

**HİDROJENİN ZİRCALLOY-4 ALAŞIMININ MEKANİK DAVRANIŞI
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**THE EFFECT OF HYDROGEN ON THE MECHANICAL
BEHAVIOR OF ZIRCALOY-4 ALLOY**

MEHMET CEM TOKER

DOÇ. DR ŞULE ERGÜN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak Hazırlanmıştır.

2020

MEHMET CEM TOKER'in hazırladığı “**Hidrojenin Zircaloy-4 Alaşımının Mekanik Davranışı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Üner Çolak

Başkan

.....

Doç. Dr. Şule Ergün

Danışman

.....

Prof. Dr. Okan Zabunoğlu

Üye

.....

Dr. Öğretim Üyesi Erol Çubukçu

Üye

.....

Dr. Öğretim Üyesi Gürdal Gökeri

Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak / /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

___ / ___ / 2020

MEHMET CEM TOKER

YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

..... / /.....

(İmza)

MEHMET CEM TOKER

ÖZET

HİDROJENİN ZİRCALOY-4 ALAŞIMININ MEKANİK DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

MEHMET CEM TOKER

Yüksek Lisans, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şule ERGÜN

Ekim 2020

Zirkonyum alaşımları hafif su soğutmalı reaktörlerde (LWR) yakıt zarf malzemesi olarak kullanılır ve uranyum oksit yakıt peletlerini ve birincil soğutucuyu fiziksel olarak ayırarak fizyon ürün salımının önündeki ilk engel görevi görür.

Reaktörün çalışması sırasında, yakıt zarfının yüzeyi su ile reaksiyona girerek yüzeyde bir oksit filmi tabakası oluşturur. Bu reaksiyon ayrıca kararlı durum ve kaza durumları için önemli sonuçları olan hidrojen üretilmesine sebep olur. Hidrojen, küçük atom boyutundan dolayı, metal-oksit arayüzünden matrise yayılabilir veya çözünürlük sınırının üzerinde hidrit çökmesi meydana gelebilir. Hidritler yapısı gereği kırılmandır ve zirkonyum esaslı alaşımın elastik davranışını azaltır. Buna ek olarak yüksek sıcaklıklarda reaksiyonun ekzotermik karakteri daha hızlı reaksiyon hızına yol açar. Her ne kadar sıcaklığın ve basıncın zirkonyum alaşımlarının mekanik davranışı üzerindeki güçlü etkisi oldukça iyi belirlenmiş olsa da hidrojenin (ve sonuçta ortaya çıkan hidritlerin) mekanik davranışı üzerindeki etkileri hakkında nispeten az şey bilinmektedir.

Son bulgular, hidrojenin zirkonyum esaslı alaşımların gevrekleşmesinde önemli bir rol oynadığını ve yakıt performans kodlarıyla doğru tahmin edilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymuştur. Bu tür etkilerin potansiyel varlığı, yakıt zarfında hidrojen birikiminin önemli olabileceği yüksek yanma oranlı yakıt için önemlidir. Mekanik davranış, yakıt modelleme kodları için kritik girdilerden biridir ve bu nedenle deformasyon davranışının mekanik olarak anlaşılması reaktör güvenliği için öneme sahip konulardan biridir.

Basınçlı su reaktörlerinde (PWR) sıkça kullanılan Zircaloy-4 tipi zirkonyum esaslı yakıt zarf malzemesi bir boyutlu silindir olarak, yine bu tez çalışması kapsamında geliştirilen “HUNEM-1.0 Yakıt Performansı Kodu” ile modellenmiştir. Modelde ilk olarak oksijenin difüzyon katsayısı ve kütle kazanımı zamana bağlı hesaplanmış sonrasında oksit metal arayüz sıcaklıkları ile oksit yer değiştirme modeli eksenel düzlemde geliştirilmiştir. Isı akısı, sıcaklık değişim hızı, hızlı nötron akısı ile soğutucu kimyasının oksidasyon kinetiğine olan etkileri de modele dahil edilerek bir oksit kalınlığı belirlenmiştir. Daha sonra alaşım üzerinde meydana gelen metal-oksit arayüzünün kalınlığı ile alaşımda toplanan hidrojen konsantrasyonu literatürden elde edilen korelasyonlar yoluyla HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu ile hesaplanmış olup, ampirik mekanik korelasyonlar yardımıyla, Zircaloy-4 alaşımının hidrojen konsantrasyonuna bağlı mekanik davranışı geliştirilmiştir. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu çıktılarının bir bölümünün doğrulanabilmesi için FRAPCON-3.4 yakıt performans kodu ile benzer bir yakıt çubuğu modellenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bu çalışma sonucunda, zirkonyum esaslı Zircaloy-4 alaşımının soğutucu ile temas eden yüzeyindeki hidrojen birikiminin, alaşımın mekanik ve deformasyon davranışına olan etkisinin, başlıca gerinim sertleşmesi, elastik ve plastik davranış, sünme davranışı bakımından normal çalışma koşulları altında çok düşük düzeylerde olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zirkonyum Alaşımları, Hidrojen birikimi, Nükleer Yakıt

Çubuklarının Mekanik Davranışı

ABSTRACT

THE EFFECT OF HYDROGEN ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF ZIRCALOY-4 ALLOY

Mehmet Cem TOKER

Master of Science, Department of Nuclear Energy Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Şule Ergün

October 2020

Zirconium alloys are used as fuel cladding material in Light Water Reactors (LWR) and act as the first barrier to fission product release by physically separating uranium oxide fuel pellets and primary coolant.

During the operation of the reactor, the surface of the cladding reacts with water to form an oxide film layer on the surface. This reaction also produces hydrogen, which has important consequences for steady state and accident situations. Hydrogen can spread from the metal-oxide interface to the matrix due to its small atomic size. In cladding, hydride precipitation occurs above the solubility limit. Hydrides are fragile and can reduce the ductility of the cladding. Exothermic character of the reaction at higher temperatures leads to faster reaction speed. Although the mechanical behavior of zirconium alloys as a function of temperature and the strong effect of hydrogen on the fracture behavior of

zirconium alloys are relatively well established, relatively little is known about the effects of hydrogen (and the resulting hydrides) on mechanical behavior.

Recent findings have made it clear that hydrogen plays an important role in the embrittlement of zirconium-based alloys and therefore must be correctly estimated with fuel performance codes to assess the condition of the fuel rods after various design-based accidents. The potential presence of such effects is particularly important for high combustion fuel where hydrogen uptake within the fuel cladding can be significant. The mechanical behavior is one of the critical inputs for fuel modeling codes, and therefore a mechanical understanding of the deformation behavior is critical for reactor safety.

In this study, Zircaloy-4 type zirconium-based fuel cladding material, which is frequently used in pressurized water reactors (PWR), is modeled as a one-dimensional cylinder with the HUNEM-1.0 fuel performance code which is developed in this study. In the model, the time-dependent diffusion coefficient and mass gain of oxygen were first calculated and then the oxide displacement model was developed with oxide metal interface temperatures. An oxide thickness was determined by including the effect of heat flux, temperature gradient, rapid neutron flux and coolant chemistry. Finally, the mechanical and also the deformation behavior of the Zircaloy-4 alloy in terms of the hydrogen concentration was modeled with the help of empirical correlations by HUNEM-1.0 fuel performance code through the correlations obtained from the literature with the thickness of the metal-oxide interface and the hydrogen collected in the alloy. In order to verify some of the HUNEM-1.0 fuel performance code outputs, a similar cylindrical fuel rod in one dimension was modeled with the FRAPCON-3.4 fuel performance code and the results were evaluated.

As a result of the study, it has been shown that the effect of the hydrogen concentration on the mechanical and therefore deformation behavior of the surface of the zirconium-based Zircaloy-4 alloy in contact with the coolant is reasonably low under normal operating conditions.

Keywords: Zirconium Alloys, Hydrogen Concentration, Mechanical Behavior, Nuclear Fuel Cladding

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans çalıőmalarım boyunca bana her türlü desteği veren danıőmanım Sayın Doç. Dr. Şule Ergün'e,

Ayrıca Orta Doğu Teknik Üniversitesi Finansal Matematik bölümü yüksek lisans öğrencisi Furkan Höük'e özel teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Nükleer Endüstride Zirkonyum Alaşımları	1
1.2. Oksidasyon ve Hidrojen Birikim Mekanizmaları	2
1.2.1 Oksidasyon Mekanizmaları	2
1.2.2 Hidrojen Birikim Mekanizması	5
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği	9
2. TASARIM KRİTERLERİ	10
3. ÖNERİLEN OKSİDASYON MODELİ VE BİLGİSAYAR PROGRAMI	12
3.1. Oksijen Akış Davranışının Modellenmesi.....	12
3.2. Sonlu Fark Yöntemi	13
3.2.1. Başlangıç ve Sınır Koşullarının Bulunması	14
3.3. Oksit Metal Arayüzün Hareket Davranışının İncelenmesi.....	17
3.4. Oksijen Difüzyon Katsayısının Hesaplanması	18
3.5. Oksidasyon Kinetiğine Etki Eden Diğer Faktörler	20
3.5.1. Isı Akısının Oksidasyon Hızına Etkisi	20

3.5.2. Hızlı Nötron Akısının Oksidasyon Hızına Etkisi.....	22
3.5.3. Soğutucu Kimyasının Oksidasyon Hızına Etkisi.....	23
3.6. Hafif Sulu Reaktörlerde Yakıt Zarfında Hidrojen Üreten Reaksiyonlar	23
3.7. Kullanılan Hidrojen Konsantrasyon Benzetimi.....	24
3.8. Akma Gerilmesi- Hidrojen Konsantrasyonu Benzetimi	25
3.9. Akma Gerilmesi- Plastik Şekil Değişirme Benzetimi.....	25
3.10. Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Yakın Akma Davranışı Benzetimi	26
3.11. Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Gerinim Sertleşmesi Benzetimi	26
3.12. Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Sürünme Gerinimi Benzetimi.....	27
3.13. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu.....	28
3.14. FRAPCON-3.4 Yakıt Performans Kodu.....	30
4. SONUÇLAR	30
4.1. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu Analiz Sonuçları.....	31
4.1.1. Yakıt Zarfı-Oksit Arayüz Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi.....	31
4.1.2. Yakıt-Zarf Arayüz Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi.....	34
4.1.3. Oksit Kalınlığının Zamana Bağlı Değişimi.....	35
4.1.4. Lityum Hidroksit Konsantrasyonunun Oksit Kalınlığına Etkisi.....	36
4.1.5. Hidrojen Konsantrasyonunun Zamana Bağlı Değişimi.....	37
4.2. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunun Zarf Malzemesinin Mekanik Davranışı ile ilgili Sonuçları.....	39
4.2.1. Levha Malzemesinin Deformasyon Davranışı ile Zarf Malzemesi İlişkisi... ..	39
4.2.2. Hidrojen Konsantrasyonunun Akma Davranışına Etkisi.....	42
4.2.3. Hidrojen Konsantrasyonunun Plastik Gerilme-Şekil Değişirme Davranışına Etkisi.....	43
4.2.4. Hidrojen Konsantrasyonunun Yakın Akma Davranışı Üzerindeki Etkisi.....	48
4.2.5. Hidrojen Konsantrasyonunun Gerinim Sertleşmesi Üzerindeki Etkisi.....	52
4.2.6. Hidrojen Konsantrasyonunun Sürünme Gerinimi Üzerindeki Etkisi.....	55
5. DEĞERLENDİRME.....	56
6. ÖNERİLER VE GELECEKTE YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR.....	57
7. EKLER.....	58
7.1. EK 1 – HUNEM-1.0 Matlab Kodu	58
7.2. EK 2 – FRAPCON-3.4 Yakıt Performans Kodu Girdi Verileri.....	69
8. KAYNAKLAR	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Metal Korozyonunun Şematik Gösterimi.....	2
Şekil 1.2. 260-400°C Sıcaklık Aralığında Zircaloy-4'ün Oksidasyon Davranışının Şematik Gösterimi [6].....	4
Şekil 1.3. Alfa Fazında Hidrojenin Zircaloy-4'teki Çözünürlüğü [12].....	7
Şekil 1.4. Farklı Faz ve Sıcaklıklarda Hidrojenin Yüzde Cinsinden Zircaloy-4'teki Çözünürlüğü[13].....	8
Şekil 2.1. İzin Verilen En Yüksek Homojen Oksit Tabakası Kalınlığı [18].....	11
Şekil 3.1. ZrO ₂ 'nin Arayüzlerindeki Oksijen Denge Konsantrasyonlarının Şematik Gösterimi.....	15
Şekil 3.2. Zirkonyum-Oksit Faz Sisteminin Kısmi Diyagramı [21].....	16
Şekil 3.3. Yakıt Elemanındaki Sıcaklık Profiline Şematik Gösterimi.	21
Şekil 3.4. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunun Algoritma Akış Şeması. ...	29
Şekil 3.5. FRAPCON-3.4 Yakıt Performans Kodunun Algoritma Akış Şeması.	30
Şekil 4.0. HUNEM-1.0 Kodunda Elde Edilen Yakıt Zarfı Oksit Arayüz Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi.	32
Şekil 4.1. FRAPCON-3.4 Yakıt Performans Kodunda Elde Edilen Yakıt Zarfı Oksit Arayüz Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi.	33
Şekil 4.2. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunda Elde Edilen Yakıt-Zarf Arayüz Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi.	34
Şekil 4.3. FRAPCON-3.4 Yakıt Performans Kodunda Elde Edilen Yakıt-Zarf Arayüz Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi.	34
Şekil 4.4. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunda Edilen Oksit Tabakası Kalınlığının Zamana Bağlı Değişimi	35
Şekil 4.5. FRAPCON-3.4 Yakıt performans kodunda Elde Edilen Oksit Tabakası Kalınlığının Zamana Bağlı Değişimi.	36
Şekil 4.6. Lityum Hidroksit Konsantrasyonunun Oksit Kütle Kazanımına Etkisi.	37

Şekil 4.7. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu ile Hesaplanan Hidrojen Konsantrasyonunun Zamana Bağlı Değişimi.	38
Şekil 4.8. FRAPCON-3.4 Yakıt performans kodu ile Hesaplanan Bir PWR Yakıt Çubuğu için Hidrojen Konsantrasyonunun Zamana Bağlı Değişimi.....	38
Şekil 4.9. Referans Çalışmada Kullanılan Zircaloy-4 Plakası Yönleri ile Bu Yönlere Karşılık Gelen Zircaloy-4 Silindirik Yakıt Zarfının Yönleri [30].	40
Şekil 4.10. Farklı Doğrultulardaki Zircaloy-4 Plakalarının Akma Gerilimlerinin Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Değişim Grafiği.....	43
Şekil 4.11. 25°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 Ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Normal Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.	44
Şekil 4.12. 300°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 Ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Normal Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.	45
Şekil 4.13. 400°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 Ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Normal Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.	45
Şekil 4.14. 25°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 Ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Enine Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.....	46
Şekil 4.15. 300°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 Ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Enine Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.	46
Şekil 4.16. 400°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 Ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Enine Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.	47
Şekil 4.17. 25°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 Ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Haddeme Doğrultusundaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.....	47
Şekil 4.18. 300°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 Ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Haddeme Doğrultusundaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.	48

Şekil 4.19. 400°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 Ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Haddeleme Doğrultusundaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği.	48
Şekil 4.20. 25°C ve 400°C Sıcaklıkta Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Haddeleme Yönünde Zr-4 Plakalarının Akma Gerilmesi Fark Grafiği.....	50
Şekil 4.21. 25°C ve 400°C Sıcaklıkta Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Enine Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Akma Gerilmesi Fark Grafiği.....	50
Şekil 4.22. 25°C ve 400°C Sıcaklıkta Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Normal Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Akma Gerilmesi Fark Grafiği.....	51
Şekil 4.23. 25°C Sıcaklıkta Enine, Normal ve Haddeleme Doğrultularındaki Zircaloy-4 Plakalarının Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Gerinim Sertleşmesi Üsteli Değişim Grafiği.....	53
Şekil 4.24. 300°C Sıcaklıkta Enine, Normal ve Haddeleme Doğrultularındaki Zircaloy-4 Plakalarının Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Gerinim Sertleşmesi Üsteli Değişim Grafiği	54
Şekil 4.25. 400°C Sıcaklıkta Enine, Normal ve Haddeleme Doğrultularındaki Zircaloy-4 Plakalarının Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Gerinim Sertleşmesi Üsteli Değişim Grafiği.....	54
Şekil 4.26. 400°C Sıcaklıkta Haddeleme Doğrultusunda Zircaloy-4 Plakasının 0 - 600 ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Sürünme Gerinimi Değişim Grafiği.....	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Zircolay-4 Alaşımının Fiziksel Özellikleri [2].	1
Çizelge 2.1. Ülkeler ve Nükleer Düzenleme Kurumları Tarafından Belirlenen Yakıt Zarfı Hidrojen Konsantrasyon Limitleri (ppm) [19].	12
Çizelge 3.1. Sıcaklığa Bağlı Oksijen Konsantrasyonu Değerleri (%).	16
Çizelge 3.2. Sıcaklığa Bağlı Oksijen Konsantrasyonu Değerleri (g/cm ³).	17
Çizelge 3.3. Hidrojen Konsantrasyonu - Akma Gerilim Benzetimi Çizelgesi. ...	25
Çizelge 3.4. Hidrojen Konsantrasyonu - Yakın Akma Davranışı Benzetimi.....	26
Çizelge 3.5. Hidrojenin Konsantrasyonu - Gerilim Sertleşmesi Benzetim Çizelgesi.	27
Çizelge 3.6. Hidrojenin Konsantrasyonu – Sürünme Gerilim Benzetimi Çizelgesi..	28
Çizelge 4.1. Zircolay-4'ün Deneysel Plastik Anizotropi Deformasyon Hızları [32].	41

KISALTMALAR

Kısaltmalar

PWR	Pressurized Water Reactor (Basınçlı Su Reaktörü)
LWR	Light Water Reactor (Hafif Su Soğutmalı Reaktör)
LiOH	Lityum Hidroksit
Zircaloy	Zirconium Based Alloy (Zirkonyum Esaslı Alaşım)
CRUD	CRUD (Sarımsı, Gözenekli veya Sert Kabuk) Tabakası
HBK	Hidrojen Birikim Kesri
THM	Toplam Hidrojen Miktarı
A-Zr	Alfa Zircaloy Katmanı
TÇL	Terminal Çözünürlük Limiti
ZrO ₂	Zirkonyum Dioksit
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
NUREG	ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu Tüzüğü
MATPRO	Malzeme Özellikleri Kütüphanesi
AG	Akma Gerilmesi
GS	Gerinim Sertleşmesi
GSÜ	Gerinim Sertleşme Üsteli
YAD	Yakın Akma Davranışı
HK	Hidrojen Konsantrasyonu
PŞD	Plastik Şekil Değişirme
Ppm	Parts Per Million (Milyonda Bir Birim)

1. GİRİŞ

1.1 Nükleer Endüstride Zirkonyum Alaşımları

Zirkonyum alaşımları, neredeyse tüm su soğutmalı reaktörlerde (basınçlı su reaktörleri (PWR) ve kaynar sulu reaktörler (BWR) gibi hafif su soğutmalı reaktörler ile Kanada tarafından tasarlanan Canada Deuterium-Uranium Reactor (Candu Reaktörü)) yakıt çubukları ve yakıt ayraçları için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Hafif su reaktörlerinin korunda, su ile soğutulan yakıt demetleri bulunur. Her bir yakıt demeti bir dizi halinde bulunan, çapı yaklaşık 9-10 mm, boyu 3,5-4 metrelik yakıt çubuklarından oluşur. Bu yakıt çubukları, nükleer yakıt ile birincil döngü suyu arasındaki ilk bariyer olup fizyon ürünlerini içerisinde barındıran zirkonyum alaşımından imal edilmiştir.

Yüksek korozyon direnci, mekanik özellikler ve en önemlisi düşük termal nötron yutma tesir kesitine sahip olması bakımından zirkonyum, nükleer yakıt çubuğu zarf malzemesi için en uygun seçimdir [1]. Zirkonyumun fiziksel özellikleri Çizelge 1.1'den görülebilmektedir.

Çizelge 1.1. Zircaloy-4 Alaşımının Fiziksel Özellikleri [2].

Özellikler	Değer
Atom numarası	40.00
Atom ağırlığı (g)	91.21
Teorik yoğunluğu (g/cm ³)	6.5
Erime noktası (°C)	1852
Termal iletkenliği (W/mK)	22

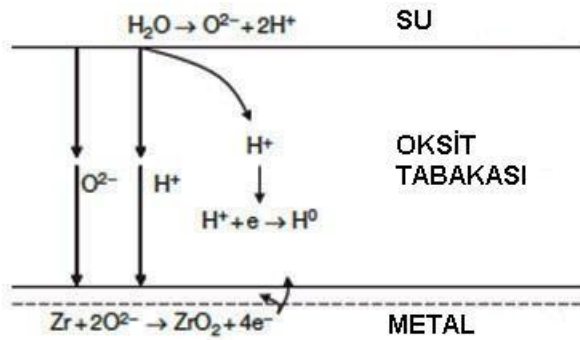
Nükleer reaktörlerde yakıt zarfı malzemesi olarak Zircaloy-2, Zircaloy-4, M5, E110 (Rusya Federasyonu Üretimi Zirkonyum Esaslı Alaşım), ZIRLO (Zirkonyum Düşük Oksidasyon), Advanced ZIRLO (İleri Zirkonyum Düşük Oksidasyon) alaşımları başta olmak üzere birçok alaşım türü kullanılmaktadır.

1.2 Oksidasyon ve Hidrojen Birikim Mekanizmaları

1.2.1 Oksidasyon Mekanizmaları

Tipik bir reaktörün işletimi esnasında, zirkonyum zarf malzemeleri çevresel bazı etkilere maruz kalabilirler. Nükleer yakıt içeren peletlerden yayılan fizyon gazları zarfın iç çeperinde bir yük oluşturabilir veya peletler şişerek zarfa temas edebilir. Tüm bunlar meydana gelirken aynı zamanda zirkonyum zarfın iç çeper sıcaklığı yaklaşık 400°C civarındadır. Zarfın dış çeperi soğutma suyuyla temas halindedir ve sıcaklığı yaklaşık 350°C'dir ve suya temas eden bu yüzeylerde korozyon meydana gelebilir.

Zirkonyum alaşımlarının korozyonu, alaşım yüzeyinin mikro yapısı ve mikro kimyası, oluşan oksit tabakasının kimyasal ve fiziksel özellikleri, metal-oksit arayüzündeki sıcaklık, soğutma suyunun kimyası ve hızlı nötron akısından etkilenen elektro-kimyasal bir süreçtir. Oksidasyon sürecine ek olarak, zirkonyum alaşımının su ile temas eden yüzeyinde gevreklemeye neden olabilecek hidrojen birikimi oluşabilir. Zirkonyum alaşımının su ile girdiği kimyasal tepkimeler Şekil 1.1'den görülebilmektedir.



Şekil 1.1 Metal korozyonunun şematik gösterimi [17].

Genel olarak, zirkonyum alaşımlarının ilk oksidasyonu sırasında ince koruyucu siyah oksit oluşur. Zirkonyum oksit kalınlığı arttıkça, oksidin su veya buhar fazı ile temas eden dış kısmı gri ve gözenekli yapıda bir okside dönüştürülür. Oksit tabakası, zirkonyum alaşım malzemesinin içine doğru büyür. Zarf malzemesinin korozyonu ile üretilen hidrojen atomlarının zirkonyum alaşımları tarafından biriktirildiği, soğutucudaki hidrojen moleküllerinin ise zirkonyum alaşımı tarafından biriktirilmediği bilinmektedir.

Yüksek sıcaklık altında suda zirkonyum esaslı alaşımlar, su ile erken oksidasyon fazı ile ince, bütün halinde ve siyah bir koruyucu tabaka oluşturur [3].

Oksit oluşum süreciyle zirkonyumdan salınan elektronlar, suyun hidrojen atomlarına indirgenen hidrojen iyonları tarafından yakalanır. Bu hidrojen atomlarının bir bölümü zirkonyum matrisi üzerinde hidrojen moleküllerini meydana getirerek birikebilir [4]. Biriken hidrojen atomları için çözünürlük sınırı (330 °C için yaklaşık 100 mg/kg-zirkonyum) zirkonyum esaslı alaşımda aşıldığında, fazla hidrojen zirkonyum esaslı alaşım üzerinde zirkonyum hidrit olarak çökeler. Zirkonyum alaşımında toplanan hidrojen çözünürlüğünün zirkonyum alaşımı üzerindeki oksit (korozyon) tarafından oluşturulan toplam hidrojene oranı, hidrojen birikim kesiri (HBK) olarak tanımlanır.

HBK, zirkonyum esaslı alaşımı oluşturan elementlere, sıcaklığa, su kimyası ve reaktör işletim parametrelerine bağlıdır. Zirkonyum alaşımı tarafından biriktirilen toplam hidrojen miktarı (THM), korozyon hızının ve HBK'nın bir fonksiyonudur.

