

**Global Sıfır Karbon Emisyonları Projeksiyonları Yönünde Ticari Sürdürülebilir
Temel Enerji Kaynağı Karbonsuz Nükleer Füzyon Santralleri Kurulması**

Ahmet Cangüzel Taner

Fizik Yüksek Mühendisi

Fizik Mühendisleri Odası FMO (canguzel.taner@gmail.com)

Mavi dünyanın küresel karbon ayak izi görüntüsünün sıfırlanması ve global karbon nötr gezegen olma hedefleri projeksiyonlarına ulaşabilmesi için ülkelerin iklim dostu karbonsuzlaştırma teknolojileri yatırımları projelerine ağırlık vermesi zorunlu görülmektedir. Yerkürenin ısınması ve dünya iklim değişiklikleri sorunlarının çözümü bağlamında Birleşmiş Milletler BM 2015 Paris İklim Anlaşması, çevre dostu uluslararası iklimsel devrim mutabakatı niteliği taşımaktadır. Söz konusu BM Paris İklim Değişikliği Anlaşması gereği olarak küresel karbondioksit emisyonlarının azaltılması, sınırlandırılması, kontrol ve denetim altına alınması icap etmektedir. Uluslararası 2015 Paris İklim Mutabakatı hükümleri uyarınca ise düşük karbon teknolojileri kapsamında füzyon tepkimeleri kökenli termonükleer güç santralleri, fisyon reaksiyonları menşeli nükleer güç santralleri NGS, yenilenebilir enerji kaynakları YEK odaklı güneş enerjisi santralleri GES, rüzgar enerjisi santralleri RES, hidroelektrik santraller HES üniteleri ve jeotermal enerji santralleri JES kompleksleri ön plana çıkmaktadır. Sürdürülebilirlik, küresel enerji arz güvenliği, iklim dostu kriterler ile çevre güvenliği ve halk sağlığı ölçütleri perspektifleri açısından en temiz enerji kaynakları arasında gösterilen aynı zamanda gelecek 30 yıl içinde kurulması ve yaygınlaşması öngörülen ticari baz yük kaynakları karbonsuz suni güneş termo nükleer elektrik santralleri bu yazıda ele alınmaktadır.

Karbondioksit salınımları olmayan, uzun vadeli ve sürdürülebilir elektrik üretimleri problemlerinin çözümü çerçevesinde dünyada var olan en önemli doğal enerji kaynağı olarak karbonsuz nükleer füzyon enerjisi, bir başka deyimle, sıfır karbon emisyonlu yapay güneş termonükleer enerji birinci sırada yer almaktadır. Yeryüzünün ısınması ve küresel iklim değişiklikleri zararlı etkilerinin yoğunlaşması karşısında özellikle ekonomik açıdan gelişmiş ülkeler hükümetleri ve özel sektör kuruluşları, nükleer füzyon enerjisi kökenli yüksek enerji fiziği ve nükleer plazma araştırma-geliştirme **Ar-Ge** çalışmaları üzerine odaklanmaktadır. Diğer taraftan, termo nükleer güç yakıtlı uzay araçları sayesinde evrenin derinliklerinin keşfi de olası sayılmaktadır. Nükleer fisyon güç üretim üniteleri olan klasik nükleer reaktörler uranyum veya plutonyum gibi özel nükleer yakıt materyalleri ve elemanları ile çalıştırılması neticesi bertaraf edilmesi gerekli olan yüksek radyoaktif nükleer atıklar meydana gelmektedir. Atomların bozunması tabanlı zincir reaksiyonları ve kimyasal tepkimeleri olmayan nükleer füzyon elektrik kompleksleri işletilmesi sonucu ise herhangi bir yüksek düzeyli radyoaktif atık oluşmamaktadır. Öte yandan, iklim dostu baz yüklü termonükleer enerji kaynaklı elektrik üretimleri çok önemli avantajlara sahip olmasına rağmen karbonsuz yapay güneş nükleer füzyon güç santralleri üniteleri ticari faaliyetleri gerçekleşmeden önce nükleer tesislerde kullanılacak malzemeler, materyaller, donanımlar ve ekipmanlar konularındaki teknolojik engellerin aşılması yönünde ciddi yasal düzenlemelerin yapılması da gerekmektedir. Günümüzde hükümetler, ulusal nükleer füzyon enerjisi projeleri için finansal destekler ve mali yardımlar sağlamaktadır. Örneğin, **Birleşik Krallık Atom Enerjisi Kurumu (United Kingdom Atomic Energy Authority - UKAEA)**, özel sektöre ait füzyon firmaları ile birlikte ticari nükleer füzyon enerjisi uygulanması ve geliştirilmesine yönelik

