

Olumlu Termonükleer Bilimsel Araştırmaları Doğrultusunda Ticari Karbonsuz Nükleer Füzyon Elektrik Santralleri Kurulması Hakkında Özel Sektör İlğisi

Ahmet Cangüzel Taner

Fizik Yüksek Mühendisi

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

Günümüz küresel enerji sepeti içinde dünya fosil yakıtlar tüketimi yaklaşık %80 dolaylarında seyretmektedir. Fosil yakıtlar kökenli atmosfere salınan global sera gazı emisyonları da maalesef hızlı şekilde giderek artmaktadır. Kesif sera gazı salınımları yapan temel enerji kaynağı fosil yakıtlı termik santraller güç üretimleri hakimiyeti karşısında baz yüklü sayılmayan doğa dostu yenilenebilir enerji kaynakları YEK tabanlı rüzgar enerjisi santralleri RES üniteleri ve güneş enerjisi santralleri GES kompleksleri kesintili elektrik üretimleri de, ne yazık ki, yetersiz düzeyde kalmaktadır. Mevzu bahis insan bazlı dünyevi olumsuz ekolojik gelişmelerin durdurulması ve dünya biyoçeşitliliğinin korunması bağlamında global sera gazı emisyonlarının sınırlandırılması, kontrol ve denetim altına alınması yoluyla yeryüzünün ısınması problemleri ve küresel iklim değışiklikleri sorunlarının önlenmesi son derece zorunlu hale gelmektedir. Global iklim değışikliği ve yerküre sıcaklık artışları nedeni hüküm süren bölgesel ciddi kuraklıklar, susuzluklar, hayati öneme sahip sulama sularının asitlenmesi, çölleşme, kıraç arazilerin yaygınlaşması ile birlikte sürdürülebilir temel gıda maddeleri tedariki ve dünya tahıl ürünleri rekolteleri de azalacaktır. Öte yandan, küresel eko denge sisteminin bozulması sonucu insanların geçim ve besin kaynağı önemli balık türleri nesillerinin tükenmesi hızlanacaktır. Böylece, küresel ısınma kaynaklı buzulların erimesi ile beraber okyanuslar ve deniz seviyelerinin yükselmesi aynı zamanda çoğunlukla tarıma elverişli arazilerin sular altında kalması, temiz ve içilebilir tatlı su kaynaklarının tükenmesi, sel, heyelan ve toprak kayması felaketleri neticesinde yoğun global iklim değışikliği mültecileri problemleri yaşanacaktır. Söz konusu süregelen küresel iklimsel değışimler kökenli vahim gelişmeler karşısında global fosil yakıtlar kullanımlarının limitlenmesi ve engellenmesi konularında Birleşmiş Milletler BM şemsiyesi altında bir türlü görüş birliği oluşturamayan ülkelerin karar merci organları ve hükümetleri gelecekte başa çıkılması çok zor olan durumlara düşecektir. Ayrıca, güneş sistemi içerisinde yaşanabilir olan mavi gezegen dünyanın geleceği açısından can alıcı ehemmiyetli kabul edilen karbonsuz inovatif nükleer füzyon enerjisi Ar - Ge faaliyetleri ise bir ümit ışığı doğurmaktadır. Sanayi devriminden beri uzun süredir atmosfere yoğun karbondioksit emisyonları salan temel yük kaynağı fosil yakıtlı termik santraller üniteleri yerine limitsiz kesintisiz alternatif enerji kaynakları arasında sayılan yine baz yüklü karbonsuz, yeşil ve doğa dostu yeni nesil termonükleer elektrik santralleri kompleksleri kurulması global her sektör için çok cazip konumunu korumaktadır. Termonükleer bilimsel ve teknolojik araştırma projeksiyonları ile çalışmalarına dair pozitif gelişmeler sayesinde inovasyona dayalı çevreci temiz yeni kuşak nükleer füzyon güç santralleri üniteleri yapımları yönünde dünya özel sektör firmalarının ilgi duyması, finansal kaynaklar tahsis etmesi ve yatırım adımları atması bu yazıda incelenmektedir.

İngiliz Astrofizikçi Arthur Eddington, İngiltere Bilimsel İlerleme Birliğı (British Association for the Advancement of Science - BAAS)'nde yıldızların iç yapısı hakkında 1920 yılında bir bildiri sunmuştur. Güneşte süregelen nükleer reaksiyonlar

