

Inovasyona Dayalı Yeni Nesil Stellarator Termonükleer Füzyon Makinesi ve Yenilikçi Tokamak Füzyon Enerjisi Reaktörü Arasındaki Teknolojik Rekabet

Ahmet Cangüzel Taner
Fizik Yüksek Mühendisi
Fizik Mühendisleri Odası (canguzel.taner@gmail.com)

Gelecekte insan uygarlığının kurtuluşu için global parçacık fiziği, yüksek enerji fiziği ve nükleer plazma fiziği bilimsel araştırmaları içeriğinde inovatif termonükleer füzyon tesisi çalışmaları çok büyük önem taşımaktadır. Yenilikçi stellarator nükleer füzyon üniteleri ve yeni kuşak tokamak termonükleer füzyon sistemleri içinde ise uzun zamandan beri süregelen bilimsel ve teknolojik mücadele halen devam etmektedir. Sürdürülebilir global enerji arz güvenliği kriterleri yönünden can alıcı ehemmiyete sahip baz yük kaynağı inovasyona dayalı nükleer füzyon güç reaktörleri sistemlerinin yaşadığımız yüzyılın ortalarından sonra temel enerji kaynağı klasik nükleer fisyon elektrik santralleri ünitelerinin yerine geçmesi beklenmektedir. Bu bağlamda ilk ciddi adım olarak stellarator tasarımı modern Wendelstein 7-X nükleer füzyon kompleksi 2016 yılı sonlarında Almanya'da devreye girecektir. Öte yandan, Çin, Avrupa Birliği – AB, Japonya, Güney Kore, Rusya Federasyonu, Amerika Birleşik Devletleri – ABD, Hindistan bilim insanlarından oluşan çok uluslu konsorsiyum tarafından yönetilen tokamak dizaynı Uluslararası Termonükleer Deney Reaktörü (International Thermonuclear Experimental Reactor – ITER) ise 2027 yılında Fransa'da faaliyete geçirilmesi planlanmaktadır. Küresel inovatif termonükleer füzyon elektrik santralleri ünitelerinin ticari boyutta 2050 yılından sonra devreye girmesi ile birlikte konvansiyonel karbonsuz nükleer enerji santralleri sistemlerinin global nükleer atık yönetimi kapsamındaki radyoaktif kalıntıların yok edilmesi maliyetleri ve problemleri de ortadan kalkacaktır. Nükleer güvenlik ve iyonlaştırıcı radyasyonlar riski çok az olan çevreci doğa dostu karbonsuz temel yük kaynağı küresel füzyon enerjisi kompleksleri, bilimsel ve teknolojik araştırmalar yönünden çıkmaza doğru sürüklenmesine rağmen şimdilerde sorunların çözümü bağlamında yeni nesil stellarator termonükleer reaktör dizaynı bir umut ışığı doğurmaktadır.