çalışmalar yürütmektedir. **Füzyon Sanayi Birliği** (Fusion Industry Association - **FIA**) Ekim 2021 raporu, özel sektör füzyon firmaları yönetimlerinin şimdiye kadar yaklaşık 1.9 milyar dolar fon yardımları aldıklarını açıklamaktadır. Özel sektör füzyon enerjisi şirketleri de manyetik sınırlandırma füzyonu (**magnetic confinement fusion** - **MCF**), manyetik hapsedme füzyonu (**magneto-inertial fusion** - **MIF**) ve atalet sınırlandırma füzyonu (**inertial confinement fusion** - **ICF**) gibi geniş spektrumlu termonükleer projeleri ticari hale getirmek için yoğun teknolojik çalışmalar yapmaktadır. Devlet sektörü olarak Birleşik Krallık Hükümeti, İngiliz Atom Enerjisi Kurumu'na Enerji Üretimi Amaçlı Küresel Tokamak (**UKAEA Spherical Tokamak for Energy Production** - **STEP**) projesine 220 milyon pound tutarında ekonomik kaynak aktarmaktadır. **Spherical Tokamak for Energy Production STEP**, termonükleer ve füzyon kökenli net elektrik üretimi potansiyelini kanıtlayacaktır. Ayrıca **STEP**, nükleer füzyon reaktörünün işletme ömrü boyunca manyetik sınırlandırmasının sürdürülebilir olmasını ve termonükleer tesisin kendi yakıtını üretme kapasitesini de tespit edecektir. Diğer taraftan, **Amerika Birleşik Devletleri Hükümeti**'nin devlete ait ulusal laboratuvarları ve **ABD** özel sektör füzyon kuruluşları işbirliği çalışmaları çerçevesinde geliştirilen çeşitli spesifik nükleer füzyon teknolojileri konularına desteği artan oranlarda sürmektedir. Böylece, yönetimlerin termonükleer yaklaşımları ve nükleer füzyon desteklerinin ışığı altında özel sektörün ticari sürdürülebilir karbonsuz termonükleer reaktörler kurması yolu da giderek teşvik edilmektedir. Son zamanlarda yeni kurulan özel sektör füzyon firmalarınca geliştirilen yenilikçi füzyon teknolojileri ve inovatif termonükleer teknikler, iklim dostu nükleer füzyon santralleri ünitelerinin ticari faaliyete geçmesinde olumlu ve önemli adımlar olarak nitelendirilmektedir.

Çevreci nükleer füzyon reaktörleri tasarım seçenekleri, özel sektöre ait termonükleer sanayi kuruluşları projeleri ve kamu sektörü füzyon enerjisi dizaynları arasında değişiklikler ve farklılıklar içermektedir. Çoğu nükleer füzyon tasarımları ise **tokamak** tipi termonükleer dizaynlar yönünde ilerleme kaydetmektedir. Tokamak tasarımı doğa dostu termonükleer tesisler, vakumlu nükleer füzyon reaktörü odasından ibaret olup, meydana gelen nükleer plazma sıcaklığı 100°C milyon derece santigrat civarında seyretmektedir. Gramla kilogram miktarlarında gerekli olan ve 12.7 yıl yarı ömürlü trityumun nükleer füzyon reaksiyonları ve termonükleer tepkimeleri sırasında çevrimiçi üretilmesi zorunluluk arz etmektedir. Tokamak dizaynı nükleer füzyon reaktörleri çevresi lityum içerikli katmanla sarılmakta ve **Li⁶(nH³)He⁴** reaksiyonu sayesinde trityum üretimi sağlanmaktadır. Üretilen trityum ise doğrudan nükleer füzyon odası içerisine enjekte edilmektedir. Nükleer füzyon enerjisi teknolojileri kullanımı sırasında trityumun depolanması ve yönetimi ile termo nükleer tesisi işletme kaynaklı iyonlaştırıcı radyasyon dozları ve radyoaktif atıklar temel sorunları teşkil etmektedir. Gaz konumundaki hidrojenin çoğu materyallere difüzyonu aynı zamanda trityumlu su oluşumu, trityum radyoizotopunun idaresi ve yönetiminin zorlukları arasında bulunmaktadır. Yedi gün ve yirmidört saat (7/24) çalışan nükleer füzyon reaktörü işletilmesi için gerekli trityum izotopu miktarı 100 gram ve 5000 gram aralığında bulunmaktadır. Söz konusu termonükleer yakıt trityum miktarı ise nükleer füzyon reaktörü tasarımı ve kapasitesine göre değişmektedir. Termonükleer reaktörün çalışması sırasında nükleer plazma tarafından üretilen gama ve X - ışınları nedeniyle oldukça önemli oranlarda iyonlaştırıcı radyasyon dozları ölçülmektedir. Ayrıca, termonükleer reaktör içerisinde füzyon reaksiyonları ve termonükleer tepkimeler kaynaklı 14.1 **MeV**'lik nötronlar ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan nötronlar ile ışınlanan yapısal materyaller ve komponentler üzerinde ise kalıntı radyoaktivite oluşmaktadır. İngiltere Atom Enerjisi Kurumu **UKAEA** tarafından yayınlanan en son