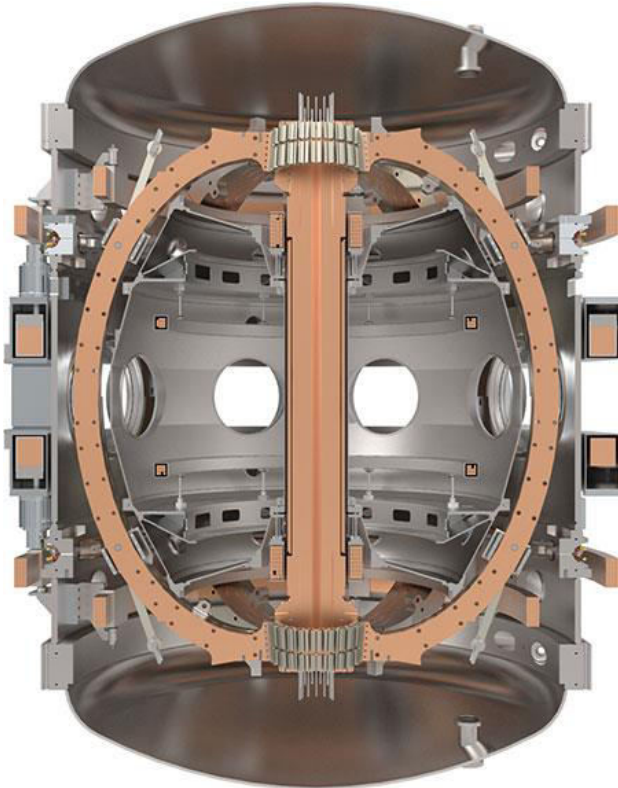
ve nükleer tepkimeler sonucu oluşan güneş ışınları ve güneş radyasyonları bildiride ele alınmıştır. Bildiri kapsamında gelecekte insanlığın hizmetine girecek olan tüm maddelerde bol miktarlarda farklı şekillerde bulunan atom altı parçacık enerjileri ile yapıları kaynaklı neredeyse bitmek tükenmek bilmeyen dev çevre dostu karbonsuz sınır tanımayan güneş enerjisi tartışılmıştır. Helyum atomlarının oluşması bağlamında hidrojen atomları çekirdeklerinin nükleer kimyasal reaksiyonlar neticesi birleşmesi ve kaynaşması sırasında ortaya çıkan güvenilir çevre dostu nükleer enerji üzerinde durulmuştur. Helyum atomu ağırlığı, dört hidrojen atomuna kıyasla biraz daha hafif geldiğinden aradaki farkın enerjiye dönüştüğü düşünülmüştür. Bir müddet sonra çağımızın en büyük fizikçilerinden **Albert Einstein** tarafından keşfedilen **E = mc²** formülü sayesinde mevzu bahis güneş enerjisi oluşumu savı doğrulanmıştır. **Arthur Eddington**'un öne sürdüğü güneş enerjisinin kullanımı düşü yönünde önemli adımlar atmaya başlayan bilim insanları, tehlikeli boyutlara ulaşan küresel fosil yakıtlar tüketimi karşısında bol ve zengin alternatif karbonsuz sınırsız yenilikçi nükleer füzyon enerjisi hayali gerçekleştirilmesi için ciddi uğraşlar vermeyi halen sürdürmektedir. Son yıllarda dikkat çekici bir görüş olarak insan kontrollü nükleer füzyon düşü de değişim periyodu yaşamaktadır. Bununla beraber çevre dostu karbonsuz nükleer füzyon reaktörü kurulması yönünde Güney Büyük Britanya **Harwell (Great Britain - GB)** kentinde 1950'li yıllarda başarısız İngiliz **Zero Energy Thermonuclear Reactor - Zeta** füzyon makinesi yatırımı yürütülmüştür. Diğer taraftan, Fransa **Cadarache** şehrinde yapımı hâlâ devam eden sürüncemeli aynı zamanda aşırı yüksek maliyetli olan dev **tokamak** tasarımı **Uluslararası Termonükleer Deney Reaktörü (International Thermonuclear Experimental Reactor - ITER)** projesi de yoğun eleştirilere uğramıştır. Mevzu bahis olumsuz nükleer füzyon denemeleri periyodu zarfında çevreci ulusal termonükleer enerji projeleri, ne yazık ki, gelişmiş ülkelerin hükümet programları içinde sadece beklemede ve atıl konumda yer almıştır. Günümüzde ise inovasyona dayalı yeni nesil nükleer füzyon enerjisi dönüşüm süreci hızlanmaktadır. Örneğin, Kuzey Amerika ve Avrupa firmaları ticari füzyon enerjisi santralleri yapımı ilgisi giderek artmaktadır. Söz konusu özel sektör şirketleri özellikle yenilikçi termonükleer proje tasarımları aracılığıyla kârlı ve kazançlı nükleer füzyon elektrik santralleri tesisi hedeflemektedir. Nükleer füzyon enerjisi yatırımları için kalkınmış ülkeler özel sektör firmaları müspet yaklaşımlar göstererek önemli finansal kaynaklar tahsis ederek farklı termonükleer bütçe planlamaları ve programları yapmaktadır. Böylece, ticari termonükleer güç santralleri faaliyete geçirilmesi bağlamında global evrimsel nükleer füzyon enerjisi yatırımları hakkında ileri sürülen her yeni keşif sonrası 30 yıl ötelenme yaşanacağına dair eski bir nükleer füzyon enerjisi mizahı da tarihe karışmaktadır. Nobel Fizik Ödülü sahibi ünlü Teorik Fizikçi **Albert Einstein** görelilik kuramı ile ilgili çalışmalar yürüten bilim insanı **Eddington** ve halefleri güneş enerjisi gücü menşeli termonükleer enerji oluşturulması için yoğun uğraşlar vermiştir. Aslında güneş kökenli füzyon etkileşimleri, iki proton ve iki nötrondan ibaret helyum çekirdeklerinden meydana gelmektedir. Özgün protonlardan çıkan bir parçacık, çok sayıdaki pozitif elektrik yüklü hidrojen çekirdeklerini pozitronlar olarak adlandırılan antimadde parçacıkları haline dönüştürmektedir. Söz konusu füzyon tabanlı nükleer reaksiyonlar ve kimyasal tepkimeleri tamamlanması süreci için ise yaklaşık bir milyar yıl gerekmektedir. Ancak, füzyon menşeli kimyasal reaksiyonlar ve nükleer tepkimeler hızlandırılması yönünde kestirme bir yol da mevcuttur. Döteryum atomu ya da trityum izotopu bileşikleri nötronları ile nükleer reaksiyonlar ve kimyasal etkileşimlere giren hidrojen atomlarının kullanılması olası görülmektedir. Gerçekte dünyada her 6000 hidrojen atomu döteryum içermektedir. Döteryum izotopu (H2) elde edilmesi de su (H2O) dan