Zirkonyum esaslı alaşımlarda meydana gelen korozyon, temel olarak galvanik bir hücreyi içeren elektrokimyasal bir süreçtir [5]. Oksit filmin oksijen boşluğu difüzyonu ile büyümesi anodik, hidrojen iyonlarının sudan oksit filmine doğru yayılan elektronlar tarafından indirgenmesi katodik bir işlemdir.

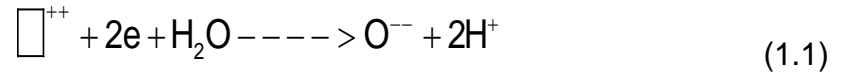
Zirkonyum esaslı alaşımın korozyon davranışı ince ve siyah oksit film oluşumu ile başlar ve oransal bir biçimde bir kübik denklemi takip ederek devam eder. Akabinde doğrusal bir denklemi takip ederek gri veya beyaz okside geçiş yapar. Bu süreç kendi arasında geçiş öncesi, geçiş ve geçiş sonrası dönem olarak isimlendirilir. Zirkonyum esaslı alaşım zamanla başlangıç kütlelerini kaybeder ve oksit bir kütle kazanır. Bu süreç, Zirkonyum esaslı alaşımın su ile temas süresi boyunca ilerler ve oksidin kütlesi artar. Bu durum grafiksel olarak Şekil 1.2'de sunulmuştur.



Şekil 1.2. 260-400°C Sıcaklık Aralığında Zircaloy-4'ün Korozyon Davranışının Şematik Gösterimi [6].

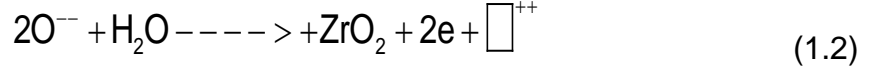
Geçiş sonrası rejimi olarak adlandırılan ikinci dönemde oksit filmi yapısında gözeneklerin ve çatlakların oluşması, korozyon oranını keskin bir şekilde artırır ve oksidin metal arayüzüne doğru daha fazla oksijenin dağılımına yol açar. Oksit, elde edilen sıcaklığa ve oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak çeşitli yapıların (çukur, delik vb.) oluşumuna yol açar.

Toplam oksidasyon reaksiyonu, eşzamanlı olarak meydana gelen iki ayrı reaksiyondan meydana gelir. Bunların ilki bir anyonik boşluğun ve iki elektronun, korozif ortam arayüzünde bir su molekülü ile etkileşimi sonucu bir oksijen iyonu ile iki hidrojen iyonu oluşumudur [8]:



Bu denklemde, \square^{++} , oksit katmanı içerisindeki anyonik boşluğu; $2e$, oksit-metal arayüzde oluşan serbest iki elektronu; O^{--} , oksit-metal arayüzde oluşan oksijen iyonunu temsil eder.

İkinci reaksiyonda ise, bir oksijen iyonu oksit filminden metale yayılarak oksit-metal arayüzde bir zirkonyum atomu ile reaksiyona girer ve bir zirkonyum dioksit molekülü, bir anyonik boşluk ve iki serbest elektron oluşturur:



Anyonik boşluklar ve serbest elektronlar oksitleyici korozif ortam arayüzüne yayılır. Böylece, anyonik boşluklar ile oksijen iyonları sabit bir oranda kalıcı hale gelir. Oksidasyon, oksijenin metalin içerisine doğru difüzyonunun bir sonucu olarak sürekli olarak ilerler ve oksidasyon sürecinde hız sınırlayıcı basamak bu difüzyondur.

Özetle, korozyon hızı, bir korozyon tabakası boyunca oksijen anyon yayılımı tarafından karakterize edilir ve bu tabaka ne kadar kalın olursa, korozyon oranı o kadar düşük olur. Bariyer tabakası kalınlığı, tekrarlanan geçiş oluşumu ve bariyer tabakası kalınlığının parçalanma durumuna göre zamanla değişir.

1.2.2 Hidrojen Birikim Mekanizması

Hidrojen atomlarının bazıları oksit-metal arayüzüne taşınır ve zarf malzemesi tarafından emilebilir [9]. Bu işleme hidrojen birikimi denir. Zircaloy-4 alaşımı için, korozyon sürecinde serbest kalan hidrojenin %10-20'si tipik olarak zarf malzemesi içine emilir. Hidrojen birikimini etkileyen faktörler şunları içerebilir [10]:

1. Kalınlık, morfoloji ve kristal yapı gibi oksit film özellikleri,
2. Çeşitli özelliklere sahip ikinci faz parçacıkları,
3. Zirkonyum alaşımı bileşimi ve mikro yapısı,
4. Korozyona maruz kalan alan,
5. Su kimyası.

Elektronlar tarafından indirgenerek oksit/çevre arayüzü üzerinde meydana gelen hidrojen atomları birleşerek hidrojen moleküllerini (suda çözünecek olan) oluşturabilir veya oksit film tabakası boyunca uygun bir aralık (boşluk) bulabilirlerse oksit/metal arayüzüne doğru yayılabilir. Bunun nasıl gerçekleştiği bilim çevrelerinde henüz açıklanmamış olmakla birlikte hidrojenin bariyer katmanından şu şekilde geçebileceği düşünülmektedir:

1. Katmanın oksit filmi üzerindeki lokal kusurlar (çatlaklar ve gözenekler) üzerinden taşınımı,
2. Hidrojenin pencere görevi gören oksitlenmemiş ikincil haz partikülü (örneğin Ni veya Cu içeren) üzerinden taşınımı,

Hidrojen zarf malzemesine girdikten sonra,

$$J = -\frac{DC_x}{RT} \left[RT \left(\frac{d \ln C_x}{dx} \right) + \frac{Q^*}{T} \frac{dT}{dx} - \frac{V^*}{3} \frac{d\sigma}{dx} \right] \quad (1.3)$$

denklemine göre yayılım gösterebilir [11]. Bu denklemde, J , metaldeki H atom akısını; D , H için difüzyon katsayısını, C_x , X noktasındaki toplam lokal H konsantrasyonunu (mol/m^3); Q^* , taşınım ısısını (kcal/mol); R , ideal gaz sabitini ($R=8.3144 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$); V^* , Metaldeki hidrojen taşınım hacmini; σ , gerilmeyi temsil etmektedir. H için difüzyon katsayısı,

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q^*}{RT}\right) \quad (1.4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklemde D , difüzyon (yayılım) katsayısını ($\text{cm}^2/\text{sn.}$); D_0 , yüksek sıcaklıklarda elde edilen sınır difüzyon sabitini; Q^* , taşınım ısısını (kcal/mol); T , mutlak sıcaklığı (K) ifade eder.

305-610 °C sıcaklık aralığı için saf zirkonyum ve zirkonyum esaslı alaşımların sıcaklığın bir fonksiyonu olarak difüzyon katsayısı,

$$D = 7,0 \times 10^{-4} \exp(-849 / (T + 273.15)) \quad (1.5)$$

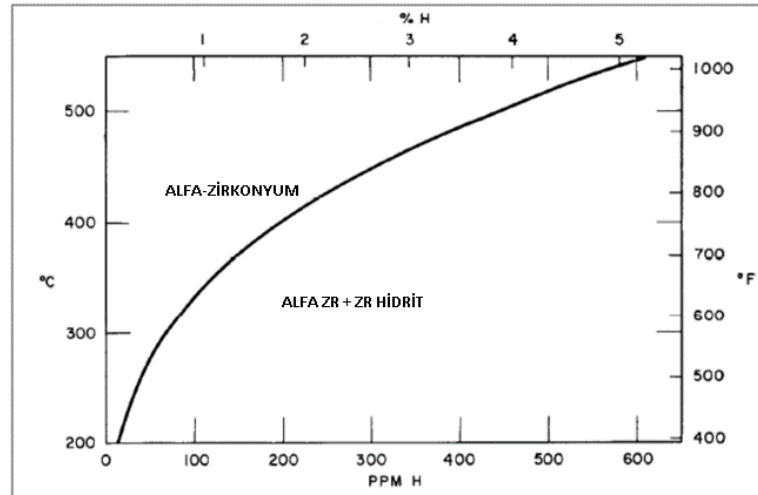
denklemlerle ifade edilebilir [12]. Belirtilen denklemler, hidrojenin düşük hidrojen içeriği, daha yüksek sıcaklık ve daha yüksek stres alanlarına yayılma eğiliminde olduğunu göstermektedir.

Hidrojenin yayılma hızı, sıcaklık ve atomların yayıldığı maddeye göre değişir. Hidrojenin difüzyon katsayısı, oksitte zirkonyum matriste göre 10^8 kat, hidritte zirkonyum matrisine göre 10^2 kat daha yavaştır [12].

Hidrojen konsantrasyonu, alfa-zirkonyum matrisindeki çözünürlük sınırına ulaştığında, hidrojen zirkonyum hidrit olarak çöker. Alfa-zirkonyumdaki hidrojenin termal çözünürlük limiti (TÇL),

$$C_s = 9.9 \times 10^4 \times e^{-8250/RT} \quad (1.6)$$

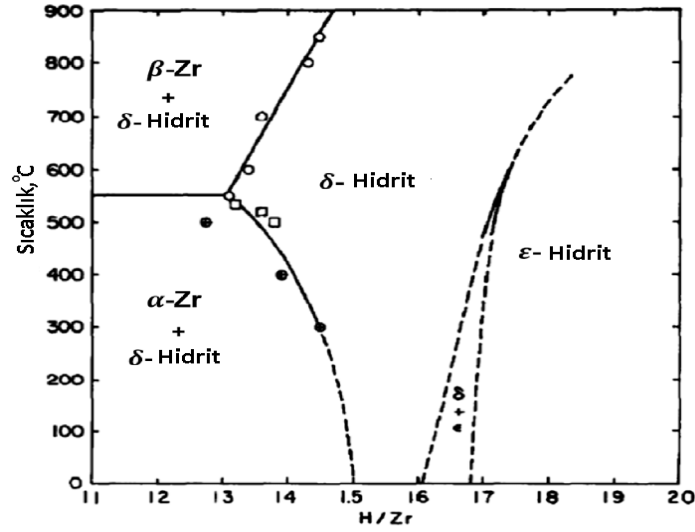
denklem [12] yardımıyla hesaplanabilir. Bu denklemde C_s , Zircaloy-4 içerisinde hidrojenin çözünürlük limitini (ppm); R , ideal gaz sabitini ($R=1.98 \text{ cal/mol}^\circ\text{C}$); T = mutlak sıcaklığı (K) temsil etmektedir. TÇL, Şekil 1.3'de gösterilmiştir:



Şekil 1.3. Alfa Fazında Hidrojenin Zircaloy-4'deki Çözünürlüğü [12].

Şekil 1.3'de görüldüğü gibi hidritlerin terminal çözünürlük limiti 350°C'de ağırlıkça yaklaşık 100 ppm'dir. Bu sınıra ulaşıldığında hidrojen atomları zirkonyum atomlarıyla reaksiyona girer ve zirkonyum hidrit formu olarak çökelir.

Zirkonyum-hidrojen sistemi için faz diyagramı Şekil 1.3'te verilmektedir [13]. Bu faz diyagramından iki ana hidrit fazı tanımlanmıştır: δ-hidrit ve ε-hidrit. Üçüncü bir hidrit fazı olan γ-hidrit fazının metastabil olduğuna inanılır, bu nedenle faz diyagramında görünmez [11].



Şekil 1.4. Farklı Faz ve Sıcaklıklarda Hidrojenin Yüzde Cinsinden Zircaloy-4'teki Çözünürlüğü [13].

Basıncılı su reaktörlerinde yakıt zarfının korozyonu homojenken, kaynar sulu reaktörlerde (BWR), beklenen homojen korozyon değerlerinin çok üzerinde ortalama bir oksit tabakası kalınlığına sahip nodüler tip oksit oluşur.

Zircaloy korozyon reaksiyonu esasen difüzyon kontrollü bir reaksiyon olup bu reaksiyonun ilerlemesi, atomların veya iyonların ZrO-Zircaloy matrisi boyunca yayılma hızına bağlıdır [14]. Oksidasyon işlemi,

$$\Delta w = kt^n \quad (1.7)$$

hız yasası ile tanımlanabilir. Denklemden Δw , oksit kütle kazanımını; k , oran sabitini; t , maruz kalma süresini; n , geçiş öncesi kübik veya parabolik olarak değişebilen (0.2-0.6 değerleri arasında) geçiş sonrası 1'e yakınsayan üs değerini ifade eder.

Geçiş öncesi aşamada oksit tabakası siyah veya parlak görünümündedir. Çok kompakt ve koruyucudur. Geçiş sonrası aşamada ise üs 1'e yakınsayarak oksidasyon hızı zaman içinde sabit hale gelir. Geçiş sonrası aşamada ufalanabilir gri bir oksit Zircaloy alaşım malzemesini kaplar. İlk aşamadan ikinci aşamaya geçiş, oksidasyon hızındaki geçiş olarak adlandırılır [15].

Bahsedilen geçişin kesin mekanizması henüz tam olarak anlaşılammış olmakla birlikte, zirkonyumun yüksek Pilling-Bedworth oranı (ZrO_2 'nin Zr'ye oranı) sebebiyle Zirkonyumun oksidasyonu esnasındaki hacim değişikliği, oksit filmdeki basınç gerilmelerinin ve metal alt yüzeyindeki çekme gerilmelerinin gelişimine yol açabilir.

Reaktör içi korozyon, ısının zarf yüzeyi üzerinden türbülanslı akışa sahip suya aktarıldığı ve metalle temas eden soğutucunun ince filmi boyunca bir sıcaklık değişiminin bulunduğu bir süreçtir. Isı akışı ne kadar yüksek olursa, bu tür bir film boyunca sıcaklık düşüşü o kadar yüksek olur ve bu nedenle metalle temas eden suyun sıcaklığı artar. Bu nedenle, ısı ve hidrolik modelleme, reaktör içi korozyon işleminin anlamlı bir tanımını sağlamak için oksidasyon modellemesiyle birleştirilmelidir. Ek olarak, Zircaloy alaşımının oksidasyon hızındaki geçiş sonrası, belirli bir radyasyon maruziyetinden sonra 'k' oran sabitinde bir artışın meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca hızlı nötron akısının mevcudiyetinin, belirli bir konsantrasyona ulaştıktan sonra, oksijen için yeni difüzyon yolları açan ve oksidasyon hızını arttıran oksit tabakasında ek kusurlar oluşturduğu söylenebilir [16].

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Zirkonyum esaslı alaşımdan imal edilen yakıt zarfında biriken hidrojen, yakıt zarfının güvenilirliğine ilişkin en büyük endişelerden biri kabul edilmektedir. Bu endişelerin temel nedeni, reaktörün normal işletimi esnasında artan hidrojen birikimi akabinde zarf korozyonunda (hidrit zirkonyum esaslı alaşımlarda daha erken ve çabuk birikir) ivmeli artışa neden olan baskın hidrit birikintilerinin oluşumudur [3].

Zirkonyum alaşımının su ile temas eden yüzeyinin korozyonunun, mevcut normal basınçlı su reaktörleri (PWR) çalışma koşullarında genellikle bir sorun teşkil etmediği gözlenmiştir.

Bununla birlikte, genellikle basınçlı su reaktörlerinde kullanılan Zircaloy-4 alaşımının su ile temas eden yüzeyinin korozyonu, yakıt çubuğu performansı ve tasarımında sınırlayıcı faktörlerden biri olacağı için son zamanlarda nükleer endüstride önemli bir teknik konu ve artan ilgi konusu haline gelmiştir.

Bu çalışmanın amacı, yaygın olarak kullanılan basınçlı su reaktörlerinde normal işletme koşulları altında zamanla korozyon ağırlık artışını, oksit kalınlığını ve hidrojen toplanması ile hidrojen birikim miktarlarını tahmin etmek için literatürde yapılan çalışmalar ve elde edilen deneysel korelasyonlar kullanılarak bir bilgisayar programı modeli geliştirmektir. Önerilen model, reaktör dışı ve reaktör içi ortamlar ve çalışma koşulları altında alaşımdaki hidrojen toplanmasını ve birikimini tahmin edebilmektedir.

2. TASARIM KRİTERLERİ

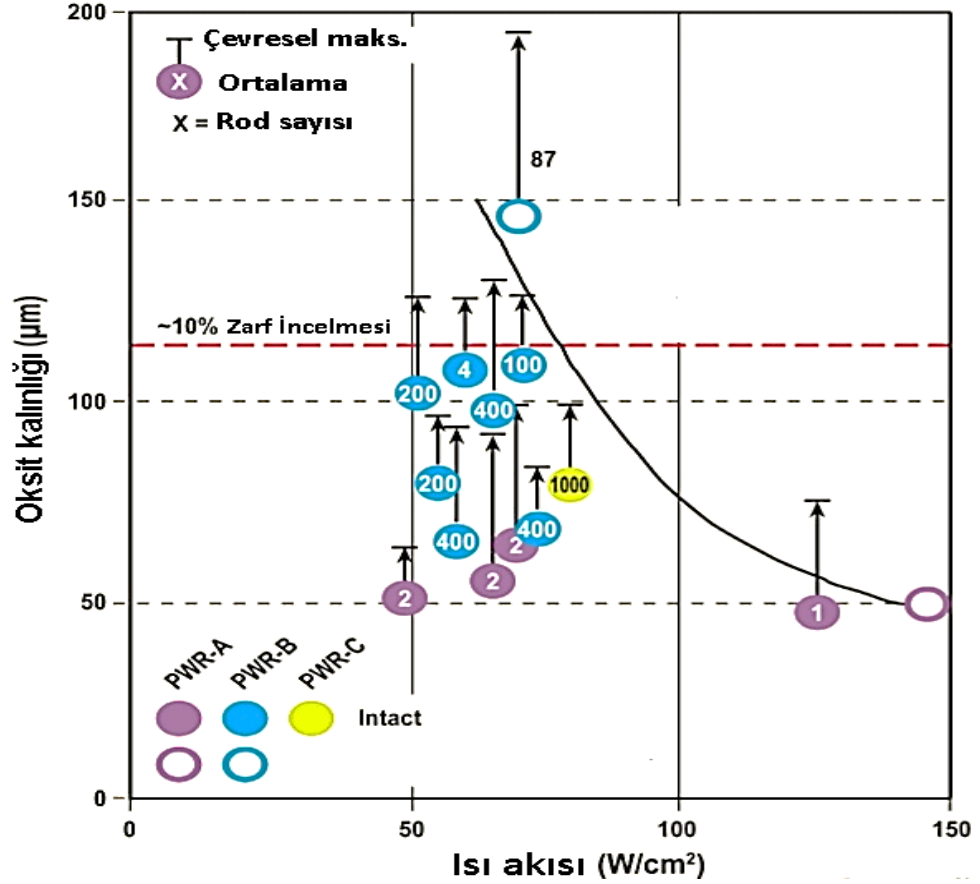
Uygun yakıt performansını sağlamak için yakıt çubuğu oksit kalınlığı, hidrojen birikimi ve CRUD (Sarımsı, kimyasal yapısına bağlı gözenekli veya sert kabuk tabakası) oluşumu Amerika Birleşik Devletleri Nükleer Düzenleme Komisyonu tarafından hazırlanan NUREG-0800, Bölüm 4.3 [NUREG, 2007] belgesine göre sınırlandırılmaktadır.

Yakıt kaplamaları için maksimum oksit kalınlığı belirtmenin esas mantığı, ortaya çıkan sıcaklık artışının yakıt zarfının mekanik mukavemetini düşüreceği gerçeğine dayanmaktadır. Oksit tabakası kalınlığı çok büyürse, ısı akısına karşı direnç önemli hale gelir ve kalınlıktaki artış yakıt zarfının sıcaklığını daha da yükseltir. Sıcaklıktaki bu artış yakıt zarfının korozyon hızını artırarak oksit kalınlığını daha da artırır ve daha yüksek bir zarf sıcaklığına neden olur. Bu ısıl durum, yakıt zarf sıcaklığını arttırabilir ve malzeme mukavemetini, yakıt zarfının çekme gerilmesinden dolayı önemli ölçüde düşürebilir.

Şekil 2.1, oksit kalınlığının ısı akısı ile olan ilişkisini göstermektedir. Eğri üstündeki alan, termal geri besleme etkilerine bağlı korozyon hızlanması nedeniyle korozyon deformasyonuna neden olacak koşulları gösterir. Bu eğrinin altındaki alanlar herhangi bir termal geri besleme kaynaklı korozyon hızlanmasına yol açmayan koşulları gösterir.

Çoğu basınçlı su reaktörü uygulaması için Amerika Birleşik Devletleri Nükleer Düzenleme Komisyonu (USNRC) de dahil olmak üzere çoğu düzenleyici tarafından günümüzde kullanılan maksimum oksit kalınlığı kriteri 100 μm 'dir. USNRC, bu maksimum oksit

kalınlığının, enine bir kesitte yakıt zarf çevresi boyunca ortalama değeri olduğunu belirtmiştir. Yakıt zarfında meydana gelen oksidin homojenliğine ilişkin düzenlemeler, hidrit kabarcıklarının oluşumunu kısıtlamak amacıyla USNRC tarafından da uygulanmaktadır.



Şekil 2.1. İzin Verilen Maksimum Homojen Oksit Tabakası Kalınlığı [18].

Zirkonyum esaslı alaşımlarının hidrojen içeriği, normal çalışma sırasında hidrit oluşumu açısından metalin gevrekleşmesine bağlı mekanik deformasyonları önlemek için sınırlandırılmalıdır. Bununla birlikte, hidritlerin süneklik üzerindeki etkisi büyük ölçüde morfolojiye ve zarf yapısına bağlı olduğundan, USNRC tarafından Zircaloy yakıt zarf malzemeleri için izin verilen maksimum hidrojen konsantrasyonu belirtilmemiştir. Bunun yerine, hidrojen yoğunluğunu sınırlandırmak için oksit kalınlığı ve homojenlik üzerindeki kısıtlamalar ortaya konulmuştur. Bu tür kısıtlamalar, basınçlı su reaktörlerinde kullanılan Zircaloy-4 tipi yakıt zarf malzemesinin oksit kalınlığı ile hidrojen konsantrasyonu arasında nispeten doğrusal bir ilişkiye dayanıyor gibi görünmektedir. Bununla birlikte, diğer ülkelerin

düzenleyicileri belirli sınırlar uygulamaktadır. Bu ülkeler ve belirlenen hidrojen konsantrasyon miktarları Çizelge 2.1'de verilmektedir.

Ülke	Hidrojen Konsantrasyon Limiti (ppm)
Fransa	600
Hollanda	500
Almanya	2000

Çizelge 2.1. Ülkeler ve Nükleer Düzenleme Kurumları Tarafından Belirlenen Yakıt Zarfı Hidrojen Konsantrasyon Limitleri [19].

3. ÖNERİLEN OKSİDASYON MODELİ VE BİLGİSAYAR PROGRAMI

İlk olarak zirkonyum esaslı alaşımlar için geliştirilen oksidasyon modeli, ısı akısının metal ile metal oksit tabakası arayüz sıcaklığı üzerindeki etkisini ve oksit tabakası boyunca sıcaklık değişim hızı nedeniyle oksidasyon hızındaki artışı göz önünde bulundurarak bir ısı akısına bağlı oksit kütle kazanımını hesaplar ve bunu oksit kalınlığındaki artışa çevirir. Sonrasında ise ısı akısına ek olarak, 1 MeV ve üzeri enerjiye sahip hızlı nötron akısının ve soğutucu kimyasının etkilerinin incelenmesi bakımından lityum konsantrasyonunun lityum hidroksit kütle kazanımına etkisini değerlendirmek için hızlı nötron akısına bağlı korozyon geliştirme faktörünün eklenmesi gibi diğer faktörler de modele dahil edilmiştir.

3.1. Oksijen Akış Davranışının Modellenmesi

Oksijen akışı, temelinde Fick kanunu tarafından üretilen sayısal bir çözüm yolu ile modellenebilir [20].

Oksijen difüzyonunun içerisinde gerçekleştiği uzun ve dairesel bir silindir için oksijen difüzyon denklemi radyal yönde gerçekleştirilir. Oksijen konsantrasyonu ise r yarıçapı ile t süresinin bir fonksiyonudur.

Fick'in birinci kanunu,

$$J = -D \frac{dO}{dr} \quad (3.1)$$

biçiminde yazılabilir. Bir boyutta silindirik geometri için Fick'in ikinci kanunu,

$$\frac{\partial O}{\partial t} = D \frac{\partial^2 O}{\partial r^2} + \frac{D}{r} \frac{\partial O}{\partial r} \quad (3.2)$$

şeklinde verilebilir. Bu denklemde J, oksijen akış yönüne dik bir birim yüzey alanından

birim zamanda yayılan oksijen miktarını; $\frac{\partial O}{\partial r}$, akış yönünde konsantrasyon değişimini; D, difüzyon katsayısını temsil etmektedir.

