

NÜKLEER YAKIT VE REAKTÖR MALZEMELERİ; YENİ GELİŞMELER VE EĞİLİMLER

Üner Çolak^{1*}

¹Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü, Beytepe 06800, Ankara

Dünya artan nüfus, hızla etkili olan çevre sorunları, Çin ve Hindistan gibi gelişen ülkelerin sürekli artan talebi gibi nedenler ile enerji konusunda daha duyarlı olma konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Bu çerçevede nükleer enerji, özellikle yüksek enerji ihtiyacı olan ülkeler için önemli bir alternatif olmaya adaydır. Nerdeyse 50 yılı bulan nükleer enerjinin ticari olarak kullanılması sürecinde güvenlik hep ön planda olmuş ve geliştirilen yakıt ve malzeme teknolojileri burada anahtar rol oynamıştır. Bu çalışmada son yıllarda ticari reaktörlerde yakıt ve malzeme ile ilişkili işletme problemleri ile yeni jenerasyon reaktörler kadar varolan reaktörlerde uygulama şansı bulabilecek yeni teknolojik çözümler sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Nükleer Yakıt, Malzeme Teknolojileri

NUCLEAR FUEL; RECENT DEVELOPMENTS AND TRENDS

Studies has been concentrated on energy issues for being concious due to increasing world population, rapidly becoming effective environmental problems, and continously increasing demand of developing countries like China and India. Nuclear energy is a candidate as an alternative source especially for countries with high energy demand. Safety has always been the primary concern for almost the last fifty years during the commercial utilization of nuclear energy and developed fuel and materials technologies have played key roles in this respect. This study deals with operational problems related with fuel and materials experienced in commercial reactor during recent years and new technological solutions applicable to new generation reactors as well as existing ones.

Keywords: Nuclear Fuel, Materials Technologies

*ucolak@hacettepe.edu.tr

1. GİRİŞ

Son yıllarda özellikle iklim değişikliği nedeni ile enerji üretiminde fosil kaynakların kullanımına yönelik kısıtlamalar ve yerine alternatif kaynakların sunulmasına yönelik genel bir eğilim pek çok ülkenin gündemindedir. Bu alternatifler arasında nükleer enerji de önemli bir yer tutmaktadır. Bunun önemli bir nedeni de hızla büyüyen Çin ve Hindistanın nükleer enerjiyi planlarının içine önemli oranda almalarıdır.

Nükleer enerji günümüzde dünyanın toplam elektrik üretiminin %15 kadarını karşılamaktadır. Teknoloji ağırlıkla hafif su teknolojisine dayanmakta ve bu durumun bir süre daha bu şekilde devam etmesi beklenmektedir. Uzun dönemde teknolojik gelişmeler ile birlikte gaz soğutmalı yüksek sıcaklık reaktörleri ve hızlı reaktörlerin de bu yelpaze içinde yer alması öngörülmektedir.

Nükleer yakıt doğal olarak nükleer enerji üretiminde en önemli girdidir. Doğal olarak özellikle güvenliğin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi konusundaki kaygılar bu alanda da yeni gelişmelerin ve iyileştirmelerin sağlanması için itici güç oluşturmaktadır.

Bu çalışmada nükleer yakıt teknolojisinin günümüzdeki durumu, son yıllardaki nükleer yakıtlar reaktör malzemeleri ile ilgili işletme problemleri, son yıllarda önerilen ve gerçekleştirilen tasarım değişiklikleri ve performans bilgileri sunulmaktadır.