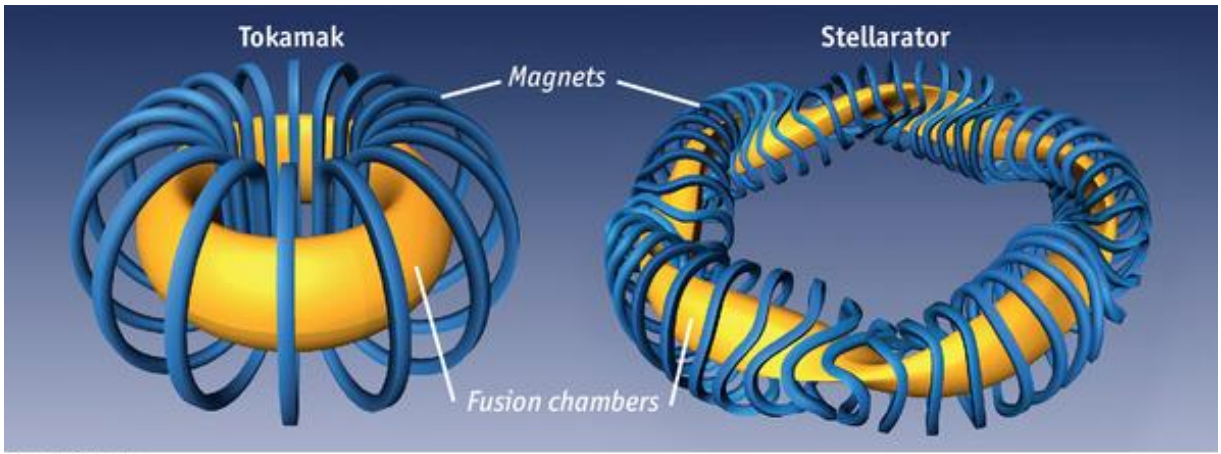
Nükleer plazma fiziği ve yüksek enerji fiziği dallarında uzman olan üç İngiliz fizikçiden oluşan bir heyet, doğa dostu, çevreci ve yeşil tokamak tipi nükleer füzyon makinesi tesisinde incelemeler yapmak üzere 1968 yılı kış aylarında günümüz Rusya Federasyonu Başkenti Moskova'yı ziyaret etmişti. Söz konusu karbonsuz yeni kuşak tokamak nükleer füzyon reaktörü, Amerikan klasik stellarator nükleer füzyon makinesi dizaynına rakip olarak tasarlanmıştı. Rus nükleer, parçacık fiziği ve termonükleer plazma uzmanları tarafından çevre yanlısı karbonsuz yeni nesil tokamak nükleer füzyon santrali tesislerinin konvansiyonel stellarator termonükleer reaktör ünitelerini o günlerde saf dışı bıraktığı dile getirilmişti. Bahse konu iddialı bilimsel teze Amerikalılar karşı çıkmış olmakla beraber İngiliz fizikçiler ise Rus nükleer füzyon bilim insanları ve teknisyenlerini haklı bulmuştu. Atomik çekirdekleri ve elektronları bir arada tutan çok sıcak ortam olan nükleer füzyon yakıtı plazma açısından konvansiyonel tokamak tesisleri, geleneksel termonükleer stellarator ünitelerine kıyasla söz konusu yıllarda daha iyi bir konumda idi. Böylece, klasik stellarator sistemleri zaman içerisinde popülaritesini kaybederken pratik ve uygun

teknoloji yoluyla nükleer füzyon oluşturan **tokamak** üniteleri tercih edilmeye başlamıştır. Nükleer füzyon enerjisi, kısaca döteryum ve trityum izotopları aracılığı ile sağlanan bol, güvenli ve temiz temel güç kaynağı vaat etmektedir. Gelecekte termonükleer enerji, küresel enerji arz güvenliği zafiyetleri ve açmazları önlenmesi bağlamında tüm ülkelerin bir teminatı olarak değerlendirilmektedir. Hidrojenin ağır izotopu olan döteryum, "H₂O" daki "H" atomlarının %0.016'sında ve lityumdan kolayca temin edilen trityum ise hidrojenin daha ağır bir izotopu halinde bulunmaktadır. Döteryum ve trityum izotoplarının nükleer birleşme, nükleer kaynaşma ve nükleer bir araya gelme biçiminde devam eden nükleer tepkimeler kanalıyla beliren çok büyük enerjiye paralel aynı zamanda helyum ve nötron da açığa çıkmaktadır. Ancak, süregelen termonükleer tepkimeler vaat edilen sürekli nükleer füzyon gücü ve enerjisini sağlayamamaktadır. Her yeni buluş sonrası ticari nükleer füzyon enerjisinin 30 yıl ötelendiği de yıllardan beri espri niteliğinde dile getirilmektedir. Fransa'da kurulmakta olan ve inovasyona dayalı en son **tokamak** tasarımı **Uluslararası Termonükleer Deney Reaktörü (International Thermonuclear Experimental Reactor – ITER)**, sözü edilen espriye bir örnek teşkil etmektedir. ITER nükleer füzyon kompleksi faaliyete geçmesi daha şimdiden on yıl ertelenerek 2027 yılına kadar uzanmaktadır. ITER füzyon tesisi maliyeti de orijinal hesaplamalara nazaran yaklaşık iki kat yükselerek 25 milyar dolara çıkması öngörülmektedir. Ayrıca, ticari nükleer füzyon enerji reaktörü işletmeye alınması da 2050 yılı dolaylarında olacağı termonükleer uzmanlar tarafından belirtilmektedir. Son yıllarda füzyon teknolojisi bilimsel araştırmaları dalında çok ilginç gelişmeler de yaşanmaktadır. İkinci plana gerileyen **stellarator** füzyon üniteleri yeniden gündeme gelmektedir. Çağımızda saniyede trilyon hatta katrilyon mertebesinde işlem yapabilen inovatif süper bilgisayarlar kullanılmakta aynı zamanda 1960 'lı yıllarda düşünülmesi olanaksız son derece gelişmiş computer programları ve mühendislik hesaplamaları sayesinde **stellarator** füzyon sistemi zorlukları birer birer aşılmaktadır. Bununla beraber **tokamak** reaktörü ünitelerinin başarısız olduğu zamanlarda yeni nesil **stellarator** füzyon enerjisi makinelerinin devreye gireceğine dair bir garanti de verilememektedir. Hüküm süren çeşitli teknolojik olumsuzluklara rağmen temiz enerji kaynakları olan hem karbonsuz evrimsel **stellarator** üniteleri ve hem de karbonsuz yeni kuşak **tokamak** termonükleer makineleri, doğa dostu nükleer füzyon enerjisi elde edilmesi yolunda birbirini tamamlayan biçimde, her iki tasarım da sürdürülebilir küresel enerji arz güvenliği ölçütleri hedefine doğru birlikte hızla ilerlemektedir. Örneğin, çok yakın zaman diliminde olmak üzere Kasım 2016 da **Wendelstein 7-X** adlı Alman yenilikçi **stellarator** ünitesi çalışmaya başlayacaktır. Çağdaş **Wendelstein 7-X** füzyon tesisi, modern ileri bilgisayarlar yardımı ile termonükleer reaksiyonlar için gerekli olan mükemmel nükleer plazma manyetik alanları yaratılan aynı zamanda geleneksel olmayan ilk yeni kuşak **stellarator** sistemi olarak tarihe geçecektir.