sağlanabilmektedir. Yeryüzünde çok daha az olan trityum atomu (H3) ise radyoaktif madde niteliğinde olup sentez yöntemi ile oluşturulması gerekmektedir. Bununla beraber yerkürede bol bulunan lityum ham maddesi vasıtasıyla trityum eldesi kolayca yapılmaktadır. Döteryum ve trityum izotopları, pozitronlar olmaksızın sadece nötronlar sayesinde reaksiyonlara girmektedir. Sonuçta helyum ve bir yedek nötron meydana gelmektedir. Böylece, nükleer füzyon reaktörü kurulması açısından bir engel kalmamaktadır. Termonükleer reaktör tasarımı ve nükleer füzyon makinası yapımı çerçevesinde sıcaklıkları ve yoğunlukları uygun döteryum ve trityum atomları karışımı içerikli bir nükleer plazma ile birlikte yeterli süre zarfında karbonsuz nükleer enerji üretimi temin edilmektedir. Nükleer plazma sıcaklık, yoğunluk ve zaman parametreleri ise nükleer füzyon makineleri ünitelerinin niteliği üzerinde etken rol oynamaktadır. Söz konusu parametrelerin optimum değeri ise **Lawson kriteri** olarak adlandırılmaktadır. İngiliz Fizik Mühendisi **John Lawson**, Birleşik Krallık (**United Kingdom - UK**) **Zeta** nükleer füzyon makinesi çalışmalarında görev almıştır. **Lawson ölçütü** ve kıstası, günümüz **tokamak** tipi nükleer füzyon enerjisi makineleri kapsamında yoğun biçimde kullanılmaktadır. Tokamak dizaynı termonükleer makineler, 1950'li yıllarda hidrojen bombasının babası sayılan Sovyet Fizikçisi **Andrei Dmitrievich Sakharov** tarafından tasarlanmıştır. Daha sonraları tanınmış insan hakları savunucusu olan Nükleer Fizikçi **Andrei Sakharov**, önderlik ettiği uluslararası nükleer silahsızlanma kampanyaları sonucu **1975 Nobel Barış Ödülü** sahibi olmuştur. Çok sayıda ticari nükleer füzyon güç santrali girişimcisi tarafından **tokamak** tasarımı yaygınlaştırılmıştır. Amerika Birleşik Devletleri Massachusetts Eyaleti Cambridge kentinde konuşlu Amerikan **Massachusetts Institute of Technology (MIT)** Plazma Fiziği Laboratuvarı bağlı kuruluşu **Milletler Topluluğu Füzyon Sistemleri (Commonwealth Fusion Systems - CFS)** tokamak dizaynı nükleer füzyon reaktörü kullanmaktadır. Birleşik Krallık **Atom Enerjisi Otoritesi (United Kingdom UK Atomic Energy Authority - UKAEA)** idaresinde **Harwell**'in halefi kabul edilen **Culham** merkezli İngiliz **Tokamak Energy (Culham Centre for Fusion Energy - CCFE)** de bir diğer tokamak tasarımı termonükleer tesisi olarak nükleer füzyon enerjisi bilimsel ve teknolojik araştırmaları yürütmektedir.

Konvansiyonel tokamak füzyon reaktörü kalbi, oyuklu simit (torus - doughnut - bagel) şeklini andıran etrafında süperiletken elektro magnetler (superconducting electromagnets) enstrümanları dolanan termonükleer kompleksi ana gövdesi sayılmaktadır. Söz konusu torus yapısı, nükleer yakıtı döteryum ve trityum atomları bileşiklerinden ibaret olan nükleer plazma (nuclear plasma)'yı ihtiva etmektedir. Nükleer plazma ise içerisinde elektronların ve atom çekirdeklerinin ayrıştığı gaz halindeki nükleer füzyon yakıtı bulutunu temsil etmektedir. Magnetler, nükleer plazmanın ısıtılması ve sınırlandırılması görevini üstlenmektedir. Böylece, nükleer plazma yoğunluğu ve bulutu sürekliliği sağlanarak torus halkası yapısı duvarlarından uzak tutulmaktadır. Ayrıca, torus halkası duvarlarına dokunmayan nükleer plazma bulutunun aniden soğuması da temin edilmektedir. Tokamak tipi termonükleer reaktörler genelde çok büyük nükleer füzyon makineleri sınıfına girmektedir. Örneğin, **ITER** füzyon tesisi halkası torus hacmi 830 metreküp civarında olacaktır. **Milletler Topluluğu Füzyon Sistemleri (Commonwealth Fusion Systems - CFS)** tokamak tasarımı termonükleer reaktörü torus halkası hacmi ise uluslararası **ITER** füzyon tesisi simidi ve halkasına kıyasla yüzde 65 oranında küçük olacaktır. Dar hacimdeki güçlü magnetler aracılığıyla nükleer plazma bulutunun daha yoğun biçimde sıkıştırılması olasılığı da ortaya çıkmaktadır. Söz konusu magnetler nispeten yüksek sıcaklıklarda süperiletken hale gelmektedir. Böylece, düşük maliyetli sıvı azot ile

magnetlerin soğutulması önemli bir kazanım olarak görülmektedir. Örneğin, ucuz sıvı nitrojen ile nükleer füzyon sisteminin soğutulması, yüksek maliyetli sıvı helyum soğutucuları mekanizmaları sistemlerine nazaran çok daha ekonomik düzeyde seyretmektedir. Ayrıca, İngiltere **Tokamak Energy** Şirketi araştırmacıları da nükleer füzyon enerjisi reaktörü magnetleri süperiletkenlerinin soğutulması yönünde sıvı nitrojen kullanmaktadır. Öte yandan, **Tokamak Energy** Firması, geleneksel tokamak geometresi şeklinden kaçınarak ortasında hâlâ delik bulunan ancak özlü elmaya benzer bir nükleer füzyon sistemi üzerinde çalışmaktadır. Kuramsal açıdan küresel toruslar içeriğinde nükleer plazma bulutunun daha kararlı kalacağı öngörülmektedir. Bu bağlamda doughnut halkasına göre nükleer plazma sisteminin işletilmesi, idaresi ve yönetimi faaliyetlerinin basit olacağı görüşü savunulmaktadır. Aynı zamanda İngiliz **Tokamak Energy** Şirketi, Amerikan **CFS** tokamak tipi füzyon enerjisi reaktörü ünitelerinden tamamen farklı biçimde bir dizi prototip nükleer füzyon modelleri, kompleksleri ve sistemleri üzerinde termonükleer proje çalışmaları yürütmektedir. Birleşik Krallık **Tokamak Energy** Firması son olarak geliştirdiği termonükleer modeli **ST40** füzyon reaktörü nükleer plazması sıcaklığı 15 milyon °C değerine kadar ulaşmaktadır. Şirket birkaç yıl içinde nükleer plazma sıcaklığı değerini 100 milyon °C'a kadar ulaştırmayı hedeflemektedir. Böylece, tokamak dizaynı **Lawson ölçütü** kriterlerinin başarılması için gerekli sayılan 150 milyon °C'ın üçte ikisine erişilecektir.

