

Geleceğin Nükleer Enerji Dünyasının Yeni Aktörleri :

SMR ve Mikro Reaktörler

Doç. Dr. Mehmet BULUT - EMO Ankara Şubesi Enerji Komisyonu Üyesi
Elektrik-Elektronik Yüksek Mühendisi
mehmetbulut06@gmail.com

1. Giriş

1950'li yıllardan itibaren büyük güçteki nükleer santraller (NGS'ler), ulusal şebekelere düzenli ve kararlı yüksek miktarda elektrik sağlayarak birçok ülkenin gelişmesinde büyük rol almış ve halen birçok gelişmiş ülkenin elektrik enerjisini sağlamada işletilmeye devam edilmektedirler. Bugün bile, büyük kapasiteli nükleer santraller teknolojik ilerlemenin ve ulusal gücün sembolleri olarak görülmektedir. Genellikle 1.000 megavatın üzerinde yüksek miktarda elektrik üretiliyorlar ve ülkelerin büyük oranlarda elektrik ihtiyacını sağlayabilmektedirler. Ancak, son 10'lu yıllarda yaşanan bazı projelerin süresindeki uzamalar, artan finansman ihtiyacı ülkeleri başka arayışlara yönlendirdiği görülmektedir. Büyük kapasiteli nükleer santraller (NGS'ler), projelerinin karmaşıklığı, yüksek maliyetleri ve sıklıkla geciken proje süreleri gibi önemli zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu karşılaşılan zorluklar, birçok ülkenin Küçük Modüler Reaktörlere (SMR'ler) yönelmesinin başlıca nedenlerin başında gelmektedir.

Büyük bir nükleer santral inşa etmek onlarca milyar dolara mal olmakta ve santral yatırımcıları santralin elektrik üretmesi ve yatırım geri dönüşümünün başlaması için neredeyse on yıla yakın bir süreyi beklemek zorunda kalmaktadır. Bunun yanında birçok projenin bütçeyi aştığı görülmüş ve bu da hükümetleri ve yatırımcı şirketleri ağır mali yüklerle karşı karşıya bırakabilmektedir. Büyük güçteki reaktörlerin tamamlanması 8-10 yıla kadar çıkabilmekte ve projelerde yaygın olarak gecikmeler yaşanabilmektedir. Bir nükleer santral tamamlandığında, enerji talep durumu değişmiş olabilmekte veya yenilenebilir enerji kaynakları gibi daha ucuz alternatifler öne çıkmış olabilmektedir.

Büyük güçteki reaktörler karmaşık mühendislik gerekmekte ve binlerce özel parçanın son derece hassas bir şekilde üretilmesi, taşınması ve monte edilmesi gerekmektedir. Tedarik zincirindeki herhangi bir aksaklık, ilerlemeyi durdurabilmekte ve maliyetleri daha da artırabilmektedir. Ayrıca, yüksek kapasitedeki nükleer santraller geniş arazilere, soğutma için büyük miktarda suya erişime ve güçlü şebeke bağlantılarına ihtiyaç duymaktadır. Bu durum, inşa edilebilecekleri alanları sınırlamaktadır. Büyük nükleer santraller, genellikle on milyarlarca sterline ulaşan şaşırtıcı sermaye yatırımları gerektirmektedir. Hinkley Point C nükleer santrali (HPC), İngiltere'nin Somerset kentinde inşa halinde olan iki üniteli, 3.200 MWe kapasiteli bir nükleer santral projesidir. Hinkley, 2010 yılında İngiliz hükümeti tarafından açıklanan sekiz olası sahadan biri olup ve Kasım 2012'de bir nükleer saha lisansı verilmiştir. İnşaatı Mart 2017'de başladığında 2025'te tamamlanması beklenen İngiltere'deki Hinkley Point C nükleer santrali başlangıçta 18 milyar sterlin olarak bütçelendirilen projeler, ünitelerin tamamlanma tarihi en az 2029 ve 2031'e ertelenerek 30 milyar sterlinin üzerine çıkmıştır.

Büyük nükleer santrallerin yüksek miktarda güç sağlamaları yanında, yüksek maliyetler, uzun zaman çizelgeleri, karmaşık mühendislik, sıkı yer seçimi gereksinimleri, çeşitli güvenlik endişeleri sebebiyle birçok ülkenin daha güvenli ve geleceğe daha uyumlu olduğunu düşündükleri nükleer enerji üretiminde Küçük Modüler Reaktörler gibi daha küçük kapasitede ve daha esnek çözümlere yöneldiğini göstermektedir. Dünya karbonsuzlaşma yolunda hızla ilerlerken, Küçük Modüler Reaktörler (KMR'ler), ülkeler nezdinde geleneksel nükleer projelerin karşılaştığı birçok zorluğa karşı çözüm sunarak daha pratik, esnek ve daha güvenli bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Çünkü SMR (Küçük Modüler Reak-

tör)'ler modülerdir, ilgili fabrikalarda parçaları üretilir ve sahaya taşınarak yerinde monte edilmesi üzerine planlanmaktadır, bunun hem proje maliyetini hem de inşaat süresini azaltmasına yol açması beklenmektedir.

2. SMR (Küçük Modüler Reaktör)'lerin Beklenen Avantajları ve Zorluklar

Günümüzde halen dünyada işletmede olan 32 ülkede 400'den fazla 1.000 MW üzerinde güç üreten büyük nükleer enerji reaktörleri bulunmaktadır. Bu nükleer reaktörler, dünya elektriğinin yaklaşık %10'unu sağlamakta ve bunlar ulusal şebekeler için tasarlanmıştır. Bunun yanında 300 MW'a kadar çıkış gücüne sahip Küçük Modüler Reaktörler (SMR) ve 50 MW'ın altındaki mikro reaktörler, kademeli olarak devreye alınabilmekte, özel ihtiyaçlara göre uyarlanabilir özellikte ve arz-talep dengesini sağlamak için yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilebilmektedir. Modüler olarak adlandırılan reaktörler, tesisin büyük ölçüde fabrika ortamında üretilmesine dayanmakta ve sahadaki inşaat maliyetini ve programını azaltmak için önceden oluşturulmuş montajlardan oluşmaktadır.