Atom çekirdekleri pozitif yüklü konumda bulunmakta ve nükleer tepkimeler sırasında aynı yüklü nükleer parçacıklar da birbirini itmektedir. Bu nedenle yeterli yakınlıktaki iki çekirdeğe kuvvet uygulanması da çok zor kabul edilmektedir. Çok şiddetli nükleer kuvvet uygulandığı takdirde ise elektromanyetik güç aşılmak suretiyle atom çekirdekleri nükleer kaynaşma, nükleer birleşme ve nükleer bir araya gelme, bir başka deyimle yoğun nükleer reaksiyonlar yoluyla nükleer füzyon moduna doğru süratle ilerlemektedir. Atom çekirdeklerinin şiddetli itme kuvveti ile aşırı derecede hızlı hareket etmeleri sonucu, tıpkı güneşte olduğu gibi ortam sıcaklıkları da milyon

santigrat derece (million °C) mertebelerine kadar ulaşmaktadır. Yüksek basınç sayesinde bir noktada nükleer toplanmalar ve nükleer dönüşümler artmakta aynı zamanda atom çekirdeklerinin çarpışma olasılıkları da aşırı ölçüde kolaylaşmaktadır. Basıncılı nükleer plazma adı verilen çok sıcak ortamın frenlenmesi, kontrol ve denetim altında tutulması bağlamında hem füzyon odasının duvarlarına dokunarak zarar vermesinin önlenmesi hem de sıcaklığın kaybolmaması için uygun geometrik manyetik alanlar gerekmektedir. Düzenekte düzgün geometrik kontrollü manyetik kuvvetler sağlanmadığı takdirde ise nükleer plazma ortamının dışarıya doğru sızma ihtimali artmaktadır.

Sade geometrik magnetler ile sağlanan **tokamak** makinesi nükleer plazma füzyon odası ve karmaşık görüntülü magnetler kanalıyla temin edilen **stellarator** ünitesi plazması füzyon odası aşağıdaki şemada gösterilmektedir.