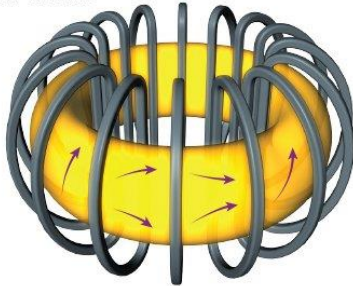
bilimsel makale, oluşan düşük düzeyli radyoaktif malzemeler ve materyaller için radyasyon sağlığı ve güvenliği açısından uygun şekilde orta seviyeli nükleer atık muamelesi gerekliliğini vurgulamaktadır. Orta düzeyli nükleer atıklar genellikle yapısal malzemeler içerisinde bulunan az miktardaki alaşım elementlerinden kaynaklanmaktadır. Örneğin, çeliği önemli ölçüde güçlendiren nano ölçekli azot bileşiği nitritleri oluşturan nitrojen ve niyobyum (**niobium**) gibi küçük safsızlıklar (minor impurities) meydana gelmektedir.

Büyük Britanya (**Great Britain - GB**) Hükümeti, ulusal yapay güneş füzyon enerjisi stratejisi çerçevesinde 2030'lu ve 2040'lı yıllarda devreye girmesi varsayılan termonükleer gücün kullanımına dair yasal düzenlemeler hakkında kapsamlı bir program üzerinde çalışmalar yürütmektedir. Kuzey İrlanda Sağlık ve Güvenlik İdaresi ve çevreci kuruluşlar tarafından hazırlanacak olan ayrıntılı nükleer füzyon enerjisi yasal düzenlemeleri sayesinde halk sağlığı, radyasyon güvenliği ve çevre korunması konuları da teminat altına alınacaktır. Yeni termonükleer reaktörler, ulusal suni güneş nükleer füzyon stratejisi prensipleri ve ilkelerine uygun olarak kurulacaktır. Nükleer füzyon güç santralleri işletme ömürleri tamamlandığı zaman ise termonükleer tesisin sökülmesi (decommissioning) çalışmaları finansmanı için önceden ayrılan korunumlu ve belirli bir amaç için kullanılabilir fonlar (ring-fenced funds) devreye girecektir. Günümüzde nükleer füzyon enerjisi şimdiye kadar hiç görülmemiş tarzda inovasyona dayalı çok hızlı büyüme ve yatırım süreci yaşamaktadır. Hükümetlerin ekonomik destekleri, mali yardımları ve fonları sayesinde nükleer füzyon endüstrisi; ticari olarak uygun, sürdürülebilir ve iklim dostu enerji kaynağı olanaklarını gelecek nesillere aktarmak üzere emin adımlar ile ilerlemektedir. Düzenli manyetik alanlı **tokamak** tasarımı ve karmaşık manyetik alanlı **stellarator** dizaynı nükleer plazma düzenekleri aşağıdaki resimde temsili biçimde gösterilmektedir. Tokamak dizaynı **Uluslararası Termonükleer Deney Reaktörü** (International Thermonuclear Experimental Reactor - **ITER**) kurulmasının 2025'de tamamlanması beklenmektedir. Sonuçta, radyasyon korunması uzmanlığı da yukarıda belirtilen termonükleer gücün olumlu gelişmeleri ışığında çok önemli bir görev üstlenecektir.

