıtlı IV. Nesil Ergimiş Tuz Reaktörleri ile ilgili düşünceleriniz nedir?**

ASO : Sürdürülebilir kalkınma için küresel çabaların bir parçası olarak endüstri önemli bir rol oynamaktadır. Uluslararası düzeyde ise sürdürülebilir kalkınma ancak teknolojik bilgi paylaşımı ile mümkündür. İklim değişikliği ile mücadele ve endüstri ilişkisine baktığımızda ise karbon emisjonsuz enerji üretiminin temeli olan nükleer enerji özellikle yeni nesil reaktörlerle kritik bir konuma sahiptir.

Toryum yakıtlı IV. Nesil Ergimiş Tuz Reaktörleri temiz enerji üretimine geçişte önemli bir kilometre taşı olmaya adaydır. Bunun yanı sıra diğer yeni nesil reaktör teknolojileri ile eski jenerasyon reaktörlerin atıklarının yakıt olarak değerlendirilebilecek olması küresel enerji dengesini daha sürdürülebilir bir doğrultuya yönlendirecektir.

• **ARGE DERGİSİ : ASO olarak ülkemizde yapılan ve destek verdiğiniz nükleer projelerinden bahseder misiniz? Sanayi ve Teknoloji bakanlığından bu konuda destek alabiliyor musunuz?**

ASO : Röportajın başında da değindiğimiz gibi, ASO NÜKSAK, Türkiye'de nükleer sanayi konusunda ilk ve tek nükleer kümelenme projesi ve Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Programı çerçevesinde desteklenmekte. Bakanlık tarafından yapılan ilerleme değerlendirmelerinde Projemiz 5 yıllık destek süresine ek 1,5 yıl daha uzatma almaya hak kazanarak 2023 yılı sonuna kadar çalışmalarını destek kapsamında sürdürdü.



Bakanlık desteklerinin nükleer teknolojiler gibi kritik öneme sahip diğer kümelenme girişimleri için de sektörel farkındalık oluşturma ve ortak iş yapabilme kültürü geliştirmede kıymetli ve öncü olduğuna inanıyoruz.

• **ARGE DERGİSİ : Okuyucularımıza ASO-NÜKSAK kümelenmesi ve çalışmalarından bahsedebilir misiniz? Kümelenme grupları nasıl ve neye göre ayrılmaktadır?**

ASO : ASO NÜKSAK Kümelenmesi; bir nükleer santralde yer alabilecek tüm ekipman ve hizmet kollarında ihtiyacı karşılamak üzere farklı sanayi firmalarını bir araya getiren bir yapıdır. Proje “karmaşık analizler”, “nükleer kalite yönetim ve belgelendirme sistemleri”, “danışmanlık hizmetleri”, “nükleer sektöre özel eğitimler”, “paslanmaz çelik için Ar-Ge çalışmaları” ve teknik destek organizasyonuna yönelik altyapı faaliyetleri” gibi faaliyetleri yürütmek üzere kurulmuştur.

Kümelenmemiz ile eğitim, belgelendirme, danışmanlık ve altyapı konularında yetkinlik kazanmış Türk firmalar ile yerel nükleer tedarik zincirinin kurulması hedeflenmiştir.

NÜKSAK üyeleri, vana-pompa, boru bağlantı elemanı üreticileri, paslanmaz çelik üreticileri, elektronik ekipman tasarımcıları, yazılım geliştiriciler, mühendislik ve teknik destek hizmet sağlayıcılarının yanı sıra lojistik firmalarından oluşmaktadır.

Ayrıca, heyet ve saha ziyaretleri aracılığıyla yurt dışındaki nükleer sanayi alanında deneyimli üreticiler ile yerli firmaları bir araya getirerek uluslararası iş birliklerinin geliştirilmesi de Kümelenme çalışmalarımız içerisinde yer almaktadır.

Uluslararası işbirlikleri çerçevesinde Fransız Uluslararası Nükleer Enerji Enstitüsü I2EN ile 2016’da, Rosatom Teknik Akademisi ile 2018’de, Rus Malzeme Test Grubu Cniitmash ve Türkiye Enerji Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) ile 2019’da, İngiltere Nükleer Kümelenmesi BECBC ve ve Çek Enerji Endüstrisi Birliği CPIA ile 2022 yılında ve son olarak Kore Nükleer Derneği ile 2023’de olmak üzere uluslararası iş birliklerini geliştirmeye yönelik olarak İyi Niyet Anlaşmaları (Memorandum of Understanding-MoU) imzalanmış durumdadır.





◆ **ARGE DERGİSİ :** ASO olarak Türkiye’de Nükleer alanında çalışan işbirlikçi firmalarınız var mıdır?

ASO : Hem NÜKSAK üyelerinden hem de Odamız üyelerinden nükleer alanda çalışan tedarikçi ve işbirlikçi firmalar mevcut. Bu firmalardan ihale kazananların bir çoğu her yıl Odamız ve Nükleer Sanayi Derneği (NIATR) tarafından düzenlenen Nükleer Santraller Fuarı ve Nükleer Santraller Zirvesi’ne de katılım sağlıyor.