Büyük santraller, geniş arazi, bol su ve güçlü şebeke bağlantıları gerektirmektedir; bu da inşa edilebilecekleri yerleri sınırlamaktadır. Örneğin, Finlandiya'da bulunan Olkiluoto 3 (OL3) santrali, 1600 MW net elektrik üretimiyle dünyanın en güçlü üçüncü nükleer enerji üretim ünitesi konumundadır. Üçüncü ünite olan OL3, Nisan 2023'te resmen faaliyete geçmiş olup, 60 yıllık bir hizmet ömrüne sahiptir. OL3'ün inşaat faaliyetleri, Finlandiya Hükümeti'nin santral için inşaat ruhsatı vermesi ve tüm saha çalışmalarının tamamlanmasının ardından 2005 yılında başlamıştır. Ünitinin 2009 yılında elektrik üretimine başlaması planlanmış, ancak projede çok sayıda gecikme yaşanmış olup OL3'ün reaktöre yakıt yüklemesi ancak Nisan 2021'de tamamlanmış ve Mart 2022'de ünite ulusal şebekeye bağlanmıştır.

Dünyada geline nokta, Nükleer enerji, karbonsuzlaşmanın sağlanması için olmazsa olmaz kabul edilme eğilimi olduğu görülmektedir. COP28'de 20'den fazla ülke, yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel enerji talebini tek başına karşılamaya yetmeyebileceği gerekçesiyle 2050 yılına kadar nükleer kapasitelerini üç katına çıkarma sözü vermiştir. Düşük Karbonlu ve Güvenilir Enerji Küçük ölçekli reaktörler (SMR) ve

mikro reaktörler, neredeyse sıfır sera gazı emisyonuyla elektrik üretmektedir. Ayrıca, ekonomik ve yenilenebilir olmasının yanında kesikli güç üreten güneş veya rüzgarın santrallerinin aksine, hava koşullarından bağımsız olarak sabit baz yük gücü sağlamaktadır. SMR'ler, genel olarak büyük reaktörlerin 1.000 MWe'den fazla çıkış gücüne kıyasla 300 MWe'ye kadar çıkış gücüyle tasarlanmaktadır.

Kompakt yapılarıyla Küçük Reaktörler, endüstriyel bölgelere daha yakın veya hatta uzak bölgelere kurulabilmektedir. Büyük güçteki nükleer santraller, güvenlik açısından karmaşık aktif sistemlere dayanırken, Küçük Reaktörler yerçekimi ve konveksiyon gibi pasif güvenlik özellikleri kullanmakta ve bu onları doğası gereği daha dayanıklı ve daha güvenli hale getirmektedir. Dünya genelinde ülkeler modüler nükleer teknolojiler geliştirmek için yarışmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde Enerji Bakanlığı, askeri üsler ve ücra topluluklar için mikro reaktörler de dahil olmak üzere tanıtım projelerini finanse ederken, NuScale Power gibi şirketler ticari projeler geliştirmektedir. Çin, dünyanın ilk kara tabanlı ticari SMR'si olan Linglong One'ı inşa ediyor ve reaktörleri endüstriyel entegre etmeyi planlamaktadır. Rusya, Arktik bölgelerine enerji sağlayan yüzen bir SMR olan Akademik Lomonosov halihazırda işletmekte olup ayrıca en yeni nükleer enerjili buz kırıcı filosuna güç sağlamak için kullanılan RITM-200 serisinden uyarlanmış, su soğutmalı 55 MW kapasiteli bir RITM-200N reaktörü projesine devam etmekte ve Yakutistan'daki Ust-Kuyga yakınlarında inşa edilecek olan reaktörün 2028'de hizmete girmesi hedeflenmektedir. Bu arada, Birleşik Krallık, 2030 yılına kadar hedefleyen Rolls-Royce'un SMR programını desteklemekte ve Japonya, Fukuşima sonrası nükleer canlanmanın bir parçası olarak gelişmiş SMR prototiplerini araştırmaktadır.

Mikro reaktörlerin ise (genellikle <50 MWe), büyük santrallerin pratik olmadığı ücra noktalara, askeri üslere veya endüstriyel alanlara güç sağlayabileceği üzerine durulmaktadır. Mikro reaktörler, afet yardımı, askeri operasyonlar veya ücra topluluklar için taşınabilir ve dayanıklı güç sağlayabilecektir. Bunlar, kırsal ücra bölgelerdeki dizel jeneratörlerin yerini alabilir, emisyonları ve yakıt lojistiğini azaltabileceklerdir.

Mikroreaktörler (MR), gelişmiş mühendislik güvenlik özelliklerine sahiptir ve fabrikada seri

olarak üretilip talep arttıkça kurulum için enerji dağıtım şirketlerine gönderilmek üzere tasarlanmaktadır. Tek veya çok modüllü bir tesis olarak konuşlandırılabilen ve mikroreaktörler tüm temel reaktör teknolojilerinde geliştirilme aşamasında bulunmaktadır.

Küçük Reaktör Reaktörlerinin (SMR) özel bir kategorisi taşınabilir reaktör tipleridir. Taşınabilir nükleer santral (TNPP), yakıt ikmali yapıldığında elektrik ve ısı gibi nihai enerji ürünleri üretebilen, fabrikada üretilen taşınabilir bir nükleer santraldir. Daha düşük ön maliyet, daha küçük şebekelere uygunluk ve daha kısa inşaat süreleri potansiyelleri nedeniyle birçok Devlet, küçük modüler reaktörlere (SMR'ler) güçlü ve artan bir ilgi duymaktadır.

Günümüzde küresel nükleer tedarik zinciri, büyük reaktörlere yönelik gelişmiştir. Küçük ölçekli reaktörlerin ölçeklenebilir bir şekilde inşa edilmesi, yeni üretim kapasiteleri, standartlaştırılmış tasarımlar ve güvenilir bileşen tedarikçileri gerektirmektedir.

