

Nükleer Araştırma Reaktörlerinin SMR Modellenmesi ve Geliştirilmesine Katkıları :

Řeř Nükleer Araştırma Enstitüsü (ÚJV Řeř) Örneęi

Doç. Dr. Mehmet BULUT - *Elektrik-Elektronik Mühendisi*

mehmet.bulut06@emo.org.tr

1. Giriş

Küçük Modüler Reaktörler (SMR), dünyada faaliyetinde olan geleneksel nükleer reaktörlere göre daha düşük güçte sahip genellikle 300 MWe altındaki modüler yapıda ve daha esnek kurulum seçenekleri sunan nükleer reaktörlerdir. Dünyada geliştirilmekte olan birçok farklı teknolojiye SMR'lerin geliştirilmesinde nükleer araştırma reaktörleri, deneysel altyapı, malzeme testleri ve güvenlik analizleri açısından önemli rol oynamaktadır.

Araştırma reaktörleri, genellikle elektrik üretimi için kullanılmayan çok çeşitli sivil ve ticari amaçlı nükleer reaktörleri ifade etmektedir. Güçleri daha yüksek olan test reaktörleri de bu kapsamda değerlendirilmektedir. Dünyadaki araştırma nükleer reaktörlerin çoğu araştırma ve eğitim, malzeme testleri veya tıp ve endüstri için radyoizotop üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Yetenekleri, nükleer endüstrinin yanı sıra füzyon araştırmaları, çevre bilimleri, ileri malzeme geliştirme, ilaç tasarımı ve nükleer tıp gibi birçok alanda uygulanmaktadır. Bunlar güç reaktörlerinden veya gemileri iten reaktörlerden çok daha küçük ve birçoğu üniversite kampüslerinde bulunmaktadır. Araştırma reaktörlerinin temel amacı, araştırma ve diğer amaçlar için bir nötron kaynağı sağlamaktır. Çıkışları (nötron ışınları), kullanıma bağlı olarak farklı özelliklere sahip olabilmektedir. Bunların kapasiteleri, birincil işlevi faydalı miktarda elektrik üretmek için ısı üretmek olan güç reaktörlerine kıyasla küçüktür. Esasen net enerji kullanıcılarıdır. Çoęunun termal gücü 100 MWt'a kadar çıkarken, tipik bir güç reaktörü için 3000 MWt (yani 1000 MWe) güç yeterlidir. Aslında dünyadaki faaliyette olan 227 araştırma reaktörünün toplam gücü 3000 MW'ın biraz üzerindedir.

Araştırma reaktörleri, güç reaktörlerinden daha basittir ve daha düşük sıcaklıklarda çalışmaktadır. Çok daha az yakıtı ihtiyaç duyarlar ve yakıt kullanıldıkça çok daha az fisyon ürünü oluşur. Diğer yandan, yakıtları genellikle %20'ye kadar U-235 içeren, yüksek analizli düşük zenginleştirilmiş

uranyum (HALEU) olarak bilinen daha zenginleştirilmiş uranyum gerektirir; ancak bazı eski reaktörler hala %93 U-235 kullanır. Ayrıca, çekirdeklerinde çok yüksek bir güç yoğunluğu vardır ve bu da özel tasarım özellikleri gerektirir. Güç reaktörleri gibi, çekirdeğin genellikle pasif olarak soğutulması gerekir ve yalnızca daha yüksek güçlü test reaktörlerinin zorunlu soğutmaya ihtiyacı vardır. Genellikle nötronları yavaşlatmak ve fisyonu artırmak için bir moderatör gerekir. Nötron üretimi ana işlevleri olduğundan, çoğu araştırma reaktörünün çekirdekten nötron kaybını azaltmak için bir reflektöre de ihtiyacı vardır.