3.2. Sonlu Fark Yöntemi

Sonlu fark yöntemi, tek yönlü ve silindirik koordinatlar için Fick yasasından inşa edilmiştir.

Türevlerin, (n + 1) zaman aşaması için konsantrasyonun bilinmeyen değerleri açısından sonlu farkı,

$$\frac{\partial^2 O}{\partial r^2} = \frac{O_{i+1}^{n+1} - 2O_i^{n+1} + O_{i-1}^{n+1}}{(\Delta r)^2} \quad (3.3)$$

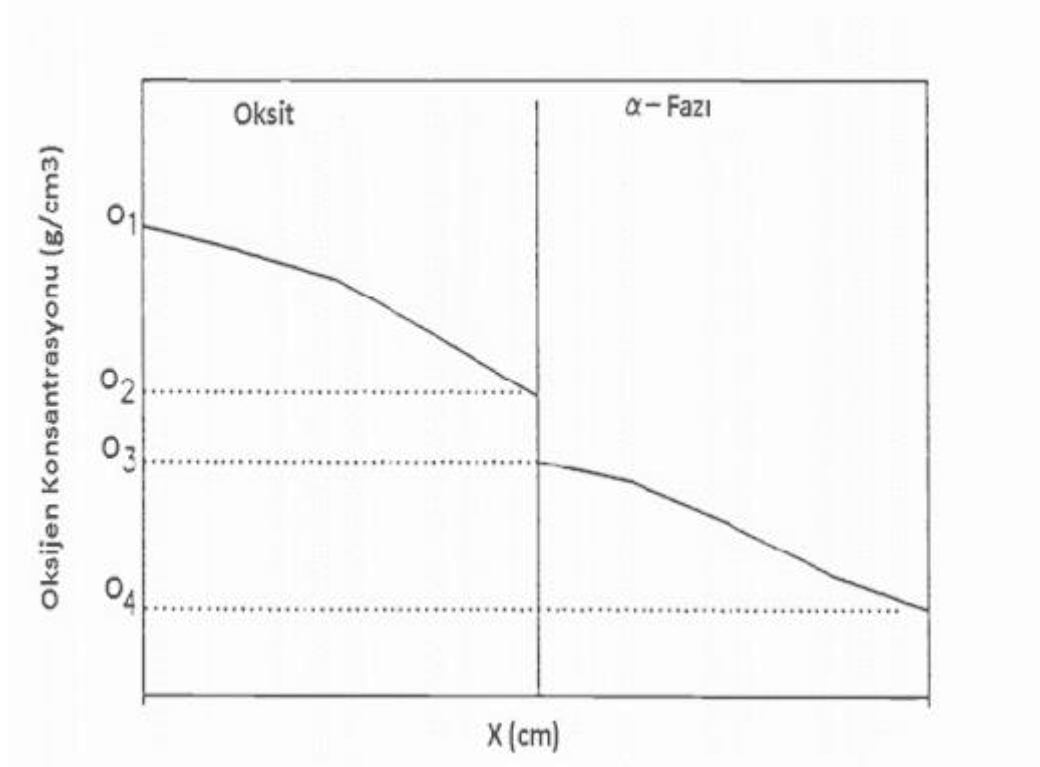
$$\frac{\partial O}{\partial r} = \frac{O_{i+1}^{n+1} - O_{i-1}^{n+1}}{2\Delta r} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial O}{\partial t} = \frac{O_i^{n+1} - O_i^n}{\Delta t} \quad (3.5)$$

denklemler olarak ifade edilebilir: Bu denklemde Δt , süre artışı; Δr , mesafe artışı; i, düğüm sayısını temsil eder.

Sonlu farklar formu,

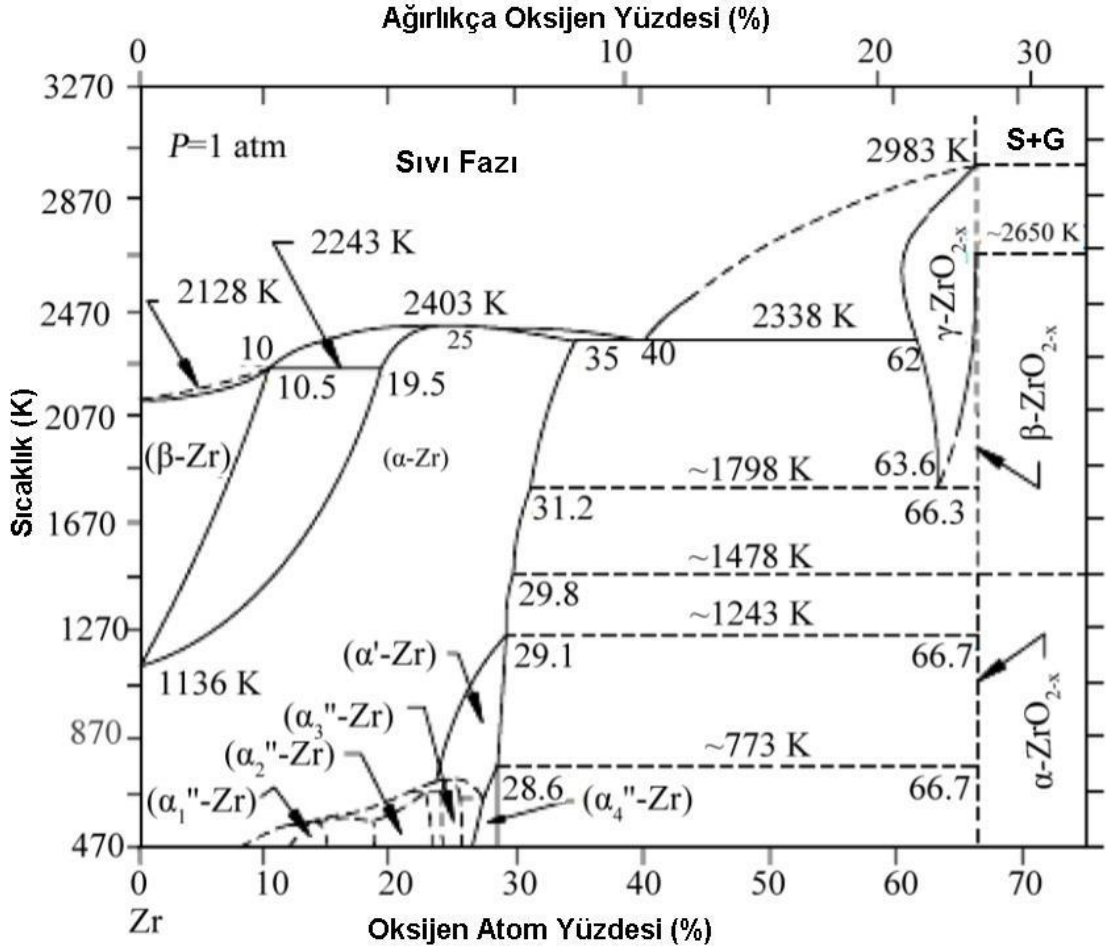
konsantrasyonuna eşit olduğu varsayımı ile sıcaklığa bağlı bir sınır koşulu konsantrasyonunu temsil eden analitik bir ifade ortaya çıkarılmıştır.



Şekil 3.1 ZrO₂'nin Arayüzlerindeki Oksijen Denge Konsantrasyonlarının Şematik Gösterimi.

Şekil 3.1'de O₁, soğutucu-oksit arayüz denge konsantrasyonunu (g/cm³); O₂, oksit alfa fazı-arayüz denge konsantrasyonunu (g/cm³); O₃, alfa-fazı oksit arayüz denge konsantrasyonunu (g/cm³); O₄, başlangıç konsantrasyonunu (g/cm³) simgelemektedir.

Şekil 3.1'deki temsili faz diyagramı için isimlendirilen konsantrasyonlar, Şekil 3.2'de verilen Zirkonyum oksit faz diyagramında ZrO₂ ve alfa+ZrO₂ faz bölgelerinden sıcaklığa karşılık gelen kütlece % oksijen miktarı olarak belirlenmiş ve Çizelge 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.2. Zirkonyum-Oksit Faz Sisteminin Kısmi Diyagramı [21].

Çizelge 3.1. Sıcaklığa Bağlı Oksijen Denge Konsantrasyonu Değerleri (%).

Konsantrasyon % cinsinden O kütlesi	Sıcaklık 1, K	Sıcaklık 2, K
O ₁	25.98	25.98
O ₂	22.48	24.48
O ₃	6.54	6.54

Çizelge 3.1'deki değerler ZrO₂'nin teorik yoğunluğu (5.68 g/cm³) kullanılarak Çizelge 3.2'de g/cm³ cinsinden konsantrasyona dönüştürülmüştür.

Çizelge 3.2. Sıcaklığa Bağlı Oksijen Denge Konsantrasyonu Değerleri (g/cm³).

Konsantrasyon g/cm ³	Sıcaklık 1, K 2172	Sıcaklık 2, K 972
O ₁	1.512032037	1.512032037
O ₂	1.308336	1.424736
O ₃	0.425051556	0.425051556

Çizelge 3.2'de bulunan bu konsantrasyon değerleri, MATLAB CurveFit uygulaması ile sıcaklığın bir fonksiyonu olan sınır konsantrasyon bağıntısına dönüştürülmüştür.

Denge oksijen konsantrasyonu $O_{\text{başlangıç}}$ ve $O_{\text{sınır}}$;

$$O_{\text{başlangıç}} = 1.512 \text{ g/cm}^3 \quad (3.7)$$

$$O_{\text{sınır}}(T) = 1.5190 - 9.7 \times 10^{-5}T \text{ g/cm}^3 \quad (3.8)$$

şeklinde yazılabilir. Burada T, Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı ifade eder.

3.3. Oksit-Metal Arayüzün Hareketinin Davranışının İncelenmesi

Her bir süre aralığı esnasında oksit-metal arayüzünün hareketini belirlemek için Fick'in difüzyon kanunu [22],

$$J = \frac{dm/dt}{A} = -D \frac{dO}{dr} \quad (3.9)$$

şeklinde uygulanabilir. Denklemden dm , bir dt zamanında ve dr mesafesinde difüzyona katılan kütleyi; D , difüzyon katsayısını (cm^2/sn); A , alanı (cm^2); dO , dr mesafesi boyunca konsantrasyon değişimini temsil etmektedir. Bu denklemin 0'dan t süresine integrali,

$$\int_0^m dm = - \int_0^t DA \frac{dO}{dr} dt \quad (3.10)$$

şeklinde alınabilir. Okside yayılan oksijen kütlesi,

$$m = DA t \frac{dO}{dr} \quad \text{veya} \quad m = r A \rho \frac{n \cdot M}{M_w} \quad (3.11)$$

şekilde hesaplanabilir. Bulunan iki ifade bir araya getirilerek integrali alındığında oksit kalınlığının zamana bağlı olarak veren ifade,

$$r A \rho \frac{n \cdot M}{M_w} = t DA \frac{\partial O}{\partial r} \rightarrow \int r dr = \int \frac{t DA}{\rho n \cdot M A} dO \rightarrow \frac{r^2}{2} = \frac{t DA M_w}{\rho n \cdot M A} \Delta O \rightarrow r = \sqrt{\frac{2 D M_w t \Delta O}{\rho n \cdot M}} \quad (3.12)$$

şeklinde bulunur. İfadede r oksit kalınlığını (cm); ρ , oksit yoğunluğunu (g/cm^3); n, oksit molekülü içerisindeki oksijen atomlarının sayısını; M, oksijen atom ağırlığını (g); M_w , oksidin moleküler ağırlığını simgelemektedir.

Bilgisayar modelinde yer alan oksijen difüzyonu hesaplamalarında oksit metal arayüzünün hareketini kontrol etmek için Denklem 3.12 kullanılmıştır.

3.4. Oksijen Difüzyon Katsayısının Hesaplanması

Difüzyon katsayısı sıcaklık, konsantrasyon değişimi ve kristal yapı gibi birçok değişkenin bir fonksiyonudur. Tipik olarak, difüzyon katsayısı deneysel olarak ölçülür ve Arrhenius denklemi [23] formunda elde edilebilir:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (3.13)$$

Bu denklemde D_0 , sabit ($cm^2/saniye$) olup; E, aktivasyon enerjisini (kalori/mol); R, gaz sabitini (kalori/K-mol); T, mutlak sıcaklığı (K) temsil etmektedir.

Zirkonyum metalinde oksijenin uzun süreli difüzyonunu tahmin edebilmek amacıyla, denklem (3.12) düzenlenerek difüzyon katsayısı,

$$D (\text{cm}^2 / \text{sn}) = \frac{r^2 \rho n M}{2 t M_w \Delta O} \quad (3.14)$$

denklemini ile hesaplanabilir. Oksit kütle kazanımı (mg/dm^2), oksit tabakası kalınlığına (μm) dönüştürmek için,

$$r = P \frac{A_{\text{Zr}}}{A_{\text{O}_2}} \times \frac{W}{\rho} \quad (3.15)$$

ifadesi kullanılmıştır. Denklemde r , oksit tabakası kalınlığını (μm); A_{Zr} , zirkonyumun atom ağırlığını (92g); A_{O_2} , oksijenin atom ağırlığını (16 g); W , oksit kütlesini (mg/dm^2); ρ , Zircaloy-4 yoğunluğunu ($6.56 \text{ g}/\text{cm}^3$) temsil etmektedir. Değişkenleri değerleri ile birlikte denkleme ilave ettiğimizde, oksit tabakası kalınlığı,

$$r (\mu\text{m}) = 6.84736 \times 10^{-2} \times W (\text{mg} / \text{dm}^2) \quad (3.16)$$

şeklinde ifade edilebilir. Geçiş öncesi ve geçiş sonrası için Hillner modeli [24] kullanılarak oksit kalınlığı,

$$r_{\text{geçişöncesi}} = A \left[6.36 \times 10^{11} \exp(-13636 / T) \times t \right]^{1/3} (\mu\text{m}) \quad (3.17)$$

$$r_{\text{geçişsonrası}} = A \left[1.12 \times 10^8 \exp(-12529 / T) \times t \right]^{1/3} \mu\text{m} \quad (3.18)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Bu denklemde A, 6.84736×10^{-2} 'e eşittir. Denklem 3.16'da r değerlerinin yerlerine geçiş öncesi ve geçiş sonrası r değerleri konarak geçiş öncesi ve sonrası için difüzyon katsayıları,

$$D_{\text{GeçişÖncesi}} = \frac{2.41 \times 10^5}{\Delta O t^{1/3}} [\exp(-13656 / T) \times t]^{2/3} \text{ cm}^2 / \text{sn} \quad (3.19)$$

$$D_{\text{GeçişSonrası}} = \frac{4.1 \times 10^{12}}{\Delta O t^{-1}} \exp(-12529 / T) \text{ cm}^2 / \text{sn} \quad (3.20)$$

şeklinde verilmiştir.

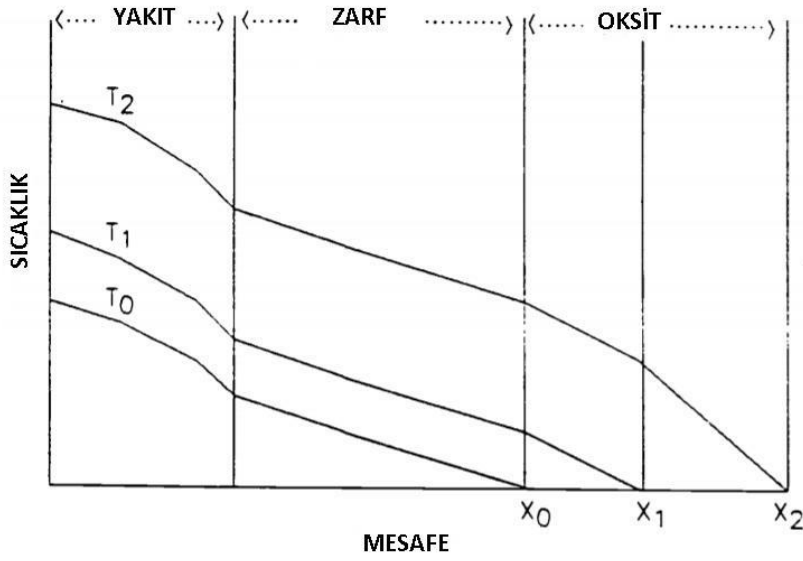
3.5. Oksidasyon Kinetiğine Etki Eden Faktörler

Önceki bölümde açıklanan oksidasyon mekanizması ve modeline ek olarak, basınçlı su reaktörünün işletme koşulları altında zirkonyum esaslı alaşımın oksidasyon hızını, ısı akısı, sıcaklık dağılımı, belirli bir enerjinin üzerindeki nötron akısı ile birincil soğutma suyundaki lityum konsantrasyonu gibi birkaç faktör artırabilir veya azaltabilir. Tezin bu bölümünde oksidasyona etki eden faktörler anlatılacaktır.

3.5.1. Isı Akısının Korozyon Hızına Etkisi

Basınçlı su reaktörlerinde yer alan yakıt çubuklarının yüzeyinde oluşan oksitten geçen ısı akı dağılımı oksit-metal arayüzünün sıcaklığını doğrudan etkiler. Isı akısındaki artış metal-oksit arayüzünün sıcaklığını artırır.

Zirkonyum esaslı alaşıma kıyasla düşük ısı iletkenliğine sahip olan oksit tabakasının işletimle birlikte devamlı olarak artış gösteren kalınlığı, metalden soğutucu sıvısına ısı aktarımına karşı artan bir dirence sebep olur. Bu sebeple metal-oksit arayüz sıcaklığı ve buna bağlı olarak korozyon oranı yükselir. Şekil (3.3) ile temsil edilen silindirik bir yakıt geometrisi için, yakıt elemanından soğutucu sıvısı yönünde ısı akısı matematiksel olarak denklem 3.20'de ifade edilebilir:



Şekil 3.3 Yakıt Elemanındaki Sıcaklık Profiline Şematik Gösterimi.

$$\text{Toplam Isı Transferi (W)} = k_{\text{zarf}} A_{\text{ort}}^z \frac{(T_z - T_a)}{t_{\text{zarf}}} = k_{\text{oksit}} A_{\text{ort}}^o \frac{(T_a - T_w)}{t_{\text{oksit}}} \quad (3.21)$$

(Yakıt Zarfı) (Oksit Tabakası)

Bu denklemde k_{oksit} , oksidin termal iletkenliğini (W/mK); k_{zarf} , yakıt zarfının termal iletkenliğini (W/mK); A_{ort}^o , logaritmik ortalama oksit alanını (m²); A_{ort}^z , logaritmik ortalama yakıt zarfı alanını (m²); T_z , yakıt-yakıt zarfı arayüz sıcaklığını (K); T_a , yakıt zarfı-oksit tabakası arayüz sıcaklığını (K); T_w , yakıt zarf sıcaklığını (K), t_{zarf} , yakıt zarf kalınlığını (m); t_{oksit} , oksit tabakası kalınlığını (m) simgelemektedir.

Zircaloy-4'ün sıcaklığın bir fonksiyonu olarak termal iletkenliği [25],

$$k_{\text{zarf}} = 7.848 + 2.2 \times 10^{-2} T - 1.676 \times 10^{-5} T^2 + 8.712 \times 10^{-9} T^3 \quad (\text{W/mK}) \quad (3.22)$$

sıcaklığın bir fonksiyonu olarak oksidin termal iletkenliği [25],

$$k_{\text{oksid}} = 1.9599 - 2.41 \times 10^{-4}T + 6.43 \times 10^{-7}T^2 - 1.94 \times 10^{-10}T^3 \text{ (W/mK)} \quad (3.23)$$

denklemleri ile verilmiştir. Yakıt zarfının ve oksidin kalınlıkları zamanın fonksiyonu olup, her bir oksit kalınlığı artışıında yakıt zarf kalınlığının yeni değeri,

$$S' = S - \frac{X}{P} \quad (3.24)$$

$$A_{\text{ort}}^z = \frac{2\pi XL}{\ln \left[\frac{R + S' + X}{R + S'} \right]} \quad A_{\text{ort}}^o = \frac{2\pi SL}{\ln \left[\frac{R + S'}{R} \right]} \quad (3.25)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Bu denklem takımında S' , başlangıçtaki yakıt zarfı kalınlığını; S , zamana bağlı yakıt zarfı kalınlığını; X , oksit tabakası kalınlığını; P ise Pilling-Bedworth oranını temsil etmektedir.

3.5.2 Hızlı Nötron Akısının Oksidasyon Hızına Etkisi

Hızlı nötron akısının oksidasyona etkisini hesap edebilmek amacıyla geçiş sonrası korozyon hızını hızlı nötron akısı ile ilişkilendirmek için kullanılabilir ampirik bir ilişki geliştirilmiştir [26]. Hızlı nötron akısı ile oksidasyon hızı arasındaki bağıntı,

$$\frac{X'}{X} = 1 + 3.2214[7.46 \times 10^{-15} \Phi]^{0.24} \quad (3.26)$$

şeklinde ifade edilebilir: Bu denklemde $\frac{x'}{x}$, geçiş sonrası dönem için hızlı nötronlar tarafından oksit kalınlığı artış faktörüdür.

3.5.3. Soğutucu Kimyasının Oksidasyon Hızına Etkisi

Lityum hidroksit ve diğer kimyasalların neden olduğu reaktör soğutucu kimyasındaki küçük değişiklikler oksidasyon kinetiğinde bazı değişikliklere neden olabilir. Bu kimyasallar çeşitli nedenlerle kullanılır. Örneğin, lityum hidroksit, soğutucudaki çözünmeyen korozyon ürünlerinin miktarını düzenlemek için birincil su sistemini alkaline bir durumda tutmak için kullanılır. Lityum hidroksitin kullanımı ayrıca soğutucu sıvısında çözünen radyoaktif maddelerin miktarının azalmasına, birincil soğutucu döngüsündeki radyasyon seviyesinde önemli bir azalmaya neden olarak lityum hidroksitin varlığına bağlı zirkonyum esaslı alaşımın korozyon direncinde de bir azalmaya sebep olur.

Soğutucu sıvısındaki Lityum iyon konsantrasyonunun Zirkonyum esaslı alaşımın oksidasyon hızına etkisi,

$$\frac{Kr}{Kr^0} = 1 + 13.125[Li^*]_{H_2O} \quad (3.27)$$

olarak ifade edilmiştir [27]. Denklemde $\frac{Kr}{Kr^0}$, Lityum konsantrasyonunun oksidasyon hızı üzerindeki etki faktörünü; $[Li^*]_{H_2O}$ - Soğutucu sıvısı içerisindeki Li^* konsantrasyonunu (mol/litre) temsil etmektedir.

3.6. Hafif Sulu Reaktörlerde Yakıt Zarfında Hidrojen Üreten Reaksiyonlar

Tezin giriş bölümünde de belirtildiği gibi, LWR korunda üretilen hidrojen üç ana kaynaktan gelir. Birinci kaynak,



denkleminde gösterilen yakıt zarfının su ile temas eden yüzü olmak üzere ikinci kaynak,



İfadesi ile radyasyon tarafından üretilebilir. Üçüncü kaynak ise oksidasyonu sınırlamak için birincil çevrim suyuna işletme sırasında hidrojen ilavesidir.

3.7. Kullanılan Hidrojen Konsantrasyon Benzetimi

Yakıt zarf malzemesi tarafından, metal-su korozyon reaksiyonu ile serbest kalan hidrojenin alaşım tarafından soğurulma miktarına, hidrojen birikim kesri (HBK) denir. PWR işletim koşulları için, sabit bir hidrojen birikim kesrinin uygulanabilir olduğu kabul görmüştür [28].

Basıncılı su reaktörlerinin yakıt çubuklarında kullanılan Zircaloy-4 tipi zirkonyum esaslı alaşımlar için, hidrojen birikim kütlesi,

$$m_{\text{H}} = \rho_{\text{ZrO}_2} \times V_{\text{ZrO}_2} \times F \times \frac{1 \text{ mol ZrO}_2}{123 \text{ gr ZrO}_2} \frac{4 \text{ mol H}}{1 \text{ mol ZrO}_2} \frac{1 \text{ gr H}}{1 \text{ mol H}} \quad (3.30)$$

denklemleri ile verilmiştir. Bu denklem üzerinden hidrojen konsantrasyonu,

$$H_{\text{kons}} (\text{ppm}) = \frac{m_{\text{H}}}{m_{\text{H}}} \times 10^6 = \frac{F \times 5.8 \times D_{\text{zarfdış}} \times t}{6.5 \times (D_{\text{zarfdış}}^2 - D_{\text{zarfiç}}^2)} \times \frac{16}{123} \times 10^6 \quad (3.31)$$

denklemleri ile elde edilmiş olur. Denklemlerde H_{kons} , hidrojen konsantrasyonunu (ppm); F , hidrojen birikim kesri (Zircaloy-4 için 0.15) [29]; $D_{zarfdış}$, zarf dış çapını (m); $D_{zarfiç}$, zarf iç çapını (m); t , oksit tabakası kalınlığını (m) simgelemektedir

3.8. Akma Gerilmesi-Hidrojen Konsantrasyonu Benzetimi

Normal, haddeleme ve enine doğrultulardaki levha malzemesi için malzemedeki hidrojen konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak ve gerininin %0,2 olduğu durumda akma gerilimi deneysel olarak incelenmiştir [30]. Deneysel veriler ışığında HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunda kullanılmak üzere 0-600 ppm hidrojen konsantrasyonu aralığında akma gerilimi (AG) - hidrojen konsantrasyonu (HK) benzetimi, Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Hidrojen Konsantrasyonu – Akma Gerilim Benzetimi Çizelgesi.

