

# NÜKLEER ENERJİNİN YENİ NESLİ: KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER

TREND ANALİZİ HAZİRAN 2022





İşbu eserde yer alan veriler/bilgiler, yalnızca bilgi amaçlı olup, bu eserde bulunan veriler/bilgiler tavsiye, reklam ya da iş geliştirme amacına yönelik değildir. STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş. işbu eserde sunulan verilerin/ bilgilerin içeriği, güncelliği ya da doğruluğu konusunda herhangi bir taahhüde girmemekte, kullanıcı veya üçüncü kişilerin bu eserde yer alan verilere/bilgilere dayanarak gerçekleştirecekleri eylemlerden ötürü sorumluluk kabul etmemektedir. Bu eserde yer alan bilgilerin her türlü hakkı STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş.'ye aittir. Yazılı izin olmaksızın işbu eserde yer alan bilgi, yazı, ifadenin bir kısmı veya tamamı, herhangi bir ortamda hiçbir şekilde yayımlanamaz, çoğaltılamaz, işlenemez.



## 1. GİRİŞ

İnsanlık tarihi, enerjinin farklı formları keşfedildikçe gelişmiştir. Daha fazla enerji elde etmek için yapılan çalışmalar mevcut kaynakların verimli kullanılmasına veya yeni kaynakların ortaya çıkarılmasına imkân vermektedir.

Bilinen enerji kaynakları içinde en güçlülerinden biri de nükleer enerjidir. Nükleer enerji bir ülkeyi aydınlatmaya yetecek elektriği sağlayabilirken, aynı zamanda bomba şeklinde kullanılarak bir şehri uzun yıllar yaşanmaz hâle getirebilir. Nükleer enerji santralleri ürettikleri yüksek güçlü enerjiyi ülkeleri kalkındırmak için kullanırken, emniyet sistemleri doğru kullanılmazsa ve bakımlar ihmal edilirse, Çernobil ve Fukuşima’da yaşanan kazalar gibi doğanın dengesini bozacak güçte etkiler yaratabilmektedir.

İlk olarak 1950’lerde inşa edilen nükleer reaktörlerden 60 MWe enerji elde edilebilirken, bu rakam artık 1.600 MWe’lere ulaşmıştır. Büyük reaktörlerin yanı sıra gelişimi devam eden Küçük Modüler Reaktörler (Small Modular Reactors -SMRs) alternatif güçlü enerji üretimi için umut vadetmektedir<sup>[1]</sup>.

Geçmişin büyük nükleer enerji santrallerinde yaşanan kazalar, yüksek işletme ve bakım maliyetleri ve çevresel risk etmenleri zamanla bu santrallerin gözden düşmesine neden olmuştur. 1996’da küresel ölçekte üretilen elektriğin yüzde 17,5’i nükleer santrallerden elde edilirken bu oran 2020’lerde yüzde 10 civarına gerilemiş ve düşmeye devam etmektedir. Her ne kadar çevresel riskler temel etmenmiş gibi görünse de, bu düşüşteki asıl pay yüksek işletme ve bakım maliyetlerinden kaynaklanmaktadır<sup>[2]</sup>.

Günümüzde büyük santraller yerine alternatif olarak tercih edilmeye başlayan küçük modüler reaktörlerin ne olduğu, pazar özellikleri ve gelişim durumlarının detaylı bir şekilde incelenmesi geleceğin güvenli ve güçlü enerji üretim araçlarını anlamak açısından önemlidir.

## 2. KÜÇÜK MODÜLER NÜKLEER REAKTÖR NEDİR?

Nükleer enerji reaktörleri büyük, orta ve küçük olarak sınıflandırılmaktadır. Güç kapasitesi 300 MWe’nin altında olan nükleer reaktörler küçük sınıfta yer almaktadır. Küçük modüler reaktörler hem özel sektör hem de kamu tarafından ilgiyle karşılanmaktadır. Dünya genelinde 70’den fazla ticari küçük modüler reaktör tasarımı bulunmaktadır. Bu tasarımlar elektrik üretiminden hibrid enerji sistemlerine, ısıtmadan deniz suyu arıtma ve buhar üretimiyle sanayi alanında kullanıma kadar birçok alanda değerlendirilmektedir<sup>[3]</sup>.

Bilinen en eski küçük modüler reaktör, Rus yapımı olan EGP-6’dır. Eski Rus tasarımı olan RBMK model konvansiyonel nükleer reaktörün küçültülmüş versiyonu olan EGP-6, su ve grafit soğutma sistemiyle çalışmaktadır. EGP-6, Perma-Frost adı ile bilinen ve 0 santigrat derecenin altında bulunan bir bölge için tasarlanmış tek küçük modüler reaktördür. 1974-1977 yılları arasında faaliyete geçen Bilibino Nükleer Enerji Santrali’nde dört adet olarak faaliyet gösteren EGP-6’ların 2020 yılı ile birlikte çalışmalarının durdurulması ve yeni nesil Akademik

Lomonosov Yüzen Nükleer Enerji Santrali ile enerji üretimi bakımından yer değiştirmesi planlanmış olmasına rağmen 2025 yılı sonuna kadar faaliyeti uzatılmıştır<sup>[4]</sup>.

Küçük modüler reaktörler aslında nükleer füzyon reaktörlerinin bir çeşididir. Genellikle bir tesiste üretildikten sonra kullanılacağı yerde montajı yapılabilen küçüklükte olan bu reaktörler, öncelikli olarak düşük maliyetleri ve akabinde karbon izi bakımından çevre dostu olmaları nedeniyle tercih edilmeye başlanmıştır.

Küçük modüler reaktörler konvansiyonel nükleer santraller gibi termal enerjinin ürettiği buhardan faydalanarak elektrik ve diğer enerjileri ortaya çıkarmakta kullanılır<sup>[5]</sup>.

Nükleer reaktörlerin küçük boyutlarda tasarlanması 1960'lı yıllarda Hafif Su Reaktörü (Light Water Reactor -LWR) teknolojisi yardımı ile gelişmiştir. Küçük modüler reaktörlerin bu teknolojiyi kullanmasının yanında yeni teknolojilerden de destek alınması farklı sınıflarda reaktörler ortaya çıkmasını sağlamıştır.

## 2.1 Küçük Modüler Reaktör Çeşitleri

Küçük Modüler Reaktörler beş farklı kategoride incelenebilir:

### 2.1.1 Tekli Birim LWR Küçük Modüler Reaktörler:

LWR teknoloji ile desteklenen yakıt sistemi ile çalışmaktadır. Bu sistemin gelecekte standart fosil yakıt birimlerinin yerini alması beklenmektedir.

**2.1.2 Çoklu Modül LWR Küçük Modüler Reaktörler:** LWR teknolojisi ile donatılmış ve orta ölçekte enerji dağıtımı sağlayan enerji altyapılarının alternatifi olarak veya yeni ve güçlü enerji ağları yaratmak için birden fazla küçük modüler reaktörün birleşiminden oluşmaktadır.