Uranyum, U-235 izotopik oranı %20'nin altında kalırsa düşük zenginleştirilmiş olarak kabul edilir. Çoğu ticari reaktör, yakıt olarak %5'in altında düşük zenginleştirilmiş uranyum (DZU) kullanır ve bu genellikle "reaktör sınıfı uranyum" olarak da adlandırılır. Doğal uranyum genellikle yalnızca %0,72 oranında U-235 içerir ve çoğu reaktör yakıtında bu izotopun daha yüksek bir konsantrasyonuna ihtiyaç duyar. Uranyum zenginleştirme, U-235'in izotopik oranının yüzde 0,72'den daha yüksek bir orana çıkarıldığı işlemdir. U-235'in izotopik oranını artırmak için farklı yöntemler kullanılabilir. Genellikle sarı kek, uranyum hekzaflorür adı verilen gaz haline dönüştürölür. Bu gaz daha sonra hızlı dönen silindirlere (santrifüjlere) pompalanır; burada U-238 gibi daha ağır izotoplar silindirlerin duvarlarına doğru itilir ve daha hafif U-235 silindirlerin merkezinde kalır. Bu, daha yüksek U-235 konsantrasyonlarına sahip gazın "filtrelenmesini" ve toplanmasını sağlar.

Dünyadaki santrallerin %80'inin sadece iki benzer tipte olduğu güç reaktörlerine kıyasla, araştırma reaktörleri için çok daha geniş bir tasarım yelpazesi kullanılmaktadır. Yaygın bir tasarım (47 ünite), çekirdeği büyük bir su havuzunda bulunan bir yakıt elemanları kümesi olan havuz tipi reaktördür. Yakıt elemanları arasında kontrol çubukları ve deneysel malzemeler için boş kanallar bulunur. Her eleman, dikey bir kutu içinde birkaç (örneğin 18) kavisli alü-

minyum kaplı yakıt plakasından oluşur. Su, reaktörü hem yumuşatır hem de soğutur ve reflektör için genellikle grafit veya berilyum kullanılır, ancak başka malzemeler de kullanılabilir. Nötron ışınlarına erişim için açıklıklar havuzun duvarına yerleştirilmiştir. Tank tipi araştırma reaktörleri (21 ünite) benzerdir, ancak soğutma daha aktiftir.

TRIGA (Eğitim, Araştırma, İzotoplar, Genel Atomlar) reaktörü, 1960'tan beri üç nesil tasarımı devreye alınmış, yaygın bir havuz tipi tasarıma (36 ünite) sahiptir. Günümüzdeki zenginleştirme oranı %20'nin altındadır (HALEU). Çekirdek bir su havuzunda bulunur ve genellikle reflektör olarak grafit kullanılır. Diğer tasarımlar ağır su (yaklaşık 10 ünite) veya grafit ile yumuşatılır. Birkaçı, yavaşlatıcı gerektirmeyen ve yakıt olarak uranyum ve plütonyum karışımı kullanabilen hızlı reaktörlerdir. Homojen tip reaktörler, yaklaşık 300 mm çapında bir tankta bulunan, sıvı halde uranyum tuzlarından oluşan bir çözeltiden oluşan bir çekirdeğe sahiptir.

Araştırma reaktörleri birçok konuda olduğu geliştirme amaçlı kullanılmakla birlikte, bunlardan malzeme test reaktörlerinde (MTR), malzemeler değişiklikleri incelemek için yoğun nötron ışınımına da tabi tutulur. Örneğin, bazı çelikler kırılma direnci gelir ve nükleer reaktörlerde kırılma direnci alaşımlar kullanılmalıdır. Fransa, Cadrache'de 100 MWt'lik Jules Horowitz reaktörünün inşasını amaçlayan uluslararası proje , IV. Nesil nükleer santral-lerde hayati önem taşıyacak malzemeler üzerinde araştırma yapılmasını sağlayacaktır. Güç reaktörleri gibi, araştırma reaktörleri de nükleer silah üretme potansiyelleri nedeniyle IAEA güvenlik denetimleri ve önlemleri kapsamındadır.

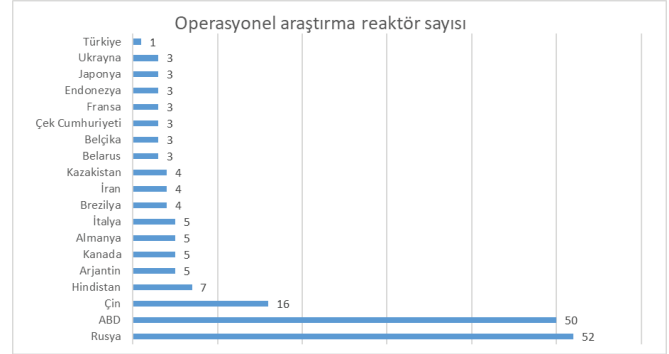
2. Dünyadaki Araştırma Reaktörleri

IAEA Araştırma Reaktörü Veritabanı (RRDB), dünyadaki kritik ve alt kritik montajlar da dahil olmak üzere Araştırma Reaktörleri hakkında yetkili düzeyde teknik bilgiler içeren veritabanıdır. Bu veritabanına göre Dünyada 72 ülkede 847 araştırma reaktörü bulunmaktadır.