Levha Doğrultusu	Hidrojen Konsantrasyonu- Akma Gerilim Benzetimi
Enine	$AG = 520 + (560 - 520) / (1 + (HK / 52.39457) ^ 23.4847);$
Haddeleme	$AG = 562.754 - 0.4016484 * HK + 0.001043805 * HK ^ 2 - 9.379713e-7 * HK ^ 3 + 2.952348e-10 * HK ^ 4;$
Normal	$AG = 990 + 1.085693 * HK - 0.007470016 * HK ^ 2 + 0.00001350288 * HK ^ 3 - 7.158556e-9 * HK ^ 4;$

3.9. Akma Gerilmesi – Plastik Şekil Değişirme Benzetimi

Hidrojenin Zircaloy-4 levha tipi alaşım üzerindeki akma davranışını daha iyi belirleyebilmek için gerçek gerilme-gerçek plastik gerinim eğrisi, ilk durum ile 400-420 ila 600-620 ppm hidrojen konsantrasyonuna sahip Zircaloy-4 alaşımı için 25, 300, 400 °C sıcaklıklarda, enine, haddeleme ve normal doğrultularda deneysel olarak incelenmiştir [30]. Deneysel veriler ışığında elde edilen benzetimler, HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunda aktarılarak akma gerilmesi (AG) – plastik şekil değişirme (PŞD) davranışı elde edilmiştir.

3.10. Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Yakın Akma Davranışı Benzetimi

Yakın akma davranışı (YAD) ve bu davranışın hidrojen konsantrasyonu ile levhanın yönüne olan bağımlı, 400-420 ila 600-620 ppm hidrojen konsantrasyonuna sahip Zircaloy-4 alaşımı için 25 ve 400 °C sıcaklıklarda, enine, haddeleme ve normal doğrultularda iki ayrı gerinim referans noktası belirlenerek deneysel olarak gözlemlenmiştir [30].

Çizelge 3.4. Hidrojen Konsantrasyonu- Yakın Akma Davranışı Benzetimi.

Levha Sıcaklığı	Levha Doğrultusu	Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Yakın Akma Davranışı Benzetimi
25 °C	Haddeleme	$YAD = 1.1962e-10 * HK^4 - 2.2294e-07 * HK^3 + 0.00010311 * HK^2 - 0.0018045 * HK + 5.3947$
	Enine	$YAD = -1.1739e-09 * HK^4 + 1.6143e-06 * HK^3 - 0.00074807 * HK^2 + 0.13468 * HK + 0.96844$
	Normal	$YAD = -1.6675e-07 * HK^3 + 0.00014933 * HK^2 - 0.025555 * HK + 7.2048$
400 °C	Haddeleme	$YAD = 0.0063484 * HK + 4.8357$
	Enine	$YAD = 0.0051261 * HK + 4.8775$
	Normal	$YAD = 0.0052683 * HK + 5.4605$

Referans alınan gerinim noktaları arasında kalan eğim, malzemenin elastikten plastik davranışa geçişi ile ilgili fikir vermektedir. Elde edilen veriler ışığında Çizelge 3.4'te belirlenen benzetim, HUNEM-1.0 Yakıt Performans Koduna dahil edilerek yakın akma davranışı incelenmiştir.

3.11. Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Gerinim Sertleşmesi Benzetimi

Malzemenin gerinim sertleşmesi (GS), sıkıştırma testi esnasında $0.01 \leq \epsilon_p \leq 0.05$ gerçek plastik gerilme dahilindeki gerinim sertleşmesi üsteli (GSÜ) belirlenerek 25 °C, 300 °C, 400

°C sıcaklık altında ve enine, normal ve haddeleme yönü doğrultularında yapılan bir deneyde [30] elde edilen veriler ışığında, alaşımdaki hidrojen konsantrasyonunun (HK) fonksiyonu olarak verilmiştir.

Çizelge 3.5. Hidrojenin Konsantrasyonu- Gerinim Sertleşmesi Benzetim Çizelgesi.

Levha Sıcaklığı	Levha Yönü	Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Gerinim Sertleşmesi Benzetimi
25 °C	Hadde.	$GSÜ = 1.9545e-12*HK^4 - 3.586e-09 *HK^3 + 1.8245e-06*HK^2 - 0.00022984 *HK + 0.068445$
	Enine	$GSÜ = 7.0968e-13*HK^4 - 6.935e-10*HK^3 + 1.3083e-07*HK^2 + 1.9042e-05*HK + 0.051301$
	Normal	$GSÜ = -1.6432e-10*HK^3 + 1.6875e-07 *HK^2 - 2.6826e-05*HK + 0.05789$
300 °C	Hadde.	$GSÜ = -1.3372e-09*HK^3 + 1.2003e-06 *HK^2 - 0.00022616*HK + 0.051373$
	Enine	$GSÜ = 2.2891e-10*HK^3 - 1.3854e-07*HK^2 - 3.9461e-06*HK + 0.042397$
	Normal	$GSÜ = 4.4811e-10*HK^3 - 4.2769e-07 *HK^2 + 0.00011248*HK + 0.036545$
400 °C	Hadde.	$GSÜ = -6.8776e-10*HK^3 + 4.9252e-07*HK^2 - 5.1833e-05*HK + 0.044936$
	Enine	$GSÜ = -1.6132e-11 * HK^3 + 4.8351e-08 *HK^2 - 2.2299e-05*HK + 0.025707$
	Normal	$GSÜ = 1.9289e-10*HK^3 - 1.3203e-07*HK^2 + 3.642e-05*HK + 0.029011$

Çizelge 3.5, HUNEM-1.0 Yakıt Performans Koduna doğrudan hidrojen ve yakıt zarfı sıcaklığı bir fonksiyonu olarak dahil edilmiştir.

3.12. Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Sürünme Gerinimi Benzetimi

Sürünme davranışının, mikro yapılara [39,40], malzeme örgü yapısına [41,42], alaşım elementlerine ve hidrojen konsantrasyonuna [43] bağlı olduğu bilinmektedir. Bu etkiler sıcaklık ve gerilme testlerine bağlı olarak değişmektedir.

HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu, soğuk şekillendirilmiş ve gerilim giderilmiş halka biçimindeki Zircaloy-4 zarf malzemesinin 400°C sıcaklık ve 10 MPa basınç altında 30, 60, 120, 210 ve 300 gün süreyle oksidasyonunun yapılarak 273.6 N sabit bir yük altındaki sürünme testi verilerinin bir benzetimini kullanmaktadır. Bu test düzeneği bölmeli otoklav olarak da bilinmektedir. Test esnasında sürünme gerinimi, 0.001 mm'lik çözünürlüğe sahip bir doğrusal değişken türevsel dönüştürücü kullanılarak gözlenmiştir. Test sonrası hidrojen konsantrasyonunun ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak sürünme gerinimi milimetre cinsinden elde edilmiştir [44].

Çizelge 3.6. Hidrojen Konsantrasyonu – Sürünme Gerinim Benzetimi Çizelgesi.

Levha Sıcaklığı	Hidrojen Konsantrasyonu- Sürünme Gerim Benzetimi		
400°C	$SG = k_1 \cdot HK^{10} + k_2 \cdot HK^9 + k_3 \cdot HK^8 + k_4 \cdot HK^7 + k_5 \cdot HK^6 + k_6 \cdot HK^5 + k_7 \cdot HK^4 + k_8 \cdot HK^3 + k_9 \cdot HK^2 + k_{10} \cdot HK + k_{11}$		
	Denklemin Katsayıları:		
	$k_1 = 1.3468e-26$	$k_2 = -5.5579e-23$	$k_3 = 9.9635e-20$
	$k_4 = -1.0178e-16$	$k_5 = 6.5353e-14$	$k_6 = -2.7447e-11$
	$k_7 = 7.6144e-09$	$k_8 = -1.3791e-06$	$k_9 = 0.00015814$
	$k_{10} = -0.010966$	$k_{11} = 0.5375$	

3.13. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu

HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunun algoritma akış şeması Şekil 3.4'te verilmiştir:



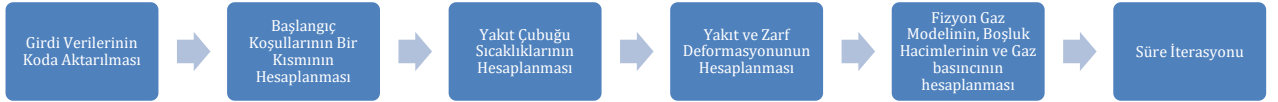
Şekil 3.4. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunun Algoritma Akış Şeması.

- HUNEM-1.0 Yakıt Performans Koduna tanımlanacak verilerin hazırlanması:

Koda örgü sayısı, örgü boyutu, zarf kalınlığı, zaman aralıkları, başlangıçtaki oksijen konsantrasyonu, Pilling Bedworth oranı gibi veriler ile girdi ve çıktı özelliklerini tanımlayan ilgili değerler girilerek benzetimi yapılacak yakıt zarfı tanımlanır ve kodun benzetim yapıp sonuç verebilmesi için gerekli bilgiler koda aktarılır.

3.14. FRAPCON-3.4 Yakıt Performans Kodu

FRAPCON-3.4 yakıt performans kodu kullanılarak Zircaloy-4 tipi yakıt zarfının bir nükleer santraldeki normal işletim süresi içerisinde benzetimi yapılmıştır. FRAPCON-3.4 yakıt performans kodunun basitleştirilmiş algoritma akış şeması Şekil 3.5'te verilmiştir:



Şekil 3.5. FRAPCON-3.4 Yakıt performans kodunun Basitleştirilmiş Algoritma Akış Şeması.

- FRAPCON-3.4 yakıt performans koduna tanımlanacak verilerin hazırlanması:

FRAPCON-3.4 yakıt performans koduna yakıt çubuğunun malzeme bilgisi, yakıt çubuğunun boyutları, pelet boyutları, yakıt çubuğu içerisindeki yayın boyutları, zarfın ve peletin üretimi ile ilgili veriler, yakıtın kompozisyonu, boşluk gazı basıncı, reaktör özellikleri, zamana bağlı güç bilgisi, aksenal güç profili, yakıtın bulunduğu kanaldaki soğutucunun giriş sıcaklığı, düğüm sayısı ve işletim süresi gibi veriler girdi ve çıktı özelliklerini tanımlayan ilgili değerler girilerek benzeşimi yapılacak yakıt tanımlanmıştır.

Bu çalışmada, yakıt performans kodlarında, Westinghouse 17x17 PWR Yakıt Çubuğu [45], 1000 günü aşkın bir işletim süresini kapsayacak biçimde modellenmiştir. Yakıt çubuğunun yüzeyindeki ısı akısı 70 ila 110 W/cm² olarak alınmış, aksenal ve radyal yönlerde ısı akısının konuma bağlı değiştiği dikkate alınmıştır. Ayrıca yakıt zarfının su ile temas eden yüzeyindeki ısı transferi hesapları da FRAPCON-3.4'te gerçeğe en yakın bir biçimde modellenmiştir.

4. SONUÇLAR

Tezin bu bölümünde öncelikle HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu tarafından hesaplanan yakıt zarfı dış yüzey sıcaklığı, yakıt zarfı arayüz sıcaklığı, oksit kalınlığı ve hidrojenin

konsantrasyonu verileri zamana bağlı olarak görselleştirilmiştir. Grselleştirilen parametreler, FRAPCON-3.4 yakıt performans kodu ıktıları ile kıyaslanmıştır. Farklı işletim koşulları için hesaplanan oksit kalınlığı ile hidrojen konsantrasyonu ile yakıt zarf malzemesi olan Zircaloy-4 alaşımı üzerindeki etkileri, hidrojen konsantrasyonu ve ampirik korelasyon verileri yardımıyla hidrojen konsantrasyonunun plastik anizotropi, akma davranışı, gerinim sertleşmesi ve gerinim hızı sertleşmesi üzerindeki etkisi hakkında bir kanıya varılmak istenmiştir.

Hidrojenin Zircaloy-4 alaşımının mekanik davranışına etkisinin yanı sıra, HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu ile ısı akısının, oksit-metal arayüz sıcaklığının, lityum oksit konsantrasyonunun, hızlı nötron akısının ve zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplanan oksijenin difüzyon katsayısı, oksit kalınlığı, oksit kütle kazanımı ve metalde toplanan hidrojen miktarı da değerlendirilmiştir.

4.1. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu ve FRAPCON-3.4 Kodunun Analiz Sonuçları

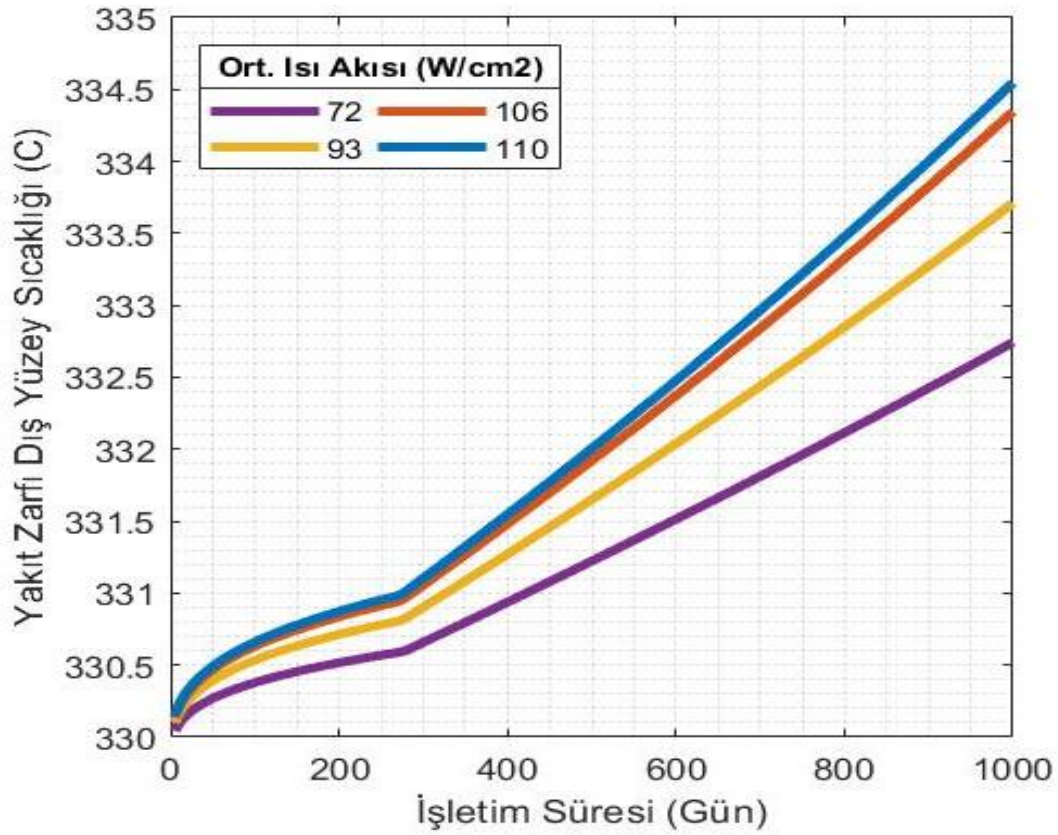
HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunun sonuçları, yapılan kabullere ve HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunun kısıtlarına bağlı olarak, sonuçların değişim davranışı ve elde edilen değerlerin doğru aralıkta olduğunun gösterilmesi amacıyla FRAPCON-3.4 kodunun sonuçları ile karşılaştırılmıştır

4.1.1. Yakıt Zarfı-Oksit Arayüz Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi

Zarfın yüzeyinde meydana gelen oksijen ve hidrojen birikimi, zarf ve oksit arayüz sıcaklığı ısı akısının artışına paralel olarak artmaktadır. Isı akısının yanı sıra oksit kütle kazanımının da artışı ısı direnci daha da artırdığından ısı transferi zorlaşmıştır. Bunun sonucunda ısı akısının etkisi oksidin geçiş dönemi sonrası üstel bir biçimde yükselmiştir. Geçiş ncesi ve geçiş dönemlerinde lineer bir artış gözlemlenmiştir. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu tarafından hesaplanan Zircaloy-4 alaşımının zarf-oksit arayüz sıcaklığının zamana bağlı değişimi Şekil 4.0'da görülebilmektedir. Ortalama ısı akısında meydana gelen artış, zarf-oksit arayüz sıcaklığının artmasına neden olmuştur. Ayrıca oksitlenme sürecinin geçiş öncesi döneminde alaşımın su ile temas eden yüzeyindeki oksitlenme sonucunda oksit tabakasının kalınlığında meydana gelen artış nispeten ısı transferini zorlaştırmıştır. Bunun temel sebebi Zircaloy-4 alaşımına nazaran oksit tabakasının teorik olarak daha düşük bir ısı iletim katsayısına sahip olmasıdır. Oksit kalınlığının, oksitlenmenin geçiş dönemi ve geçiş sonrası döneminde daha seri artışından ötürü ısı iletiminin daha da

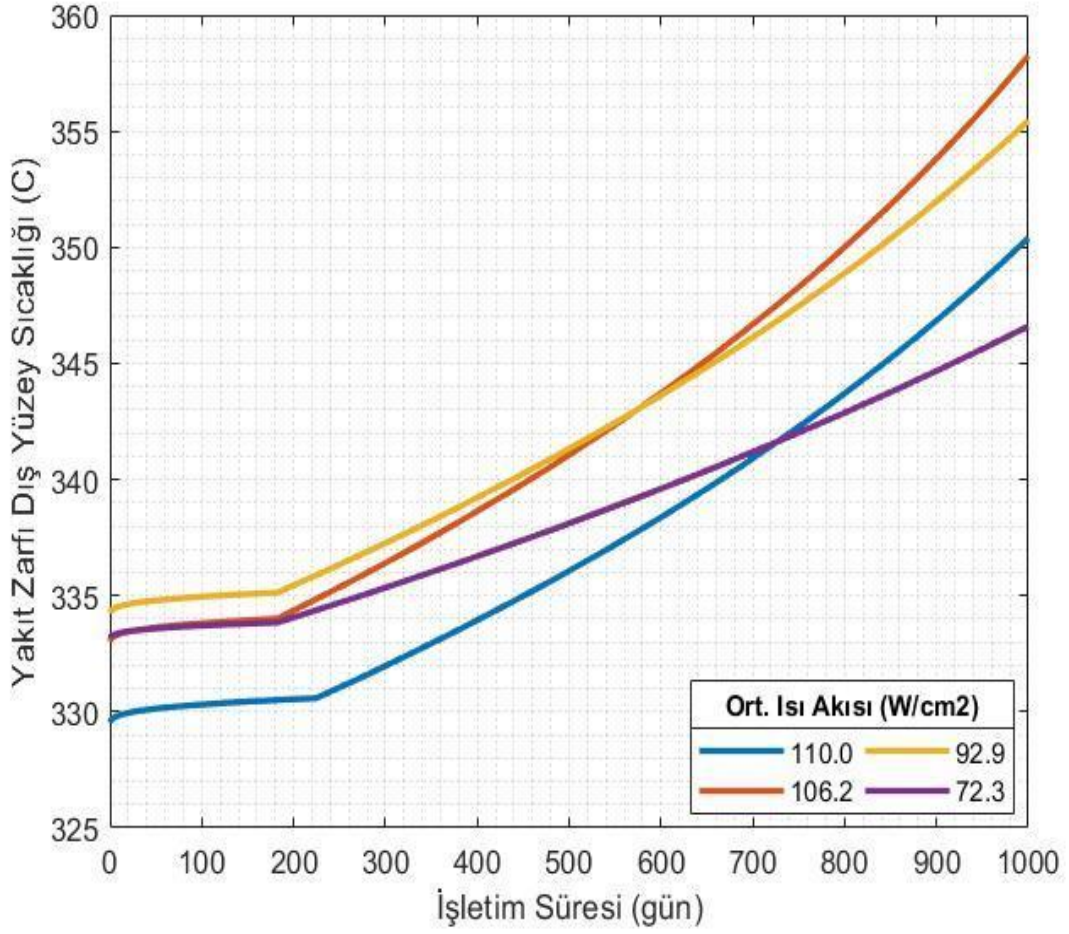
zorlaştığı ve bu sebeple de zarf-oksit arayüz sıcaklığının geçiş öncesi duruma göre arttığı da görülebilmektedir.

Isı transferinin zarf-oksit arayüzünde zorlaşması, yakıt zarfı dış ve iç yüzeyinin sıcaklıklarında da benzer artışa sebebiyet vermiştir. Bu durum, hem HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu hem de FRAPCON-3.4 kodlarından elde edilen veriler ışığında Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te görselleştirilmiştir.



Şekil 4.0. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunda Elde Edilen Yakıt Zarfı-Oksit Arayüz Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de, yaklaşık olarak ilk 200 günlük işletim periyodundaki zarf-oksit arayüz sıcaklığının, eşit ısı akılarına bakıldığında birkaç derece yükseldiği görülmektedir.

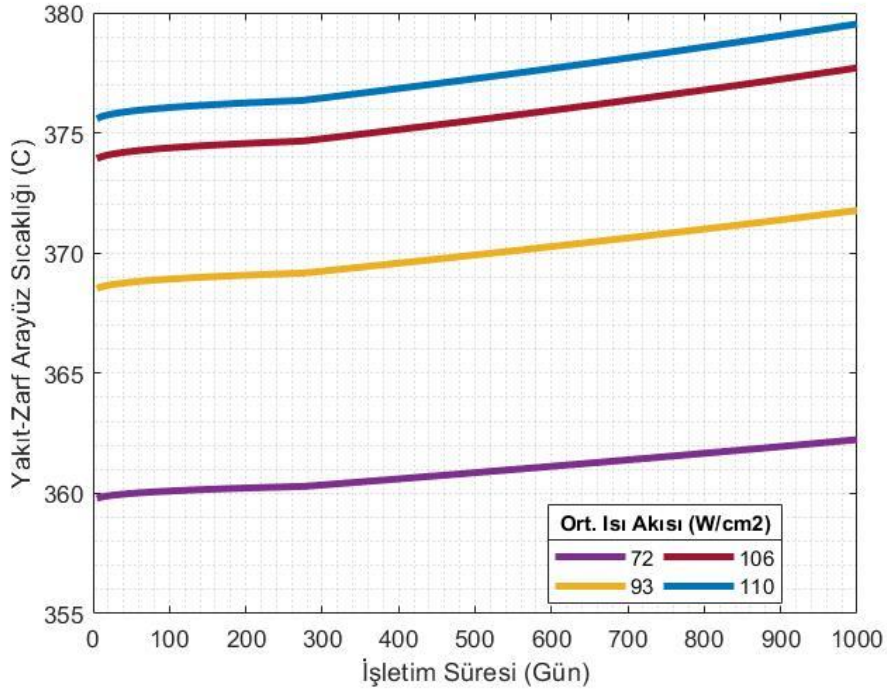


Şekil 4.1. FRAPCON-3.4 Yakıt performans kodunda Elde Edilen Yakıt Zarfı Oksit Arayüz Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi.

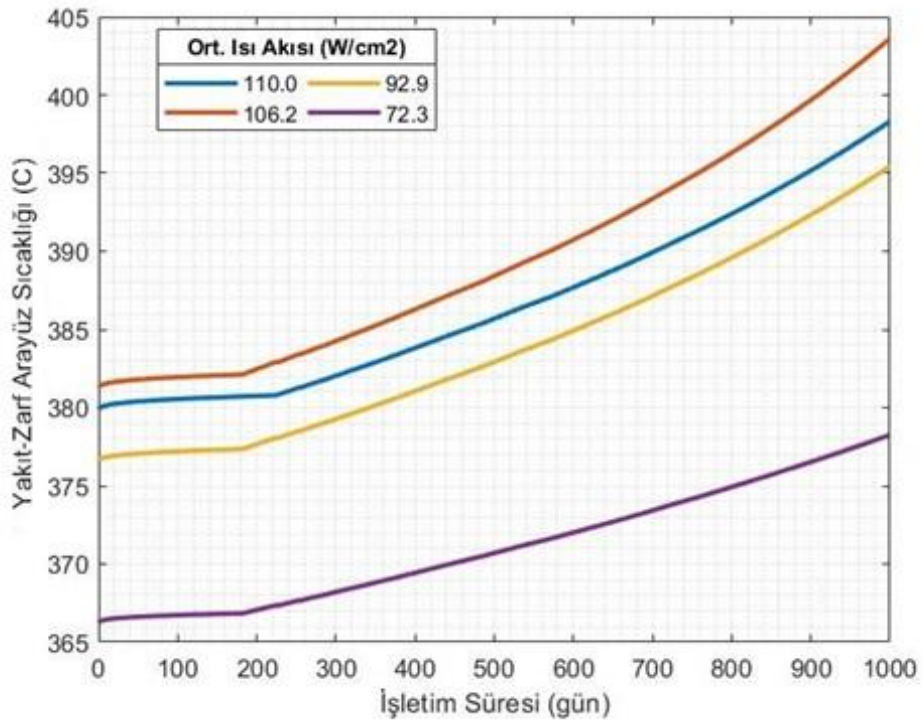
Yaklaşık 200 gün sonrasında, yakıt zarfı dış ve iç yüzeyinin sıcaklıklarında önce doğrusal bir yükseliş meydana gelmiş, sonrasında ise sıcaklıklar üstel bir biçimde artış göstermiştir. Bu yükselişin, hem HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu hem de FRAPCON-3.4 kodu tarafından elde edilerek Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te görselleştirilen zamana bağlı oksit kalınlığı grafiğine paralellik gösterdiği de anlaşılmıştır.