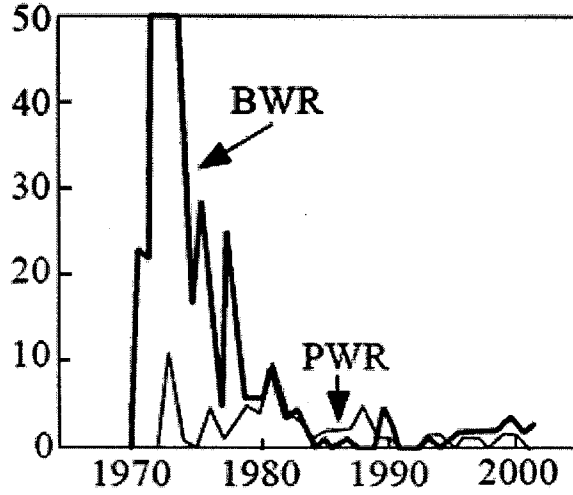
2. HAFİF SU REAKTÖR YAKITLARINDA VE MALZEMELERİNDE İŞLETME PROBLEMLERİ

Hafif su reaktörlerinde daha yüksek yanma oranlarına ulaşmak özellikle nükleer yakıt hammaddelerinin daha verimli kullanılması açısından önemli bir hedef oluşturmaktadır. 70'li yıllarda 30 000 MWD/MTU olan yanma oranları günümüzde 70 000 MWD/MTU değerlerini zorlamaktadır. Bu durumda bile yakıttan yararlanma oranı yaklaşık %7 değerini aşmamaktadır. Bu da daha önümüzde önemli bir yol olduğunu göstermektedir.

Nükleer reaktörlerde yanma oranını daha da arttırmayı engelleyen en önemli konu yakıt çubuklarının değişik nedenlerle işlevsizleşmesi ve zarf üzerinde oluşan çatlaklar nedeni ile fisyon ürünleri nedeni ile oluşan radyasyonun yakıt ve zarf bariyerlerini aşarak soğutucuya karışmasıdır. Şekil 1'de PWR ve BWR reaktörlerinde yıl bazında sızıntı yapan yakıt çubuğu sayısı verilmektedir. Buradan da görüldüğü gibi önceleri performansları daha kötü olan BWR reaktörleri yapılan iyileştirmeler ile son yıllarda PWR'lara yakın performanslarda işletilebilmektedir.

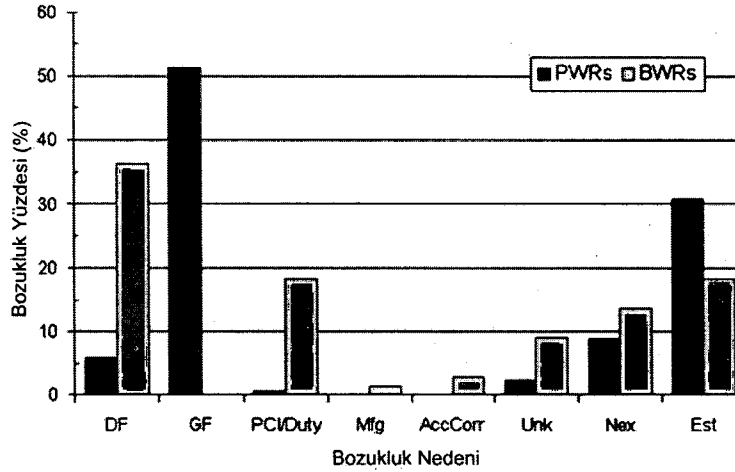
1970'li yıllarda özellikle ABD basınçlı su reaktörlerinde yakıt çubuklarının bozulma oranları 10^{-4} düzeyindeydi. İzleyen yıllarda özellikle Japon reaktörlerinde elde edilen oranlar 10^{-6} değerlerine kadar iyileştirilmişti. O yıllardan günümüze özellikle yakıt tasarımında gerçekleştirilen iyileştirmeler ve işletim parametrelerinde düzenlemeler ile bu düzeydeki performans genel olarak endüstri standardı haline gelmişti. Doğal olarak daha önce düşük yanma oranlarında işletim limiti olan fazla reaktivitenin yerini yavaş yavaş malzeme problemleri yerini almaktadır. Bunların arasında yakıt çubuğunun yakıt demeti ile arasında oluşan sürtünme sonucu aşınma, zarf malzemesinin korozyonu, pelet-zarf etkileşimi, hidrojen gevrekliği, fisyon gazı salınımından dolayı yakıt çubuğu iş basınç artımı sayılabilir. Hedef yanma oranlarında yakıt çubuklarının bozulma olasılığı 10^{-5}

değerlerini aşmaktadır. Bu kapsamda hedef bu oranın önemli bir şekilde aşağı çekilmesidir.