3. Geliştirilen SMR Projelerinde Yaşanan Gelişmeler

Küçük Reaktör Reaktörleri (SMR'ler), modül başına tipik olarak 300 MW(e)'ye kadar elektrik çıkışına sahip veya buhar üretimi, tuzdan arındırma ve hidrojen üretimi gibi diğer uygulamalarda eşdeğer olan gelişmiş reaktörleri tanımlamaktadır. Genellikle 10 MW(e) veya eşdeğerinden daha düşük güç kapasitesine sahip reaktörler mikroreaktör olarak tanımlanmaktadır.

Amerika Birleşik Devletleri: ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu (NRC), NuScale Power'ın VOYGR SMR'si gibi tasarımları onaylanmıştır. ABD Enerji Bakanlığı, askeri üsler ve uzak topluluklar için mikroreaktörler de dahil olmak üzere tanıtım projelerini finanse etmektedir. Teknoloji şirketleri (Google, Amazon), veri merkezlerine güç sağlamak için SMR'leri araştırmaktadır.

Rusya: Uzak Arktik bölgelerine güç sağlayan dünyanın ilk yüzen SMR'si Akademik Lomonosov'u işletmektedir. İzole topluluklar için gelişmiş hızlı reaktörler ve mikroreaktörler geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

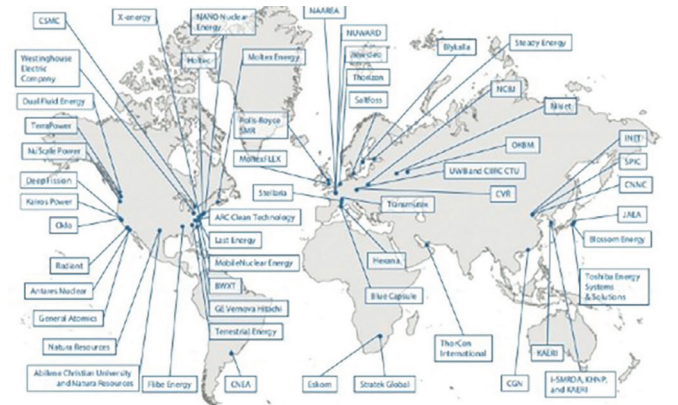
Çin: İlk kara tabanlı ticari SMR olan Linglong One (ACP100) reaktör projesini inşa etmeye devam etmektedir. SMR'leri endüstriyel kümeler ve

uzak şebekelere entegre etmeyi planlamaktadır.

Kanada: Ontario Power Generation (OPG), Darlington'da bir GE Hitachi BWRX-300 SMR inşa etmektedir. Kanada, SMR ihracatı için bir merkez olarak konumlanmayı seçmiş ve güçlü bir devlet desteğine sahip bulunmaktadır.

Japonya: Sodyum soğutmalı ve kurşun soğutmalı hızlı reaktörler de dahil olmak üzere gelişmiş reaktör tasarımları geliştirmektedir. Fukushima sonrası nükleer canlanma stratejisinin bir parçası olarak SMR'lere odaklanılmıştır.

2024 itibarıyla dünya çapında yalnızca iki SMR faaliyette bulunmakta, ancak 120 tanesi daha planlama veya inşaat aşamasında bulunmaktadır. OECD Nükleer Enerji Ajansı'nın Küçük Modüler Reaktör Gösterge Tablosu'nun son sayısında, dünya çapında 127 farklı SMR tasarımı olduğunu, bunun 51 Küçük Modüler Reaktör tasarımının ön lisans veya lisanslama süreçlerinde yer aldığı ve 85 aktif görüşmenin SMR geliştiricileri ile nükleer santral saha sahipleri arasında gerçekleştiği bildirilmektedir. Ayrıca, 2024 baskısından bu yana en az bir finansman kaynağı veya finansman taahhüdü alan SMR tasarımlarının sayısında %81'lik bir artış olduğu belirtilmektedir.



Şekil 1: SMR geliştiren ülkeler ve pojejeri (OECD NEA SMR Dashboard)

SMR ve mikroreaktör projelerinin zaman çizelgesi (2025-2035) bu teknolojilerin gerçekten ne zaman elektrik üretmeye başlayacağına bir işaret vermektedir :

2025-2027 arası

- Çin: Linglong One'in (ACP100) Hainan'da faaliyete geçmesi bekleniyor.

- Amerika Birleşik Devletleri: Idaho Ulusal Laboratuvarı'nda Enerji Bakanlığı destekli mikroreaktör gösterileri.
- Kanada: Darlington'da BWRX-300 SMR'nin inşası devam ediyor ve 2020'lerin sonlarında faaliyete geçmesi hedefleniyor.
- Rusya: Akademik Lomonosov'un ötesinde Arktik bölgelerde yüzen SMR'lerin genişletilmesi.

2028-2030 arası

- ABD NuScale VOYGR SMR: İlk ticari dağıtım Idaho Falls'ta planlanıyor.
- Kanada: Darlington SMR'nin 2029 yılına kadar devreye alınması planlanıyor.
- Birleşik Krallık: Rolls-Royce SMR programının ilk başlangıcı 2030 civarında hedefleniyor.
- Japonya: Gelişmiş SMR prototiplerinin tanıtım aşamasına ulaşması bekleniyor.

2031-2035 arası

- Küresel Genişleme: Birçok ülkede (ABD, Kanada, Birleşik Krallık, Çin, Rusya, Güney Kore) SMR filo sahalarının kurulmasını hedeflenmektedir.
- Mikroreaktörler: Askeri üsler, madencilik operasyonları ve uzak topluluklar için taşınabilir ünitelerin ölçeklenmesi bekleniyor.
- Hibrit Enerji Sistemleri: Yenilenebilir enerji ve hidrojen üretim tesisleriyle entegre SMR'ler.