Fick'in difüzyon denklemi kullanılarak sonlu eleman analizi yöntemi ile HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu tarafından elde edilen veriler ile FRAPCON-3.4 kodu verilerin birbirine nazaran farklı olması, bir boyutta ve silindirik geometride çözümlenen difüzyon probleminin hem başlangıç hem de sınır koşullarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

4.1.2. Yakıt-Zarf Arayüz Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi



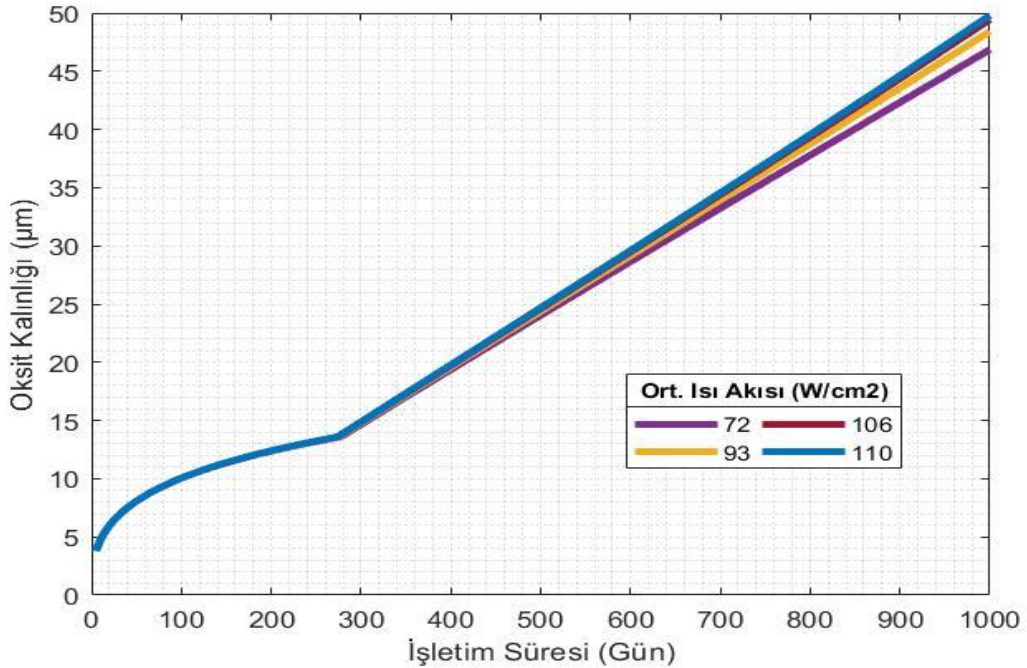
Şekil 4.2. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunda Elde Edilen Yakıt-Zarf Arayüz Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi.



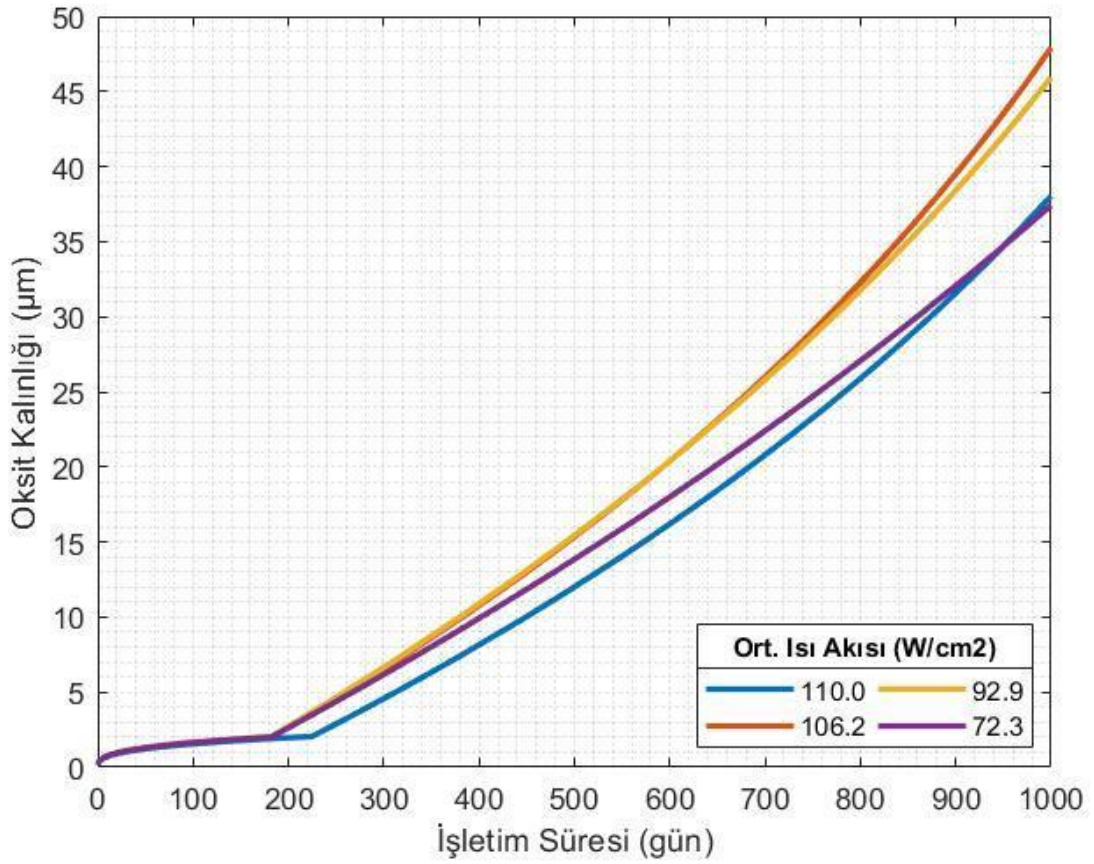
Şekil 4.3. FRAPCON-3.4 Yakıt performans kodunda Elde Edilen Yakıt-Zarf Arayüz Sıcaklığının Zamana Bağlı Değişimi.

4.1.3. Oksit Kalınlığının Zamana Bağlı Değişimi

Oksijenin kristal yapıdaki kütle kazanımı, metalin elastik davranışının plastik davranışa doğru ilerlemesine yol açan faktörlerden biridir. Bu durum aynı zamanda metalin kristal yapısının zamanla bozulmasına yani dislokasyonlara sebebiyet verir. Her iki kod da oksijenin metalin kristal yapısı içerisindeki yayılımının sıcaklıkla sürekli bir artış içerisinde olduğunu öngörmektedir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te oksit kalınlığının zamanla değişimleri HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu ve FRAPCON-3.4 kodu tarafından elde edilmiştir. Yaklaşık olarak ilk 200 günlük geçiş öncesi dönemde her iki kodda da oksit kalınlıkları yavaş bir artış göstermiştir. Yaklaşık 200 gün sonrasında oksitlenmenin geçiş dönemi tamamlanmış ve oksit tabakası metalin kristal yapısı içerisinde kütle kazanmaya başlamıştır. Şekil 4.4'te HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu tarafından 200-700. günler arası elde edilen oksit kütle kazanımının, Şekil 4.5'te FRAPCON-3.4 kodu tarafından elde edilen verilere nazaran daha düşük bir eğime sahip olmasının altında yatan temel neden, FRAPCON-3.4 kodu içerisindeki oksit-metal arayüz sıcaklığının oksit kalınlığı üzerinde daha baskın etkiye sahip olması ve oksit kalınlığı ile oksit-metal arayüz sıcaklığı arasındaki geri bildirim mekanizmasının daha dinamik olarak modellenmiş olmasıdır. Ayrıca FRAPCON-3.4'te oksitlenme hızına etki eden ağırlık faktörleri de her iki kod sonuçları arasında fark yaratmıştır.



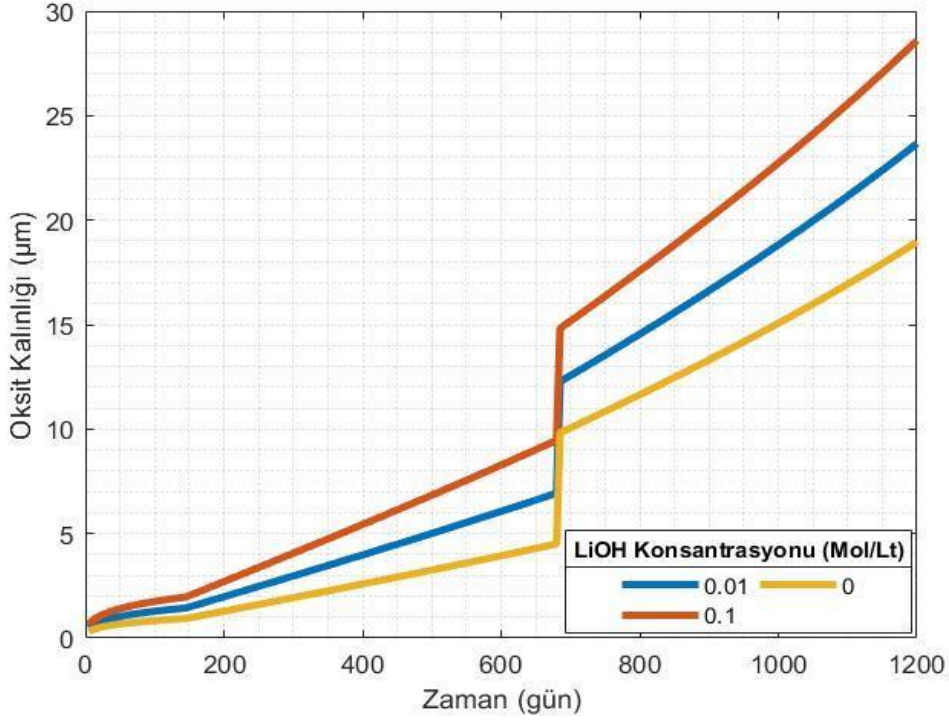
Şekil 4.4. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunda Edilen Oksit Tabakası Kalınlığının Zamana Bağlı Değişimi.



Şekil 4.5. FRAPCON-3.4 Yakıt performans kodunda Elde Edilen Oksit Tabakası Kalınlığının Zamana Bağlı Değişimi.

4.1.4. Lityum Hidroksit Konsantrasyonunun Oksit Kalınlığına Etkisi

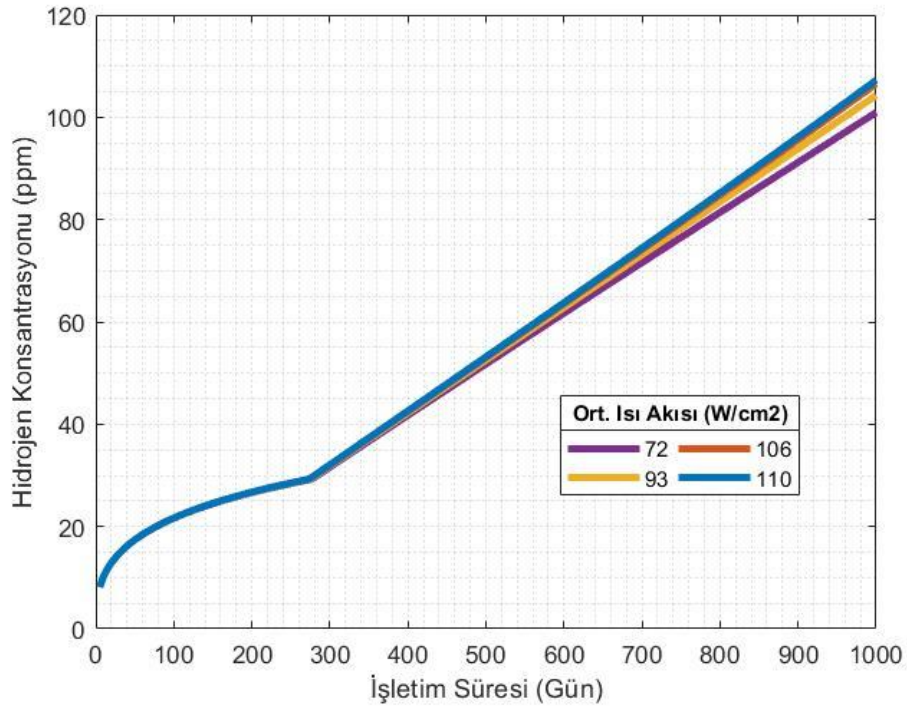
Hafif su reaktörlerinde birincil soğutucu sıvısının asitlik düzeyini kontrol etmek için eklenen Lityum Hidroksit çözeltisinin Zircaloy-4 alaşımın su ile temas eden yüzeyinde korozyonunu hızlandırdığı bilim çevrelerince bilinmektedir. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu tarafından elde edilen verilerde, oksit kalınlığının ilk 200 günlük işletim süresinde LiOH konsantrasyonu ile doğru orantılı olarak 1-2 μm civarında arttığı gözlemlenmiştir. İlk 200 günlük süre sonrasında oksit kalınlığı lineer ve parabolik olarak artmaya devam etmiş, oksidasyonun geçiş dönemi ve geçiş sonrası dönem, sırasıyla lineer ve kübik oran kuralını takip etmiştir.



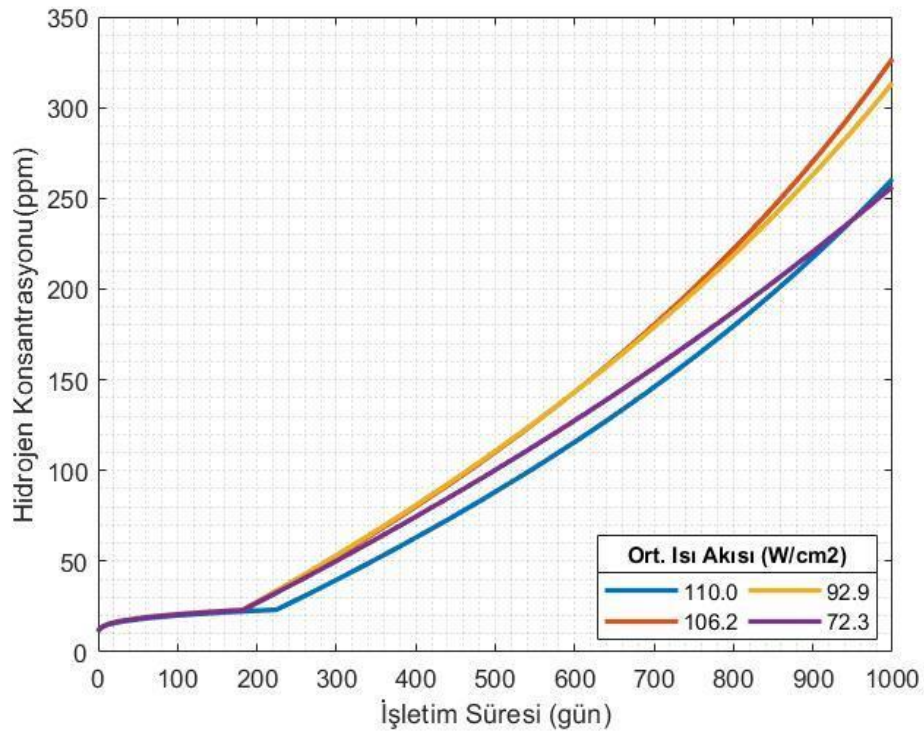
Şekil 4.6. Lityum Hidroksit Konsantrasyonunun Oksit Kütle Kazanımına Etkisi.

4.1.5. Hidrojen Konsantrasyonunun Zamana Bağlı Değişimi

HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu ve FRAPCON-3.4 kodu tarafından hesaplanan, Zircaloy-4 alaşımının su ile temas eden yüzeyinde oksidasyon süresince zamanla artan hidrojen konsantrasyonu Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de görülmektedir. Oksidasyon sürecine paralel olarak hidrojen konsantrasyonu da işletim süresince yükselmiştir. Bununla birlikte hidrojen konsantrasyonunun ısı akısındaki farklılıklardan keskin bir biçimde etkilenmediği de her iki grafikte görülebilmektedir. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu verilerinin 1000 gün sonundaki toplam hidrojen konsantrasyonunun FRAPCON-3.4 koduna göre düşük olmasının temel sebebi, HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunda soğutucuya dahil edilen lityum hidroksitten ve hesaplama algoritmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.7. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu ile Hesaplanan Hidrojen Konsantrasyonunun Zamana Bağlı Değişimi.



Şekil 4.8. FRAPCON-3.4 Yakıt Performans Kodu ile Hesaplanan Hidrojen Konsantrasyonunun Zamana Bağlı Değişimi.

4.2. HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunun Zarf Malzemesinin Mekanik Davranışı ile ilgili Sonuçları

HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu ile hidrojenin Zircaloy-4 alaşımının mekanik davranışı üzerindeki olası etkileri modellenmiştir ve modelleme sonuçları tezin bu kısmında verilmektedir.

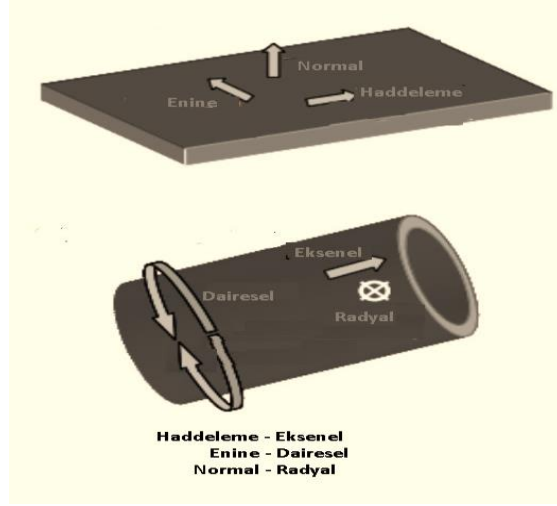
4.2.1. Levha Malzemesinin Deformasyon Davranışı ve Yapısı ile Zarf Malzemesi İlişkisi

Bu tez çalışmasının amaçlarından birisi, Zircaloy-4 alaşımının elastikliğini kaybederek plastik davranışa veya mekanik karakterine hidrojenin ne kadar tesir ettiğini incelemektir. Elastik davranıştan plastiğe geçiş aslında metal atomlarının dizilişlerinin atomik bağlar yardımıyla esneyip geri eski hallerine dönmeleri olarak da açıklanabilir. Metallerin mekanik davranışı, çekme ve sıkıştırma testleri esnasında aynıdır. Malzeme testleri malzemenin işletim esnasında olduğu gibi aynı biçimde deformasyonuna imkân tanımaktadır. Yakıt zarf malzemesinin plastik davranışı, aşağıdaki yapısal ilişkiye göre malzeme özellikleri veritabanı MATPRO [31] 'da,

$$\sigma = K \epsilon_p^n \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10^{-3}} \right)^m \quad (4.1)$$

şeklinde verilmiştir. Denklemden gerçek gerilme (σ), mukavemet katsayısı (K), gerilme sertleşmesi üssü (n), gerçek plastik gerilme (ϵ_p), gerinim hızı üsteli (m) ile normalize

gerinim hızı $\left(\frac{\dot{\epsilon}}{10^{-3}} \right)$ ile orantılıdır.



Şekil 4.9. Referans Çalışmada Kullanılan Zircaloy-4 Plaka Tipi Numunenin Test Yönlere Karşılık Gelen Zircaloy-4 Silindirik Yakıt Zarfının Yönleri [30].

Flanagan [30] tarafından yapılan çalışmada, hidrojen konsantrasyonunun K, n ve m parametreleri üzerindeki etkisini deneysel verilerin bir benzetimini kullanarak belirlemek amaçlanmıştır. Soğuk şekillendirilmiş ve gerinimi giderilmiş Zircaloy-4 silindirik yakıt zarfı malzemesinde olduğu gibi, Zircaloy-4'ün plaka formu da güçlü bir kristalografik doku sergiler. Bu nedenle, mekanik davranışın ve mikro yapısal özelliklerin levha yönüne göre anizotropik olması muhtemeldir. [30]

Sonuç olarak bu çalışma için verileri referans olarak kullanılan deney düzeneği için edinilen plaka malzemesinde yapılan testler haddeme yönünde, enine yönde ve normalden plaka yüzeyi yönünde gerçekleştirilmiş olup, bu yönler Şekil 4.8'de görüldüğü gibi yakıt zarfında eksenel, çevresel ve radyal yönlerle karşılık gelmektedir.

Referans olarak seçilen deneysel çalışmada, Zircaloy-4 plaka malzemesinin çeşitli yöntemler ile hidrojen toplaması amaçlanmış olup, bu süreçler sonrasında malzeme karakteri tayini için mekanik testleri tamamlanmıştır.

Mekanik testler, sıkıştırma ve çekme testlerinden oluşur. Sıkıştırma testleri malzemenin gerinim kabiliyeti, gerilme sertleşmesi ve gerilme oranı sertleşmesi gibi özelliklerinin tayin edilmesi amacıyla tasarlanmıştır.

Ayrıca, plastik anizotropi gerilme hızları olarak tanımlanan R ile P de plaka malzemesindeki plastiklik anizotropisinin tanımlanmasında genel olarak kullanılmaktadır.

Haddeme yönünde uygulanan gerilimli tek eksenli gerilme testi için:

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\epsilon_{enine}}{\epsilon_{normal}} \quad (4.2)$$

Enine yönde uygulanan gerilimli tek eksenli gerilme testi için:

$$P = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\epsilon_{haddeleme}}{\epsilon_{normal}} \quad (4.3)$$

Eşitlikleri kullanılmaktadır. Bu eşitliklerde ϵ_w ve ϵ_t sırasıyla genişlik ve kalınlık gerilmelerini ifade etmektedir. Bire eşit plastik anizotropik gerilme hızı izotropik plastikliği ifade ederken, birden büyük anizotropik gerilme hızı ise kalınlık kaymasının genişlik kaymasına oranla daha güç olduğunu gösterir. Zircaloy-4 alaşımı için hesaplanan deneysel plastik anizotropi deformasyon/şekil değiştirme hızı Çizelge 4.1'de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Zircaloy-4'ün Deneysel Plastik Anizotropi Deformasyon Hızları [32].

Levha	R=5.4
Levha	P=4.2
Zarf	P=2.3

Hill akma kıstası [33] ile R ve P değerlerine dayanarak, zarf-yakıt pelet etkileşiminin belirgin hale geldiği tasarıma dayandırılan kazalar esnasında şekil değişimi/gerinime sebebiyet veren, eşikieksenli gerilme içinde akmaya yol açan normal gerilmelerin hızının tahmin edilmesine imkân tanır [34]. Eşikieksenli gerilme (σ_{eig}) içerisindeki malzemenin akması için gerekli normal gerilmelerin hızı,

$$\frac{\sigma_{eig}}{\sigma_{eg}} = \left[\frac{P(1+R)}{P+R} \right]^{0.5} \quad (4.4)$$

bağıntısı ile bulunabilir: σ_{eg} , Hill eşdeğer gerilmesi; σ_{eig} eşikieksenli gerilmedir. Malzeme düzlemsel izotropi sergilediğinden, haddeleme yönü veya enine yönelim boyunca tek eksenli akma gerilmesi olup $\sigma_{eg} = \sigma_g$ 'dir.