Şekil 1. Hafif su reaktörlerinde yakıt çubuklarının yıllık işlevsizleşme sayıları

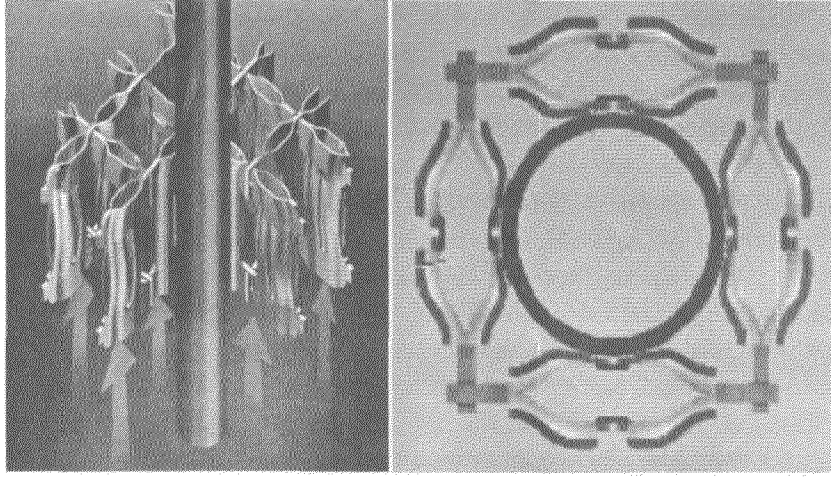
2004-2005 yılları esas alınarak elde edilen hafif su reaktörleri işletme problemleri ile ilgili istatistik Şekil 2’de verilmektedir [1].



Şekil 2. 2005 ve 2006 yıllarında hafif su reaktörlerinde malzeme ilişkili işletme problemleri [1]; DF (debris fretting, birikmiş parçalar nedeni ile aşınma), GF (grid to rod fretting, grid-çubuk arası aşınma), PCI (pellet-clad interaction, pelet-zarf etkileşimi), Mfg (manufacturing related, imalat ile ilişkili), AccCorr (Accelerated corrosion, hızlandırılmış korozyon), Unk (unidentified, belirlenmemiş), Nex (not examined, incelenmemiş), Est (diğerleri)

Şekil 2’de görüldüğü gibi basınçlı su (PWR) reaktörlerin de son yıllarda en çok karşılaşılan problemlerin başında zarf malzemesinin sürtünmeden dolayı aşınması gelmektedir. Bu tür reaktörlerde yakıt demetinde yakıt çubukları ayırıcı grid üzerinde Şekil 3’te gösterildiği gibi sıkıca sabitlenmiştir. Tipik bir basınçlı su reaktöründe kor içinde soğutucu debisi saniyede 23-24 ton kadardır. Ancak soğutucunun bu yüksek akış hızı nedeni ile oluşan

titreşim zarf malzemesinin sürtünmesi nedeni ile yırtılmasına neden olmaktadır. Bu da önemli miktarda radyoaktivitenin soğutucuya karışmasına yol açabilmektedir.



Şekil 3. Yakıt çubuğu ve ayırıcı grid ile konumlandırılması

BWR tipi reaktörlerde en yaygın problem reaktör soğutma sistemi içinde çeşitli nedenlerle serbestçe bulunan ve yüksek hızlarda dolaşırken yakıt elemanlarına çarpan metalik parçaların oluşturduğu darbeler ve zararlardan oluşmaktadır.