Halen faaliyette olan, 54 ülkede 227 adet araştırma reaktörü bulunmaktadır. İnşaat halinde veya planlanmış 18 ülkede 23 adet reaktör ve geçici veya kalıcı olarak kapatılmış olan 28 ülkede 73 reaktör bulunmaktadır. Araştırma reaktörlerinin çoğu (160'tan fazla) esas olarak araştırma amaçlıdır, ancak bazıları radyoizotop da üretebilir. Pahalı bilimsel tesisler oldukları için genellikle çok amaçlıdırlar ve çoğu 30 yıldan uzun süredir faaliyet göstermektedir. Hizmet dışı bırakılmış olan 37 ülkede 524 araştırma reaktörü bulunmaktadır. Araştırma reaktörlerinin çoğu (160'tan fazla) esas olarak

araştırma amaçlıdır, ancak bazıları radyoizotop da üretebilir. Pahalı bilimsel tesisler oldukları için genellikle çok amaçlıdırlar ve çoğu 30 yıldan uzun süredir faaliyet göstermektedir.

Şekil1. Operasyonel olarak faaliyette olan araştırma reaktörleri



Veri tabanında yer alan Türkiye ve Çek Cumhuriyetinde bulunan araştırma reaktörleri ile ilgili bilgiler tablolarda verilmiştir. <https://nucleus.iaea.org/rrdb/home>

Tablo 1. Türkiye'deki nükleer araştırma reaktörleri

Tesis Adı	Şehir	Tip	Termal Güç (kW)	Durumu
TR-2, Turkish Reactor 2	Istanbul	POOL, MTR	5000	Uzun Süreli Kapanma
ITU-TRR	Istanbul	TRIGA MARK II	250	Faaliyette
TR-1	Istanbul	POOL	1000	Devre Dışı

Tablo 2. Çek Cumhuriyeti'ndeki nükleer araştırma reaktörleri

Tesis Adı	Şehir	Tip	Termal Güç (kW)	Durumu
LR-0	Husinec-Rez	POOL - VARIABLE CORE	5	Faaliyette
VR-2	Prag	SUBCRIT	0	Faaliyette
VR-1	Prag	POOL	0.5	Faaliyette
LVR-15 Rež	Rež	TANK WWR	10000	Faaliyette

SR-0	Plzen	POOL	1	Devre Dışı
TR-0	Prag	TANK	0.3	Devre Dışı

3. Türkiye'deki Nükleer Araştırma Reaktörleri

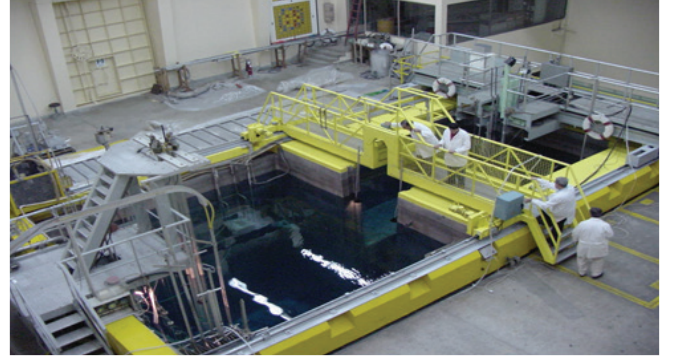
1959 yılında ülkemizin ilk nükleer tesisi olan 1 MW gücündeki TR-1 araştırma reaktörünün temeli atılmış, Yerleşkenin adı, "atom reaktörü" projesinin ismi, bulunduğu yere ve verilen görevlere izafeten "Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi" olarak belirlenmiştir. Nükleer enerjinin araştırma amaçlı kullanımına gerek olan şartların başında gelen araştırma reaktörleri açısından ise Türkiye ÇNAEM bünyesinde kurulan 1 MW gücündeki TR-1 araştırma reaktörü 6 Şubat 1962 tarihinde kritik olmuştur.