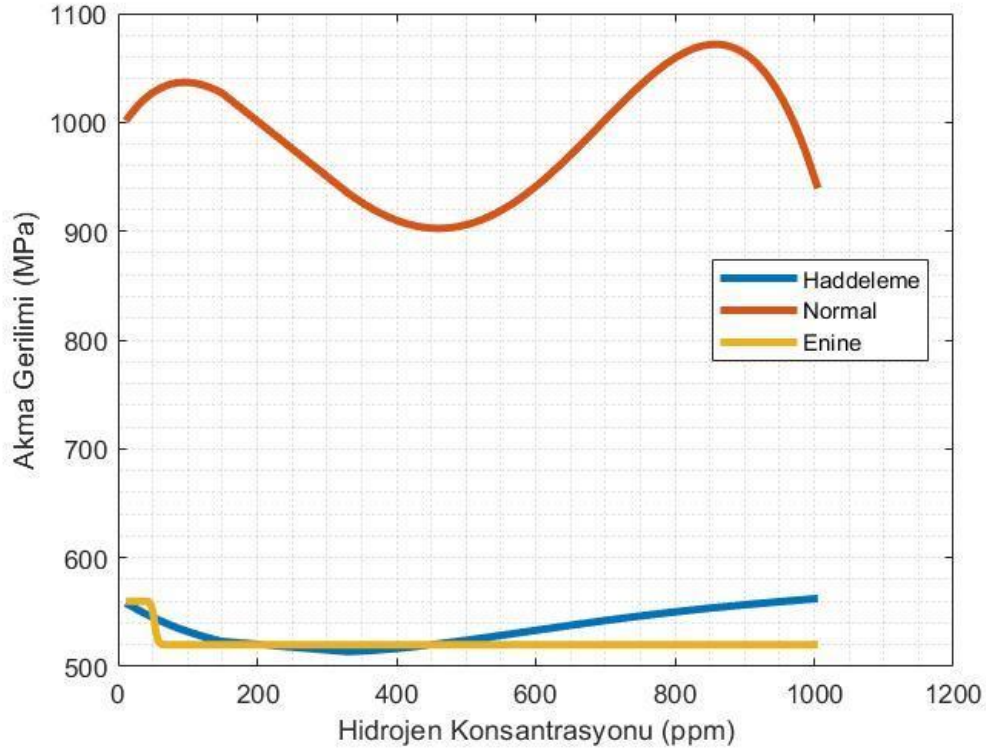
Çizelge 4.1 ve Denklem 4.4 kullanılarak, oda sıcaklığındaki normal doğrultuda akma gerilmelerinin haddeleme yönü veya enine doğrultularındaki hızını tahmin etmek mümkündür:

$$\frac{\sigma_{eig}}{\sigma_{eg}} = \frac{\sigma_{Normal}}{(\sigma_y)_{Haddeleme}} = \frac{\sigma_{Normal}}{(\sigma_y)_{Enine}} \cong 1,67 \quad (4.5)$$

Bu oran, Zircaloy-4 alaşımı için akma gerilmesi anizotropisi yani malzemenin mekanik davranışı hakkında tahmin yürütülmesini sağlayabilir. Yapılan deneyler sonucunda, bu oranın sıcaklık ve hidrojen konsantrasyonundan bağımsız olduğunu ve plastik anizotropinin de 400°C'ye kadar korunduğunu göstermiştir [35].

4.2.2. Hidrojen Konsantrasyonunun Akma Davranışına Etkisi

Şekil 3-8, HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu tarafından hesaplanan hidrojen konsantrasyonunun bağlı olarak plaka malzemesi için haddeleme, normal ve enine doğrultulardaki akma gerilmesinin (%0,2 gerinim) göstermektedir.



Şekil 4.10. Farklı Doğrultulardaki Zircaloy-4 Plakalarının Akma Gerilimlerinin Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Değişim Grafiği.

Hidrojen konsantrasyonu arttıkça, normal doğrultudaki akma gerilmesi kısmen artmış ancak keskin bir artışa yol açmamış olup, haddeme ve enine doğrultularda hemen hemen aynı kalmıştır. 400-800 ppm arası hidrojen konsantrasyonu normal doğrultuda akma gerilmesini fark edilir düzeyde artırmıştır. Diğer hidrojen konsantrasyon seviyeleri normal ve enine doğrultularda akma gerilmesine etki etmemiştir. Bununla birlikte hidrojen konsantrasyonunun Zircaloy-4 malzemesinin akma gerilmesi davranışı üzerindeki etkisini tam anlamıyla inceleyebilmek için gerilme-şekil değiştirme/gerinim eğrisinin incelenmesi gerekmektedir.

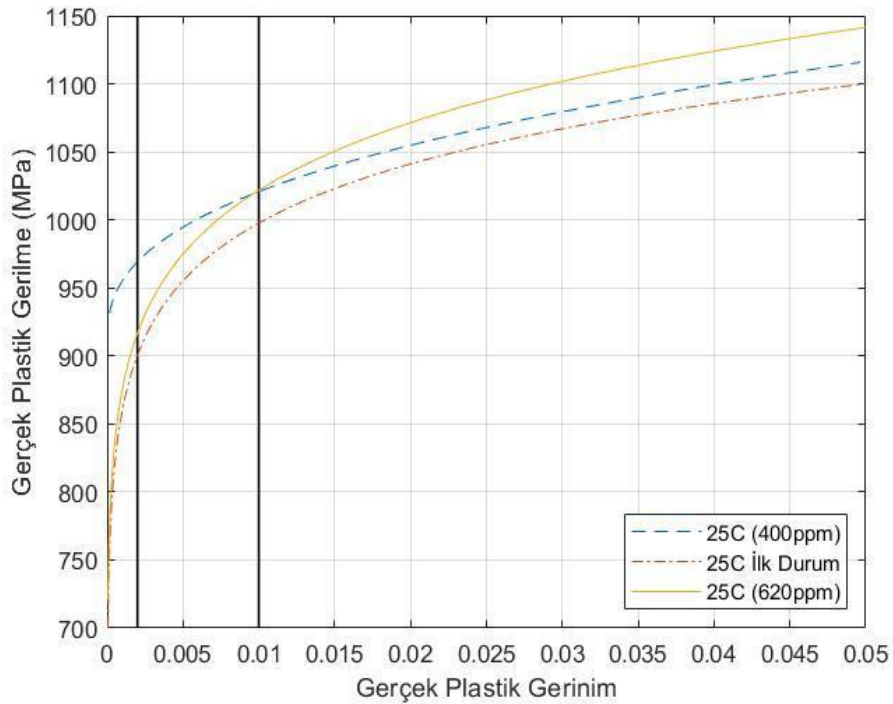
4.2.3. Hidrojen Konsantrasyonunun Plastik Gerilme-Şekil değiştirme/Gerinim Davranışına Etkisi

Şekil 4.10, Zircaloy-4 levhasının haddeme, enine ve normal yönleri için gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme davranışını göstermektedir. Ayrıca farklı sıcaklık ve hidrojen

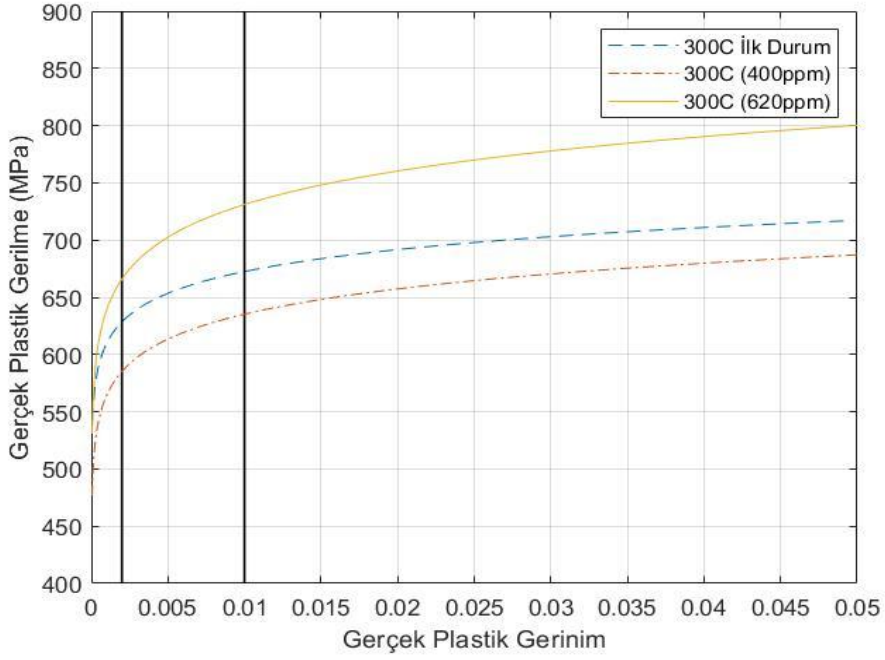
konsantrasyonu seviyelerine bağı gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrileri de görülebilmektedir.

Şekiller 4.11- 4.13'de, farklı sıcaklık değerleri ve hidrojen konsantrasyonları altında Zircaloy-4 alaşımının elastik-plastik davranışı açısından etkileri incelenmiştir. Öncelikle belirtmek gerekir ki, 25°C, 300°C, 400°C sıcaklık değerlerinde ve 0.01'lik gerçek plastik gerinim referans alındığında, hidrojen konsantrasyonlarının metalin plastik gerilme ve şekil değiştirme davranışına etkisi çok net anlaşılammaktadır. Ancak 25°C, 300°C, 400°C sıcaklık değerlerinde hidrojen konsantrasyonlarından bağımsız olarak 0.01'lik gerçek plastik gerinim referans alındığında plastik davranışa geçişin ivme kazandığı çok rahatlıkla söylenebilmektedir. Şekil 4.11'de de açıkça görüldüğü üzere düşük sıcaklıkta 0.01'lik gerçek plastik gerinim referans alındığında, gerçek plastik gerilme değeri yaklaşık olarak 1000 MPa dolaylarındadır. Bu değer, 300°C, 400°C sıcaklıklarda 500-700 MPa civarında gerçekleşmiştir.

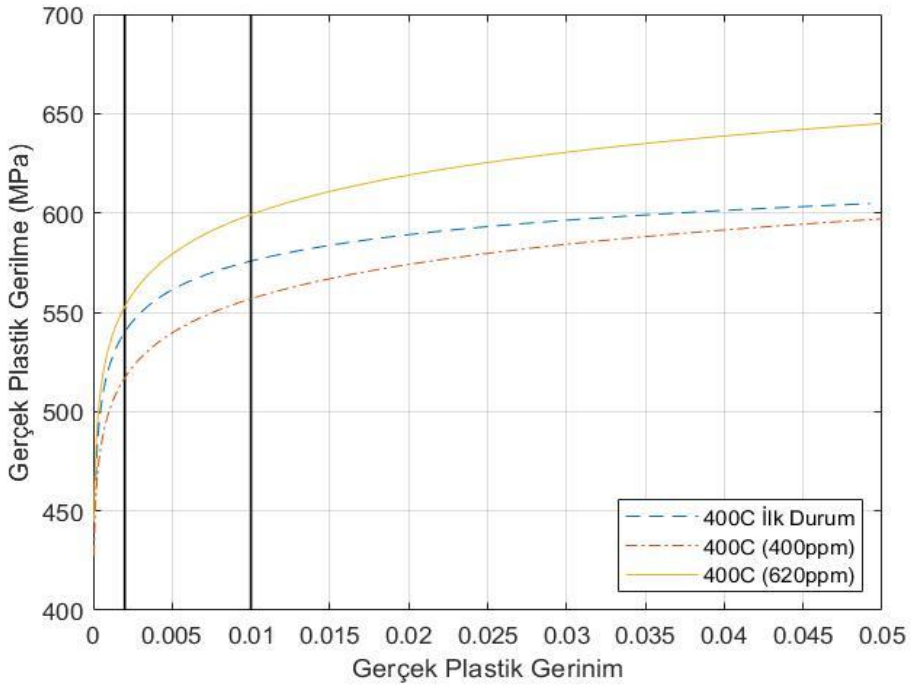
Normal doğrultuda plastik gerilme-şekil değiştirme eğrileri farklı sıcaklık ve hidrojen konsantrasyonları için Şekiller 4.11-4.13'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. 25°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağı Normal Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.

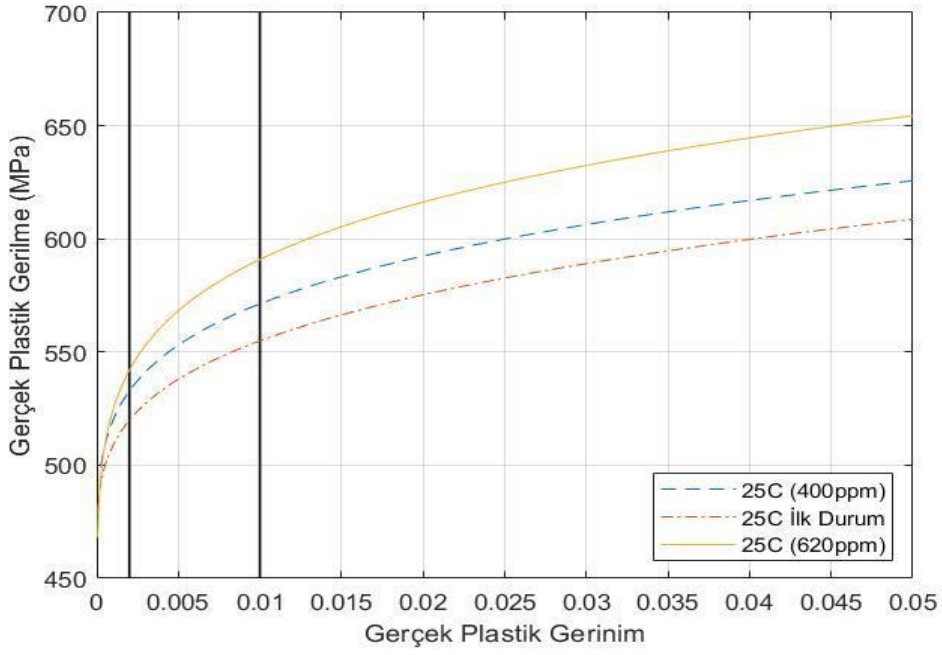


Şekil 4.12. 300°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Normal Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği.



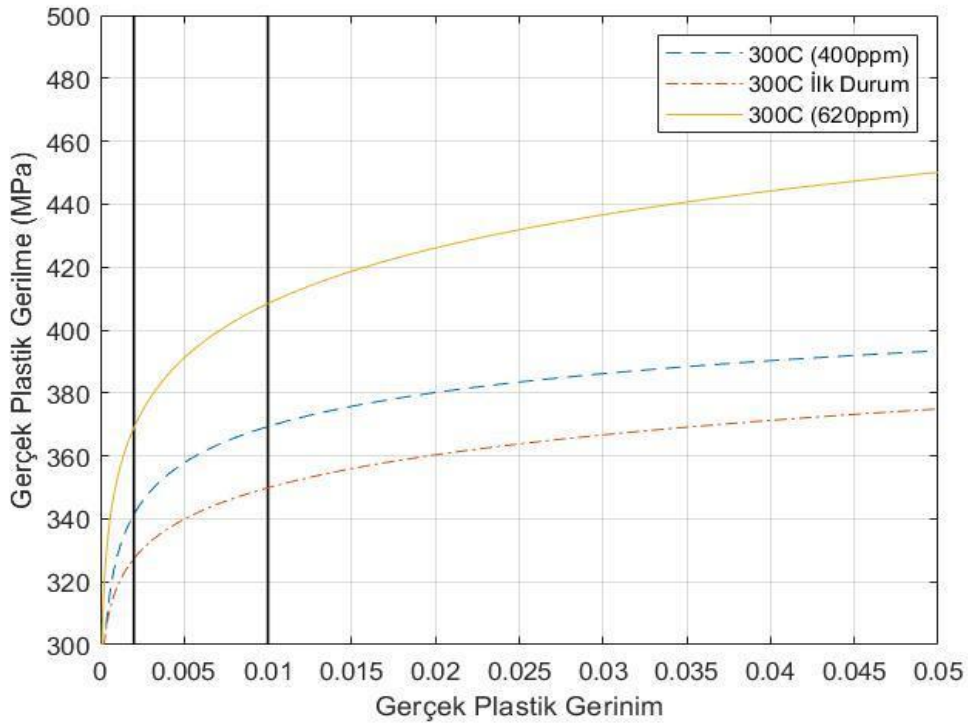
Şekil 4.13. 400°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Normal Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği.

Enine doğrultuda gerçek plastik gerilme-şekil değişirme eğrileri farklı sıcaklık ve hidrojen konsantrasyonları için Şekiller 4.14-4.16'da gösterilmiştir.

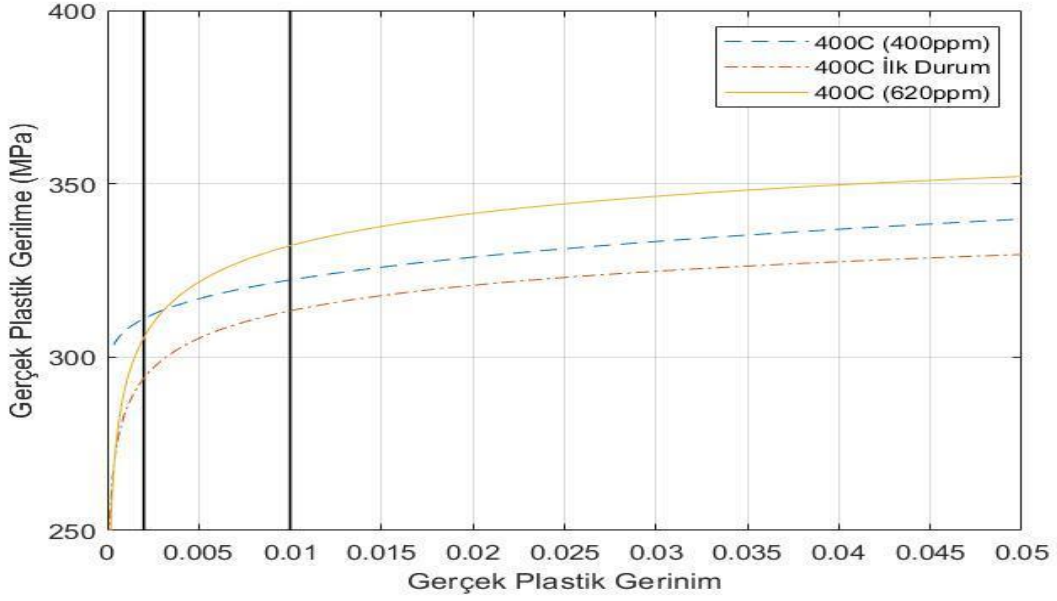


S

Şekil 4.14. 25°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Enine Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği.

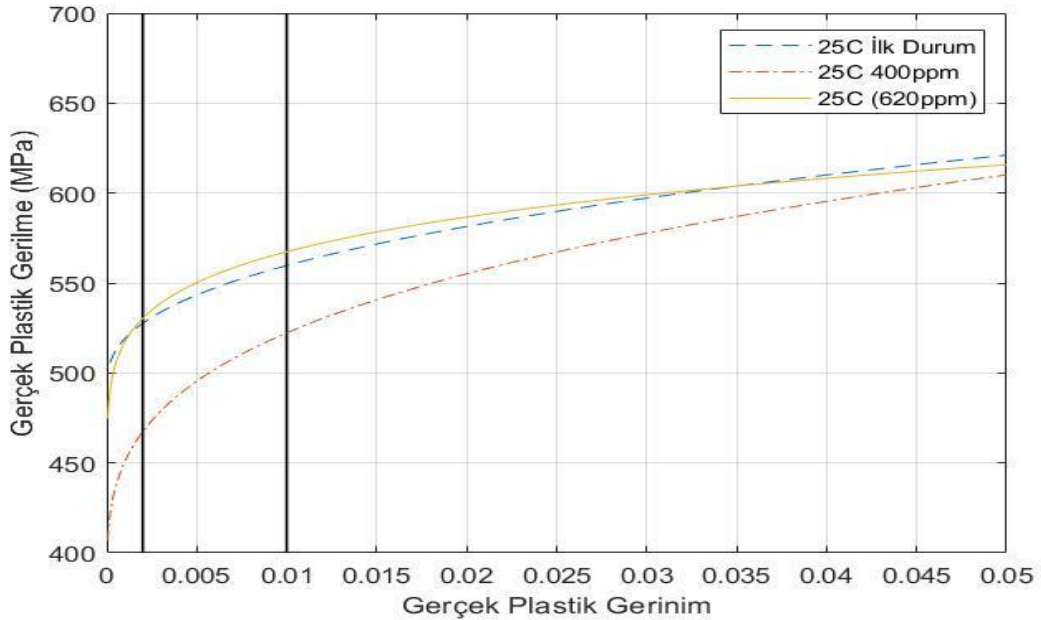


Şekil 4.15. 300°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Enine Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği.

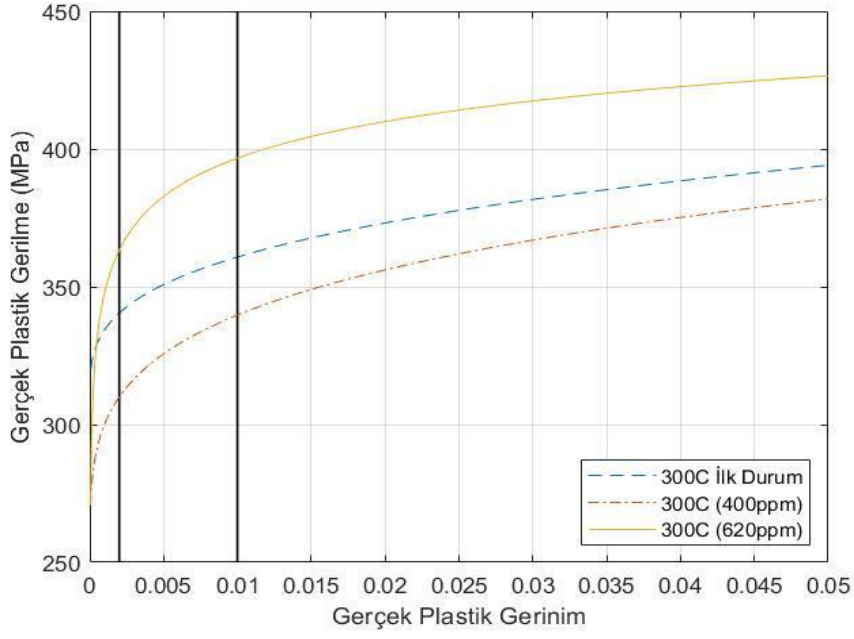


Şekil 4.16. 400°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Enine Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği.

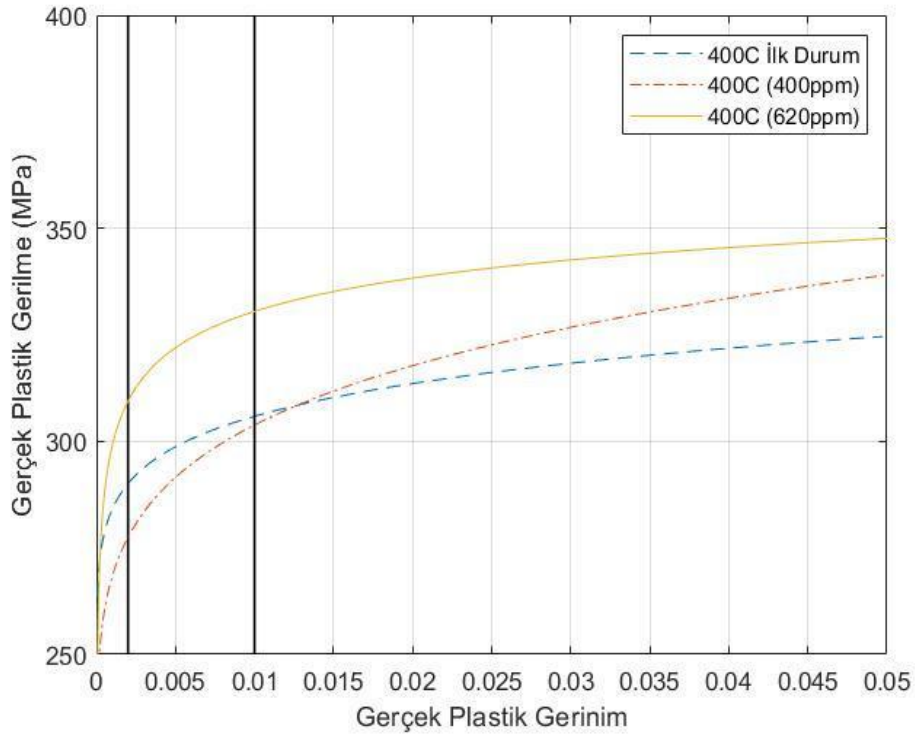
Haddeleme plastik gerilme-şekil değişirme eğrileri farklı sıcaklık ve hidrojen konsantrasyonları için Şekiller 4.17-4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.17. 25°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Haddeleme Doğrultusundaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği.



Şekil 4.18. 300°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Haddeme Doğrultusundaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği.



Şekil 4.19. 400°C Sıcaklıkta 0, 400, 620 ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Haddeme Doğrultusundaki Zircaloy-4 Plakalarının Gerçek Plastik Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği.

Şekiller 4.11-4.19 incelendiğinde, genel olarak sıcaklık arttıkça Zircaloy-4 alaşımındaki hidrojen konsantrasyonuna bağlı olmaksızın gerçek gerilmenin belirgin olarak azaldığı gözlenmiştir.