Economist.com

Kaynak: The Economist Dergisi

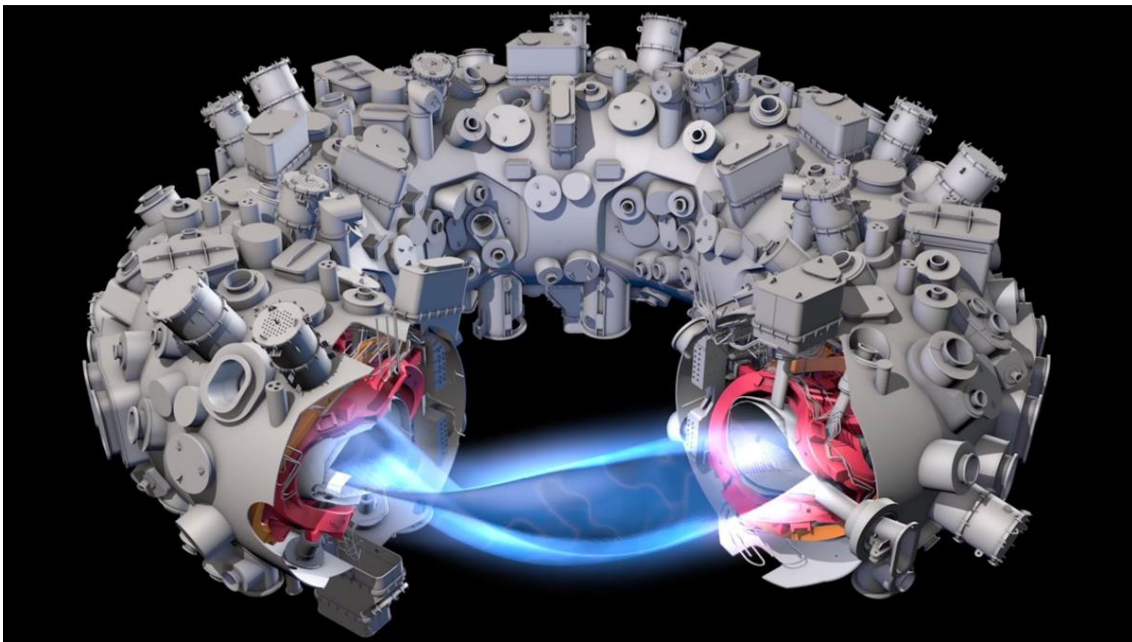
Tokamak sistemleri içi oyuk olan halka - doughnut biçimindeki füzyon odaları iki manyetik alan ile birlikte sınırlanmaktadır. Manyetik alanlardan biri füzyon odası etrafındaki ve odanın merkezindeki süper iletken elektro magnetler yardımıyla temin edilmektedir. Diğer manyetik alan ise nükleer plazma tarafından uyarılan elektrik akımından oluşmaktadır. Oldukça basit kombinasyon sayesinde meydana gelen manyetik kuvvetler ile beraber plazma sarmalı ve **halka içinde daha küçük halka** şeklinde yer alan düzenek, **tokamak** füzyon odası nükleer plazmasının kontrol ve denetim altında tutulmasını sağlamaktadır. Harekete geçen manyetik alanların güçleri de sürekli artan daha yoğun **halka - doughnut** yaratmakta ve böylece atom çekirdekleri **nükleer füzyon, nükleer kaynaşma ve nükleer birleşme** moduna erişinceye kadar **nükleer plazma** sıcaklığı ve basıncı yükselmektedir. Ancak, **Tokamak** ünitesi basit geometrisi ise dış yüzeye doğru manyetik alanı zayıflatmakta ve manyetik kuvvetleri etkisizleşmektedir. Etkisini yitiren manyetik kuvvetler neticesinde de **nükleer plazma**, füzyon odası duvarına kadar ilerlemektedir. Öte yandan, **stellarator** makinesi füzyon odası magnetleri, **İsyanyol Gaudi** mimarisine benzer tarzda karmaşık ve asimetric biçimde donatılmaktadır. Teoride bu karmaşık düzenleme, füzyon odası içinde nükleer plazmanın ilerlemesini sınırlamaktadır. Böylece, füzyon odasının tüm devresinde **termonükleer plazma** konumu düzgün şekilde korunmaktadır. Klasik **stellarator** sistemlerinin 1960'lı yıllarda tasarımı ve kurulması çalışmaları bilimsel olduğu kadar sanatsal bir değer taşıymaktaydı. O