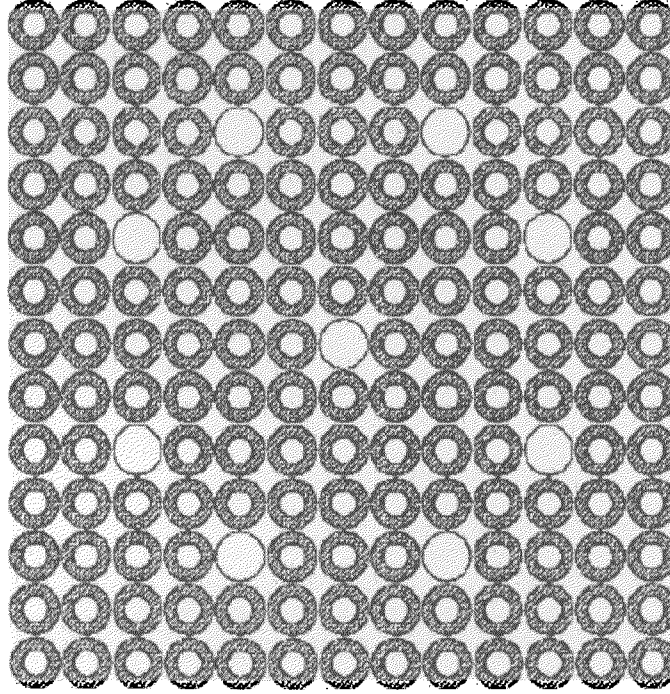
Hafif su reaktörlerinde radyasyon sızıntısına karşı engellerden biri de yakıt çubuğunu çevreleyen zarftır. Nötron ekonomisi ve yakıt performansı gözönüne alınarak zirkonyum alaşımları geleneksel olarak kullanılmaktadır. Her ne kadar bu tür malzemelerin korozyon dirençleri pek çok alternatiflerine göre yüksek ise de işletim koşullarına göre PWR'larda üniform korozyon ve BWR'larda nodüler korozyon hala önemli işletme problemi olarak algılanmaktadır. Diğer taraftan PWR soğutma suyunun içinde bulunan çözünmüş hidrojenin zarf malzemesi tarafından absorbe edilmesi önemli bir problem olan hidrat oluşumuna neden olmaktadır. Yüzeylerde oluşan zirkonyum hidrat tozu ve yüzeyden kolay ayrılan bir yapı oluşturduğundan zarf malzemesinin incelmeye ve zarfın bütünlüğünün kolayca bozulmasına neden olmaktadır. PWRlar için önemli bir sorun oluşturan bu durum için gerek yakıt alaşımında Ni elementinin azaltılması ve su kimyasının kontrolü gibi önlemler alınmıştır. Bu tür bir problem soğutucuda düşük çözünmüş hidrojen konsantrasyonu nedeni ile BWR için bir problem oluşturmamaktadır.

Özellikle 1970 ve 80'li yıllarda en önemli işletme problemi olan pelet-zarf etkileşimi zarf malzemesinde yapılan tasarım değişiklikleri ve işletme koşullarının düzenlenmesi nedeni ile birincil önemini kaybetmiştir. Ancak yine de üzerinde durulması gereken önemli bir konudur. Yakıtta oluşan şişme yakıt ve zarf arasındaki boşluğu kapatmakta ve yakıt zarf üzerinde mekanik yük oluşturmaktadır. Bunun sonucunda zarf malzemesinde çatlaklar oluşmakta ve radyasyonun yakıt çubuğunu terk etmesine neden olmaktadır. Bunun yanı sıra Cs ve I gibi fisyon ürünü isotopların yakıtı terk edip zarf içinde yayılması özellikle tane sınırları boyunca sonucu gerilmeli korozyon kırılması olasılığını arttırmaktadır.

3. YENİ YAKIT TASARIMLARI

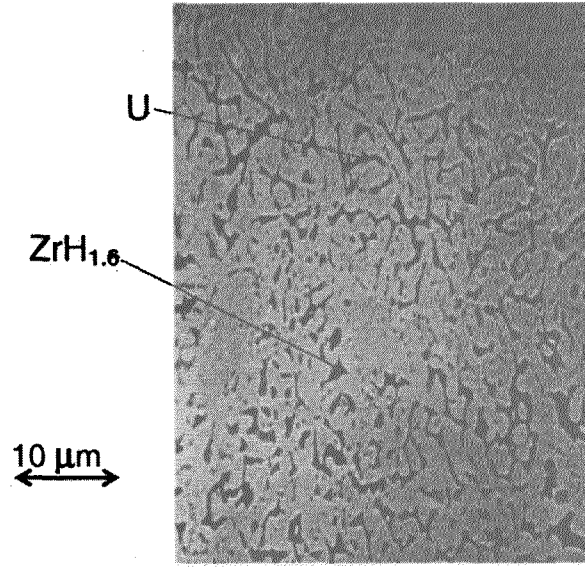
Yanma oranlarının giderek yükselmesine paralel nükleer yakıtların performanslarını arttırmak amacı ile önemli tasarım değişiklikleri de önerilmektedir. Bunların arasında