Tokamak Energy ST40 model nükleer füzyon makinesi aşağıdaki resimde temsil edilmektedir. Füzyon enerjisi için gerekli tüm anahtar komponentler ve elemanlar tokamak tipi termonükleer ünite içerisine düzgün ve itinalı şekilde monte edilmiştir.



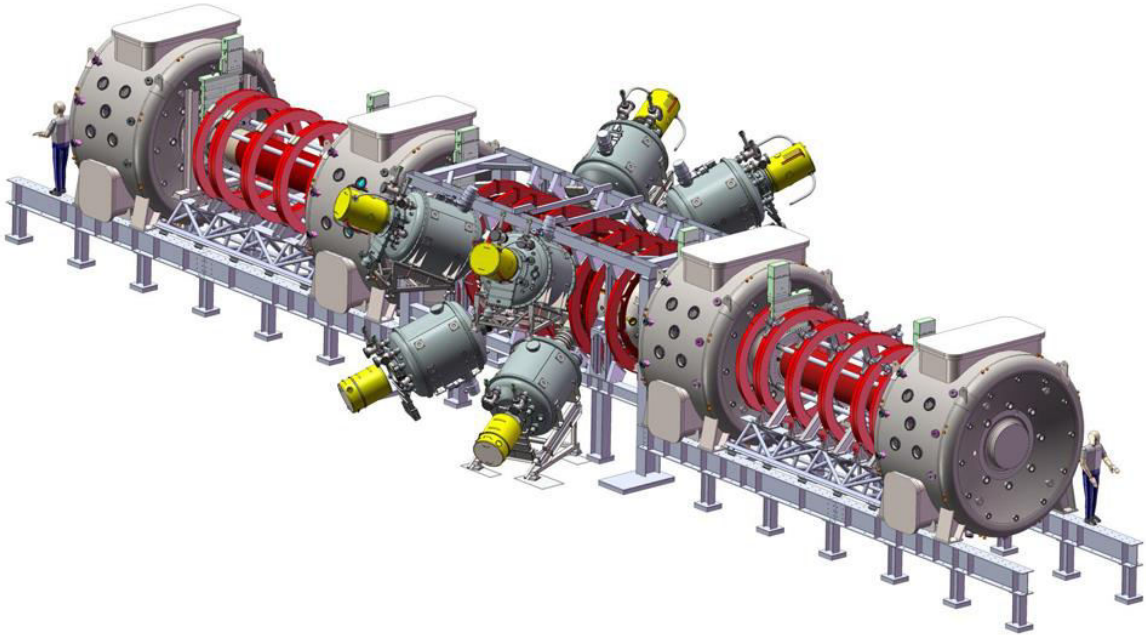
Kaynak: Büyük Britanya **Tokamak Energy** Firması

Dünyada sadece tokamak füzyon reaktörleri yaygınlaşmaktadır. Örneğin, Kanada **Vancouver** kentinde **General Fusion** Firması, **alanı tersine çevrilmiş yapı** (field