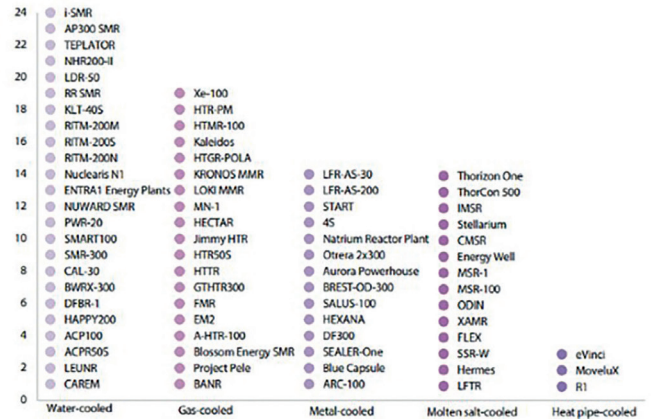
Kısacası, dünyada 2020'lerin bitimine doğru elektrik üreten SMR'lerin ve mikro reaktörlerin ilk dalgasının görülmesi ve 2030'ların başlarında bunların yaygın olarak konuşlandırılması ve küresel enerji sistemlerine entegrasyonu gerçekleşmesi beklenmektedir.

4. Dünyada Geliştirilen SMR ve Mikroreaktör Teknolojileri

Uluslararası Atom Enerji Ajansı, Üye Devletlerin, SMR'lere dayalı bir nükleer enerji programı için nükleer altyapı gelişiminin, geleneksel büyük nükleer enerji santrallerine dayalı bir programla karşılaştırıldığında nasıl hızlandırılabilirliğini veya derecelendirilebileceğini ve optimize edilebileceğini anlamalarına yardımcı olmak için IAEA Nükleer Uyumlaştırma ve Standardizasyon

Girişimi başlatmıştır. Yayınlanan kılavuz ile SMR teknolojilerine dayalı nükleer enerji programları için gerekli olan ve yakın gelecekte ticari olarak kullanıma sunulması muhtemel nükleer altyapının geliştirilmesi ele alınmaktadır. Dünyada geliştirilen SMR teknolojileri genel olarak beş sınıfta tanımlanmaktadır.

Basınçlı su reaktörleri, kaynar su reaktörleri ve bazı durumlarda ağır su reaktörleri gibi büyük reaktörler için geliştirilen teknolojiye dayanırlar. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansının web sitesinde yayınladığı Gelişmiş Reaktörler Bilgi Sistemi (ARIS) bilgilerine göre, Kara tabanlı su soğutmalı SMR'ler 15 farklı tasarımla yeni tasarımların en büyük grubunu oluşturmaktadır. Çoğu tasarımda, maliyeti kontrol altına almak için basitleştirmeye ve modüler yapıya odaklanılmıştır. Bazı tasarımlar, entegre basınç kapları gibi yenilikler içermektedir. Bu kategorideki bazı reaktör tasarımlarının 2027 yılı ile 2020 yılı arasında ticari olarak satışa sunulması beklenmektedir.



Şekil 2: Dünyada geliştiren SMR konseptleri (OECD NEA SMR Dashboard)

Su Soğutmalı Reaktörler, 20. yüzyılda nükleer endüstrinin temel taşı olmuş, halen faaliyette olan 442 reaktörün %96'sı su soğutmalı teknolojiye dayanmaktadır. Bu santrallerin çoğu başlangıçta 40 yıllığına lisanslanmış olup, ancak teknolojik bilgi düzeyindeki ilerlemeler sayesinde bu santrallerin ömürleri, ömür uzatma işlemleri sonucunda 60 yıla çıkarılmaktadır.

Hafif su reaktörleri (LWR'ler), dünya çapında en yaygın su soğutmalı reaktörlerdir ve iki türe ayrılır: Türbin için buharı ayrı buhar jeneratörlerinde üreten Basınçlı Su Reaktörleri (PWR'ler) ve reaktör çekirdeğinde üretilen buharı doğrudan buhar türbininde kullanan Kaynar Su Reaktör-

leri (BWR'ler). Tüm LWR'ler, fisil izotop U-235 ile zenginleştirilmiş yakıt kullanmaktadır.

Ağır Su Reaktörleri (HWR'ler), molekülleri %99'dan fazla oranda daha ağır bir hidrojen izotopu olan döteryumdan oluşan hidrojen atomlarından oluşan "zenginleştirilmiş" su kullanmaktadır. Yavaşlatıcı olarak kullanılan bu ağır su, genel nötron ekonomisini iyileştirerek zenginleştirme gerektirmeyen yakıt kullanımına olanak tanımaktadır.

ARIS Veritabanında on dört HTGR **Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörler (HTGR'ler)** tasarımı tanımlanmıştır ve bunlardan bir tanesi halihazırda 2022'den beri Çin'de faaliyette bulunmaktadır. Ayrıca, ikisi test amaçlı faaliyette olan üç test reaktörü tasarımı bulunmaktadır. Bu tasarımlar, yüksek sıcaklıklarda bile fisyon ürünlerini muhafaza etmelerini sağlayan bir çeşit izotropik yakıt kullanmaktadır.

ARIS veritabanı, soğutucu olarak **sodyum**, kurşun veya **kurşun bismüt** kullanan 10 hızlı reaktör tasarımı tanımlamaktadır. Hızlı reaktör geliştirilmede ilerleme kaydedildikçe, bu teknolojiye dayanan Küçük Reaktör Reaktörleri (SMR) güvenilir bir seçenek haline gelebilecektir. Ancak şu anda değerlendirilen bazı modeller daha çok tanııtım amaçlı olup, büyük hızlı reaktörlerin inşası daha sonra gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Erimiş tuz reaktörleri, ARIS veri tabanında 12 tasarım temsil edilmektedir ve bunlardan biri sahada konuşlandırılmak üzere olduğu değerlendirilmektedir. Erimiş tuz reaktörleri, Gen IV reaktörlerinin altı kategorisinden biridir. İlk olarak 1950'lerde geliştirilen erimiş tuz reaktörleri, daha yüksek verimlilik ve daha düşük atık üretimi gibi avantajlara sahiptir. Bazı tasarımlar katı yakıt gerektirmemekte olup, bu da üretim ve imha ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Son yıllarda bu teknolojiye olan ilginin artması, geliştirme faaliyetlerinin yenilenmesine yol açmıştır. Erimiş tuz reaktörleri (MSR'ler), çeşitli faydaları nedeniyle bazı ülkelerde gelecek vaat eden gelişmiş bir reaktör teknolojisi olarak görülmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda çalışırlar, bu da elektrik üretiminde verimliliğin artmasına yol açmaktadır. Ayrıca düşük çalışma basınçları, bir kaza sonucu büyük bir kırılma ve soğutma sıvısı kaybı riskini azaltabilir ve böylece reaktörün güvenliğini artırabilmektedir. Bu reaktörler, yakıt kaynaklarının genişletilmesine olanak tanıyan çeşitli nükleer

yakıt çevrimlerine (Uranyum-Plütonyum ve Tor-yum-Uranyum çevrimleri gibi) uyum sağlayabilmektedir.