Dönemin Başbakanlık Atom Enerjisi Komisyonu tarafından 1972 'de yayınlanan İlerleme Raporunun giriş kısmında, "Üretmekte olduğu tıbbî radyoizotopların mikdârı bakımından ÇNAEM (yaptığımız incelemelere binâen) gerek Balkanlar, gerek yakındaki ve gerekse ortaöğüdaki benzer merkezlerle nisbetle çok ileri ve müstesna bir mevki işgal etmeğe muvaffak olmuş bulunmaktadır. Radyoizotop Üretim Bölümünde hâlen projelendirilmesi ve inşai sürmekte olan 1-131 ve Hg-197 hücreleri 1973 içinde hizmete girecek ve bazı etiketlenmiş bileşikler de aynı yıl imâl edilmeye başlanacaktır." denilmiştir. Araştırma olanakları geniş olan TR-1 reaktörü 15 yıldan fazla çalıştıktan sonra 19 Eylül 1977'de kapatılmıştır.

Türkiye'deki nükleer alandaki çalışmaları hızlandırmak, artan radyoizotop ihtiyacının karşılanması amacıyla aynı bina ve havuz içine daha yüksek güçlü ikinci bir reaktörün yapılmasına karar verilmiş ve 1984 yılında 5 MW gücündeki TR-2 araştırma reaktörü tam kapasite ile hizmete alınmıştır. TR-2 Araştırma Reaktörü 5 MW ısı gücünde, düşük zenginlikli Uranyum yakıtlar kullanılan, açık havuz tipi bir araştırma reaktörüdür. Nükleer teknolojinin yurt içinde gelişmesini sağlamak için temel araştırma ve geliştirme çalışmalarının yürütülmesi, tıp ve endüstri alanlarında kullanılan radyoizotopların üretimi ve üretim teknikleriyle ilgili araştırmaların yapılması, nükleer alanda çalışacak personelin yetiştirilmesi amacıyla işletmeye alınmıştır. 1995 yılında reaktör binasının sismik değerlendirmesinin yapılması için reaktör çalışmaları düşük güce indirilmiştir. Reaktör düşük güçlerde test, analiz ve eğitim ihtiyaçlarına göre çalıştırılmaktadır. TR-2 araştırma reaktörü ulusal ve uluslararası mevzuatlarda belirlenen koşullara uygun olarak işletilmektedir.

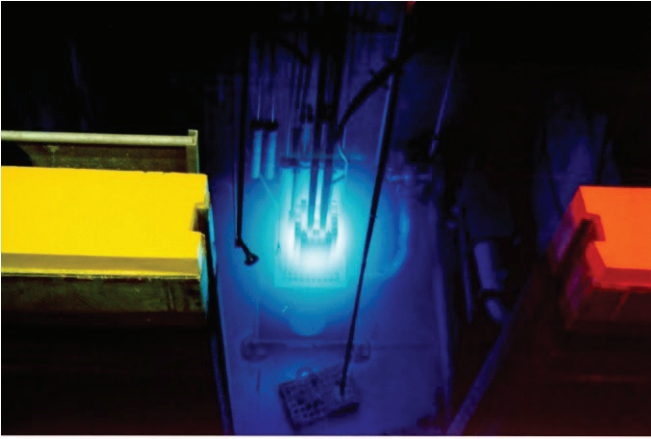
Nükleer araştırma ve hizmet amaçlı ülkenin en yüksek nötron akısı sağlayan tesisi durumundadır. Reaktörde genel olarak; Tıpta ve endüstride kullanılan radyoizotopların üretimi, Nötron aktivasyon analizleri için örnek ışınlamaları, Termohidrolik ve nötronik hesapların deneysel uygulamaları ve nükleer teknolojiyle ilgili diğer araştırma faaliyetleri gerçekleştirilmektedir.