Ayrıca hidrojenin akma davranışı üzerine etkisi gerilme yönüne de bağlıdır. Hidrojenin akma sınırına etkisi hakkında ilk duruma göre karşılaştırıldığında, net bir kaniya varılmamış olmakla birlikte hidrojen konsantrasyonu arttıkça akma gerilmesi azalabilir ve aynı şekilde gerinim sertleşmesi (şekil değiştirme sertleşmesi) artabilir veya akma sınırı artabilir ve gerinim sertleşmesi belirli bir düzeyde kalabilir.

4.2.4. Hidrojen Konsantrasyonunun Yakın Akma Davranışı Üzerindeki Etkisi

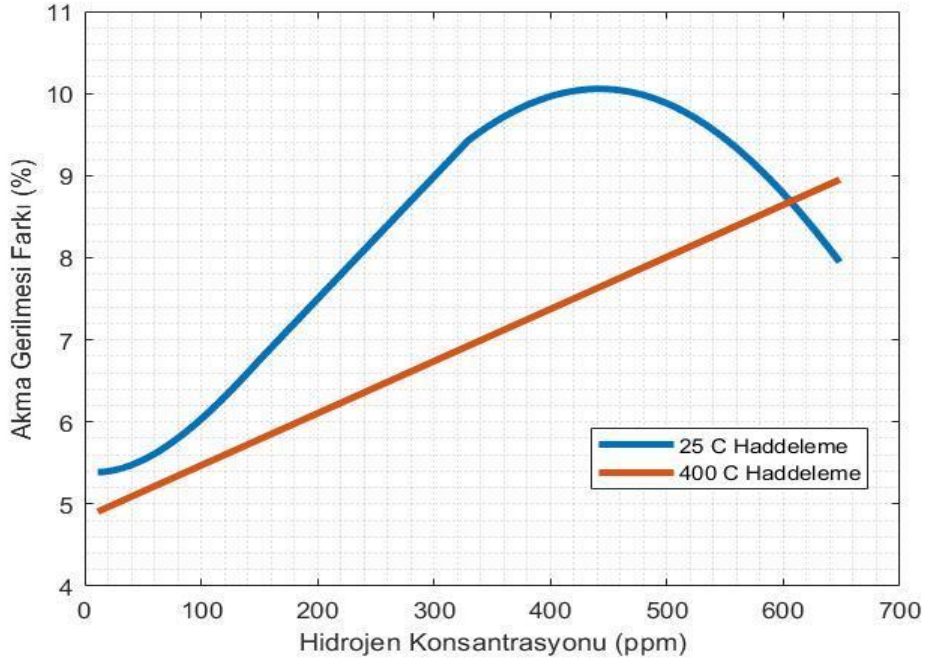
Çeşitli doğrultulardaki Zircaloy-4 malzemesinin %1,0 gerinimdeki akma gerilmesi ve %0,2 ötelemeli akma gerilmesi arasında normalleştirilen fark,

$$\text{Akma Gerilmesi Farkı} = \frac{AG_{0.01} - AG_{0.002}}{AG_{0.01}} \quad (4.6)$$

denkleminde önceki bölümde tanımlanmıştı. Akma gerilmesi farkı akma akabinde gerilmenin git gide sabitleşmeye başlarken uzamanın halen devam etmeye başladığı malzeme davranış sürecini ifade eder. Bu oranın artışı malzemenin elastikliğini kaybederek kalıcı bozulmaya başladığı süreçtir. Bu sürecin bir diğer ismi de yakın akma davranışıdır.

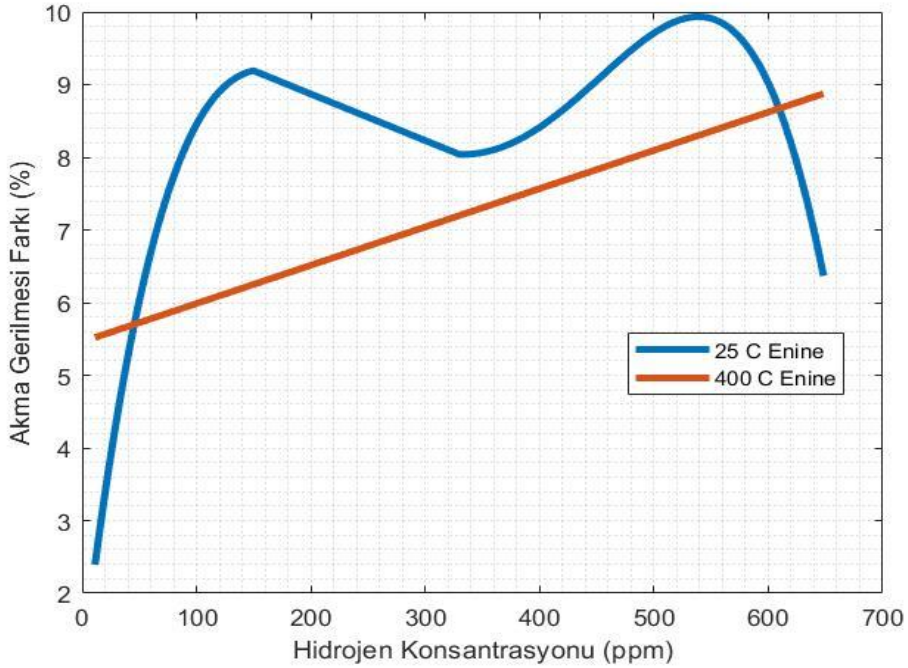
Farklı doğrultulardan (haddeleme, enine ve normal) uygulanan malzeme testleri ile yapılan bir deneyden elde edilen veriler ışığında yakın akma davranışı ile hidrojen arasında korelasyonlar üretilmiş ve bu korelasyonlar HUNEM-1.0 Yakıt Performans Koduna aktararak farklı doğrultularda hidrojenin bir fonksiyonu olan akma gerilmesi farkı yüzde cinsinden elde edilmiştir.

Haddeleme yönünde akma gerilmesi farkı Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



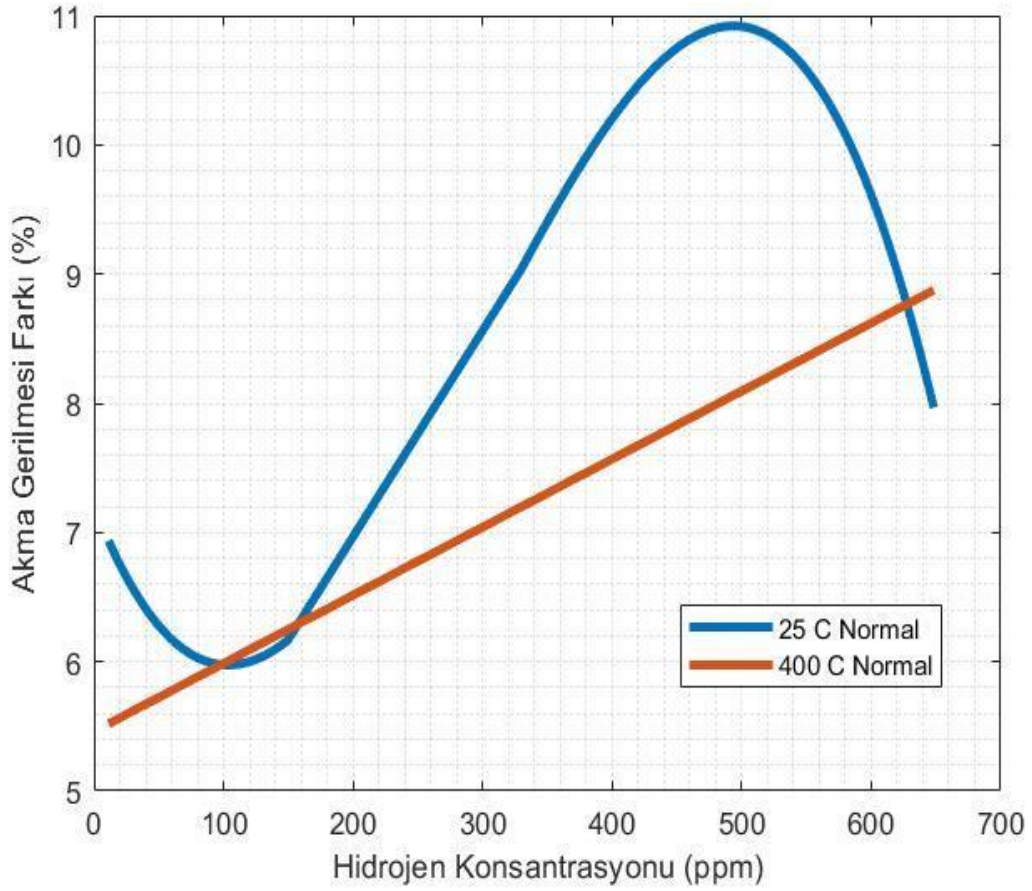
Şekil 4.20. 25°C ve 400°C Sıcaklıkta Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Haddelene Doğrultusundaki Zircaloy-4 Plakalarının Akma Gerilmesi Fark Grafiği.

Şekil 4.21, enine yönde akma gerilmesi farkını göstermektedir.



Şekil 4.21. 25°C ve 400°C Sıcaklıkta Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Enine Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Akma Gerilmesi Fark Grafiği.

Normal yönde akma gerilmesi farkı Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. 25°C ve 400°C Sıcaklıkta Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Normal Doğrultudaki Zircaloy-4 Plakalarının Akma Gerilmesi Fark Grafiği.

25 °C'de 400-500 ppm hidrojen konsantrasyonunun gözlemlendiği noktada, akma gerilmesi farkının kademeli olarak en yüksek noktaya ulaştığı normal ve haddeleme doğrultusu için söylenebilmekle birlikte, enine yönde 500-550 ppm hidrojen konsantrasyonunda sert bir yükseliş eğilimi göstermiştir. Bu durum ortalama 400-500 ppm hidrojen konsantrasyon ve 25 °C'deki Zircaloy-4 numunesinin tüm yönlerde elastikten plastik davranışa kademeli olarak geçişini göstermekle birlikte 500-550 ppm hidrojen konsantrasyonu ve sıcaklığın 400 °C olduğu örneklerde tüm yönlerde geçişin daha keskin olarak görülebilmektedir. Buradan yola çıkarak, 400°C'de elastik davranıştan plastik davranışa geçişin 25°C sıcaklığa oranla daha kararlı olduğu söylenebilir. Aynı zamanda hidrojen konsantrasyonunun 25°C sıcaklıkta ve 300-500 ppm arası konsantrasyonda malzemenin plastik davranışa yönelimini arttırdığı da görülebilmektedir.

Alaşımların akma davranışı, klasik dislokasyon dinamiği konsepti ile ilk olarak ortaya konmuştur. Bu konsept, yüksek gerilmeli yakın akma koşulları altında yüksek hız ile hareket halindeki dislokasyonlarla aynı şekilde hızlı bir biçimde çok düşük seviyedeki hareketli dislokasyon yoğunluğunun artması esnasında ani bir akma noktası oluştuğunu açıklar.

Zirkonyum hidritler ile zirkonyum alaşım matrisi arasındaki özgül hacimde meydana gelen büyük boşluklar, hidrit yakınlarındaki dislokasyonların plastik bölgede hidrit çökeltilerinin oluşumuna yol açar [36-38]. Şekillerde de görülen davranışın, hidritlerle alakalı plastik bölgelerden kaynaklanan başlangıçtaki değişken dislokasyonların miktarındaki artıştan kaynaklandığı düşünülebilir. Ayrıca, Zircaloy-4 levhasındaki yüksek hidrojen mevcudiyeti ile yüksek sıcaklığın mekanik davranış üzerinde gözlemlenen değişiklikleri sürekli hale getirdiği düşünüldüğünde, hidritlerin plastik bir biçimde bozunabilir olduğunu göstermektedir.

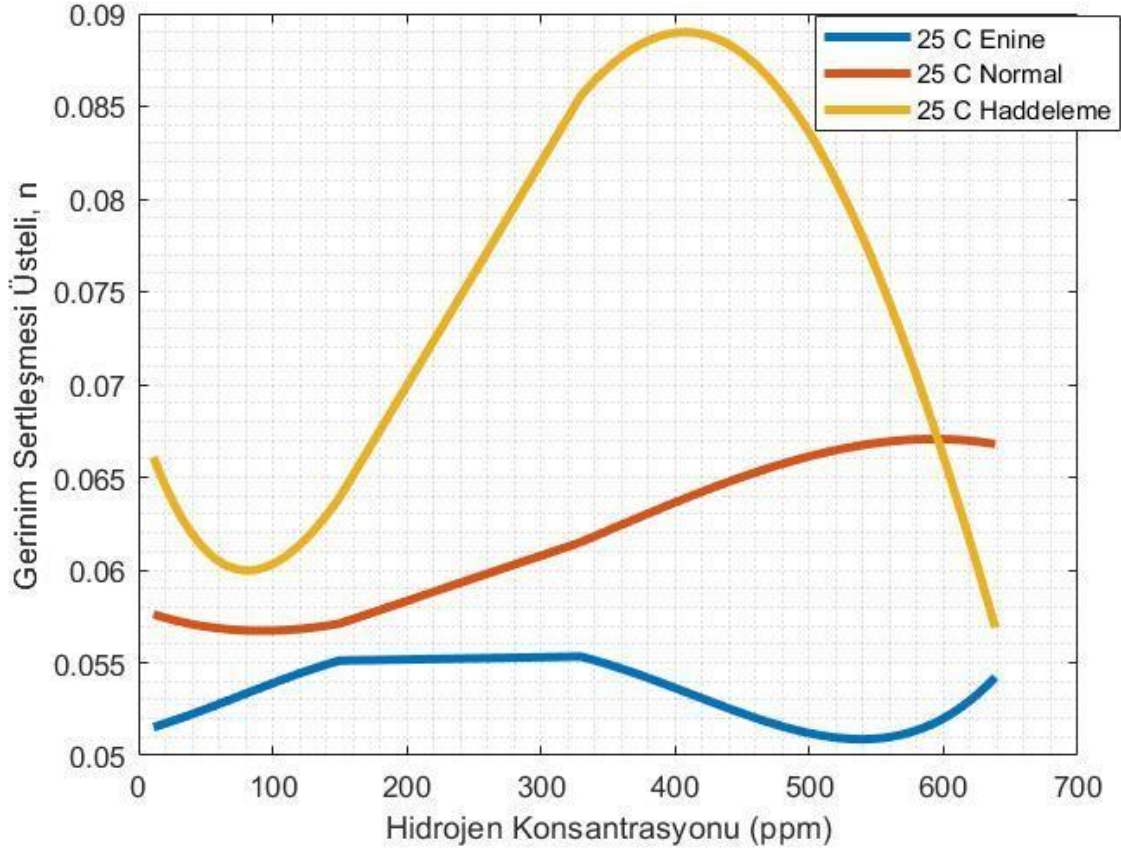
Hidrit çökeltileri sonrasında oluşan dislokasyonlar, daha kademeli elastik ve plastik geçişlere sebep olup akma deformasyonunun artışının bir sebebi kabul edildiğinde, 420 ppm'lik hidrojen konsantrasyonunun haddeleme ve normal doğrultulardaki Zircaloy-4 alaşımının akma davranışına olan etkisinin belirgin olduğu söylenebilir.

Ayrıca hidrit çökeltileri etrafında oluşan dislokasyonların plastik bölgesinin, hidrit çökeltilerinin yerleşimine bağlı olduğu göz önünde bulundurulduğunda, hareketli dislokasyonların gerilme eksenlerinin yerleşimleri de bağlı olduğu görülmektedir. Akma davranışının gerilme eksenlerinin yerleşimine bağlılığı Şekil 4.20-4.22'de açıkça görülebilmektedir. Gerilme eksenini açısından 420 ppm'lik hidrojen konsantrasyonuna sahip Zircaloy-4 levhalarının akma davranışına en belirgin etki haddeleme ve normal doğrultularda meydana gelmiştir. Enine doğrultudaki numunede 420 ppm'lik hidrojen konsantrasyonunun etkisi belirgin değildir. Bu durum kaymaya katkıda bulunan dairesel dağılımlı hidrit çökeltileri etrafındaki dislokasyonlardan kaynaklanıyor olabilir.

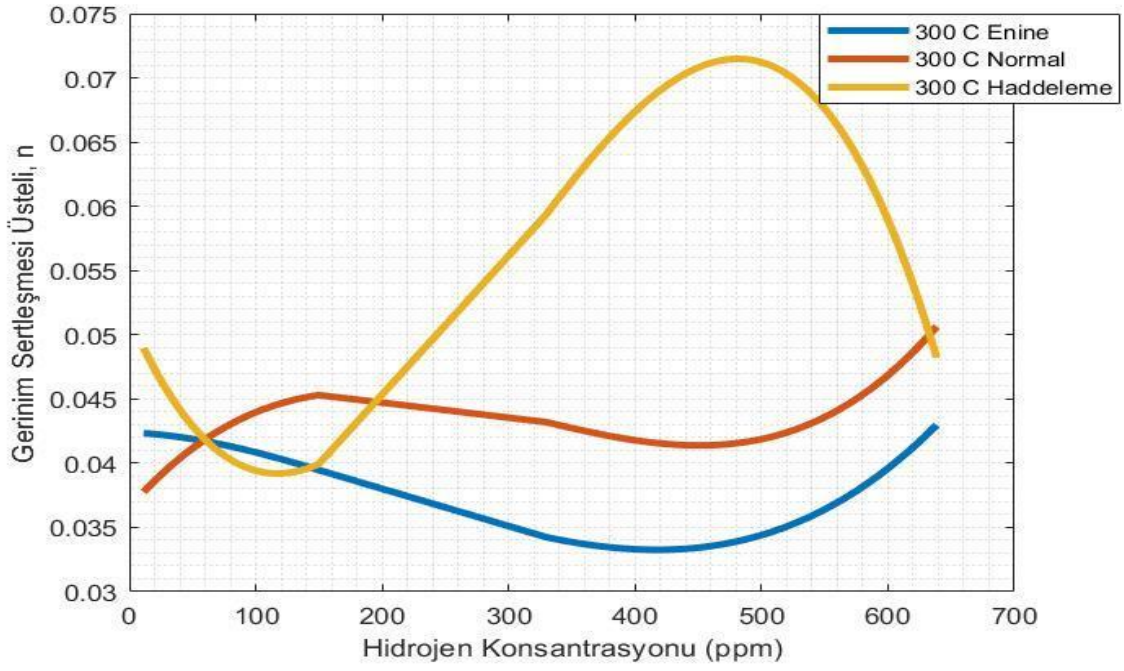
4.2.5. Hidrojen Konsantrasyonunun Gerinim Sertleşmesi Üzerindeki Etkisi

Yakıt zarf malzemesinin plastik deformasyonu, yapısal ilişkiye göre gerçek gerilme (σ), gerinim sertleşmesi üsteli (n), gerçek plastik gerilme (ϵ_p) ile orantılıdır.

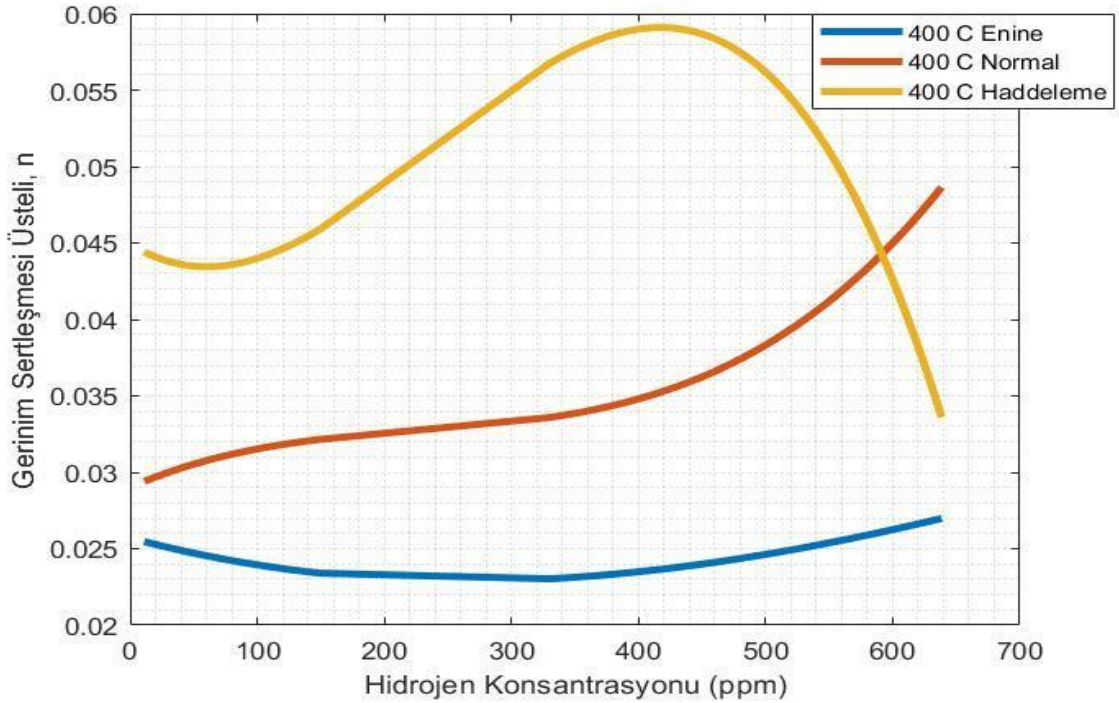
Bununla birlikte gerinim sertleşmesi üstelinin (n), sıcaklığın, hızlı nötron akısının ve alaşım kompozisyonunun bir fonksiyonu olduğu ancak hidrojen konsantrasyonunun bir fonksiyonu olmadığı malzeme özellikleri veritabanı MATPRO tarafından tanımlanmıştır [31]. Yapılan sıkıştırma testi [30] esnasında $0.01 \leq \epsilon_p \leq 0.05$ gerçek plastik gerilme dahilindeki gerinim sertleşmesi üsteli belirlenerek 25 °C, 300 °C, 400 °C sıcaklık altında ve enine, normal ve haddeme yönü doğrultularında yapılan bir deneyde elde edilen veriler, alaşımdaki hidrojen konsantrasyonunun fonksiyonu olan bir korelasyona dönüştürülerek hidrojenin gerinim sertleşmesi HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu tarafından doğrudan hidrojen ve sıcaklığı, dolaylı olarak hızlı nötron akısının bir fonksiyonu olarak Şekil 4.23-4.25'de görüldüğü gibi hesaplanmıştır.



Şekil 4.23. 25°C Sıcaklıkta Enine, Normal ve Haddeme Doğrultularındaki Zircaloy-4 Plakalarının Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Gerinim Sertleşmesi Üsteli Değişim Grafiği.



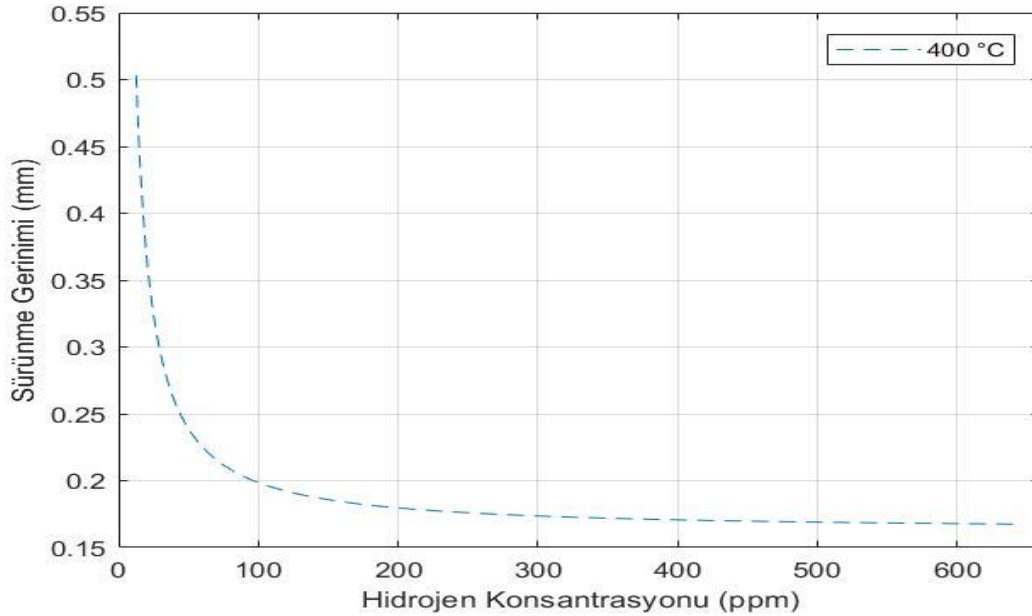
Şekil 4.24. 300°C Sıcaklıkta Enine, Normal ve Haddeme Doğrultularındaki Zircaloy-4 Plakalarının Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Gerinin Sertleşmesi Üsteli Değişim Grafiği.



Şekil 4.25. 400°C Sıcaklıkta Enine, Normal ve Haddeme Doğrultularındaki Zircaloy-4 Plakalarının Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Gerinin Sertleşmesi Üsteli Değişim Grafiği.