Ayrıca nükleer atık "yakıcıları" veya yetiştiricileri olarak da tasarlanabilirler. MSR'ler tarafından üretilen yüksek sıcaklıktaki ısı daha sonra elektrik üretimi ve diğer yüksek sıcaklıktaki proses ısısı uygulamaları için kullanılabilir. MSR teknolojisinin gelişimi birçok ülkede artmaktadır. Kökenleri 1960'larda Oak Ridge Ulusal Laboratuvarları tarafından başlatılan Erimiş Tuz Reaktörü Deneyine kadar uzanan çeşitli reaktör konseptleri üzerinde çalışılmaktadır. Mevcut araştırma ve geliştirme çabaları, malzemelerle ilgili sorunların çözülmesine, güvenlik özelliklerinin değerlendirilmesine, temel tasarım yöntemlerinin geliştirilmesine ve ekonomik modellerin değerlendirilmesine odaklanmaktadır.

Mikroreaktörler, hafif su, helyum, erimiş tuzlar ve sıvı metaller gibi çeşitli soğutucu akışkanlarla birçok farklı tasarıma sahip olabilir. Çıkış güçleri genellikle 10 MW(e)'den azdır ve uzak bölgeler veya şu anda dizel jeneratörlerle çalışan madencilik endüstrileri gibi niş uygulamalar için tasarlanmıştır. Bu reaktörler daha küçük olsa da, bunların nasıl konuşlandırıldığı ve kullandıkları teknolojiler, nükleer altyapıda ele alınması gereken hususlar olarak ortaya çıkmaktadır.

Mikroreaktörler taşınabilir oldukları ve gelişmiş yakıt çevrimlerini benimseme olasılıkları yüksek olduğundan, potansiyel sayıları, güvenlik önlemlerinin uygulanmasını potansiyel olarak karmaşık hale getirebilmektedirler. Ancak, kapladıkları alanın küçüklüğü ve taşınabilir olmaları, yenilikçi dağıtım modellerine yol açabilir ve bu da ev sahibi ülkede nükleer altyapı uygulamasını kolaylaştırabilmektedir.

5. Teknoloji olgunluk seviyesi ve SMR Proje Geliştirilmesi

Avrupa Küçük Modüler Reaktörler Endüstri İttifakı (SMR'ler), 2030'ların başlarına kadar Avrupa'da SMR'lerin geliştirilmesi, gösterimi ve dağıtımını kolaylaştırmayı ve hızlandırmayı amaçlamaktadır. İlk Stratejik Eylem Planını kabul etmiş olup Plan, 2030'ların başlarına kadar Avrupa'da SMR'lerin geliştirilmesini, tanıtımını ve dağıtımını desteklemek için önümüzdeki beş yıldaki faaliyetlere dair ayrıntılı bir genel bakış sunmaktadır. Elektrik üretiminin ötesinde piyasa

talebini karşılamak, tedarik zincirini canlandırmak, Ar-Ge ve beceri geliştirmeyi teşvik etmek, finansal fırsatların kilidini açmak ve düzenlemeleri basitleştirmek gibi temel zorlukları ele almak için on özel eylem özetlenmektedir. Ayrıca, SMR gelişimi için olmazsa olmaz olan finansman, kamuoyu katılımı, yakıt ve atık yönetimi ve emniyet ve güvenliği de kapsamaktadır. İttifak, Avrupa'da Küçük Ölçekli Reaktörlerin (SMR) zamanında ve başarılı bir şekilde konuşlandırılmasını sağlamak için üyeler, AB kurumları ve uluslararası kuruluşlarla yakın bir şekilde çalışmaya kararlı olduğunu belirtmektedir.

Geliştirilen SMR projelerinde, olgunluk seviyesi yüksek teknoloji seçimi kritik bir süreç olarak ortaya çıkmaktadır. Teknoloji olgunluk seviyesi, belirli bir tasarımın ticarileştirmeye ve dağıtımına ne kadar yakın olduğunu ifade etmektedir. En olgun teknoloji, bir veya daha fazla örneğinin lisanslandığı, inşa edildiği ve devreye alındığı, bir tedarik zincirinin kurulduğu ve işletme deneyiminin mevcut olduğu teknolojidir. Bu olgunluk düzeyine sahip bir tasarım, aynı zamanda gelişmiş güncel tasarım olarak da bilinir ve diğer projeler için bir "referans tesis" sağlayabilir. Bir referans tesisten elde edilen bilgi ve uzmanlık, giriş yapan ülkeler de dahil olmak üzere diğer ülkelerde benzer tasarıma sahip diğer nükleer santrallerin konuşlandırılmasını önemli ölçüde destekleyebilir.

SMR nükleer projelerde yer belirleme çalışmaları, uygun alanların belirlenmesi, belirli yerlerin sıralanması ve seçilen yerlerin uygunluğunun gerekçelendirilmesi gibi çeşitli aşamalarını içermektedir. Bir nükleer santral için uygun bir sahanın seçimi ve değerlendirilmesi, net bir dizi özelliğin ve ilgili kriterlerin benimsenmesini ve uygulanmasını gerektirir. Bu genellikle, uygulanabilir mühendislik çözümlerinin bulunmadığı kabul edilemez bölgeleri/alanları/sahaları eleme için kullanılan dışlayıcı özellikleri ve uygun alanları belirlemek ve nihayetinde koruyucu mühendislik çözümlerinin mevcut olduğu potansiyel sahaları sıralamak için kullanılan tercihe dayalı özellikleri içermektedir.