halka tipi yakıt kullanımı, basınçlı su reaktörleri için önerilen yeni bir yakıt tasarımıdır [2]. Yakıt çubuklarının boyutları büyütülerek orta kısmı boş bırakılıp yakıtların hem içerden hem de dışardan soğutulması sağlanarak güvenlik sınırları zorlanmadan daha düşük sıcaklıklarda çalışılması sağlanacaktır. Bu tür yakıtlarda yakıt demetlerinin geleneksel 17×17 yerine 13×13 şeklinde olması öngörülmektedir. Bu tür yakıt elemanları ile yüklenmiş PWR tipi reaktörlerde 45 kW/m olan doğrusal güç güvenli bir şekilde 100 kW/m değerini aşarak toplam gücün %50 kadar arttırılabileceği düşünülmektedir.

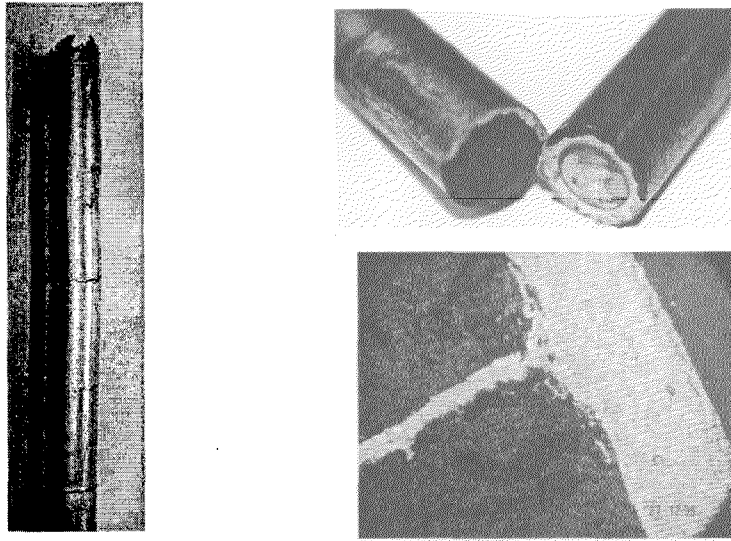


Şekil 4. Halka tipi yakıt elemanı içeren 13×13'lük yakıt demeti

Son yıllarda ortaya atılan başka bir yakıt tasarımında da alışılmış UO_2 ya da MOX içeren yakıtlar yerine daha çok plaka tipi TRIGA reaktörlerinde kullanılan uranyum-zirkonyum hidrat esaslı yakıt malzemesini silindirik yakıt çubukları içinde hafif su reaktörlerinde kullanımı önerilmektedir [3, 4]. Bu tasarımın bir avantajı hidrojen içeriği nedeni ile yakıtın kendinden moderatör işlevi üstlenmesi ve böylece soğutucu kanallarını daha sıkı oluşturma olanağıdır. Ulaşılabilecek yanma oranlarının da artması beklenmektedir. Yakıtın yaklaşık 6 kat artan ısı iletkenliği nedeni ile de yakıt sıcaklıkları düşük seviyelerde kalmakta ve ekstra bir güvenlik marjini sağlamakta ya da doğrusal güç değerlerini arttırmak için fırsat sağlamaktadır. Bu tür yakıtlarda yakıt-zarf arasındaki boşluğu geleneksel olarak kullanılan helyum gazı yerine düşük ergime sıcaklığına sahip kurşun, kalay ve bizmut alaşımının kullanılması önerilmektedir. Helyuma göre çok yüksek ısı iletkenliğe sahip bu malzeme ile önemli derecede olan sıcaklık düşümleri ırtadan kaldırılacaktır. Ayrıca yakıt merkez sıcaklığı da düşürülerek fisyon gaz salınımı hemen ortadan kaldırılabilir.