◆ **ARGE DERGİSİ :** ASO ve Nükleer Sanayi Derneği (NIATR) tarafından düzenlenen Nükleer Santraller Fuarı ve Nükleer Santraller Zirvesi’nin (NPPES) yerli firmalarımıza sağladığı katkılardan bahsedebilir misiniz?

ASO : Nükleer Santraller Fuarı ve Nükleer Santraller Zirvesi 10 yıldır başarıyla gerçekleştirilen ve uluslararası tanınırlığı olan bir etkinlik. Biz de Ankara Sanayi Odası olarak Nükleer Sanayi Derneği (NIATR) ile birlikte bu etkinliğin organizatörü olarak yer alıyoruz. Rusya, Güney Kore, Çin ve bir çok ülkenin nükleer sanayisi ile temsil edildiği Nükleer Santraller Fuarı ve Nükleer Santraller Zirvesi Türk sanayicilerini küresel tedarik zincirinin bir parçası olmak için fırsat sunuyor. NÜKSAK üyelerinin de ilgi ile takip ettiği bu etkinlik nükleer sektörde lider ülke temsilcilerine de ev sahipliği yaparak güncel gelişmeleri yakından takip etmemize imkan sağlıyor.

◆ **ARGE DERGİSİ :** Son olarak, nükleer enerjide ASO ve FİGES iş birliğiyle yürütülen faaliyetlerden bahsedebilir misiniz?

ASO : Projemiz üyelerinden olan Figes A.Ş.’nin uluslararası nükleer sınıfta ve ergimiş tuz reaktörlerinde kullanılabilecek bir eşanjör tasarımı yapmış olması, ülkemizdeki yetkinliklerin belli bir noktaya gelmiş olduğunun göstergesiydi. Buradan yola çıkarak, nükleer sektörde farklı birçok alanı içeren NÜKSAK faaliyetleri kapsamında IV. Nesil nükleer reaktörler ile ilgili yeni bir başlığı Mayıs 2021’de gerçekleştirdiğimiz basın sunuşu ile gündeme taşıdık. Türk akademisyenleri, sanayi, siyaset ve Hükümet temsilcilerini periyodik olarak çevrim içi toplantılar çerçevesinde bir araya getirdik.

2022 yılında düzenlenen Nükleer Santraller Fuarı ve Nükleer Santraller Zirvesi’nde; yerli ve milli ergimiş tuz reaktörü tasarımı konusunda uzmanlaşma hedefinde olan Figes A.Ş. ile NÜKSAK Nükleer Sanayi Kümelenmesi arasında ortak çalışmalar sürdürmek üzere karşılıklı niyet beyanımızı ifade eden bir İyi Niyet Anlaşması da imzalandı.

MILMAST

www.milmast.com



www.milmast.com

FTM

FOM

FHM



BuildUp Academy ile Kariyerine Yön Ver!

BuildUp Academy, mühendisleri ileri mühendislik yöntemleri ile sosyal ve yönetsel becerilerle donatıp, profesyonel çalışma hayatında dinamik olmalarını ve yerli teknolojimize yön veren yeni nesiller yetiştirmeyi amaçlamaktadır. Bu nedenle BuildUp Academy, MATLAB & Simulink Eğitimlerini planlamaktadır.

Eğitimler, MathWorks firmasının orijinal eğitim notları ve katılımcılara açılacak olan deneme lisansları ile ilerleyecektir. Ders saati 9.00-17.00 olarak belirlenmiştir. Eğitimlerimiz deneyimli ve alanında uzman mühendisler tarafından verilmektedir.

Her bir eğitim modülünü tamamlayan ve yeterli devamlılığı sağlayan katılımcılara programa "**Katılım Belgesi**" verilmektedir.

EĞİTİM ADI	EĞİTİM SEVİYESİ	EĞİTİM SÜRESİ
MATLAB'ın Temelleri	Temel	2 gün
MATLAB Coder ile MATLAB'den C'ye	İleri	2 gün
Sistem ve Algoritma Modellemesi için Simulink	Temel	2 gün
MATLAB ve Simulink ile Kontrol Sistemi Tasarımı	Orta	2 gün
Simulink ile C Kod Entegrasyonu	Orta	1 gün
Stateflow ile Lojik Temelli Sistemlerin Modellenmesi	Temel	2 gün
MATLAB ile Sinyal İşleme	Orta	2 gün
MATLAB ile Görüntü İşleme	Orta	2 gün
MATLAB ile Makine Öğrenmesi	Orta	2 gün
MATLAB ile Öngörücü Bakım	Orta	2 gün

● MATLAB'ın Temelleri

Teknik hesaplama dili ve platformu olan MATLAB'a kapsamlı bir giriş sağlar. Veri analizi, görselleştirme, modelleme ve programlama temaları ders boyunca incelenmektedir.