Şekil 2. TR-2 Nükleer Araştırma Reaktörü



İTÜ Üniversitesi bünyesinde yer alan TRIGA Mark-II Reaktörü ise, 11 Mart 1979 tarihinde kritik yapılmış ve TRIGA reaktörlerinin 54'üncüsü olarak işletmeye açılmıştır. TRIGA adı "Training Research Isotope Production General Atomic" kelimelerinin ilk harflerinden meydana gelmekte olup Mark-II ise, çeşitli TRIGA reaktör tipleri arasında yer seviyesi üstünde inşa edilen bir türünü tanımlamaktadır. İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü; hafif su soğutuculu, grafit yansıtıcı ve zenginleştirilmiş uranyum yakıtın zirkonyum-hidrit yavaşlatıcı ile homojen bir şekilde karıştırılmasıyla meydana gelen katı yakıt elemanları ile çalışan açık tank tipi bir reaktördür.

Reaktör, sürekli (steady-state) ve darbeleri (pulsing) modda çalıştırılabilir. Sürekli çalışmada 250 kW ve darbeli çalışmada ise çok kısa bir zaman aralığında 1200 MW güç seviyelerine çıkmaktadır. Reaktörde meydana gelen herhangi bir ani güç artması, aynı anda yakıt-yavaşlatıcının sıcaklığının artmasına ve bunun neticesinde de yavaşlatıcının yavaşlatma özelliğinin azalmasına, ani olarak reaktivitenin düşmesine neden olmakta ve milisaniyeler mertebesinde bir zaman süresinde reaktör gücü otomatik olarak azalmaktadır. Bu özellik yalnız TRIGA reaktörlerinde vardır ve bu nedenle de "kendiliğinden güvenli reaktörler" diye de tanımlanmaktadır.



4. Çek Cumhuriyeti : ÚJV Rez Nükleer Araştırma Enstitüsü

Çek Cumhuriyeti şu anda elektriğinin yaklaşık üçte birini, 1985-1987 yılları arasında faaliyete geçen Dukovany NGS'deki dört VVER-440 ünitesinden ve 2000 ve 2002 yıllarında faaliyete geçen Temelín NGS'deki iki VVER-1000 ünitesinden sağlamaktadır.

Son yıllarda dünyada 300 MWe'ye kadar güç çıkışına sahip küçük nükleer reaktörler ve bunların enerji temininde kullanımının ilgi görmesi sebebiyle, Çek Cumhuriyeti enerji sektöründe araştırma reaktörleri, özellikle merkezi ısıtma tedariği alanında, küçük nükleer reaktörlerin araştırılması ve bunların kullanım olanakları üzerinde çalışmaktadır. ÚJV Řež'deki araştırmalar basınçlı tipteki küçük ölçekli nükleer reaktörler, ağır metal hızlı reaktörler ve ayrıca gaz soğutmalı yüksek sıcaklık reaktörleri üzerine yoğunlaşmaktadır.

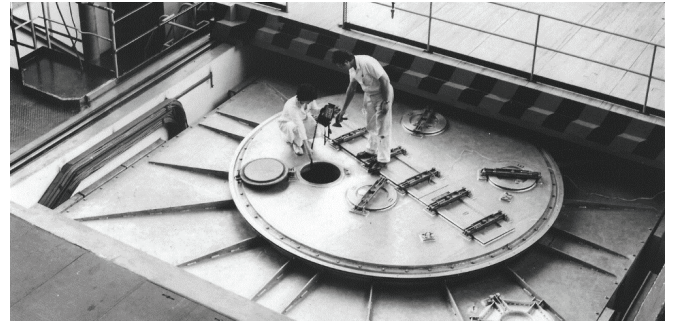
Araştırma reaktörlerinde aşağıdaki alanlarda çalışmalar yürütülmektedir:

- Nükleer yakıt ve yakıt çevrimleri,
- İnşaat malzemeleri ve işletme koşullarındaki davranışları,
- Güvenlik analizleri ve değerlendirmeleri,
- Çek Cumhuriyeti'nin enerji ekonomisinde uygu-

lama olanakları (elektrik, ısı, diğer uygulamalar),

- Çek Cumhuriyeti'nin enerji mühendisliğine uygunluğu açısından küçük reaktör kavramlarının değerlendirilmesi,
- Yerleştirme sorunları, çevre ile etkileşimler, çevresel etki değerlendirmesi,
- Çek sanayisinin ekipman üretimi ve tedarikine katılım olanakları.