Şekil 5. U-Zr hidrat yakıt malzemesinin mikroyapısı [4]



Şekil 6. U-Zr hidrat yakıt içeren elemanda zarf ve metal bağlayıcı [4]

Zirkonyum alaşımları yerine seramik malzemelerin hafif su reaktörlerinde zarf malzemesi olarak kullanımı da yenilikçi çalışmalar arasında önemli bir yer tutmaktadır. Uzun yıllar nötronik avantajları ve sünekliği nedeni ile tercih edilen zirkonyum alaşımları yerine aday olarak önerilen malzeme SiC'dir. Nötron yutma tesiri kesiti zirkonyum alaşımlarından daha düşük olan SiC yaklaşık 1700°C düzeylerine kadar kullanım olanağı sağlar. Oksidasyon ya da termal bozunma için ise sıcaklıkların 1900°C'lerin üzerine çıkması gerekmektedir. Normal çalışma koşullarında ise korozyon zirkonyum alaşımlarının onda biri düzeyindedir.

Hafif su reaktörlerinin yanı sıra tekrar gündeme gelen gaz soğutmalı yüksek sıcaklık reaktörlerine yönelik geliştirme çalışmaları da devam etmektedir. Bu çerçevede TRISO kaplamalı yakıt teknolojisi önemli yer tutmaktadır. Sol-jel esaslı yakıt üretimi, pirolitik karbon ve SiC için akışkan yatakte kimyasal buhar çöktürme (CVD) süreci ve nükleer grafit bu alanda yoğun bir şekilde araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılan konulardır.

TRISO kaplamalı yakıtların özelliği SiC tabakasının ana basınç engeli işlevi gördüğü için fisyon ürünü gazların salınımı çok düşük seviyelerde olmakta ve 1800°C'lere kadar herhangi bozunma nedeni ile herhangi bir güvenlik problemi olmadan kullanım olanağı sağlamaktadır. Bu tür reaktörlerde yakıtlar tamamı seramik olduğu ve kendiliğinden güvenli olduğu için önemli avantajlar sağlamaktadırlar.

4. TARTIŞMA VE YORUM

Nükleer reaktörlerde işletme problemlerinin içinde yakıt ve malzeme ile ilgili konular önem taşımaktadır. Bu alanlarda yapılan düzenlemeler ve işletme koşullarının değiştirilmesi ile yakıtların güvenilirliğinin artırılması sağlanmaktadır. Pelet-zarf etkileşimleri gibi zamanında önemli bir problem alınan önemler ile ikincil problem haline getirilebilmiştir. Son yıllarda özellikle artan yakıt yanma oranları ile beraber yakıt tasarımlarında da yenilikler hedeflenmeye başlanmıştır. Bunların arasında içten ve dıştan soğutulan halka tipi yakıt çubukları ile zarf malzemesi olarak zirkonyum yerine seramik alternatiflerinin kullanımı yönündeki çalışmalar dikkat çekmektedir. Bu tasarımlar mevcut hafif su reaktörlerinde de kullanılarak güvenlik marjları artırılarak daha yüksek yanma oranlarına çıkılması sağlanacaktır. Bunların yanı sıra gaz soğutmalı yüksek sıcaklık reaktörleri için tamamı seramik olan TRISO kaplamalı yakıt teknolojisi ile ilgili çalışmalar sürdürülmektedir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Rusch, C.A., Nuclear fuel performance: Trends, remedies and challenges. *Jou of Nucl Mater*, 383, 1-2, 41, 2008.
- [2] Hejzlar, P. ve M.S. Kazimi, Annular fuel for high-power-density pressurized water reactors: Motivation and overview. *Nucl Tech*, 160, 1, 2, 2007.
- [3] Greenspan, E. ve diğerleri, Hydride fuel for LWRs--Project overview, *Nucl Eng and Des*. 239, 8, 1374 2009.
- [4] Olander, D., Nuclear fuels - Present and future. *Journal of Nuclear Materials*, 389, 1, 1-22, 2009..