reversed configuration - **FRC**) teknolojisi şeklinde tanımlanan nükleer plazma makinesi kullanılmaktadır. Kapalı manyetik alan çizgileri ile merkezi nüfuz etme (penetrasyon) olmaksızın nükleer plazma limitlenmesi sağlanmaktadır. Manyetik alan sınırlaması ise nükleer plazmanın bulut halkasına benzer bir girdap ortamında dönüşü sırada plazma içerisindeki elektriksel yüklü parçacıkların hareketi sayesinde oluşmaktadır. **General Fusion** termonükleer makinesi, dönen nükleer plazma özelliğine sahiptir. Nükleer plazmanın küresel reaksiyon odasına ateşlenmesi sonrası odanın dışında bulunan pistonların aniden hareketlenmesi ile birlikte plazma sıkıştırılmaktadır. Döteryum-trityum nükleer plazma yakıtının sıkışması ise bir şok dalgası oluşturmaktadır. Böylece, nükleer füzyon yakıtı yoğunluğu bin kat artarak nükleer plazma sıcaklığı 5 milyon °C dan 150 milyon °C'a yükselmektedir. **Lawson ölçütü** hesaplanması içeriğindeki söz konusu iki parametrenin ilerleme kaydetmesi ile beraber üçüncü parametre olan zaman artık önemini kaybetmektedir. En azından **Lawson teorisi** bazında ortadan kalkmaktadır. **General Fusion** Şirketi Yönetim Kurulu Başkanı **Christofer Mowry**, bahse konu gerçeklerin doğrulanması bağlamında nükleer füzyon enerjisi deneme tesisi kurulması ve işletilmesi faaliyetlerinin muhtemelen beş yıl içinde başlayacağını ifade etmektedir. Kaliforniya **Foothill Ranch** kentinde konuşlu **TAE Technologies** Firması da Temmuz 2017 tarihinde field reversed configuration - **FRC** tekniği kullanan termonükleer makine geliştirdiğini duyurmuştur. **Norman** adlı füzyon makinesi 25 metre uzunluğunda olup, adını **TAE Technologies** Şirketi kurucusu **Prof Dr Norman Rostoker**'den almaktadır. Nükleer plazma bazlı hızlandırıcılar yoluyla temiz nükleer füzyon enerjisi teknikleri ile termonükleer bilimsel araştırma projeleri yürüten parlak fikirli ve yaratıcı nitelikli **Dr Rostoker**, uzun yıllar **Kaliforniya Üniversitesi Irvine (University of California, Irvine - UCI)**'de görev yaparak 2014 yılında hayatını kaybetmiştir. **Norman** termonükleer makinesi, silindirik nükleer füzyon reaktörü geometrisi özelliği taşımaktadır. **FRC** teknolojileri kanalıyla silindirin her bir ucundaki plazma enjektörleri birbirlerine doğru aynı anda saniyede yaklaşık 1 milyon kilometre hızla ateşleme yapmaktadır. Girdaplar karşı karşıya geldiği zaman puro biçiminde dönmekte olan üç metre uzunluğunda ve takribi yarım metre genişliğinde birleşmek suretiyle dışarıdan içeriye doğru kararlı ve sıcak tarzda döteryum atomları ateşlenmektedir. Şimdiye kadar yenilikçi **Norman** nükleer füzyon makinesi sayesinde geleneksel **FRC** tekniği ile sıcaklıkları mikrosaniye devam eden burgaçlar yerine yaklaşık 10 milisaniye süren 3.5 milyon °C'da girdaplar meydana gelmektedir. **TAE Technologies** kuruluşu 2019 yılı sonuna kadar sıcaklığı 30 milyon °C'a kadar yükseltmeyi ve nükleer plazma ömrü periyodunu ise üç kat artırmayı amaçlamaktadır. Söz konusu tüm hedeflerin akılcı olmasına karşın **TAE Technologies** firması özel bir yaklaşım göstermektedir. Örneğin, döteryum ve trityum menşeli nükleer yakıt yerine tek protonlu çekirdeği olan hidrojen ve boron kökenli nükleer yakıt tercih edilmektedir. Böylece, söz konusu nükleer kimyasal reaksiyonlar ve füzyon tepkimeleri neticesi helyum çekirdeği ve bir nötrondan ziyade üç helyum çekirdeği (alfa) oluşmaktadır. Ayrıca, salt helyum çekirdekleri, alfa parçacıkları şeklinde adlandırılması nedeniyle gerçekte nükleer fizik alanı kapsamında **TAE, Üç Alfa Enerjisi (Tri Alpha Energy - TAE)** olarak da anılmaktadır. Öte yandan, nötronların yokluğu can alıcı prosesi teşkil etmektedir. Döteryum-trityum füzyon reaksiyonları vuku bulan Tokamak tipi reaktör tesisinde ortaya çıkan enerjinin %80'i nötronlar vasıtasıyla taşınmaktadır. Uygulamaya yönelik pratik güç santrali içeriğinde söz konusu kinetik enerji, uygun bir materyalle nötronların absorblanması ve soğurulması sonucu ortaya çıkacaktır. Meydana gelen enerji de sadece ısıdan ibaret olacaktır. Ortaya çıkan ısı enerjisi ise buhar üretimi ve buhar türbinleri döndürülmesi için kullanılacaktır. Ayrıca, absorblayıcı ve soğurucu

materyal olarak lityum kullanılması halinde sistem içinde nükleer füzyon reaksiyonları ve nükleer kimyasal tepkimelerin geri beslenmesi bağlamında yeni trityum atomları oluşumları da sağlanacaktır. Nükleer füzyon reaktörü düzeneğinin geri kalan bölümünde nötronların absorblanması ile sistemin radyoaktif olması bahse konu reaktörün dezavantajı ve olumsuz yönü biçiminde yorumlanmaktadır. Ancak açığa çıkan radyoaktivite, klasik nükleer fisyon reaktörleri ünitelerine benzer olmamakla beraber iyonlaştırıcı tadyasyonlar eninde sonunda termonükleer kompleksi donanımlarına zarar vermektedir. Diğer taraftan, prosesin her aşamasında enerji kaybı da yaşanmaktadır. Proton-boron yöntemi nükleer füzyon elektrik üretimi çerçevesinde daha iyi bir seçim sunmaktadır. Alfa parçacıklarının pozitif yüklü olması sebebiyle dış iletken tarzında doğrudan doğruya bir akım oluşması mümkün görülmektedir. Sistem ısı içermemekte ve alfa parçacıklarının kaçmaması sayesinde başka yerlerin zarar görmesi önlenmektedir. Kuşkusuz bir püf noktası da bulunmaktadır. Proton-boron füzyon tepkimeleri açısından milyarca derece santigrat sıcaklıklar gerekmektedir. Şimdiye kadar ki füzyon enerjisi denemeleri kapsamında bahse konu son derece yüksek sıcaklıklar mertebelerine henüz erişilmemiştir. Ancak, başka koşullar altında diğer laboratuvarlarda mevzu bahis aşırı sıcaklık rakamlarına ulaşılmasına rağmen **TAE** firmasının kullandığı ekipmanla nasıl başarılacağı ise belirsizliğini korumaktadır.

Foothill Ranch, California merkezli **Tri Alpha Energy - TAE** Firması **field reversed configuration – FRC** teknolojisi kullanılan silindirik **Norman** nükleer füzyon enerjisi makinesi aşağıdaki resimde görüntülenmektedir.