Rez Nükleer Araştırma Enstitüsü Řež plc (Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., ÚJV) 1955 yılında Çekoslovakya ve Sovyetler Birliği arasında yapılan bir anlaşma ile kurulmuş ve daha sonra Çekoslovakya Bilimler Akademisi'ne dahil edilmiştir. O zamanki Sovyetler Birliği'nin desteğiyle, Çekoslovakya hükümeti Nükleer Fizik Enstitüsü adlı bir nükleer araştırma tesisi kurmaya karar vermiş, Haziran 1955'te nükleer fizik, radyokimya, nükleer enerji mühendisliği alanında araştırma faaliyetlerini geliştirmek ve radyoizotopların kullanımının geliştirilmesi ve üretimiyle ilgili olarak kurulmuştur. 1957'de burada VVR-S araştırma reaktörü (bugün LVR-15) başlatılmış ve Çekoslovakya'daki ilk nükleer fisyon reaksiyonu gerçekleştirmiştir. İlerleyen yıllarda enstitü genişlemiş, ismi ve kurucuları değişmiş, 1972 yılından itibaren Nükleer Araştırma Enstitüsü ismi kullanılmaya başlanmıştır. Rez'de şu anda iki araştırma reaktörü faaliyettedir: Eylül 1957'de kritik hale gelen 10 MWt LVR-15 ve 5 kWt LR-0 (kritiklik 1982)



Rež Nükleer Araştırma Enstitüsü giderek esas olarak bir mühendislik şirketi haline gelmiş, yurt içi ve yurt dışı pazarlardaki ticari faaliyetlere girişmiştir. Araştırma projelerini gerçek pratiğe dönüştürme yeteneği, şirketin temel rekabet avantajlarından biri haline gelmiştir. Proje faaliyetlerine, enerji tesislerinin güvenliğine ve verimli çalışmasına, malzeme mühendisliğine ve radyoaktif atık yönetimine yönelik temel yönelim, özellikle PET (pozitron emisyon tomografisi) için radyofarmasötiklerin geliştirilmesi ve üretimini de içerecek şekilde genişlemiştir.

Günümüzde, LVR-15 ve LR-0 araştırma reaktörleri, teknolojik döngüler, sıcak odalar ve çok çeşitli son teknoloji donanımlı laboratuvarlar içeren benzersiz bir deneysel altyapıya sahiptir. Rež reaktörleri teknolojileri altyapının temel direkleri arasındadır. LVR-15 reaktörü öncelikle malzemelerin ısınması, radyofarmasötiklerin üretimi ve nötron radyografisi ve nötron ışınlarının diğer uygulamaları kullanılarak yapılan deneyler için kullanılmaktadır. LR-0 reaktörü ise, nötron-fiziksel özelliklerinin doğrulanması için güç reaktörlerinin hemen hemen her konfigürasyonunun modellenebileceği dünyadaki en esnek deneysel reaktörler arasındadır. LR-0 reaktörü, tüm işletme durumlarında nükleer güvenliğin sağlanması yönünden ve ayrıca VVER tipi çekirdeklerin fiziksel araştırmalarına yönelik olarak tasarlanmıştır. LR-0 reaktörü esas olarak VVER-1000 ve VVER-440 reaktörlerinin çekirdekleri, depolama şebekeleri ve model deneyleri üze-

rine araştırma yapmak için kullanılmaktadır.

Bu araştırma reaktörleri dışında, Çek Cumhuriyetinde Ocak 2020'de nükleer araştırma enstitüsü UJV Rez, 20 MWt kapasiteli ve yedi yıllık yakıt döngüsüne sahip Energy Well adlı florürlü yüksek sıcaklık SMR tasarımının patentini aldı. Mayıs 2021'de UJV Rez, 2035 yılına kadar ısıtma ve endüstriyel sektörlere yönelik yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktör (HTR) tasarlama projesini duyurdu. HeFasto projesi, 900 °C'ye kadar çalışan 200 MWt'lik bir reaktör geliştirmeyi amaçlamaktadır. Isıtma, kojenerasyon ve kimya endüstrisi için üç versiyon sunulacak. Macaristan, Polonya ve Slovakya tarafından da desteklenen ve 2015 yılında Slovakya'da kurulan V4G4 Mükemmeliyet Merkezi'ne odaklanan 50-100 MWt'lik gaz soğutmalı hızlı bir reaktör geliştirmek için Allegro projesinden yola çıkmıştır. Mart 2022'de CEZ atarında, Temelin sahasında gelecekte ülkenin ilk SMR'lerinin inşası için kullanılacak bir arazi alanı ayırdığı belirtilmiştir.