### 2.1.3 Mobil/Nakledilebilir Küçük Modüler Reaktörler:

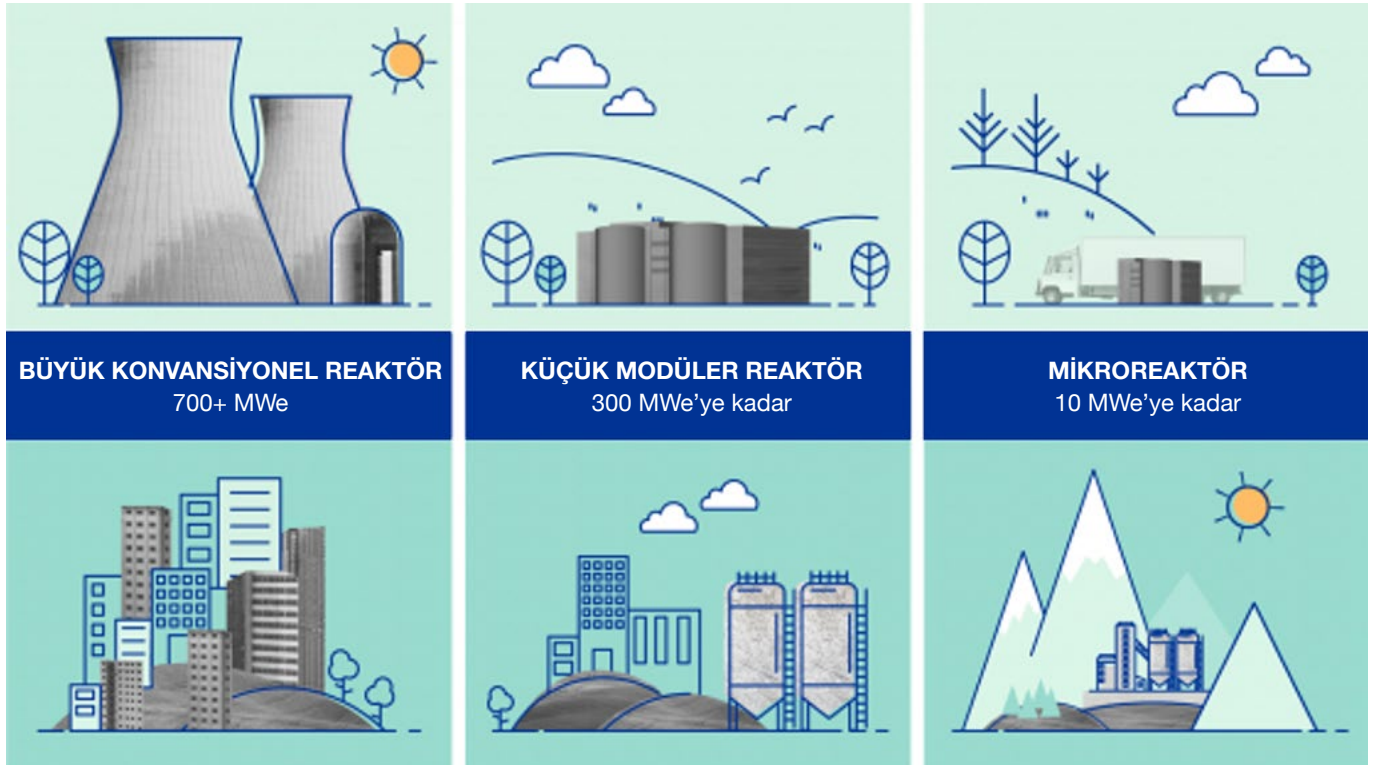
Yüzen reaktörlerin de değerlendirildiği bu sınıf, acil enerji ihtiyacı duyulan veya standart enerji istasyonlarının kurulmadığı bölgeler için tasarlanmıştır. Kolaylıkla bir noktadan başka bir noktaya aktarılabilen tasarımı sayesinde afet, savaş veya diğer acil ihtiyaçlarda başarılı bir enerji çözümü sağlayabilmektedir.

### 2.1.4 Jenerasyon IV Küçük Modüler Reaktörler:

Gelişmiş LWR olmayan soğutma sistemleriyle donatılmış küçük modüler reaktörleri tanımlamaktadır. Jenerasyon IV teknolojisi sıvı metal, erimiş tuz veya gaz gibi soğutucuların kullanıldığı bir soğutma yöntemidir. Çok yeni bir teknoloji olmasından dolayı araştırmaları devam etmektedir.

### 2.1.5 Mikro Modüler Reaktörler:

10 MWe'den daha düşük enerji kapasitesine sahip ve yarı otonom olarak çalışabilen bu reaktörler jenerasyon IV de dahil birçok yeni teknoloji ile donatılarak tasarlanmaktadır. Özellikle enerji şebekesi dışında ve ulaşım zorluğu olan bölgelerde önemli bir enerji çözümü için tasarlanmışlardır<sup>[6]</sup>.



Şekil 1: Küçük modüler reaktörlerin konvansiyonel ve mikro reaktörlerle boyut karşılaştırması<sup>[3]</sup>.

### 3. KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLER GÜVENLİ MİDİR?

Günümüzde araştırmaları devam eden küçük modüler reaktörler gelecekte bir kamyonun arkasındaki konteynere sığabilecek büyüklüğe, hatta daha küçük boyutlara gelebilir. Son araştırmaların konusu olan mikro ölçekteki reaktörlerin daha önceki 10 MWe sınırının aşılmasıyla 20 MWe güç üretmesi ve bir araçla taşınabilir özellikte olması planlanmaktadır.

ABD gibi elektrik ihtiyacının yarıya yakınına sera gazına neden olmayan nükleer enerji santrallerinden karşılayan ülkeler için devasa depolar büyüklüğünde binalarda yönetilen enerji sistemlerinin küçülmesi olası önemli bir araştırma konusu olarak değerlendirilmektedir. Bu modüler nükleer reaktörlerin taşınabilir olması, acil durumlarda ihtiyaç duyulan yerlere konumlandırılması konusunda da avantaj sunmaktadır.

Küçük modüler reaktörlerin nükleer enerji riskleri açısından kendi kendini kontrol edebilecek mekanizmalarla donatılması ve yüzyıllarca güvenle çalışabilmesi tasarım özelliklerindedir. Nötron adı verilen atom altı parçacıklarının ortaya çıkardığı enerji ile faaliyet gösteren reaktörlerde bu işlemin güvenle gerçekleşmesi için nötronların yavaşlatılması gerekmektedir. Bu işlem için genellikle grafit tercih edilmektedir. Ancak grafit oldukça ağır ve çok yer kaplayan bir malzemedir. Küçük Modüler Reaktörlerde bu işlemi daha kompakt ve güvenli hâle getirmek için araştırmacılar metal hibridlerle çalışmalar yapılmaktadır. Hidrojenle bağlı metal hibridler, reaktörün yavaşlatma işlemi olan moderasyon için ilgili alanlara çoklu katman teknolojisi ile uygulanmaktadır. Bu işlem düşük zenginlikte uranyum yakıtının kullanılmasına imkân vermektedir. Düşük zenginlikte uranyumun silahlandırma işlemi çok zor olduğundan ve kolay kontrol edilebildiğinden daha güvenli olarak değerlendirilmektedir<sup>[7]</sup>.

Nükleer reaktörler ile ilgili en büyük endişelerden biri de uranyum yakıtının bulunduğu çekirdeğin erime olasılığıdır. Çernobil ve Fukuşima'da yaşanan kazalardan edinilen tecrübeler bu yüksek güçte enerji üretme potansiyeli olan araçların olumsuz bir durumda çok ciddi bir çevre felaketine ve can kayıplarına neden olabileceğini göstermektedir. Yapılan araştırmalar ve ABD'nin Nükleer Regülasyon Komisyonu'nun yaptığı açıklamalar küçük modüler reaktörlerin yapıları ve tasarımları dikkate alındığında bir erime durumunda kayda değer risklerin oluşmayacağı yönündedir. Bu nedenle küçük modüler reaktörler konvansiyonel modellere göre çok daha çevre dostudur<sup>[8]</sup>.

### 4. KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖRLERİN OLUMLU VE OLUMSUZ ÖZELLİKLERİ

Nükleer enerji yüksek kapasitesi sayesinde elektrik, ısınma ve başka birçok alanda önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak sunduğu bu avantajların yanında taşıdığı riskler hep bir endişe kaynağı olmuştur. Konvansiyonel nükleer reaktörlerin küçük modüler reaktörler olarak kullanılarak çevre dostu ve güvenli bir alternatif sunması geleceğin enerji dünyası için umut vadetmektedir<sup>[9]</sup>.

Küçük modüler reaktörler, üretim maliyetleri açısından oldukça düşük bütçelerle üretilmekte ve bu sayede yüksek güçte enerjiye ihtiyaç duyan herkes tarafından kolaylıkla erişim imkânı bulabilmektedir. Bu teknoloji modüler olması sebebiyle her ortama uyarlanabilir bir yapıdadır. İhtiyaç duyulan bölgeye teslim edilmesi ve uygun şekilde programlanarak enerji hattına bağlanması yeterli olmaktadır. Düşük risk ve tehlikesiz çalışma özelliği yanında yüksek verim sunabilmektedir. Küçük modüler reaktörler için planlanan güvenlik önlemleri oldukça güvenli bir çalışma ortamı sunmaktadır. Doğal afetler veya sabotaj olasılıkları dahi gözlemlenerek riskli seviyelerin altında nükleer yakıtla çalışabilen küçük reaktörler, bir fabrikada inşa edilip yakıtı da eklenerek güvenli bir şekilde paketlenip kullanılacağı alana hazır bir şekilde gönderilebilmektedir.