Önemli Aşamalar yaklaşımı, projeye başlayan veya genişleyen ülkelerin, proje risklerini azaltmak ve uygulama için destek kazanmak amacıyla referans bir tesisin mevcut olduğu olgun tasarımları seçeceğini varsaymaktadır. Bugüne kadar, yalnızca birkaç SMR tasarımı yüksek

olgunluk seviyelerine ulaşmıştır. Nükleer Enerji Ajansı (NEA) SMR Panosu, nükleer enerjiye hazırlığın altı boyutunda ilerlemeyi değerlendirmek için kriterleri tanımlar: lisanslama, yerleştirme, finansman, tedarik zinciri, katılım ve yakıt. Bu kriterlere göre sıralandığında, su Soğutmalı ve yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörler, ticari olarak kullanıma hazır hale gelmeye en yakın SMR tasarımları arasındadır.

Holtec firmasının geliştirmekte olduğu SMR-160+ küçük modüler reaktörü, düşük oranda zenginleştirilmiş uranyum yakıtı kullanan bir Basınçlı Su Reaktörüdür (PWR). 2010 yılından beri geliştirilmekte olan tasarım, bir yeraltı reaktör çekirdeği ve nükleer buhar besleme sistemi bileşenlerini barındırmakta ve kapatıldıktan sonra süresiz olarak çalışabilen pasif bir soğutma sistemini içermektedir. Holtec SMR-160 reaktörünün pasif güvenlik özellikleri sayesinde, reaktörü çalıştırmak için pompalar gibi aktif bileşenlere ihtiyaç duyulmaz ve reaktörün kapatılması veya bozunma ısısının giderilmesi için tesis içi veya tesis dışı herhangi bir güç kaynağına gereksinim duyulmamaktadır. Bu tasarım, herhangi bir insan müdahalesi olmadan reaktörün koşulsuz güvenliğini sağlamak için yerçekimini kullanan pasif soğutma özelliklerini bünyesinde barındırmaktadır. Bu özellikler, reaktörün doğal afetler, insan kaynaklı tehditler veya düzenleyici kurum dokümanlarının gerektirdiği herhangi bir durumda operatör eylemine gerek kalmadan "kendi kendine güvenli" (walk-away safe) olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, SMR-160'ın neredeyse istenen her basınçta buhar sağlama yeteneği, endüstriyel uygulamalarda yüksek basınçlı buhar kullanımını gibi yeni geliştirme fırsatları sunmaktadır.

NuScale SMR, NuScale Güç Modülü olarak adlandırılan bir PWR enerji santralidir. Bu küçük enerji santrali, 250 MWth'den 77 MWe güç üretecek şekilde tasarlanmış ve 924 MWe'ye kadar özel talepleri karşılayacak şekilde ölçeklendirilebilen bir dizi modülden oluşmaktadır. VOYGR™ SMR santralleri, sahada dört, altı veya onikiye kadar güç modülüne sahip olacak şekilde tasarlanabilmektedir. Standart hafif su reaktör yakıtı kullanan bu reaktör, ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu'ndan (NRC) tasarım onayı alan tek küçük modüler reaktör özelliği taşımaktadır. Diğer SMR tasarımları gibi, NuScale Güç Modülü de elektrik sağlamak üzere geliştirilmiş olup aynı zamanda elektrik üretimi, bölgesel ısıtma, tuzdan arındırma, ticari ölçekli hidrojen üretimi

ve diğer proses ısı uygulamalarında da kullanım potansiyeline sahiptir. NuScale SMR projeleri şu anda 10'dan fazla ülkede değerlendirilmekte olup, ilk projenin 2029 yılına kadar Idaho'da faaliyete geçmesi beklenmektedir.

Westinghouse AP300™ küçük modüler reaktörü, şu anda lisanslı ve operasyonel bir nükleer reaktör tasarımına dayanan tek SMR projesi konumundadır. Piyasaya sürülen tasarım, operasyonel AP1000 PWR'den türetilmiş olup, bu onu türünün ilk örneği teknolojiler ve risklerle geliştirilen diğer tüm SMR'lerden ayırmaktadır. Bu reaktör, gelişmiş, III+ Nesil tek devreli, basınçlı hafif su reaktörüdür. Westinghouse, AP1000 ile aynı mühendislik, bileşen ve tedarik zincirini kullandığını, bunun da lisanslama süreçlerini kolaylaştıracağını ve mevcut teknik becerilerin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayacağını belirtmektedir. Westinghouse ayrıca, basitleştirilmiş, modüler ve ultra kompakt nükleer adanın inşaat maliyetlerini ve programını da azalttığını belirtmektedir. Bu nedenlerle şirket, ilk operasyonel ünitenin 2030'ların başında hazır hale getirmeyi planlamaktadır.



Şekil 3. Tam bağlantısız olarak tasarlanmış entegre küçük basınçlı hafif su reaktörü (nucleus.iaea.org)

Çin'de şu anda inşaatı devam eden önde gelen SMR projesi, Güney Çin'deki tropikal Hainan Adası'ndaki Changjiang Nükleer Santrali sahasında inşa edilen Linglong One (ACP100) reaktörüdür. Linglong One, karada inşaatı başlayan dünyanın ilk ticari SMR'si olarak öne çıkmakta ve teknoloji açısından önemli bir küresel dönüm noktasını temsil etmektedir. Bu reaktörün güç kapasitesi 125 MWe (megawatt elektrik) olup, inşaatı devam etmektedir. Bu reaktörün 2026 yılında şebekeye bağlanması planlanmaktadır. Linglong One, 2016 yılında Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından yapılan güvenlik incelemesinden başarıyla geçen ilk küçük modüler

reaktör olmasıyla dikkat çekmektedir. Tasarımı, harici güç veya insan müdahalesi gerektirmeden güvenli bir şekilde kapatılmasını sağlayan pasif güvenlik sistemlerine sahiptir. Şekil 3.'te tasarım yapısı verilen Çin'in inşaatı devam eden SMR projesi "Linglong 1" olarak da adlandırılan ACP100, reaktör teknolojisinin geliştirilmesinde önemli yenilikler içermektedir. SMR'nin esnek yapısı nedeniyle, reaktör elektrik üretiminin yanı sıra bölgesel ısıtma, endüstriyel ısı temini ve tuzdan arındırma gibi çeşitli uygulamalarda da kullanılabilir olacaktır.