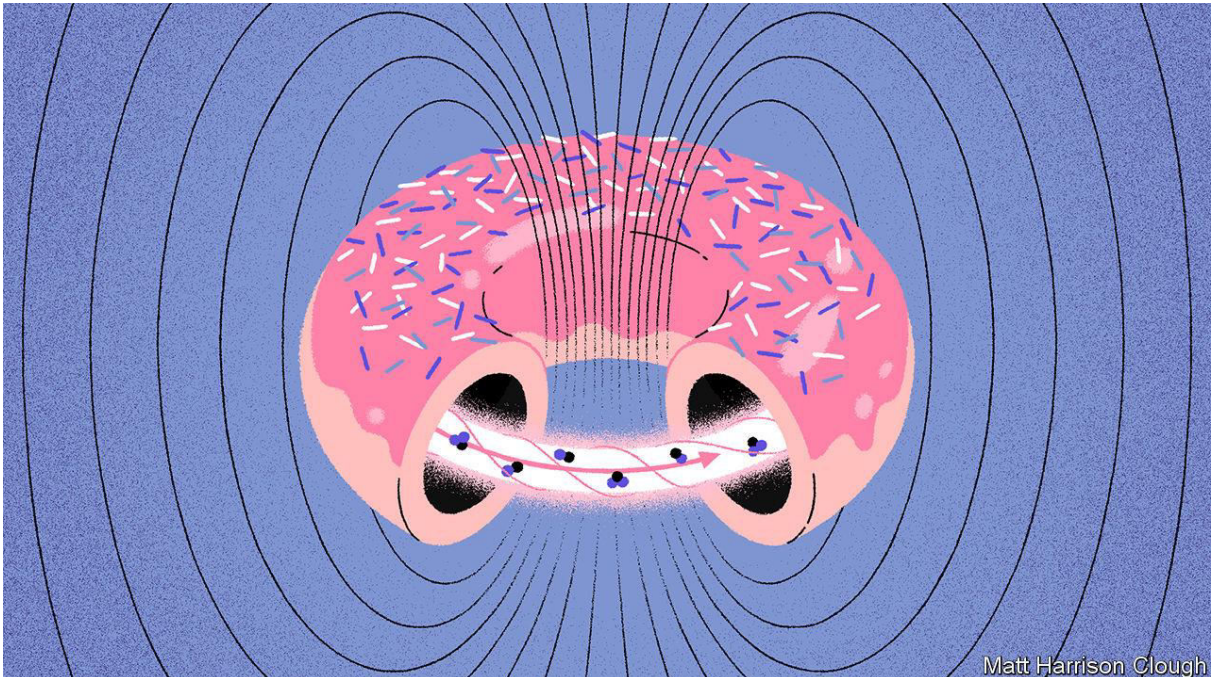


Kaynak: TAE Technologies Firması

TAE Şirketi nükleer füzyon yakıtı seçimi radikal ve köktenci sayılmaktadır. Bununla beraber diğer füzyon enerjisi formları çerçevesinde radikallik ve köktencilik de olası kabul edilmektedir. Radikal seçimlerin çoğunluğu ise nükleer füzyon reaktörünün gerçekçi tasarımını benimseyen Oxford Üniversitesi yönetimindeki **First Light Fusion** Şirketi tarafından izlenmektedir. **First Light** füzyon prosesi yönünde döteryum ve trityum geleneksel karışımı yoluyla enerji elde edilmesi amaçlanmasına rağmen bir karides deniz canlısından esinlenen teknoloji planları kullanılmaktadır. Tabancalı

karidesler (pistol shrimps) mavi gezegenin en sesli ve gürültülü deniz kabukluları (marine crustaceans) içinde yer almaktadır. Tabancalı karides gürültüsü ve sesi, deniz canlısının yarısı kadar olan kendine mahsus kısılcı vasıtasıyla üretilmektedir. Tabancalı karidesin özel kısılcı (specialised claw) avı üzerinde şok etkisi yaratmak ve sersemletmek için kullanılmaktadır. Tabancalı karides kısılcı hızla kapandığında su çevresinde hava kabarcıkları meydana gelmektedir. Hava kabarcıklarının sönmesi ise uzaya gönderilen **Saturn V** roketinin sesi kadar güçlü şok dalgaları oluşturmaktadır. Böylece, küçük balıkların öldürülmesi için yeterli olan gürültü ve sesli şok dalgaları sayesinde tabancalı karides beslenmesini sürdürmektedir. Tabancalı karidesler, Oxford Üniversitesinde lisansüstü ve doktora çalışmaları yürüten **Nicholas Hawker**'e doktor ünvanı kazandırmıştır. **Dr Nicholas Hawker**, İngiliz **First Light** füzyon enerjisi tesisi kurucusudur. Nükleer plazma yaratılması bağlamında **Lawson kıstası** ve ölçütü karşılanmasına yönelik karides tekniği kullanılması için **Dr Hawker** bir dizi bilimsel ve teknolojik araştırma sonuçları elde etmiştir. **First Light** füzyon reaktörü tasarımının çekirdeği, tabancalı karidesin kısılcının yarısını oluşturan kurşun ya da roket fırlatıcısı şeklinde düşünülmüştür. **First Light** füzyon makinesi dizaynının bir tür mermi fırlatan düzeneği, alüminyum veya bakır alaşımları içerikli küçük diskten yapılmıştır. Karidesin kısılcının diğer yarısı biçimde tasarlanan **First Light** nükleer füzyon cihazı, kenarları 10 milimetre olan küp şeklindeki yakıt saniyede yaklaşık 30 kilometre hızla ateşlemektedir. Ateşlenen yakıt içerisinde şok dalgaları ve kabarcıklar meydana gelmektedir. Kabarcıkların kaybolması ile sönmesi sırasında döteryum ve trityum nükleer füzyon yakıtı kapsamındaki hesaplamalar, yeterli ortamda kafi derecede nükleer kaynaşma ve nükleer birleşme olacağını işaret etmektedir. Ancak, nükleer füzyon hesaplamalarının doğruluğu ise 2019 yılı sonunda test edilecektir.