Küçük modüler reaktörlerin en önemli özelliklerinden biri de alternatif enerji kaynaklarıyla ortak bir hatta güvenle ve uyum içinde çalışabilmesidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına veya ana enerji hatlarına eklenerek destek veya güçlendirme amaçlı olarak kullanılabilmesi büyük bir avantaj sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynağında yaşanabilecek kesintilerin yerini alabilecek güçte bir enerji desteği sağlayabilen küçük modüler reaktörler güvenli ve kesintisiz enerji ihtiyacının sunulmasında önemli bir adımı oluşturmaktadır<sup>[10]</sup>.

Küçük modüler reaktörler için birçok tasarım bulunması nedeniyle hangi teknolojinin tasarımda seçileceği ve daha güvenli olacağı karışıklığa yol açabilmektedir. Mevcut tasarımlarda düşünülen teknolojilerin oldukça azı ticari kullanıma uygun olduğundan hangilerinin gelişiminin devam edeceği ve ticari olarak pazarda yer alacağı bir sorun yaratmaktadır. Tasarım yolunda seçilen teknolojilerin titizlikle değerlendirilmesi ve ticari kullanıma uygun olanların araştırmalarının artırılarak güçlendirilmesi gerekmektedir.

Küçük modüler reaktörler açısından karşılaşılan bir diğer zorluk da regülasyonlar ve uluslararası kanunlara uyum süreçleridir. Yeni tasarım ve teknolojilerle donatılmış küçük modüler reaktörlerin lisanslama süreçleri için



ciddi çalışmalar yapılması gerekebilir. Çokuluslu Tasarım Değerlendirme Programı (Multinational Design Evaluation Programme -MDEP) gibi çalışmalar tasarım lisanslama süreçleri ve içerikleri ile ilgili düzenlemeler yapmak için oluşturulmuştur.

Küçük modüler reaktörlerin konvansiyonel reaktörlerle karşılaştırıldığında yaşayabileceği bir diğer sorun da tedarik zinciri süreçlerinde ortaya çıkmaktadır. Küçük modüler reaktör için gerekli teknolojik parçaların üretimi ve gerekli hammaddelerin yanında kullanılacak yakıt ile ilgili tedarik sorunları aşılması gereken bir zorluk olarak öne çıkmaktadır. Reaktörlerde kullanılacak yakıtın yüksek ayarlı ve düşük zenginlikte uranyum (High-Assay Low-Enriched Uranium -HALEU) olması ise nükleer enerji alanında bütün yakıt döngüsünün yeniden değerlendirilmesine ve yeni tedarik zincirleri oluşturulmasına neden olabilmektedir.

Son olarak nükleer enerji ile ilgili genel kamu görüşü ve geçmiş kazaların yol açtığı olumsuz çevre etkisi korkusu, küçük modüler reaktörler için aşılması gereken başka bir zorluğu ortaya koymaktadır. Her ne kadar kaza riski oldukça düşük olsa da kamu görüşü ciddi korkular ortaya çıktığını göstermektedir. Bu noktada insanların nükleer enerji ve küçük modüler reaktörlerin emniyet sistemleri konusunda geniş kapsamlı bir şekilde eğitilmesi gerekmektedir<sup>[6]</sup>.

Küçük modüler reaktörlerin olumlu ve olumsuz yanları değerlendirildiğinde, birçok olumlu özelliğin yanında yeni araştırmalarla giderilme olasılığı olan olumsuz özellikleri olması gelecekte güçlü enerji sistemlerinde tercih edilebileceklerinin göstergesidir.

## 5. KÜÇÜK NÜKLEER REAKTÖR PAZARI VE YAPIM MALİYETLERİ

Küresel ölçekte devam eden birçok küçük modüler reaktör tasarım çalışmasının en büyük sorunu üretim maliyetlerinin yanında güvenlik onaylarının tasarım aşamasında tamamlanmasıdır. Bu süreç tamamlanmadan üretime geçilemeyeceğinden araştırma harcamaları artarak devam etmektedir. Sodyum soğutma sistemi ile tasarlanan Natrium Reaktörü küçük modüler reaktörlerden çok az büyüklükte olmasına rağmen, 1950'lerden bu yana yüzlerce milyon dolar araştırma bütçesi almıştır. Ancak buna rağmen ticari kullanım aşamasına ulaşamamıştır.

ABD'de araştırmaları devam eden su soğutma sistemli NuScale tasarımı küçük modüler reaktörün ise tahmini araştırma ve sertifikasyon bütçesi 1,5 milyar dolar civarındadır. Ayrıca yeni susuz soğutma sistemli tasarımı ise bütçesinin daha da fazla olması beklenmektedir<sup>[11]</sup>.

Çin'in faaliyete geçirdiği dünyanın ilk küçük modüler reaktörünün bir biriminin ise yaklaşık maliyetinin üç milyar dolar civarında olduğu düşünülmektedir. 2018'de başlanan proje ile üretilen küçük modüler reaktör, 2022 yılında faaliyete geçirilmiştir<sup>[12]</sup>.

Yapılan araştırmalar ışığında geleceğin küçük modüler reaktörlerinin su soğutmalı sistemler ile kurgulandığında üç milyar dolar civarında bir maliyeti olması beklenirken, soğutma sisteminin alternatif yöntemlerle kurgulanmasında bu maliyetin çok daha fazla artacağı öngörülmektedir.

### 5.1 Küçük Modüler Reaktörler Verimli mi?

Bir enerji santralının verimliliği, toplam üretim maliyeti ve işletme giderlerinin yaşam boyu hesaplanarak bu tutarın aynı sürede elde edilecek elektrik üretimine bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Bu hesaplama Kademelendirilmiş Elektrik Maliyeti (Levelized Cost of Electricity -LCOE) denilmektedir.

Bu ölçüm yöntemi ile değerlendirildiğinde bütün reaktörler uzun vadeli kullanımda işletme maliyetleri açısından ekonomik olarak düşünülmektedir. Küçük modüler reaktörlerin hem daha düşük üretim maliyetleri ve işletme giderleri hem de daha çevre dostu olma özelliği sayesinde gelecekte çok daha ekonomik olacakları öngörülmektedir<sup>[13]</sup>.

Küçük modüler reaktörleri savunan görüşler bu teknolojinin uzun vadede ekonomik olabileceğini ancak kısa vadede araştırma ve tasarım süreçleri nedeniyle masraflı olduğunu kabul etmektedir. Gelecekte daha ekonomik hâle gelmelerinin, üretim hatlarında üretilebilir parçalar ile mümkün olacağı düşünülmektedir. Seri üretime başlandığında genel olarak da maliyetlerde bir düşüş yaşanacağı beklenmektedir. Maliyet ve fayda açısından bakıldığında kısa vadede yenilenebilir enerji kaynakları daha verimli görünse de küçük modüler reaktörler uzun vadede diğer yeşil enerji kaynaklarını yakalama potansiyelindedir. Güneş enerjisi gibi sadece güneşle etkileşim hâlindeyken enerji sağlayabilen veya akarsu yataklarında suyun debisi ile orantılı enerji üreten yenilenebilir enerji kaynakları süreklilik açısından da çok elverişli sayılmamaktadır. Bu noktada da kesintisiz bir kaynak sunan küçük modüler reaktörler uygun bir alternatif olarak değerlendirilmektedir<sup>[2]</sup>.

### 5.2 Dünyada Küçük Modüler Reaktör Pazarı

Geçmişte Çernobil ve Fukushima'da yaşanan kazalar değerlendirildiğinde, nükleer enerji hep bir endişe kaynağı oluşturmuştur. Ancak herkes tarafından atlanan önemli bir detay göz önüne alındığında kömür enerjisinin çok daha fazla can aldığı ve çevre zararı olduğu düşünülmektedir. Bu endişeler nedeniyle 1996 yılında dünyada üretilen elektriğin yüzde 17,5'i nükleer enerji ile karşılanırken, 2020 yılında bu oranın yüzde 10,1'e düştüğü görülmektedir<sup>[14]</sup>.