Nükleer araştırma reaktörleri, SMR teknolojisinin olgunlaşmasında temel yapı taşlarını oluşturmaktadır. Deneysel doğrulama, güvenlik analizleri ve yeni tasarımların test edilmesi gibi kritik alanlarda bu reaktörler, SMR'lerin ticari ve güvenli biçimde hayata geçirilmesine olanak tanımaktadır. SMR'ler, düşük güçte, modüler ve güvenli yapılarıyla geleceğin enerji sistemlerinde önemli bir rol üstlenmektedir. Avrupa'da bu teknolojinin öncülerinden biri olan ÚJV Rež, hem araştırma altyapısı hem de özgün tasarımlarıyla SMR gelişimine yön vermektedir. Rez UJV'nin SMR Alanındaki Faaliyetleri :

- **HeFASTo:** Gaz soğutmalı hızlı reaktör (GFR) teknolojisine dayalı SMR konsepti. Yüksek sıcaklıkta çalışabilen, pasif güvenlik sistemleriyle donatılmıştır.

- **ALLEGRO:** Avrupa'nın GFR demonstrasyon reaktörü. SMR'lerin güvenlik ve verimlilik testleri için temel oluşturur.

- **CR-100:** 100 MWt kapasiteli, şehir merkezlerine yakın kurulabilen, pasif güvenli SMR tasarımı.

CR-100 gibi projeler, SMR'lerin şehir içi enerji altyapısına entegre edilmesini mümkün kılarken, HeFASTo ve ALLEGRO gibi konseptler geleceğin reaktör teknolojilerine yön vermektedir.

ÚJV Rež'deki yeni nesil reaktör araştırmaları kapsamında şu anda uluslararası "V4G4 Mükemmeliyet Merkezi" derneği bünyesinde helyumla soğutulan hızlı nötron spektrumlu (GFR - Gaz Hızlı Reaktörü) gösteri amaçlı yüksek sıcaklık reaktörü ALLEGRO'nun konseptinin geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu kapsamda enstitü tarafından; Reaktörle-



rin kavramı ve güvenliği: Mevcut IV. Nesil reaktör konseptlerini değerlendirilerek, detaylı teknik çözümler önerilmektedir. İşletme ve acil durum koşullarında birincil devre davranışının termohidrolik hesaplamaları gerçekleştirilmekte, çekirdek erimesiyle sonuçlanan ciddi bir kazanın seyri ve sonuçları analiz edilerek ve bu reaktörlerin değerlendirilmesinde Olasılıksal güvenlik değerlendirmesi (PSA) yöntemlerinin kullanımına ilişkin sorunları çözümlenmektedir. Teknolojik ve deneysel destek: Hesaplamalı araçların doğrulanması ve geçerliliğinin sağlanması ve çalışma modlarının ve teknoloji sistemlerinin doğrulanması için deneysel cihazların tasarımı da dahil olmak üzere helyum teknolojisi için destek sağlanmaktadır.

CR-100, ÚJV Řež tarafından geliştirilen ve Avrupa'nın şehir içi enerji altyapısına entegre edilebilecek şekilde tasarlanmış yenilikçi bir **Küçük Modüler** Reaktör (SMR) konseptidir. CR-100, özellikle **şehir merkezlerinde elektrik ve ısı ihtiyacını karşılamak** üzere tasarlanmıştır. Bu reaktör, elektrik üretimi, bölgesel ısıtma ve pembe hidrojen üretimi gibi çoklu enerji hizmetleri sunmak üzere tasarlanmıştır. CR-100, SMR teknolojisinin şehir içi enerji çözümlerine entegre edilmesinde öncü bir tasarımdır. Mimari sadeliği, pasif güvenlik sistemleri ve çoklu enerji üretim kapasitesi ile hem teknik hem stratejik açıdan yüksek potansiyele sahiptir. ÚJV Řež'in bu alandaki çalışmaları, Avrupa'nın SMR dönüşümünde kritik bir rol oynamaktadır.