6. Sonuç ve Değerlendirmeler

Küçük Modüler Reaktörler (SMR'ler), nükleer teknolojilerin yeni endüstriyel uygulamalara entegre edilmesinin önünü açan yenilikçi güvenlik özellikleri içermekte olduğundan, bu özellikleri sebebiyle potansiyel yatırımcılar için daha cazip görünmektedirler. Bu reaktörler, nispeten düşük karbonlu elektrik ve ısı sağladıkları için entegre enerji sistemlerinde önemli bir rol oynamaları beklenmektedir. SMR'ler, ulaştırma, kimya ve çelik endüstrileri ve bölgesel ısıtma gibi emisyon azaltımı zor sektörlerin karbonsuzlaştırılmasına katkıda bulunabilirler. Kısacası, Küçük Modüler Reaktörler (SMR'ler) ve mikro reaktörler, güvenlik, uygun fiyat ve esnekliği temiz ve güvenilir enerjiye olan acil ihtiyaçla bir araya getirdikleri için nükleer enerjinin geleceğini temsil etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yerini alması beklenmemekte olup, ancak istikrarlı elektrik sağlamaları ve ülkelerin emisyon hedeflerine ulaşmalarına katkı sağlaması beklenmektedir. Ulusal Enerji Planı, Türkiye'nin toplam kurulu nükleer kapasitesini 2035 yılına kadar 4,8 GW'tan 7,2 GW'a çıkarmayı hedeflemektedir. Nükleer kapasite inşasında sıçrama yapmayı hedefine koyan Türkiye'nin, nükleer endüstri tarafından önemli bir pazar haline gelmesi göz ardı edilemeyecek bir gelişme olacaktır.

Türkiye'nin Küçük Modüler Reaktörler (KMR) ve mikro reaktörleri entegre etme stratejisi, 2035 yılına kadar iddialı 7,2 GW nükleer kapasite hedefine başarıyla ulaşmak için güvenlik, ekonomik uygulanabilirlik ve stratejik bağımsızlığı önceliklendiren kriterlere dayanmalıdır. Türkiye, SMR projesi geliştirirken, proje riskini önemli ölçüde azaltmak, lisanslamayı hızlandırmak ve istikrarlı bir tedarik zinciri sağlamak için Westinghouse AP300 veya NRC onaylı NuScale SMR gibi yüksek olgunluk seviyesine sahip ve "Refe-

rans Tesis" statüsünde olabilen SMR tasarımlarını seçmeye öncelik vermesi IAEA gerekliliklerine yerine getirmede daha uyumlu olacaktır. SMR'lerin ve mikro reaktörlerin benimsenmesi, Türkiye'ye enerji karışımını çeşitlendirme ve çelik ve kimya gibi karbonsuzlaştırılması zor endüstriyel sektörlerin karbonsuzlaştırılması için gerekli esnek, düşük karbonlu güç ve ısıyı sağlama gibi ikili bir avantaj sunması beklenmektedir. Türkiye, karasal SMR tasarımlarından yararlanması, 2035 yılına kadar nükleer kapasitesini 7,2 GW'a çıkarma gibi iddialı hedefine ulaşabilmesine de katkı sağlayacaktır.

Türkiye, ilk tedarik çalışmalarını, yüksek düzeyde teknolojik olgunluğa ulaşmış, ideal olarak tanımlanmış bir "Referans Tesis"e sahip SMR tasarımlarına odaklanmalıdır. Gerekçe: "Referans Tesis", lisanslanmış, inşa edilmiş ve devreye alınmış, yerleşik bir tedarik zinciri ve işletme deneyimine sahip bir tasarım olarak tanımlanır olmalıdır. Olgunluk seviyesi yüksek bir SMR tasarımı seçmek, proje yürütme riskini önemli ölçüde azaltacak, inşaat programlarını kısaltarak ve türünün ilk örneği (FOAK) teknolojilere kıyasla maliyetlerin hesaplanması için daha güvenilir bir temel sağlayacaktır.

SMR'ler, Türkiye'ye enerji ve sanayi sektörlerindeki birçok zorluğun aynı anda üstesinden gelmek için güçlü bir araç sunmaktadır. SMR'ler ve mikro reaktörlerin konuşlandırılması, Türkiye'nin enerji karışımını dalgalı güç sağlayan fosil yakıtlardan uzaklaştırarak, kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarını (rüzgar/güneş) tamamlayan dayanıklı bir temel yük güç kaynağı olarak öne çıkacaktır. Türkiye, gelişmiş tasarımlara sahip tedarikçilerle ortaklık kurarak, uzun vadeli kendi kendine yeterliliği garanti altına alarak, işletme, bakım ve düzenleme için nitelikli bir yerel nükleer iş gücünü hızla oluşturmak için bu uzmanlıktan etkili bir şekilde yararlanabilecektir. Türkiye, belirli reaktör bileşenleri için Türk üretim kapasitesinin kullanılmasını zorunlu kılan anlaşmalar üzerinde müzakere edebilir, böylece yerel tedarik zincirini canlandırmalı ve yüksek değerli istihdam olanakları oluşturabilecektir.

Türkiye'nin başlangıçta odak noktası Basınçlı Su Reaktörü (PWR) tabanlı Küçük Modüler Reaktörler (SMR'ler) olara görünse de, Erimiş Tuz Reaktörleri (MSR'ler), Türkiye'nin uzun vadeli stratejisi için aktif olarak araştırdığı hayati önem taşıyan, gelişmiş bir nükleer teknolojiyi temsil

etmektedir. Bu teknoloji, yerli toryum kullanımının ithal uranyum yakıtına olan bağımlılığı azaltması ve doğal pasif güvenlik ile daha az kalıcı radyoaktif atık potansiyelinin çevresel hedeflerle uyumlu olması sayesinde enerji bağımsızlığını da artırmaktadır. MSR teknolojisinin küresel olarak hala prototip aşamasında olduğu göz önüne alındığında, mevcut strateji öncelikle 2035 kapasite hedeflerine hızla ulaşmak için ticari olarak olgunlaşmış PWR tabanlı SMR'lerin devreye alınmasını, ardından yüksek sıcaklıklı, yakıt açısından esnek ve tamamen ulusal nükleer teknolojinin tüm avantajlarından yararlanmak için MSR'lerin ikinci bir aşamada entegre edilmesini içermelidir. Bazı MSR tasarımları toryumu yakıt kaynağı olarak kullanabilmektedir. Türkiye'nin yerel toryum rezervleri, MSR'lerin geliştirilmesi ithal uranyuma olan bağımlılığı azaltarak enerji bağımsızlığını önemli ölçüde artıracaktır.