Araştırmaları devam eden ve yeni yeni pazara girmeye başlayan küçük modüler reaktörlere yüz milyarlarca dolar yatırım yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Ortalama üretim maliyetleri 1,5 ila 3 milyar doları bulan su soğutmalı reaktörlerin öncelikli tercih olduğu pazarda, alternatif soğutma sistemlerinin daha ekonomik çözümler sunması pazar değerlerinde ciddi değişimlere neden olabilir.

## 6. DÜNYADAKİ KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖR PROJELERİ

Fosil yakıtlı enerji santrallerine önemli bir alternatif oluşturan küçük modüler reaktörler esnek enerji üretme kapasitesi ve çok yönlü kullanım olanaklarıyla birçok ülke tarafından ilgiyle karşılanmaktadır. Gelecekte küçük modüler reaktörlerin diğer elektrik sistemleriyle ortak bir paydada buluşmasıyla hibrid enerji santrallerinin gelişebileceği düşünülmektedir.

Küresel ölçekte 50 civarında küçük modüler reaktör konsepti bulunmaktadır. Bu reaktörlerin büyük çoğunluğu geliştirme aşamasında olmakla beraber bir kısmı uygulamaya neredeyse hazır konumdadır. Dünyada dört adet küçük modüler reaktör Arjantin, Çin ve Rusya'da ileri inşa seviyesine ulaşmıştır. Ayrıca birçok başka proje çeşitli ülkelerde uygulama ve inşa aşamasına geçmeyi beklemektedir<sup>[15]</sup>.

### 6.1 Hangi Ülkeler Küçük Nükleer Reaktörlere Yatırım Yapıyor?

Dünyada birçok ülke küçük modüler reaktör geliştirme ve inşa projelerine yatırım yapmaktadır. Bu projelerden bazıları tamamlanma aşamasına gelmişken bazılarında yaşanan aksaklıklar hâlen akıllarda soru işaretleri oluşturmaktadır. Geçmişin nükleer güce sahip ülkelerinin yanında yeni ülkeler de küçük modüler reaktörlerle nükleer enerji yatırımlarını ortaya çıkarmıştır<sup>[16]</sup>.

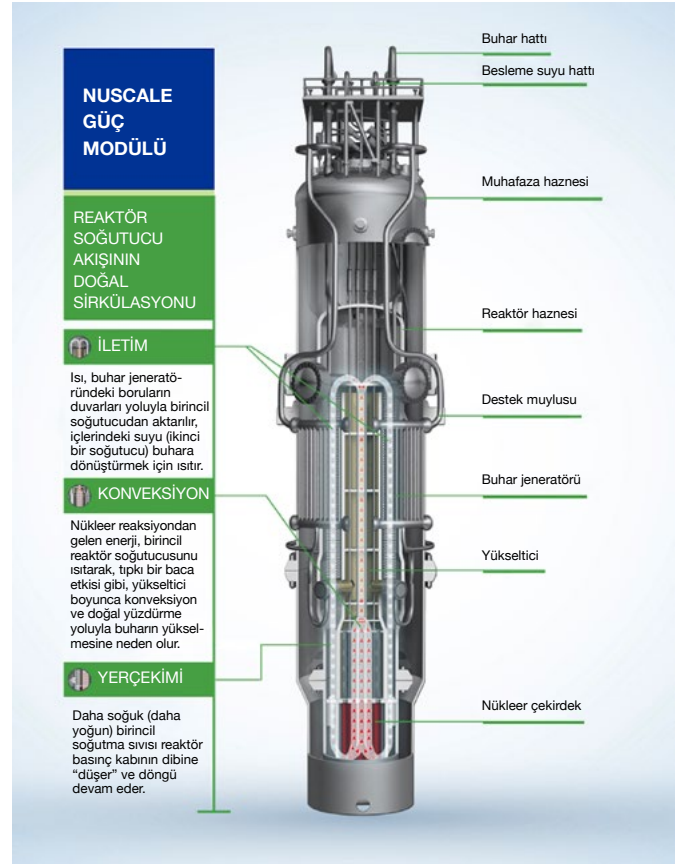
#### 6.1.1 ABD

ABD konvansiyonel nükleer santrallere alternatif olarak geliştirilen ve fosil yakıtlardan uzaklaşmayı destekleyen küçük modüler reaktörlere önemli yatırımlar yapan ülkelerden biridir.

ABD'de faaliyet gösteren 55 nükleer enerji santralinde toplam 93 nükleer reaktör bulunmaktadır. İçlerinde en küçük olarak değerlendirilebilecek olan New York'taki R.E. Ginna Nükleer Enerji Santrali 582 MWe güç üretmektedir. Bütün bu nükleer reaktörler yüksek işletme maliyetleri ile ABD'nin elektrik ihtiyacının yarıya yakınına karşılama potansiyelindedir. Bu reaktörlerin kaza olasılıkları düşük olsa da yerlerini alabilecek alternatif küçük modüler reaktörlerin daha güvenli ve ekonomik olması gelecekte ciddi değişimlerin yaşanabileceğinin habercisidir<sup>[17]</sup>.

ABD'de NuScale firması tarafından geliştirilen küçük modüler reaktör tasarımı ABD Nükleer Regülasyon Komisyonu tarafından sertifikalandırılmıştır. NuScale'in ilk müşterisi olan Utah İlişkili Belediye Güç Sistemleri (Utah Associated Municipal Power Systems -UAMPS) 12 q modülden oluşan küçük modüler reaktör siparişini Idaho Ulusal Laboratuvarı için istemiştir. Reaktörün işletmesi ise Energy Northwest'in deneyimli operatörleri tarafından yapılacaktır<sup>[18]</sup>.

NuScale tasarımı her ne kadar ABD Nükleer Regülasyon Komisyonundan sertifika onayı almış olsa da bu durum firmanın inşa aşamasına geçebileceği anlamına gelmemektedir. Ancak zamanla daha güvenli tasarımların



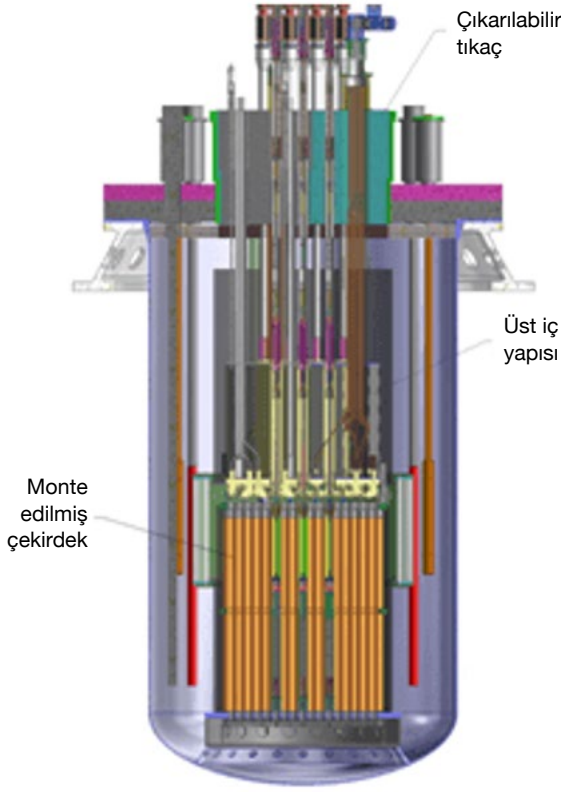
Şekil 2: NuScale küçük modüler reaktör tasarımı güç modülü<sup>[19]</sup>.

oluşturulması ve yeni teknolojilerin devreye girmesiyle gelecekte küçük modüler reaktörler nükleer enerji pazarının canlanmasını sağlama potansiyelindedir.