yıllarda **tokamak** füzyon makineleri tercih edilmekte idi. Bununla beraber inovasyona dayalı **süper bilgisayarlar** sayesinde sağlanan kesin mühendislik hesaplamaları, günümüzdeki yeni kuşak **stellarator** termonükleer tesisleri ünitelerinin lehine doğru gelişmelere ışık tutmaktadır. Bu açıdan **Wendelstein 7-X** kompleksi denemesi de ön plana çıkmaktadır.

Alman yapımı **Wendelstein 7-X** yenilikçi **stellarator** termonükleer tesisi **füzyon odası** içindeki 2011 yılı montaj çalışmaları ve daha sonra ulaşılan nükleer plazmanın görüntüleri aşağıda verilmektedir.



Kaynak: IPP, Wolfgang Filser



Şüphesiz, yeni nesil **stellarator** füzyon tesisleri için teknolojik aksilikler ve terslikler yaşanmaması da temenni edilmektedir. Maliyeti ortaya çıkaran **Ulusal Ateşleme Tesisi (NATIONAL IGNITION FACILITY – NIF)** olan Amerikan projesindeki bilgisayar modelleri de gerçeği yansıtmamaktadır. **NIF** füzyon kompleksi, ataleti sınırlama ya da eylemsizliğin kontrol ve denetim altına alınması amacıyla yönelik tasarlanmıştır. **NIF** termonükleer tesisi düzeneğinde ataletin sınırlanması, dondurulmuş döteryum ve trityum peletlerin lazer ile şiddetle çarpıştırılması aynı zamanda ısıtılması ve sıkıştırılması hedeflenmektedir. **NIF** termonükleer füzyon ünitesi tasarım nitelikleri mükemmel olmakla beraber üretilen enerji tüketilen enerjiye kıyasla oldukça düşük kalmaktadır. Bununla beraber Almanya **Max Planck Institute for Plasma Physics (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, IPP)** bilimsel araştırma laboratuvarlarında geliştirilen daha küçük **stellarator** füzyon makinesi nispeten daha üstün ve verimli kabul edilmektedir. **Stellarator** dizaynı **Wendelstein 7-X – Max-Planck-Institut für Plasmaphysik** termonükleer füzyon makinesi öngörülen performansı sağlamasına rağmen dev **tokamak** tasarımı **Uluslararası Termonükleer Deney Reaktörü (International Thermonuclear Experimental Reactor – ITER)** projesi yoluna devam edecektir. Diğer taraftan, **ITER** yatırım bilançosundaki sabit giderler yanılığısı da hem Fransa hem de projeye katkı sağlayan ülkeler tarafından zaman içinde görülecektir. Bununla beraber uluslararası **ITER tokamak** termonükleer yatırımı füzyon enerjisi dalındaki lider konumunu kaybetmesi de öngörüler arasında kabul edilmektedir. Ancak **ITER tokamak** projesi, **stellarator** füzyon makineleri yatırımları çerçevesinde örneğin nötronlara dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi gibi prototip çalışmalara önemli ölçüde yardım sağlamayı sürdürecektir. Bu arada nükleer füzyon üniteleri arasında süregelen şiddetli rekabet ile birlikte termonükleer gücün niçin ve neden gerekli olduğunun sorusunun yanıtı da sorgulanmaktadır. **Stellarator** termonükleer sistemler zamanla çok iyi ve verimli çalıştırılsa bile yaklaşık 30 yıl sonra uygulanması olası görülmektedir. Yüzyılın ortalarında dünya enerji profili ve manzarasının şimdikinden çok farklı bir görüntü sergileyeceği tahmin edilmektedir. Sonuçta, küresel enerji arz güvenliği ikilemi ve sarmalı sorunlarının muhtemelen füzyon enerjisi ile çözümleneceği hesaplanmaktadır. Diğer taraftan, ucuz fotovoltaik piller ve enerji depolama teknolojileri geliştirilmesi sayesinde küresel enerji arz güvenliği sorunlarının aşılmasında en büyük güvenceyi ise yine **solar sisteminin tek füzyon reaktörü** olan dünyadan 150 milyon kilometre uzaklıktaki **güneş** vermektedir.