Millî İstihbarat Akademisi tarafından Ekim 2025 te yayınlanmış olan Nükleer Enerjide Stratejik Fırsat: Küçük Modüler Reaktörler Ve Türkiye raporunda da, Türkiye'nin büyüyen ekonomisi ve artan enerji talebi karşısında arz güvenliği, uygun maliyet ve düşük emisyon hedeflerinin aynı anda karşılanmasının stratejik bir zorunluluk olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca Raporda, SMR'lerin uzak şebekeler, maden sahaları ve dağınık yerleşimler için kesintisiz ve ölçeklenebilir bir çözüm sunduğu vurgulanmıştır. Bu bağlamda Türkiye'nin Nükleer Denizaltı (NÜKDEN) Projesi'nin stratejik önem taşıdığı, Türkiye'nin 2053 vizyonunda toplam nükleer kurulu gücün 20 GWe'ye çıkarılmasının hedeflendiği vurgulanmıştır. Türkiye'nin teknolojik olgunlaşma penceresini iyi kullanması durumunda yalnızca kullanıcı değil; aynı zamanda bölgesel tedarik, mühendislik ve AR-GE (araştırma-geliştirme) merkezi olma fırsatını da yakalayabileceği, yerli kapasiteyi de artıracığı vurgulanmıştır.

Bu anlamda, Türkiye, olgunluk seviyesi yüksek PWR tabanlı SMR'lerin başarılı bir şekilde devreye alınmasının ardından, nükleer dağıtımın ikinci aşamasının bir parçası olarak MSR'leri dahil etmesi ülke stratejik hedeflerine ulaşmada daha kolaylaştırıcı rol oynayacağı değerlendirilmektedir.

Kaynaklar :

- 1- Nuclear Engineering International , traceyhonney, www.neimagazine.com/advanced-reactorsfusion/smr-shortlist-explored-11370078/?cf-view, December 14, 2023
- 2- Ontario Investing \$1 Billion to Build Small Modular Reactors at Darlington , news.ontario.ca/en/release/1006638/ontario-investing-1-billion-to-build-small-modular-reactors-at-darlington, October 23, 2025
- 3- Energynews, Nuclear Energy Energy Asset Transfer. www.energynews.pro/en/acp100-chinas-first-modular-reactor-for-sustainable-nuclear-energy, September, 17 2024
- 4- NEA Small Modular Reactor (SMR) Dashboard, www.oecd-nea.org/jcms/pl_73678/nea-small-modular-reactor-smr-dashboard
- 5- World Nuclear Association, www.world-nuclear-news.org/articles/there-are-now-127-different-smr-designs-finds-nea-report, Wednesday, 23 July 2025
- 6- Advanced Reactors Information System (ARIS), International Atomic Energy Agency, www.aris.iaea.org/TechnicalData/, September 2024
- 7- The Platform on Small Modular Reactors and their Applications, International Atomic Energy Agency (IAEA)nucleus.iaea.org/sites/smr/SMR_Platform_Meeting_Public_Assets/INT2023
- 8- NuScale to Power Historic 6-GW SMR Project, www.nuscalepower.com
- 9- Main pump installed on Linglong One unit of Changjiang Nuclear Power Plant, www.en.cnn.com.cn/2025-04/27/c_1089207.htm
- 10- SMR technology development, www.small-modular-reactors.org/smr-technology-development/, November 2025
- 11- Rapor, Nükleer Enerjide Stratejik Fırsat: Küçük Modüler Reaktörler Ve Türkiye, Millî İstihbarat Akademisi, Ekim 2025.
- 12- Small Modular Reactor Technology Catalogue 2024 Edition. www.aris.iaea.org/publications

2026 YILI EN AZ ÜCRETLERİ YAYIMLANDI

Elektrik Mühendisleri Odası Yönetim Kurulu, 2026 yılında işletme sorumluluğu, trafo, dış tesis projeleri, test ve ölçümler gibi mühendislik hizmetleri için uygulanacak en az ücretlerin artışını karara bağlayarak, EMO alanındaki mühendislik hizmetlerinde temel alınacak yönetmelikler, sözleşmeler, rapor kriter ve formları, en az ücretlerin uygulama esaslarının da yer aldığı kitapçığı elektronik olarak yayımlamıştır.



1 Eylül 2025 tarihinden itibaren, elektrik tesisatı ve topraklama tesisatı, yıldırımından korunma tesisatı ve yangın algılama ve uyarı sistemleri periyodik kontrollerinde şeklen ve içerik olarak eksiksiz kullanılması zorunlu hale gelen rapor formatlarını bu yayın içerisinde bulabilirsiniz.

2026 yılında geçerli ücretler 26-27-28 Nisan 2024 tarihli Elektrik Mühendisleri Odası 49. Olağan Genel Kurulu'nun verdiği yetki ve 09.12.2010 tarih ve 27780 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Elektrik Mühendisleri Odası En Az Ücret ve Mesleki Denetim Uygulama Esasları Yönetmeliği'nin 6. maddesi uyarınca EMO Yönetim Kurulu'nun 10.11.2025 tarih ve 49/50 sayılı toplantısında kabul edilmiştir ve 01.01.2026 tarihi itibarıyla yürürlüğe girecektir.

2026 Yılı Elektrik, Elektronik, Elektrik-Elektronik, Biyomedikal Mühendisliği Hizmetleri kitabına ulaşmak için başlığa tıklayınız.