NuScale zaman içinde gelişen tasarımlarının kabul görmesiyle dünyanın her yerinde 2023 ve 2042 yılları arasında 674 ila 1.682 reaktörün inşa edilebileceğini öngörmektedir. Öngörülen rakamdaki yükseklik ABD'de faaliyette olan 100 büyük reaktöre karşılık gelen 98 GW enerji üretimini yakalamak hedefiyle oluşturulmuştur<sup>[20]</sup>.

ABD'nin Enerji Bakanlığı (Department of Energy -DOE) NuScale firmasının tasarımını 2012 yılından bu yana çeşitli bütçelerle desteklemiştir. Özel sektörde yapılan inovatif küçük modüler reaktör araştırmalarına da destek veren DOE, 2015 yılında Nükleerde Hızlandırılmış İnovasyon Geçidi (Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear -GAIN) girişimini başlatmıştır. DOE ayrıca 2019 yılında Ulusal Reaktör İnovasyon Merkezinin (National Reactor Innovation Center -NRIC) açılışını da duyurmuştur. Bu merkezde, gelişmiş nükleer enerji teknolojilerinin araştırılması hedeflenmektedir.

DOE'nin destek verdiği bir diğer gelişmiş küçük modüler reaktör projesi de İleri Araştırma Projeleri Ajansı-Enerji'nin (Advanced Research Projects Agency-Energy -ARPA-E) konsept çalışmasıdır. Bu proje özellikle mikro modüler reaktörler üzerine yoğunlaşmıştır. AFR-100 adı verilen sodyum soğutmalı reaktör tasarımı ARPA-E araştırmaları içinde bulunmaktadır<sup>[6]</sup>.



**Şekil 3:** ARPA-E gelişmiş sodyum soğutmalı hızlı küçük modüler reaktör tasarımı<sup>[21]</sup>.

ABD’li Ultra Safe Nuclear firması da mikro modüler reaktörler tasarlamaktadır. Firmanın hedefinde maden ocakları, fabrikalar ve enerji erişimi sınırlı topluluklar bulunmaktadır. Bir diğer ABD firması olan Westinghouse Electric Company de tasarladığı küçük modüler reaktörleri faaliyete geçirmeyi planlamaktadır<sup>[22]</sup>.

ABD’de gerçekleşen bir diğer küçük modüler reaktör çalışması da Savunma Bakanlığı tarafından yürütülmektedir. ABD Savunma Bakanlığının Stratejik Yetenekler Ofisi, Idaho Ulusal Laboratuvarı’nda taşınabilir bir nükleer reaktör inşa etmek için BWXT Technologies Inc. ile 300 milyon dolarlık bir sözleşme imzalamıştır.

BWXT’nin tasarımı, 1 ila 5 MWe arasında bir güç çıkışına sahip yüksek sıcaklıkta gaz soğutmalı bir reaktörden (HTGR) oluşmaktadır. Reaktörün, aşırı ısıya dayanabilen ve düşük çevresel risklere sahip olan yüksek ayarlı ve düşük zenginlikte uranyum (HALEU) yakıtı kullanması planlanmaktadır. Yakıt, reaktörün çalışma koşullarından çok daha yüksek sıcaklıklar için test edilmiştir.

BWXT, reaktörü taşınabilir hâle getirmek amacıyla reaktör çekirdeği ve kontrol sistemi bileşenleri de dahil olmak üzere tüm bileşenleri hava ve karayolu, demiryolu veya deniz yoluyla taşımayı planlamaktadır. Reaktörün taşıma yöntemini kolaylaştırmak için ISO uyumlu altı metre uzunluğunda nakliye konteynerleriyle uyumlu bir tasarım yapılmaktadır. Reaktör sistemi 72 saat gibi kısa bir sürede kullanıma hazır hâle gelebilecektir. Taşıma için kapatma, soğuma ve demontaj yedi günden daha kısa sürede gerçekleştirilebilecektir<sup>[23]</sup>.

### 6.1.2 Çin

Küçük modüler reaktörleri kullanıma sunan ilk ülke Çin’dir. Çin Huaneng Grup’a ait olan küçük modüler reaktör ünitesi, ürettiği 200 MWe güçle Shandong bölgesine enerji sağlamaya başlamıştır. Kullanıma açılmayı bekleyen ikinci bir reaktörün de testleri yapılmaktadır.

Dünyanın ilk çakıl yataklı modüler yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörü olan bu tesis, enerji üretmek için su yerine helyumu ısıtmaktadır. Jenerasyon IV olarak da adlandırılan yeni nesil küçük modüler reaktör, olası bir risk durumunda pasif emniyet sistemi ile kapanabilmektedir. Daha önce Fukuşima Santrali’nde yaşanan kazanın da gerekçesi olan aktif güvenlik sistemlerinin elektrik kesintisinde kapanması riskine göre daha emniyetli olan pasif güvenlik sistemleri, küçük modüler reaktörlerin tercih edilmesinde etkilidir.

Dünyada hiçbir ülke nükleer enerji sistemlerine Çin kadar yatırım yapmamaktadır. Çin önümüzdeki 15 yıl içinde nükleer enerjiye 440 milyar dolar yatırım yapmayı planlamaktadır<sup>[24]</sup>.

Çin’de inşası devam eden bir diğer küçük modüler reaktör de Çin’in Hainan bölgesinde yer alan Changjiang Nükleer Güç Santralinde bulunmaktadır. ACP100 olarak adlandırılan reaktörün, tamamlandığında 125 MWe güç üretmesi beklenmektedir. 2021’in Haziran ayında inşası başlanan ve “Linglong One” olarak da adlandırılan reaktörün 526.000 evin enerji ihtiyacını karşılaması beklenmektedir<sup>[25]</sup>.

Çin fosil yakıtlara olan bağımlılığı ortadan kaldırmak için nükleer füzyon enerjisine de ciddi yatırımlar yapmaktadır. Suni güneş olarak da bilinen EAST reaktöründe yakın zamanda 101 saniye boyunca 120 milyon santigrat derece sıcaklık elde edilebilmiştir.

Yaptığı yatırımlar ve küçük modüler reaktör inşasını ilk tamamlayan ülke olarak Çin günümüzde bu teknoloji-den en verimli şekilde faydalanan ülkedir<sup>[27]</sup>.

Çin deniz uygulamalarında kullanılmak üzere 60 MWe güç üreten ACPR50s adlı küçük modüler reaktör üzerinde çalışmalar yaparken, 125 MWe güç üretebilen ACP100 adlı reaktörleri kara uygulamalarında değerlendirmektedir<sup>[6]</sup>.



**Şekil 4:** Çin’in Changjiang Nükleer Santrali’nde inşası devam eden küçük modüler reaktör çalışması<sup>[26]</sup>.



### 6.1.3 Rusya

Rusya çeşitli küçük modüler reaktör projeleri yürütmektedir. Öncelikli olarak kutuplardaki askeri üslerin enerji ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla planlanan 30 küçük modüler reaktör küresel anlamda endişeye yol açmıştır. Genel anlamda güvenli kabul edilen küçük modüler reaktörlerin askeri uygulamalara konu olması ve olası kaza durumları kutup civarında bulunan ülkelerin bu konu hakkında endişe duymasına neden olmuştur<sup>[28]</sup>.

Rusya'nın ulusal nükleer şirketi olan Rosatom 2021 yılında Sibirya'nın Yakutia (Yakutistan) bölgesinde bir küçük modüler reaktör inşasına başlamıştır. Daha önce yapılan askeri kullanım açıklamalarının aksine sivil alanda desteklenmesi için planlanan bu reaktörün Sibirya'nın doğu kesiminde kıyı şeridinde enerji sağlaması beklenmektedir. Rosatom'un inşasının 2028 yılına kadar tamamlanması beklenmektedir. RITM-200 adı verilen reaktör ünitesinin 50 MWe güç üretmesi planlanmıştır. Rusya'nın ayrıca önümüzdeki 20 yıl boyunca küçük modüler reaktörlere 300 milyar dolar yatırım yapması beklenmektedir<sup>[29]</sup>.

Rusya geçmişten bu yana nükleer enerjide öncü ülkelerden biri olmuştur. Kutuplarda faaliyet gösteren buz kırma filolarında kullanılan reaktörlerden ilk yüzen reaktöre birçok alanda önemli adımlar atan Rusya, fosil yakıt tüketimini sınırlayacak küçük modüler reaktör araştırmalarının ciddi bir destekçisidir<sup>[31]</sup>.