● MATLAB Coder ile MATLAB'den C'ye

MATLAB Coder kullanarak MATLAB kodundan C kodu üretmeye odaklanır.

● Sistem ve Algoritma Modellemesi için Simulink

Simulink blok diyagramlarını geliştirmek için temel modelleme tekniklerinin ve araçlarının nasıl uygulanacağını gösterir.

● MATLAB ve Simulink ile Kontrol Sistemi Tasarımı

MATLAB ve Simulink kullanarak kapalı çevrim kontrol sistemleri için tasarım sürecinin nasıl hızlandırılacağına dair genel bir anlayış sağlar.

● Simulink ile C Kod Entegrasyonu

C kodunu Simulink modellerine entegre etmek için C Caller ve C Function blokları, harici C fonksiyonları gibi birden fazla yöntem sunar.

● Stateflow ile Lojik Temelli Sistemlerin Modellenmesi

Stateflow kullanılarak karmaşık karar akışlarının ve sonlu durum makinelerinin nasıl uygulanacağını gösterir.

● MATLAB ile Sinyal İşleme

MATLAB, Signal Processing Toolbox ve DSP System Toolbox kullanarak sinyallerin nasıl analiz edileceğini ve sinyal işleme sistemlerinin nasıl tasarlanacağını gösterir.

● MATLAB ile Görüntü İşleme

Bu eğitim, görüntü analizi gerçekleştirme konusunda uygulamalı deneyim sağlar.

● MATLAB ile Makine Öğrenmesi

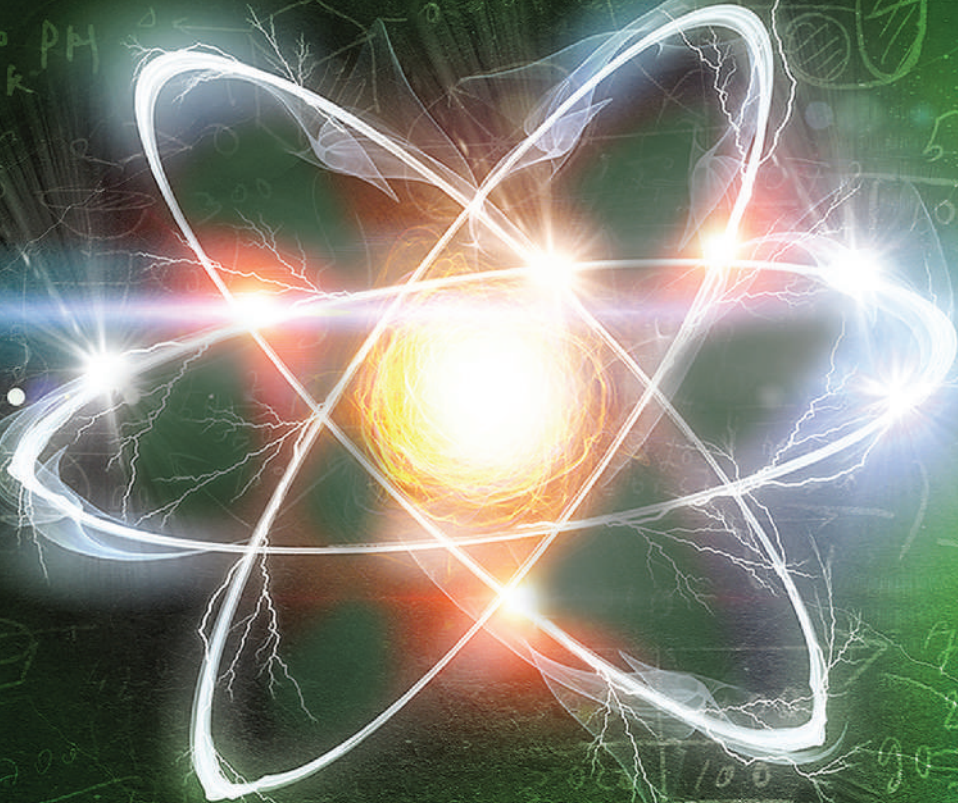
İstatistik ve Machine Learning Toolbox ve Neural Network Toolbox içindeki işlevleri kullanarak MATLAB'de veri analitiği ve makine öğrenimi tekniklerine odaklanır.

● MATLAB ile Öngörücü Bakım

Bu eğitim, kestirimci bakım ve durum izleme iş akışları için gereken veri analitiği, sinyal işleme ve makine öğrenimi tekniklerine odaklanır.

Sağdaki QR kodu okutarak www.buildupacademy.com web sitemiz üzerinden güncel eğitim takvimimize ulaşabilirsiniz.





Milli Nükleer Reaktör Projesi

Türkiye'nin Enerji İhtiyacı İçin 4. Nesil Ergimiş Tuz Reaktörü

İhsaniye Mah. İzmir Yolu Cd.
Efe Plaza No:116/12 16130
Nilüfer / BURSA

Tel: +90 (224) 442 85 85
info@thoratom.com
www.thoratom.com

Bizi Takip Edin!