Containment strategy

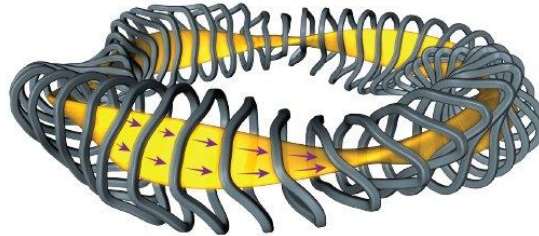
No known material can withstand the 100 million °C heat of a fusion plasma.
Building a reactor requires a different strategy

TOKAMAK



Superconducting magnets inside and outside contain the plasma, but currents of moving particles wander off course, destabilising the plasma - INTERMITTENT OPERATION

STELLARATOR



A complex asymmetric magnetic field ensures every plasma particle feels the same force, so the plasma can be maintained - CONTINUOUS OPERATION

Kaynak: Scoopnest

Kaynaklar:

- Radyoaktif Atıkların Yok Edilmesi veya Nihai Depolanması, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2006.
- Nükleer Atıkların İdaresi ve Yönetimi, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO**, 2007.
- Atom, Radyoaktivite, Radyoizotoplar ve Radyasyon Türleri, Ahmet Cangüzel Taner **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2008.
- Evren, İnsan ve İyonlaştırıcı Radyasyonlar, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2010.
- İyonlaştırıcı Radyasyonların Biyolojik Etkileşme Mekanizmaları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2010.
- Nükleer Füzyon Enerjisi (Nükleer Kaynaşma Birleşme Enerjisi) Termonükleer Füzyon Santralleri, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2011.
- Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Kapsamında Güneş Kökenli Nükleer Füzyon Enerjisi Güç Üretimi Amaçlı Uluslararası Termonükleer Deney Reaktörü **ITER**, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2014.
- İnovasyona Dayalı Yeni Nesil Stellarator Termonükleer Füzyon Makinesi ve Yenilikçi Tokamak Füzyon Enerjisi Reaktörü Arasındaki Teknolojik Rekabet, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Kyoto Protokolü Sonrası Olası BM 2015 Paris İklim Değişikliği Anlaşması Dünya Karbondioksit Emisyonları Artışları ve Yok Edilmesi Teknolojileri, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Gezegeenin Geleceği Açısından Hemen Gündeme Alınması Gereken Sorunlar Arasında Sayılan Küresel Isınma ve Global İklimsel Değişim Mekanizmaları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2016.
- Dünyanın En Büyük Termonükleer Deneme Reaktörü **ITER** Projesi Kanalıyla Nükleer Karbonsuz Füzyon Güç Santralleri Yapımları Gerçekleştirilmesi, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2019.
- Olumlu Termonükleer Bilimsel Araştırmaları Doğrultusunda Ticari Karbonsuz Nükleer Füzyon Elektrik Santralleri Kurulması Hakkında Özel Sektör İlgisi, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2019.
- İngiltere Tokamak Tipi Nükleer Füzyon Reaktörü Çalıştırılması ve Geleceğin Karbonsuz Baz Yüklü Termonükleer Güç Santralleri İçin Öncü Rolü, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2020.
- Küresel Karbonsuzlaştırma Teknolojileri Perspektifleri ile 21. Yüzyıl Global Isınma ve İklim Değişiklikleri Sorunları Dizginlenmesi Stratejileri, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2020.
- Dünya Karbonsuzlaştırma Devrimi Süreci Başlatan **Birleşmiş Milletler BM** 2015 Paris İklim Anlaşması Hükümleri Uygulamalarının Durumu ve Geleceği, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2020.
- Amerikalı Nükleer Füzyon Enerjisi ve Nükleer Plazma Fizikçileri Termo Nükleer Elektrik Santralleri Kurulması Mali Destekleri için İşbirliği Çalışmaları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2020.
- Küresel Termonükleer Araştırmaları ve Karbonsuz Temel Enerji Kaynağı Birinci Nesil Nükleer Füzyon Elektrik Santralleri Kurulması Çalışmaları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2021.
- The State of Play With Fusion Energy, Dr Thomas Davis, Radiation Protection Today Dergisi, Winter 2021.