Akademik Lomonosov dünya üzerinde yüzerek faaliyet gösteren ilk küçük modüler reaktördür. Rosatom yüzen reaktör inşaatlarına Baltık Tersaneleri'nde devam etmektedir. Diğer yandan, Akademik Lomonosov'da tercih



Şekil 5: Rus tasarımı RITM-200 küçük modüler reaktör görseli<sup>[30]</sup>.



Şekil 6: Arjantin'de inşası devam eden CAREM-25 projesi<sup>[33]</sup>.

edilen RITM-200 hem yüzen platformlar ve araçlarda hem de karada uygulanabilen bir reaktör tasarımıdır. Bu avantajı ile denizlerde ve karasal alanlarda kullanım imkânı vardır. Bu reaktörlerin seri üretimlerinin 2030 yılında başlaması planlanmaktadır<sup>[6]</sup>.

### 6.1.4 Arjantin

Arjantin dünya üzerinde küçük modüler reaktör inşasına başlayan üç ülkeden biridir. CAREM-25 adı verilen ve Henisa Sudamericana tarafından yürütülen proje ile bir üniteye 32 MWe enerji üretilmesi planlanmaktadır. CAREM-25'in hedefinde çeşitli modüler reaktör üniteleri ile gelecekte 100 MWe ila 120 MWe enerji üretilmesi bulunmaktadır<sup>[32]</sup>.

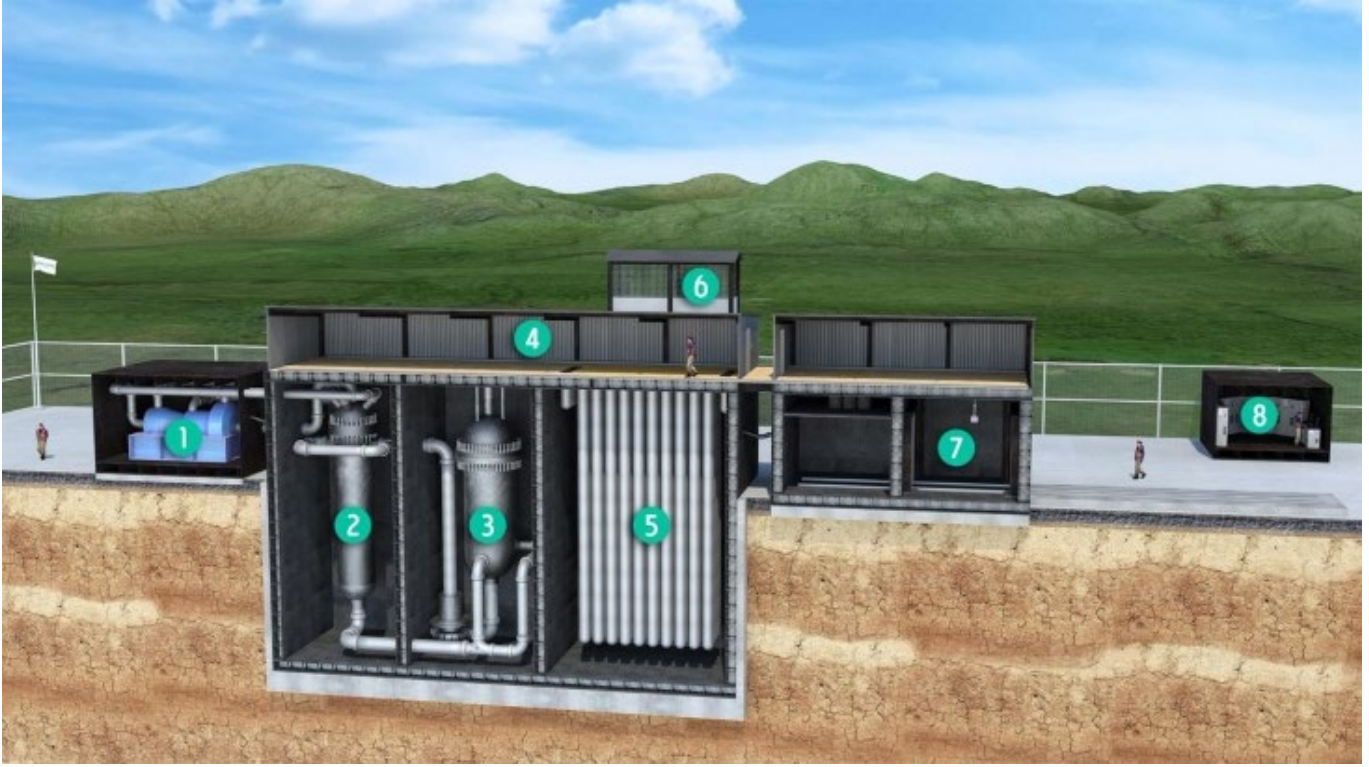
### 6.1.5 Avustralya

Avustralya madencilik için ihtiyaç duyduğu yüksek enerji ihtiyacını güvenli kabul edilen küçük modüler reaktörlerle sağlamayı planlamaktadır. Avustralya Mineral Konseyi (Mineral Council of Australia -MCA) çevre dostu enerji üretimi yöntemlerine yönelmeyi savunmaktadır. Bu doğrultuda gelecek yıllarda Avustralya'da da küçük modüler reaktör yatırımlarının ortaya çıkması muhtemeldir. Ancak küçük modüler reaktörlerin kullandığı yakıtın bertaraf edilmesi için gereken bütçenin büyük reaktörlere göre daha fazla olma olasılığı akıllarda soru işaretlerine yol açmıştır<sup>[34]</sup>.

### 6.1.6 İngiltere

İngiltere'de ortaya çıkan bir girişim ise U-Battery adını verdiği ve oldukça küçük boyutlu ve uranyum yakıtlı bir küçük modüler reaktör tasarımı üzerinde çalışmaktadır. U-Battery'nin küçük bir topluluğun veya bir fabrikanın enerji ihtiyacını karşılayabilecek miktarda enerji üretmesi hedeflenmektedir. U-battery'nin 25 ila 30 yıl ömre sahip olacak şekilde çalışması beklenmektedir. U-Battery reaktörlerinin yaklaşık 50 milyon pound bütçe ile üretilmesi hâlinde pazarda önemli bir yer edinebileceği düşünülmektedir.

İngiliz Hükümeti ayrıca lüks arabalar ve uçak motorları üreten Rolls-Royce'a 284 milyon dolar hibe ederek her biri bir milyon epe enerji sağlayabilecek küçük modüler



**Şekil 7:** İngiliz U-Battery küçük modüler reaktör konsepti<sup>[35]</sup>.

reaktör tasarlamasını istemiştir. Rolls-Royce daha önce İngiltere'nin nükleer denizaltıları için motorlar üretmiştir. Rolls-Royce tasarımı reaktörlerin kısmen yeraltına olacak şekilde 15 m uzunluğunda ve U-Battery tasarımından daha büyük olacağı düşünülmektedir. Reaktörlerin yaşam ömrünün 60 yıl olması planlanmaktadır<sup>[22]</sup>.

İngiltere küçük modüler reaktörlere olan ilgisini 2020 yılında yayınladığı "Yeşil Endüstriyel Devrim Stratejisi" çerçevesinde göstermiştir. İngiltere 2020 yılında yerel küçük modüler reaktör araştırmalarına 215 milyon pound ek bütçe ayıracağını duyurmuştur. İngiltere İş Enerji ve Endüstriyel Strateji Bakanlığı (BEIS) da Gelişmiş Modüler Reaktör Fizibilite ve Gelişim Projesi'ne 44 milyon pound yatırım sağlamıştır. Fizibilite çalışmaları özellikle Jenerasyon IV soğutma teknolojileri üzerine odaklanmaktadır. İngiltere Ulusal Altyapı Stratejileri de bu girişimlere 170 milyon pound bütçe temin etmiştir.