Kaynaklar:

- Nükleer Atıkların Yok Edilmesi veya Nihai Depolanması, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2006.
- Nükleer Reaktörler, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2007.
- Radyoaktif Atıkların İdaresi veya Yönetimi, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2007.
- Nükleer Güç Santralleri Gelişiminde Nükleer Emniyet ve Nükleer Güvenlik, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2008.
- Nükleer Enerji Santralleri, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Geleceği ve Enerji Kaynak Çeşitliliği, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2008.
- Nükleer Santraller ve Gelecekteki Nükleer Enerji Projeksiyonları, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2008.

- İngiltere’de Enerji Arz Güvenliği, Enerji Kaynaklarının Çeşitlendirilmesi, Nükleer Santraller ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2008.
- Atom, Radyoaktivite, Radyoizotoplar ve Radyasyon Çeşitleri, Ahmet Cangüzel Taner **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2008.
- Evren, İnsan ve İyonlaştırıcı Radyasyonlar, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2010.
- Nükleer Füzyon Enerjisi (Nükleer Kaynaşma Birleşme Enerjisi) Termonükleer Füzyon Santralleri, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2011.
- Güneş Enerjisi Elektrik Santralleri ve Fotovoltaik Güç Santralleri, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2011.
- Almanya Enerji Reformu Düşük Karbon Ekonomileri Yenilenebilir Enerji Kaynakları **YEK** Devrimi ve Energiewende Enerji Çevrimi Açmazı, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2013.
- 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.
- Almanya Düşük Karbon Ekonomisi Enerji Dönüşümü Paradoksu ile Temel Yük Kaynağı Karbonsuz Nükleer Güç Santralleri Kapatılması ve Elektrik Devrimi (**Energiewende**) Çelişkisi, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2014.
- Yenilenebilir Enerji Kaynakları **YEK** ile Güneş Radyasyonları Kökenli Güneş Enerjisi Sistemleri **GES** ve Silikon Kristalli Fotovoltaik Pil Maliyetleri Düşüşleri, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Afrika Enerji Politikaları Üzerinde Küresel Yenilenebilir Enerji Kaynakları **YEK** Menşeli Güneş Enerjisi Sistemleri **GES** Üniteleri Maliyeti Düşüşleri Etkisi, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Düşük Karbon Enerjileri Yenilenebilir Enerji Kaynakları **YEK** Kökenli Rüzgâr Elektrik Santralleri **RES** ve Güneş Enerjisi Santralleri **GES** Kompleksleri Süreci, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Çin Nükleer Enerji Programı Çerçevesinde Karbonsuz Temel Yük Kaynağı Nükleer Güç Santralleri **NGS** Nükleer Güvenlik Kriterleri Açmazı ve İkilemi, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- ABD** Nükleer Güç Santralleri **NGS** İşletilmesi ve Nükleer Yakıt Çevrimi Sonrası Radyoaktif Atıkların Saklanması ve Nükleer Kalıntıların Depolanması Sorunları, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Atom Bombası Üretilmesi Sonrası Uranyum Nükleer Atıkları Depolanan Özbekistan Kırgızistan Tacikistan Fergana Vadisi Radyoaktif Kontaminasyonu, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Fransız Elektrik Firması **EDF** ve Çin Nükleer Güç Şirketi **CGN** Tarafından Ortaklaşa İngiltere Üçüncü Nesil İnovatif Fisyon Enerji Santralleri Yatırımları, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- Ortadoğu Ülkeleri Mısır, Suudi Arabistan, Ürdün ve Birleşik Arap Emirlikleri Baz Enerji Kaynağı Karbonsuz Nükleer Güç Santralleri **NGS** Kurulması Projeleri, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- The Economist Dergisi (24 Ekim 2015 – 30 Ekim 2015).

Fizik Mühendisleri Odası Resmi İnternet Sitesi:
[www.fmo.org.tr/ yayinlar/faydali-bilgiler](http://www.fmo.org.tr/yayinlar/faydali-bilgiler)