5. Sonuç ve Değerlendirme

Nükleer araştırma reaktörleri, SMR'lerin modellemesinde ve geliştirilmesinde, nükleer Ar-Ge faaliyetlerinin ayrılmaz bir parçası olarak çok yönlü ve kritik roller üstlendiği gözlemlenmektedir. Yeni nesil reaktör tasarımlarının test edilmesi, pasif güvenlik sistemlerinin deneysel doğrulanması, yeni nesil yakıt ve materyal teknolojilerinin geliştirilmesi, gelişmiş simülasyon araçlarının kalibrasyonu ve kalifiye insan gücünün yetiştirilmesi gibi alanlarda sağladıkları katkılarla, SMR'lerin güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak ticarileşmesinin önünü açmaktadır.

Çekya'daki Řež Nükleer Araştırma Enstitüsü (ÚJV Řež) gibi önemli kuruluşlar, kendi araştırma reaktörleri ve uzmanlıklarıyla bu alana önemli katkılar sağlamaktadır. Bu anlamda araştırma reaktörleri, SMR teknolojisinin olgunlaşması ve gelecekteki enerji portföyündeki yerini alması için vazgeçilmez bir Ar-Ge altyapısı sunmaktadır. Bu araştırmalar, SMR'lerin güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak ticarileşmesinin önünü açmaktadır.

Türkiye'nin mevcut nükleer araştırma reaktörü

altyapısı ise sınırlı fakat stratejik öneme sahiptir. İstanbul'da yer alan İTÜ TRIGA MARK-II Reaktörü hâlâ faaliyettedirken, TR-1 kapatılmış ve TR-2 uzun süreli kapanma sürecine alınmıştır. Bu durum, SMR teknolojisinin yerli geliştirilmesi açısından altyapı ve deneysel kapasite bakımından güçlendirme ihtiyacına işaret etmektedir. Türkiye, modern güvenlik sistemleri ve yüksek nötron akısı sağlayan yeni bir çok amaçlı araştırma reaktörü yatırımını gündeme almalıdır. Bu reaktör, SMR prototiplerinin termohidrolik, nötronik ve malzeme davranışı testlerine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır.

Çekya Cumhuriyeti'ndeki LVR-15 ve LR-0 gibi reaktörler, hem endüstriyel hem akademik çıktılar üreten hibrit yapılar sunmaktadır. TRIGA gibi eğitim ve radyoizotop üretimini birleştiren reaktör tiplerinin ötesine geçilerek, termik sistemler, hidrojen üretimi ve malzeme ısınması gibi alanlara hitap edecek bir mimari benimsenmelidir. Bu anlamda Türkiye, Çekya Cumhuriyeti'nin Allegro ve HeFASTo gibi projelerine gözlemci veya teknik ortak olarak dahil olması, bu konularda daha hızlı yol almasını sağlayacak, uzun vadede Avrupa SMR altyapısının bir parçası olmak, yerli tasarımın geliştirilmesini kolaylaştıracaktır.

Türkiye'nin SMR teknolojilerine bu yönde yönelik atacağı adımlar, Çekya Cumhuriyeti örneğinde olduğu gibi, deneysel altyapı ve sektörler arası işbirliği Türkiye'nin sürdürülebilir ve güvenli SMR sistemleri geliştirmesi için kritik bir temel oluşturacaktır.

Kaynaklar :

- <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/research-reactors>
- <https://www.ujv.cz/en/akordeonovy-seznam/male-vyzkumne-reaktory-1-10817>
- <https://holtecinternational.com/2022/10/25/holtec-advances-project-delivery-plan-for-smr-160-in-czech-republic/>
- <https://www.neimagazine.com/news/rolls-royce-selected-for-czech-smr/>
- <https://holtecinternational.com/2022/10/25/holtec-advances-project-delivery-plan-for-smr-160-in-czech-republic/>
- <https://www.neimagazine.com/news/rolls-royce-selected-for-czech-smr/>
- <https://nuken.tenmak.gov.tr/tr/tesisler/aras-tirma-reaktoru.html>
- <http://www.triga.itu.edu.tr/>
- <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/czech-republic>