### 6.1.7 Diğer Avrupa Ülkeleri

Avrupa ülkelerinde çeşitli küçük modüler reaktör çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalardan işletme aşamasına geçmeye en yakın olanı Romanya'da yapılmaktadır. ABD'nin enerji firması NuScale ile yapılan anlaşmalar doğrultusunda Romanya'ya ait olan Nuclearelectrica firmasıyla yapımı planlanan altı adet küçük modüler reaktörün 2028 yılında faaliyete geçmesi planlanmaktadır. Projeyi yürüten firmanın açıklamasına göre, her küçük modüler reaktörün ortalama 77 MWe güç üretmesi beklenmektedir. Su soğutma sistemli reaktörlerin 50.000 eve enerji sağlaması hedeflenmektedir<sup>[36]</sup>.

Avrupa'da küçük modüler reaktör araştırmalarını destekleyen bir diğer ülke de Fransa'dır. Küçük modüler reaktör Nuward adı ile bilinen Fransız projesi ikiz modül ile 300-400 MWe güç üretme potansiyelindedir. Fransa ekonomik toparlanma planı çerçevesinde 100 milyon avruluk destekle Nuward çalışmalarının hızlandırılması beklenmektedir<sup>[6]</sup>.

### 6.1.8 Türkiye

Gelişmiş Batı ülkelerinin çoğu, kayda değer kurulu nükleer kapasiteye sahiptir. Bu ülkeler neredeyse tüm fosil yakıtlı santralleri kapatmayı ve yeni nükleer santral kurulumlarını sınırlamayı planlamaktadır. Diğer taraftan; Çin, Hindistan, Mısır, Suudi Arabistan gibi Uzakdoğu ve Ortadoğu ülkeleri yeni nükleer güç santrali yatırımları planlamaktadır. Türkiye de bu ülkeler arasında olup 12 reaktör üniteli ve toplamda yaklaşık 15.000 MWe kurulu kapasiteye sahip üç nükleer güç santrali planlanmıştır. Bu projelerin önümüzdeki 10 yıl içerisinde hayata geçirilmesi beklenmektedir. Bu kapsamda 4.800 MWe kapasiteye sahip Mersin Akkuyu santralinin inşaa faaliyetleri devam etmekte olup 2023 yılında devreye alınması planlanmaktadır<sup>[37]</sup>.

Türkiye'de EUAS Uluslararası ICC İngiltere'nin yeni nesil modüler reaktör tasarımlarını yapan Rolls-Royce ile ortaklaşa küçük modüler reaktörler için teknik, ekonomik ve yasal değerlendirme çalışması başlatmıştır. Türkiye'nin mevcutta planladığı konvansiyonel reaktörlerin yanında küçük modüler reaktörlere de yapacağı yatırımla enerji kapasitesini ciddi oranda artırması beklenmektedir<sup>[38]</sup>.



## 7. KÜÇÜK NÜKLEER REAKTÖRLERİN GELECEĞİ

Küçük modüler reaktörler ekonomik ve çevre dostu özellikleriyle ülkelerin dikkatini çekmektedir. Çok daha opsiyonel özelliklere sahip olması ve ulaşılması güç alanlarda dahi uygulanabilmesi öncelikli tercih sebebi olan küçük modüler reaktörler enerjinin geleceğinde önemli bir yere sahiptir. Küresel ölçekte 400 civarında nükleer reaktör bulunmaktadır. Küçük reaktörlerin de devreye girmesiyle dünya genelinde 2050 yılına kadar düşük karbonlu elektrik üretimine geçiş planlamasının gerçekleşmesi daha da kolaylaşmaktadır<sup>[39]</sup>.

Dünya genelinde sera gazı etkilerinin azaltılması için çalışmalar devam ederken bir diğer taraftan da gelişen teknolojiler nedeniyle artan bir enerji ihtiyacı bulunmaktadır. Alternatif temiz enerji kaynakları araştırmaları umut vadetse de bazı durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Özellikle sera gazı emisyonlarının 2050 yılına kadar sıfıra indirilmesi için yapılan çalışmalarda nükleer enerji sistemlerinin önemli bir role sahip olması beklenmektedir. Küçük modüler reaktörler kaza ve sızıntı gibi durumlarda daha güvenli olmaları ve yüksek enerji sağlama kapasiteleriyle herkesin dikkatini çekmektedir. Gelecekte enerji ihtiyacının daha da artacağı öngörüldüğünden küçük modüler reaktörler güvenli ve güçlü bir çözüm olasılığı yaratmaktadır<sup>[40]</sup>.

## 8. SONUÇ

Dünyanın her geçen gün enerji üretimi açısından daha temiz ve kullanılan ekipmanlar açısından daha teknolojik bir yer hâline gelmesi hedeflenmektedir. Geçmişin fosil

yakıt tüketen enerji santralleri yerini temiz enerji kaynaklarına bırakmaktadır. İnsanlık yüzyıllardır doğaya ve atmosfere verdiği zararı telafi etmek için çalışmalar yapmaktadır. Ayrıca geliştirilen yeni teknolojiler nedeniyle de artan bir enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu enerjinin karşılanması için düşünülen temiz enerji sistemlerinin yanında nükleer enerji her zaman güçlü bir kaynak yaratmıştır. Ancak konvansiyonel nükleer reaktörlerde yaşanan çeşitli kazalar ve nükleer enerjinin silah olarak kullanılması insanların bu teknolojiye korku ve şüpheyle yaklaşmasına neden olmuştur.

Nükleer enerjiye karşı oluşan önyargı ve korkunun aşılması zaman alacaktır. Bu süreçte araştırmacılar alternatif olarak küçük modüler reaktörler üzerinde çalışmaya başlamıştır. Bu reaktörler daha kompakt enerji çözümleri ile hemen hemen her yerde konumlandırılabilir. Devam eden birçok küçük modüler reaktör araştırmasının yanında bu teknolojiyi inşa ve faaliyet seviyesine getiren ülkeler de bulunmaktadır. Küçük modüler reaktör teknolojisinin en önemli avantajlarından biri de enerji üretebilen ama silaha dönüştürülemeyen özellikte nükleer yakıt ile çalışmasıdır. Bu sayede nükleer enerjiye ulaşmakta güçlük çeken ülkelerde dahi güçlü bir enerji kaynağı yaratma potansiyeli doğmuştur.

Gelişmeye devam eden küçük modüler reaktörlerin gelecek yıllarda daha sık gündeme gelerek önümüzdeki 10 yıl içinde birçok konumda faaliyete alınması beklenmektedir. Geleceğin artan enerji ihtiyacının güvenli ve pratik bir şekilde çözümü için küçük modüler reaktörler çok önemli bir fırsat yaratmaktadır. Bu teknolojiyi benimseyen ve araştırmalarını güçlendiren ülkeler de enerjide dışa bağımlı olmayan bir altyapı ile ülke ekonomilerine katkı sağlayarak ve çevreyi koruyarak enerji üretme şansına sahip olabilecektir.