Tokamak tasarımı termonükleer reaktörü ana parçası sayılan karides deniz ürünü (shrimp) görüntüsü veren **pembe renkli torus halkası** içerisinde beyaz renkli nükleer plazma yakıtı bulutu içerisinde vuku bulan nükleer füzyon kökenli nükleer kimyasal reaksiyonlar ve nükleer tepkimeler ile dış yüzeyi çevreleyen manyetik alan çizgileri aşağıdaki resimde temsili olarak gösterilmektedir.



Kaynak: The Economist Dergisi

Diğer taraftan, pratik nükleer füzyon enerjisi reaktörü nasıl kurulacağı hakkında bilgi kıtlığı, darlığı ve eksikliği olasılığı yaşanmaktadır. Bununla beraber termonükleer füzyon enerjisi yatırımcıları söz konusu yenilikçi ve inovasyona dayalı görüşlerin ne zaman uygulanacağına dair soru işareti ile karşı karşıya kalmaktadır. Küresel füzyon enerjisi sektörü gelişimi yol haritası içeriğinde en çarpıcı kilometre taşı, kâr ve gelir sağlayıcı faktörlerin belirlenmesi sayılmaktadır. Global nükleer füzyon enerjisi pazarı oluşumu ve yaygınlaşması kazanımında dönüm noktası ise şüphesiz nükleer plazma vasıtasıyla elde edilecek enerjinin nükleer plazmanın yaratılması için kullanılan enerjiye kıyasla çok daha fazla olması biçimde değerlendirilmektedir. Tüm küresel nükleer füzyon enerjisi firmaları iyimser görüşler ileri sürmektedir. Örneğin, **Milletler Topluluğu Füzyon Sistemleri (Commonwealth Fusion Systems - CFS) Şirketi** ve **Tokamak Energy** Firması, 2025 yılına kadar nükleer füzyon enerjisi çalışmalarını başarıya ulaştırmayı hedeflemektedir. **TAE Technologies** Şirketi gelecek nükleer füzyon aygıtı **Copernicus** sayesinde olumlu termonükleer faaliyetler yürüterek deneme amaçlı pilot nükleer füzyon güç santrali kurmayı planlamaktadır. **TAE**, 2030 yılında ise şebekeye nükleer füzyon enerjisi güç arzı sağlayacağını duyurmaktadır. **Tokamak Energy** Şirketi de 2030 yılı civarında 100 MW kapasiteli karbonsuz nükleer füzyon elektrik reaktörü işletilmesi için termonükleer programlar hazırlamaktadır. **First Light Fusion** Firması yetkilileri 2030'lu yıllarda yeşil, doğa dostu ve çevreci nükleer füzyon enerjisi reaktörleri tesisleri kuracaklarını öngörmektedir. Bütün iyimser füzyon enerjisi girişimleri doğrultusunda özellikle termonükleer bilimsel ve teknolojik araştırmalar yapan firmaların gelecek nükleer füzyon denemeleri kapsamında sermaye artırımını konusuna ağırlık vermeleri gerekmektedir. Örneğin, **TAE Technologies** Firması, şimdiye kadar özel fonlar kanalıyla 600 milyon dolar düzeyinde kapital artırımını sağlamıştır. **General Fusion** Şirketi 100 milyon dolar, **Tokamak Energy** Firması 50 milyon pound (65 milyon dolar) ve **First Light Fusion** Şirketi ise ilk aşamadaki nükleer füzyon araştırmaları için 25 milyon pound sermaye artırımını temin etmiştir. Gelecekte global nükleer füzyon enerjisi çalışmaları kuşkusuz ciddi meydan okuma ve şiddetli rekabet nitelikleri taşıyacaktır. Nükleer füzyon enerjisi sektörü sahasında gözlemler yapan **Fusion Power Associates** Vakfı Kuruluşu Başkanı **Dr Stephen Dean**, füzyon enerjisinin geçmişi sorun olmayan çok sayıda güvensizlik ortamı oluşturduğunu vurgulamaktadır. Son 50 yıl boyunca nükleer füzyon enerjisi konusunda sürekli belirsizlikler yaşandığını belirten **Dr Dean**, bununla beraber özel sektör firmaları açısından son derece cazip olmayan bir görüntü sergilendiğini işaret etmektedir. Günümüzde iyi fizik bilimsel araştırmaları içeriğinde bilim insanları ve nükleer enerji mühendisleri tarafından güncel nükleer füzyon enerjisi **Ar-Ge** çalışmaları sürdürülmektedir. Nükleer füzyon konusunda kazanılacak ödül ve zafer ise mavi gezegenin geleceği açısından çok büyük bir önem taşımaktadır. Sonuçta, küresel karbonsuzlaştırma teknolojileri ve global düşük karbon ekonomileri çerçevesinde karbonsuz sınırsız baz yük kaynağı füzyon enerjisi güç santralleri elektrik üretimi, dünyada yaşayan tüm insanlara derin bir soluk aldıracaktır.

Kaynaklar:

- Nükleer Reaktörler, 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.
- 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.
- İleri Nükleer Santraller, İklimsel Değişim Mekanizmaları, Küresel Isınma ve İklim Değişiklikleri Bilimsel Raporları, Ahmet Cangüzel Taner, Fizik **Mühendisleri Odası** Yayınları **FMO**, Faydalı Bilgiler, 2010.
- Nükleer Füzyon Enerjisi (Nükleer Kaynaşma Birleşme Enerjisi) Termonükleer Füzyon Santralleri, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2011.
- Amerika Birleşik Devletleri Enerji Politikası ve Evrimsel Nükleer Santraller**, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2011.
- Amerika Birleşik Devletleri Kömür Kökenli Termik Santraller Geleceği ve Karbondioksit Emisyonları ile ilgili Federal Seviyede Yeni Yasal Düzenlemeler**, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2012.
- ABD Nükleer Enerji Politikaları Çerçevesinde Geliştirilen Modern Yeni Kuşak Nükleer Elektrik Santralleri Stratejileri**, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2012.
- ABD Kömüre Dayalı Elektrik Santralleri Karbon Salımları ve Karbondioksit Emisyonları Bertaraf Edilmesi Projeksiyonları**, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2012.
- Amerika Birleşik Devletleri Kömür Kullanan Termik Santraller ve Yeni Çevre Kirliliği Yasal Düzenlemeleri Perspektifi**, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2013.
- ABD Küresel Isınma ve Global İklim Değişikliği Politikaları Çerçevesinde Dünyanın En Kirlili Fossil Yakıtı Kömür Kullanan Elektrik Santralleri Projeksiyonları**, Ahmet Cangüzel Taner, **FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2014.
- 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 Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2015.
- ABD Düşük Karbon Teknolojileri Geçiş Süreci Zarfında Birleşik Devletler Çevre Korunma Ajansı US EPA Yeni Temiz Hava Yasal Düzenlemeleri Uygulamaları**, Ahmet Cangüzel Taner, **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 Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2016.
- Karbonsuz Temiz Enerji Kaynakları RES ve GES Üniteleri ile Konvansiyonel Fosil Yakıtlı Güç Santralleri Rekabeti Kapsamında Karşılaşılan Zorluklar**, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2017.
- ABD ile Dünyanın Diğer En Büyük Karbondioksit Emisyonları Üreticileri Çin ve Hindistan Arasında Filizlenen Global İklim Değişikliği Mücadelesi Çelişkisi**, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2017.
- ABD Uluslararası Çevre ve Hava Kirliliği Politikaları Değişim Süreci İçinde Baz Enerji Kaynağı Kömür Yakıtlı Termik Santraller İşletilmesi Perspektifleri**, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO** Yayınları, Faydalı Bilgiler, 2017.
- Amerika Paris İklim Anlaşması Taahhütleri Çekincesi ve Dünyanın En Büyük Global Karbondioksit Emisyonları Üreticisi Çin'in Çevre Kirliliği Politikası**, Ahmet Cangüzel

- Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2017.
- Dünya Okyanus Derin Sularında Balık Avcılığı ve Ekolojik Denge Sistemlerinin Bozulması Karşısında Deniz Ürünleri Nesillerinin Tükenmesi Olasılığı, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2017.
 - Mısır, Sudan, Etiyopya Nil Nehri Su Paylaşımı Anlaşmazlıkları ile İklim Değişiklikleri Sonucu Nil Havzası Boyunca Olası Seller ve Kuraklıklar, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2017.
 - Mevsimsel Yağışların Azalması ile Birlikte Akdeniz Ülkelerinde Hüküm Süren Kuraklık Sonucu Filizlenen İçme Suyu Sıkıntıları ve Orman Yangınları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2017.
 - Yüzde Yüz Doğa Dostu Karbonsuz Yenilenebilir Güç Kaynakları Elektrik Üretimi Tesisleri Sürdürülebilirliği ve Global Fosil Yakıtlar Enerji Piyasası Hakimiyeti, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2017.
 - Okyanuslar Kökenli Tropik Tayfunlar, Kasırgalar, Boralar, Fırtınalar, Hortumlar ile Filipinler Uluslararası Global İklim Değişikliği Mekanizmaları Politikaları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2018.
 - Enerji Piyasası Tekelleşmesi Önlenmesi, Küresel Fosil Yakıtlar ve Nükleer Güç ile **YEK** Menşeli **RES, GES, HES, JES** ve Biyokütle Elektrik Üretim Çeşitliliği, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2018.
 - Dünyanın En Riskli ve Tehlikeli Sera Gazı Emisyonları Sayılan Metan CH₄ Salınımları ile Global Isınma ve Küresel İklim Değişiklikleri Etkileri, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2018.
 - ABD** Beyaz Saray İklim Politikaları Karşısında Amerikan Kongresi Temsilciler Meclisi Üyeleri Tarafından **NASA** Karbon Denetim Sistemi **CMS** Onayı, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2018.
 - Karaelmas Kömür ve Düşük Kaliteli Linyit Rezervleri Karşısında Doğa Dostu Görünen Doğalgaz Yatakları Metan Gazı Sızıntıları Riskleri ve Tehlikeleri, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2018.
 - Dünya Ham Petrol Firmaları Yatırımcılarının Global İklim Değişiklikleri Faili Küresel Karbondioksit Yoğunluğu ve Konsantrasyonu Artışları Kaygısı, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2018.
 - Enerji Piyasası Tekelleşmesi Önlenmesi, Küresel Fosil Yakıtlar ve Nükleer Güç ile **YEK** Menşeli **RES, GES, HES, JES** ve Biyokütle Elektrik Üretim Çeşitliliği, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2018.
 - Arap Dünyası Küresel İklim Değişikliği Sorunları Menşeli Yüksek Sıcaklıklar, Kuraklıklar, Su Yoklukları ve Ekolojik Denge Koşulları Bozuklukları, Ahmet Cangüzel **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2018.
 - Afrika Ülkeleri Baz Yük Kaynakları Fosil Yakıt Yakan Termik Santraller Üniteleri ile Acil Çözüm Bekleyen İklim Değişiklikleri ve Bölgesel Kuraklık Sorunları, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2018.
 - Polonya Katowice Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi **UN Framework Convention on Climate Change - UNFCCC 2018 COP24** Zirvesi, Ahmet Cangüzel Taner, **Fizik Mühendisleri Odası FMO Yayınları**, Faydalı Bilgiler, 2019.
 - 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.
 - The Economist Dergisi (04 Mayıs 2019 – 10 Mayıs 2019).

Fizik Mühendisleri Odası Resmi İnternet Sitesi:

[www.fmo.org.tr/ yayinlar/faydali-bilgiler](http://www.fmo.org.tr/yayinlar/faydali-bilgiler)