## KAYNAKÇA

- [1] *World Nuclear Association*, (2022), “Small Nuclear Power Reactors”, (Mayıs 2022), <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [2] V. Ramana, M.; (2022), “Small modular reactors offer no hope for nuclear energy”, *Advanced Science News*, (14 Ocak 2022), <https://www.advancedsciencenews.com/small-modular-reactors-offer-no-hope-for-nuclear-energy/>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [3] Liou, Joanne; (2021), “What are Small Modular Reactors (SMRs)?”, *International Energy Agency*, (4 Kasım 2021), <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [4] *Wikipedia*, “What are Small Modular Reactors (SMRs)?”, <https://en.wikipedia.org/wiki/EGP-6>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [5] *TWI*, “WHAT IS A SMALL MODULAR REACTOR (SMR)? (A COMPLETE GUIDE)”, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/small-modular-reactor>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [6] *Nuclear Energy Agency*, (2022), “Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities”, (14 Şubat 2022), [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true). (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [7] Nunez, Christina; (2021), “Micro-nuclear reactors: up to 20MW, portable, safer”, *Energy Post*, (22 Nisan 2021), <https://energy-post.eu/micro-nuclear-reactors-up-to-20mw-portable-safer/>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [8] Conca, James; (2018), “How Far Do You Have To Run After A Small Modular Nuclear Meltdown?”, *Forbes*, (29 Ağustos 2018), <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2018/08/29/how-far-do-you-have-to-run-after-a-small-modular-nuclear-meltdown/?sh=6c861b067393>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [9] *Energy.gov Office of Nuclear Energy*, “Advanced Small Modular Reactors (SMRs)”, <https://www.energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [10] *Energy.gov Office of Nuclear Energy*, “Benefits of Small Modular Reactors (SMRs)”, <https://www.energy.gov/ne/benefits-small-modular-reactors-smrs>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [11] Makhijani, Arjun; V. Ramana, M.; (2021), “Why Small Modular Nuclear Reactors Won’t Help Counter the Climate Crisis”, (25 Mart 2021), <https://www.ewg.org/news-insights/news/why-small-modular-nuclear-reactors-wont-help-counter-climate-crisis>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [12] Cohen, Ariel; (2019), “China Enters Global Tech Race For Small Modular Nuclear Reactors”, *Forbes*, (25 Nisan 2019), <https://www.forbes.com/sites/arielcohen/2019/04/25/china-enters-global-tech-race-for-small-modular-nuclear-reactors/?sh=3377282762b8>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [13] *World Nuclear Association*, (2021), “Economics of Nuclear Power”, (Eylül 2021), <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [14] *Economist*, (2022), “Developers of small modular reactors hope their time has come”, (26 Mart 2022), [https://www.economist.com/science-and-technology/developers-of-small-modular-reactors-hope-their-time-has-come/21808321?gclid=Cj0KCQjwspKUBhCvARIsAB2IYusivBbgzYBir7MFCKIt\\_46rWzX2KH-J4ullwBrd2jZ7rKra3aTmdwwsaAqEbEALw\\_wcB&gclid=aw.ds](https://www.economist.com/science-and-technology/developers-of-small-modular-reactors-hope-their-time-has-come/21808321?gclid=Cj0KCQjwspKUBhCvARIsAB2IYusivBbgzYBir7MFCKIt_46rWzX2KH-J4ullwBrd2jZ7rKra3aTmdwwsaAqEbEALw_wcB&gclid=aw.ds). (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [15] *International Atomic Energy Agency*, “Developers of small modular reactors hope their time has come”, <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [16] Parshley, Lois; (2020), “The countries building miniature nuclear reactors”, *BBC*, (9 Mart 2020), <https://www.bbc.com/future/article/20200309-re-small-nuclear-power-plants-safe-and-efficient>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [17] *U.S. Energy Information Administration*, (2021), “How much electricity does a nuclear power plant generate?”, (31 Aralık 2021), <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=104&t=3>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [18] Conca, James; (2018), “NuScale’s Small Modular Nuclear Reactor Passes Biggest Hurdle Yet”, *Forbes*, (15 Mayıs 2018), <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2018/05/15/nuscales-small-modular-nuclear-reactor-passes-biggest-hurdle-yet/?sh=4bb0fb905bb5>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [19] *RPA Engineering*, “NuScale Small Module Reactors: An Intern’s Perspective”, <https://rpaengr.com/nuscale-small-module-reactors-an-interns-perspective/>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [20] Levitan, Dave; (2020), “First U.S. Small Nuclear Reactor Design Is Approved”, *Scientific American*, (9 Eylül 2020), <https://www.scientificamerican.com/article/first-u-s-small-nuclear-reactor-design-is-approved/>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [21] Martin, Aaron; (2018), “New DoE ARPA-E program awards \$24 million to 10 advanced nuclear reactor projects”, *Daily Energy Insider*, (6 Haziran 2018), <https://dailyenergyinsider.com/news/12844-new-doe-arpa-e-program-awards-24-million-10-advanced-nuclear-reactor-projects/>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [22] Stickings, Tim; (2022), “Do small reactors have a big future in Europe’s nuclear power plans?”, *The National News*, (18 Şubat 2022), <https://www.thenationalnews.com/weekend/2022/02/18/do-small-reactors-have-a-big-future-in-europes-nuclear-power-plans/>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [23] Paleja, Ameya; (2022), “The US Army will have a portable nuclear reactor ready by 2024. Here is how it works”, *Interesting Engineering*, <https://interestingengineering.com/us-army-portable-nuclear-reactor-2024>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [24] *Bloomberg*, “China is Home to World’s First Small Modular Nuclear Reactor”, (21 Aralık 2021), <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-12-21/new-reactor-spotlights-china-s-push-to-lead-way-in-nuclear-power>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [25] *World Nuclear News*, (2022), “Chinese SMR containment takes shape”, (28 Şubat 2022), <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-SMR-containment-takes-shape>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [26] *NS Energy*, (2021), “China begins construction on first onshore small modular reactor project”, (13 Temmuz 2021), <https://www.nsenerybusiness.com/news/china-begins-construction-on-first-small-modular-reactor-project/>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [27] Young, Chris; (2022), “China Powers Up the World’s First Commercial Onshore Small Modular Nuclear Reactor”, *Interesting Engineering*, (4 Ocak 2022), <https://interestingengineering.com/the-worlds-first-small-modular-nuclear-reactor-is-sending-power-to-the-grid>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [28] Nilsen, Thomas; (2015), “Russia’s mini nuclear reactors plan causes concern”, *Barents Observer*, (Temmuz 2015), <https://thebarentsobserver.com/ru/node/95>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [29] *Bellona*, “Rosatom to build plant running on small modular reactors in eastern Siberia”, <https://bellona.org/news/nuclear-issues/2021-01-rosatom-to-build-plant-running-on-small-modular-reactors-in-eastern-siberia>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [30] *Global Security*, “RITM-200 Atomic Reactor, Icebreaker”, <https://www.globalsecurity.org/military/world/russia/reactor-ritm-200.htm>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)

- [31] *Revista Nuclear*, (2021), “Russian small modular reactor nuclear power plants prospects and benefits”, (21 Ekim 2021), <https://www.revistanuclear.es/en/installations/russian-small-modular-reactor-nuclear-power-plants-prospects-and-benefits/>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [32] *World Nuclear News*, (2021), “Russian small modular reactor nuclear power plants prospects and benefits”, (8 Kasım 2021), <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Construction-of-Argentinas-small-CAREM-25-unit-to>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [33] *Prensa Latina*, (2021), “Argentina avanza en creación de su primer reactor nuclear modular”, <https://www.prensa-latina.cu/2021/12/16/argentina-avanza-en-creacion-de-su-primer-reactor-nuclear-modular>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [34] Green, Jim; (2021), “Small nuclear reactors, huge costs”, *Renew Economy*, <https://reneweconomy.com.au/small-nuclear-reactors-huge-costs/>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [35] *World Nuclear News*, (2019), “U-Battery SMR moves to next stage of Canadian assessment”, (30 Temmuz 2019), <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/U-Battery-SMR-moves-to-next-stage-of-Canadian-asse>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [36] Turp-Balazs, Craig ; (2021), “Not yet approved by the EU, Romania looks to deploy US-made small nuclear reactors”, *Emerging Europe*, (3 Kasım 2021), <https://emerging-europe.com/news/not-yet-approved-by-the-eu-romania-looks-to-deploy-us-made-small-nuclear-reactors/>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [37] Bulucu, Murat; Doğru, Seyide; (2017), “Nükleer Enerji ve Türkiye”, *STM ThinkTech*, (1 Kasım 2017), <https://thinktech.stm.com.tr/tr/nukleer-enerji-ve-turkiye>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [38] *World Nuclear News*, (2020), “Turkish utility to cooperate with Rolls-Royce in SMRs”, (20 Mart 2020), <https://world-nuclear-news.org/Articles/Turkish-utility-to-cooperate-with-Rolls-Royce-in-S>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [39] Garton, Daniel; (2021), “Why small modular reactors will shape the future of nuclear debate”, *White & Case*, (8 Haziran 2021), <https://www.whitecase.com/publications/insight/why-small-modular-reactors-will-shape-future-nuclear-debate>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)
- [40] Nakhle, Carole; (2022), “The potential of small nuclear reactors”, *GIS Reports*, (17 Mart 2022), <https://www.gisreportsonline.com/r/small-modular-reactors/>. (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2022)



**thinktech**  
STM Teknolojik Düşünce Merkezi  
<http://thinktech.stm.com.tr>