Zircaloy-4 levha malzemesi için gerilim sertleşmesi üsteli sıcaklığın artışı ile ters orantılı olarak azalmaktadır. 25 °C, 300 °C, 400 °C sıcaklıkları altında ve haddeleme yönü doğrultusunda gerilim sertleşmesi üsteli 0-620 ppm hidrojen konsantrasyonları arasında 0.01'lik bir değişime uğramıştır. 25 °C, 300 °C, 400 °C sıcaklıkları altında ve enine doğrultuda üsteli 0-620 ppm hidrojen konsantrasyonları arasında değişim yok denecek düzeydedir. Normal doğrultuda ise sadece 400 ppm ve üzeri hidrojen konsantrasyon değerlerinde sürekli bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, 25 °C'ye nazaran 300 °C, 400 °C sıcaklıklarında yaklaşık 0.02 mertebelerindedir. Bu da hidrojen konsantrasyonunun gerilim sertleşmesi üsteli üzerindeki etkisinin önemsenmeyecek düzeyde olduğunu göstermektedir.

4.2.6. Hidrojen Konsantrasyonunun Sürünme Gerinimi Üzerindeki Etkisi



Şekil 4.26. 400°C Sıcaklıkta Haddeleme Doğrultusunda Zircaloy-4 Plakasının 0- 600 ppm Hidrojen Konsantrasyonuna Bağlı Sürünme Gerinimi Değişim Grafiği.

Yüksek sıcaklıklarda ve gerilmelerde malzemelerin sürünme deformasyonu, atomların genişleyen difüzyonu ve dislokasyonların hareketliliğinin artmasından kaynaklanmaktadır. Dislokasyonlar, metallere yumuşaklık katan, atomlar arası bağların koparak yeni bağların

oluşumuna izin veren düğüm kayıplarıdır. Dislokasyonlar ve konumları, malzemelerin mukavemeti ve tokluğunu etkileyen önemli bir faktör olup atomların denge mesafesini bozduğu için kristal yapının iç enerjisini artırmaktadır. Sürünme davranışlarının, mikro yapılara [39,40], malzeme örgü yapısına [41,42], alaşım elementlerine ve hidrojen konsantrasyonuna [43,44] bağlı olduğu bilinmektedir. Bu etkiler sıcaklık ve gerilme testlerine bağlı olarak değişmektedir.

5. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışması kapsamında basınçlı su reaktörlerinde sıklıkla kullanılan yakıt zarf malzemesi olan Zircaloy-4 alaşımının silindirik bir boyutlu düzlemde ilk olarak ısı, sıcaklık değişkeni, oksit kütle kazanımı, oksit kalınlığı, oksidin yakıt zarf malzemesi üzerindeki hareketi temelindeki fiziksel davranışı deterministik olarak HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu tarafından hesaplanmıştır.

İlk olarak elde edilen yakıt dış ve iç zarf sıcaklıkları, oksit kalınlığı ve hidrojen konsantrasyonu, FRAPCON-3.4 yakıt performans kodu çıktıları ile karşılaştırılarak kodun verdiği sonuçlardaki sapma gözlemlenmiş ve muhtemel sebepleri irdelenmiştir.

HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunda ısı denkleminin sınır koşullarından birisinin sabit bir değer olarak atanması ve ısı üretiminin bir deney ortamında olduğu gibi sabit bir değerde tutulması tutucu bir yaklaşım olup, FRAPCON-3.4 gibi gerçek işletim parametrelerinde çalışan bir koda göre farklı ancak yakın sonuçlar elde edilmesine yol açmıştır. Bu, aksenel yönde soğutucunun zarfın su ile temas eden yüzeyinde sıcaklığı düşürdüğü ve sıcaklığın hidrojen difüzyonu ile katı çözünürlüğü etkilediği için tutucu sonuçlar elde edilmesine sebep olmaktadır.

İkinci kısımda ise yine bir boyutlu silindirik geometride oksidasyon sürecinin diğer bir fenomeni olan hidrojen birikim mekanizmaları açıklanmış ve devamında hidrojen konsantrasyonu bir boyutlu silindirik geometride hesaplanmış ve devamında ise bir takım deterministik yöntemler ve ampirik veriler ışığında hidrojenin Zircaloy-4 üzerindeki olası etkileri incelenmek istenmiştir.

Gerek literatürde yapılan deneysel çalışmalar gerekse bu deneysel çalışmaların bir benzetimini kullanılan bilgisayar programları, hidrojen konsantrasyonunun direkt olarak

malzemenin mekanik ve deformasyon davranışına normal işletim koşullarında bir etkisi olmadığını öngörmektedir. Bunun başlıca sebebi, deformasyonun temel nedeni olarak gösterilen dislokasyon kinetiğinin ve elastik-plastik davranışın termal yük, basınç yükü ve işletim sırasında meydana gelebilecek olan geçişlerden dominant bir biçimde etkileniyor oluşudur.

6. ÖNERİLER VE GELECEKTE YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR

HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu her ne kadar ısı akısı, sıcaklık değişim hızı ve hızlı nötron akısını mekanik davranışını etkileyen önemli parametreler olarak kullanmış olsa da gerek benzetimlerin belirli bir sıcaklık aralığında çalışıyor oluşu gerekse diğer faktörlerin deformasyon kinetiğini baskılıyor olması sebebiyle hidrojenin malzemeye olan mekanik etkisini net olarak açıklayamamaktadır. Bunun temel nedeni yapılan deneysel çalışmalarda kimyasal olarak Zirkonyumun su ile temas eden yüzeyinde meydana gelen oksidasyon sürecidir. Oksidasyon süreci sonunda malzemede hidrojen birikimi belirli bir sıcaklığın üzerinde meydana gelir. Ancak aynı zamanda da hidrojen çözünerek soğutucuya karışmaktadır. Soğutucunun asitlik düzeyi işletme parametrelerinin kontrolü esasına dayalı olarak belirli bir düzeyde korunur. Bu da oksidasyon ile artan hidrojen konsantrasyonunun düşüşüne sebebiyet verir.

Diğer yandan alaşımdaki kristal matrise yayılan hidrojen atomları belirli bir konsantrasyon eşiğini geçtikten sonra çökelerek hidrit (veya CRUD tabakası) formunu alması, (Bahsi geçen bu eşiğe uçsal katı çözübilirlik sınırı da denmektedir) HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunun göz önünde bulundurmadığı bir süreçtir. Bu durum, HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu tarafından hesaplanan hidrojen konsantrasyonundaki değişim hızının yakıt çubuğu düğümündeki sıcaklık değişim hızına bağlı olarak yeniden modellenmesini gerektirmektedir.

Bir diğer husus ise HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunun direkt olarak çekme ve sıkıştırma testlerinden elde edilen ampirik verilerin benzetimi ışığında malzemenin hidrojen konsantrasyonuna bağlı mekanik davranışı hakkında bilgi veriyor oluşudur. Bu durum HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodunun bir dezavantajı değil, bilimsel açıdan incelenen fenomenin karmaşıklığından kaynaklanmaktadır. Çünkü uçsal katı çözübilirlik

sınırını baz alarak işlem yapan gelişmiş yakıt performans programları da hidrojenin dolaylı olarak mekanik davranışa etkisini hesaplayamamaktadır. Bunun bir diğer sebebi de hidritlerin konumunun bilinmemesinden kaynaklanmaktadır.

Isının üretildiği yerde yakıt zarf matrisine daha kolay yayılan hidrojen atomları kısmen ısının daha az üretildiği alanlarda çökelirler. Bu da deney malzemesi olarak alınan Zircaloy-4 numunelerinde hidrojen toplanması akabinde hidrit çökeltirme sürecindeki soğutma hızının önemli olduğunu gösteren bir diğer ayrıntıdır. Bütün bu faktörlerin bir bilgisayar simülasyonunda göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

7. EKLER

7.1. EK 1 – HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu

Ek 1’de tez için oluşturulan HUNEM-1.0 Yakıt Performans Kodu sunulmuştur.

```
function hunem(varargin)
clear global;
clear functions;
global GlobInArgs nargs;
nargs=0;
for ii_=length(varargin):-1:1
if ischar(varargin{ii_})
nargs=ii_;
eval(['global ',varargin{ii_},';',varargin{ii_},'= ',num2str(varargin{ii_+1},15),';']);
end
end
GlobInArgs={mfilename,varargin{1:nargs-1}};
nargs=length(GlobInArgs);
global unit2fid;
if ~isempty(unit2fid), unit2fid={};
end
persistent SH_enine_400 SH_normal_400 SH_haddeleme_400 SH_enine_300
SH_normal_300 SH_haddeleme_300 SH_enine_25 SH_normal_25
SH_haddeleme_25 ASF_haddeleme400 ASF_haddeleme ASF_enine
ASF_enine400 ASF_normal400 a o2_at_weight lioh_coef normal b_NR b_TR
trans rolling fast_neu_eff_coef ox_rate_const1 pickup_fraction_zr4 zr4_at_weight
```



```

b c int_cond lioh_conc hconst dco dci co dloc oxy_conc nonoxi_cld_thck
zro2_density dif_coef dt dx firstCall fast_neu_flux i i_step stp1 stp2 ASF_normal n
num_lim num_step pbr heat_flux tt pre_trans post_trans solution times timesd t
fuel_clad_temp oxi_clad_temp run_time d_time d_timet tk_cond tkk_cond
zro2_tcd zro2_tc cld_thck cld_thckm clad_outer_temp ox_rate_u kutle_kazanimi
heat_mass_eff total_mass_eff irr_mass_eff lioh_mass_eff wtc weight_trans x
heat_thck_eff total_thck_eff irr_thck_eff lioh_thick_eff xxx z zrc4_yogunluk zpt
zptu format_100 format_103 format_104 format_111 format_122 format_128
format_133 format_222 format_223 format_224 format_299 format_442
format_443 format_444 format_445 format_446 format_53 format_55
format_552 format_553 format_554 format_56 format_67 format_68
;
if isempty(firstCall),firstCall=1;end;

if firstCall;
format_100=['%7x','ZAMAN ARALIĞI, DT =','%12.6e',' sn'];
format_103=['%7x','TOPLAM SİMÜLASYON SÜRESİ',' =','%12.4e','%2x',' sn
','%5x',' =','%12.5f','%2x',' gün'];
format_104=['%7x','ZARF KALINLIĞI, cld_thck =','%7.4f',' cm'];
format_111=['%7x','DIŞ ZARF SICAKLIĞI, clad_outer_temp =','%8.3f','%2x',' K'];
format_122=[ '\n','%4t','SÜRE (gün)','%22t',' KÜTLE KAZANIMI
(mg/dm2)','%58t','OKSİT KALINLIĞI (mikro m)','%91t','SICAKLIK (K)',' DİF.
KAT. ',' HİDROJEN KONSANTRASYONU ',' HİD. KİRİNİM GERİLİM
ANİZOTR. ',' HİD. AKMA DAVR. ETK. (Mpa) ',' AKMA
GERİLİM FARKI','
Gerinim Sertleşmesi Üsteli,n'];
format_128=['%19t','HEATF','%4x','LiOH','%5x','FNEU','%5x','TOTAL','%54t','
HEATF','%4x','LiOH','%4x','FNEU','%4x','TOTAL','%90t','Z-O','%6x','Y-Z','
(cm2/sn)',' (ppm)',' b_N/b_R',' b_T/b_R',' Enine Y. ','
Haddemeleme Y. ',' Normal Y. ',' Haddemeleme(25C) ',' Enine(25C) ',' Normal(25C) ','
Haddemeleme(400C) ',' Enine(400C) ',' Normal(400C) ',' SH.Enine(25C) ','
SH.Normal(25C) ',' SH.Hadde(25C) ',' SH.Enine(300C) ',' SH.Normal(300C) ','
SH.Hadde(300C) ',' SH.Enine(400C) ',' SH.Normal(400C) ',' SH.Hadde(400C)'];
format_133=['%12.5f','%1x','~',repmat(['%1x','%8.2f']
,1,4),'%53t','~',repmat(['%1x','%7.3f']
,1,4),'%89t','%7.7f','%1x','%7.5f','%12.4e','%1x','%18f','%23e','%1x','%10f','%1x','
%20f','%2x','%10f','%2x','%10f','%2x','%10f','%2x','%13f','%2x','%12f','%2x','%14f',
'%2x','%14f','%2x','%12f','%2x','%12f','%2x','%12f','%2x','%14f','%2x','%14f','%2x',
'%14f','%2x','%14f','%2x','%14f','%2x','%14f','%2x','%14f'];
format_222=['%7x','İSİ AKİSİ, heat_flux =','%7.2f',' W/cm2'];
format_223=['%7x','HIZLI NÖTRON AKİSİ, fast_neu_flux =','%12.6e',' n/cm2.sn'];
format_224=['%7x','[LiOH) KONSANTRASYONU, lioh_conc =','%12.6e','
mol/litre'];
format_299=[ '\n','*****ZARF TAMAMEN OKSİDE
DÖNÜŞTÜ MISSION FAILED***'];

```

```

% format_442=[ '\n' , '\n' , '%7x','Oksit kütle kazanımı ve oksit kalınlığı şu şekilde
tanımlandı:'];
% format_443=['%15x','heat_mass_eff,heat_thck_eff ==> Isı akısı katkısı ile
oksid katkısı'];
% format_444=['%15x','lioh_mass_eff,lioh_thick_eff ==> LiOH Katkısı ile oksit
kalınlığı'];
% format_445=['%15x','irr_mass_eff,irr_thck_eff ==> Hızlı nötron katkısı ile oksit
kalınlığı'];
% format_446=['%15x','total_mass_eff,total_thck_eff ==> Yukarıdaki 3 faktörün
toplamı ile oksit kalınlığı'];
% format_53=['%18x','ZİRKONYUM ESASLI ALAŞIMIN OKSİDASYON
MODELİ', '\n' ];
% format_55=['%2x','ZİRKONYUM ESASLI ZARF MALZEMESİ İÇİN OKSİJEN
DİFÜZYON DENKLEMİNİN ÇÖZÜMÜ:'];
% format_552=[ '\n' , '%15x', 'Dif. Kat. ==>OKSİJEN DİFÜZYON KATSAYISI'];
% format_553=['%15x','O-Z ==> OKSİT-ZARF ARAYÜZ SICAKLIĞI'];
% format_554=['%15x','Y-Z ==> YAKIT-ZARF ARAYÜZ SICAKLIĞI', '\n' ];
format_56=[ '*****' ];
% format_67=[ '\n' , '%10x', 'ZAMANA BAĞLI OKSİT KALINLIĞININ
HESAPLANMASI', '\n' ];
% format_68=[ '\n' , '%13x', '( 1-D SİLİNDİRİK GEOMETRİ )'];
a=zeros(1,50);o2_at_weight=0; lioh_coef=0;
fast_neu_eff_coef=0; zr4_at_weight=0; b=zeros(1,50);
c=zeros(1,50);b_NR=0;b_TR=0;int_cond=0; lioh_conc=0;lioh_thick_eff=0;
xxx=0;z=0;zrc4_yogunluk=0;zpt=0;zptu=0;
co=0;dloc=zeros(1,50);
oxy_conc=zeros(1,50);nonoxi_cld_thck=0;dco=0;dci=0;zro2_density=0;dif_coef=
0;dt=0; dx=0;fast_neu_flx=0; i=0;i_step=0; stp1=0; n=0;
num_lim=0; num_step=0;pbr=0; heat_flux=0; tt=zeros(1,50); pre_trans=0;
post_trans=0; solution=zeros(1,50);times=0;timesd=0;
t=0;fuel_clad_temp=0;oxi_clad_temp=0;run_time=0;

d_time=0;d_timet=0;tk_cond=0;tkk_cond=0;zro2_tcd=0;zro2_tc=0;cld_thck=0;cld
_thckm=0;clad_outer_temp=0;ox_rate_u=0;kutle_kazanımı=0;heat_mass_eff=0;t
otal_mass_eff=0;irr_mass_eff=0;lioh_mass_eff=0;wtc=0;weight_trans=0;x=0;heat
_thck_eff=0;total_thck_eff=0;irr_thck_eff=0;

end

firstCall=0;
heat_flux = 100; %(<68-180w/cm2)
fast_neu_flx = 5*10^13;
lioh_conc = 0.01;%molal vol.
clad_outer_temp = 640; %k
num_lim = 10000;
num_step = 100;

```

```

cld_thck = 0.07; %cm
dco=0.01072; %m
dci=0.01072-(cld_thck*10e-2); %m
pickup_fraction_zr4=0.175;
cld_thckm = cld_thck.*1.0e4;%mmicro
i_step = 12;
n = fix(i_step - 2);
dt = 8640;
times = dt.*num_lim;
timesd = times./(86400);

%-----
% " Hunem-1.0.OUT "

thismlfid=fopen(strtrim('Hunem-1.0.txt'),'w+');
unit2fid{end+1,1}=10;
unit2fid{end,2}=thismlfid;
unit2fid{end,3}=0;
unit2fid{end,4}='Hunem-1.0.txt';
unit2fid{end,5}=0;
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_53]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_55]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_67]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_68]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_56]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_100],'dt');
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_104],'cld_thck');
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_111],'clad_outer_temp');
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_222],'heat_flux');
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_223],'fast_neu_flux');
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_224],'lioh_conc');
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_103],'times','timesd');
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_442]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_443]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_444]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_445]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_446]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_552]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_553]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_554]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_56]);

stp1 = 0;
stp2 = 0;
run_time = 0.0;
int_cond = 9.3e-4;
t = clad_outer_temp;

```

```

%-----
% Set the initial condition:
for i = 1: i_step
    oxy_conc(i) = int_cond;
    dloc(i) = int_cond;
end
i = fix(i_step+1);
%-----
% Set the boundary conditons:
oxy_conc(1) = 1526.0;
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_122]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_128]);
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_56]);
while (1);

%-----
%
% oxy_conc için (N+1)nci adımı hesaplama:
%
% İterasyon sayaçlarının artışı ve
% Maksimum iterasyon sayısının bulunması:

stp1 = fix(stp1 + 1);
stp1 = fix(stp1 + 1);
run_time = run_time + dt;

%-----
% Oksit kütle kazanım hesabı Hillner modeli
% kullanılarak yapılmıştır.
% zrc4_yogunluk : zircaloy density
% DENS: ZrO2 yoğunluğu
% zr4_at_weight : Zircaloy 4 atom ağırlığı
% o2_at_weight : oksijen atom ağırlığı
% PBR : Pilling-Bedworth oranı

zrc4_yogunluk = 6.5;
zr4_at_weight = 91.22;
o2_at_weight = 32.0;
pbr = 1.57;
d_time = run_time./(24.*3600.);
d_timet = 6.73e-7.*exp(11975.0./t);

if(d_time <= d_timet)

pre_trans =(6.36e11.*exp(-13636.0./t)).^0.333333; %pre-transition
wtc = pre_trans.*d_time.^0.3333;

```

```
zpt = 1.0e-5.*pbr.*(zr4_at_weight.*wtc)./(o2_at_weight.*zrc4_yogunluk);
zptu = zpt.*1.0e4;
```

```
else;
```

```
post_trans = 1.12e8.*exp(-12529.0./t);%post-transition
wtc = post_trans.*d_time;
```

```
zpt = 1.0e-5.*pbr.*(zr4_at_weight.*wtc)./(o2_at_weight.*zrc4_yogunluk);
zptu = zpt.*1.0e4;
```

```
end
```

```
%
```

```
%-----
```

```
% The kutle_kazanimi gain at the transition , weight_trans (mg/dm2)
```

```
%
```

```
weight_trans = 7.53.*10.0.*exp(-553.6./t);
```

```
zro2_density = 5.82;
```

```
x = zptu.*1.0e-4;
```

```
dif_coef = x.*x.*zro2_density.*32.0./(2.0.*run_time.*123.22.*(oxy_conc(1)-
oxy_conc(i_step)).*(1.0e-3));
```

```
z = sqrt(2.0.*3.8506.*(dif_coef./zro2_density).*((oxy_conc(1)-
oxy_conc(i_step))./1000.0).*run_time);
```

```
dx = z./(i_step);
```

```
%
```

```
%-----  
%      cm to mikro m çevrimi,
```

```
%
```

```
%      ZU=Z*1.0E4
```

```
%
```

```
%-----
```

```
% To determine the effect of the İSİ_AKİSİ on the oxide/metal  
% interface temperature"TI"
```

```
% tk_cond : "zirkaloy-4" sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı,W/m.K
```

```
% zro2_tc : "ZrO2" sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı,W/m.K
```

```
tk_cond = 7.848 + 2.2e-2.*t - 1.676e-5.*t.^2.0 + 8.712e-9.*t.^3.0;
```

```
tkk_cond = tk_cond.*1.0e-2;
```

```
zro2_tc = 1.9599 - 2.41e-4.*t + 6.43e-7.*t.^2.0 - 1.94e-10.*t.^3.0;
```

```
zro2_tcd = zro2_tc.*1.0e-2;
```

```
% heat_flux : ısı akısı ,W/cm2
```

```

% heat_flux = Q/alan
% T : oksit/metal interface temperature,K
% fuel_clad_temp : yakıt/yakıt zarfı arayüz sıcaklığı,K
% nonoxi_cld_thck : oksitlenmemiş yakıt zarfı kalınlığı,cm
%
pbr = 1.57;
t = clad_outer_temp;
if(heat_flux>0)
oxi_clad_temp = t +(heat_flux.*z)./zro2_tcd;
nonoxi_cld_thck = cld_thck - z./pbr;
fuel_clad_temp = oxi_clad_temp +(heat_flux.*nonoxi_cld_thck)./tkk_cond;
t = oxi_clad_temp;
else
oxi_clad_temp = t;
nonoxi_cld_thck = cld_thck - z./pbr;
fuel_clad_temp = oxi_clad_temp;
t = oxi_clad_temp;
end
if(stp1 > num_lim)
tempBreak=1;
break;
end

% Üçgen denklem sistemini oluşturur:
%

[dx,dt,dif_coef,i_step,oxy_conc,dloc,a,b,c,tt]=ftrdg(dx,dt,dif_coef,i_step,oxy_conc,
dloc,a,b,c,tt);
%
% Üçgen denklem çözücü fonksiyon:
%
[a,b,c,tt,solution,n]=trdg(a,b,c,tt,solution,n);
for i = 2: i_step - 1
dloc(i) = oxy_conc(i);
end
i = fix(i_step - 1+1);
for i = 2: i_step - 1
oxy_conc(i) = solution(i);
end
i = fix(i_step - 1+1);

% BC:

[oxy_conc,i_step,t]=bcond(oxy_conc,i_step,t);

[oxy_conc,i_step,dx,kutle_kazanımı]=trap(oxy_conc,i_step,dx,kutle_kazanımı);
%

```

```

% isi akisinin oksit kütle kazancina katkisi,heat_mass_eff (mg/dm2)
% isi akisinin oksit kalınlığına katkisi,heat_thck_eff (um)
heat_mass_eff = kütley_kazanımı;
heat_thck_eff = 1.0e-
1.*pbr.*(zr4_at_weight.*heat_mass_eff)/(o2_at_weight.*zrc4_yogunluk);
if(lioh_conc>0)
lioh_coef = 1.0 + 13.125.*lioh_conc;
else
lioh_coef=0;
end
lioh_mass_eff = heat_mass_eff.*lioh_coef;
total_mass_eff = lioh_mass_eff+heat_mass_eff;
lioh_thick_eff = 1.0e-
1.*pbr.*(zr4_at_weight.*lioh_mass_eff)/(o2_at_weight.*zrc4_yogunluk);
total_thck_eff = lioh_thick_eff+heat_thck_eff;
ox_rate_u = 2.59e8;
ox_rate_const1 = 7.46e-15;
co = 8.04e7;
hconst=(pickup_fraction_zr4*5.8*dco*total_thck_eff*16*10)/(6.5*(dco^2-
dci^2)*123);

if((heat_mass_eff >= weight_trans) &&(fast_neu_flux >= 1.0e12))
fast_neu_eff_coef = 1.0+(ox_rate_u./co).*(ox_rate_const1.*fast_neu_flux).^0.24;
irr_mass_eff = heat_mass_eff.*fast_neu_eff_coef;
total_mass_eff = lioh_mass_eff+heat_mass_eff+irr_mass_eff;
hconst=(pickup_fraction_zr4*5.8*dco*total_thck_eff*16*10)/(6.5*(dco^2-
dci^2)*123);
else
fast_neu_eff_coef = 1.10;
irr_mass_eff = heat_mass_eff.*fast_neu_eff_coef;
total_mass_eff = lioh_mass_eff+heat_mass_eff+irr_mass_eff;
hconst=(pickup_fraction_zr4*5.8*dco*total_thck_eff*16*10)/(6.5*(dco^2-
dci^2)*123);
end
irr_thck_eff = 1.0e-
1.*pbr.*(zr4_at_weight.*irr_mass_eff)/(o2_at_weight.*zrc4_yogunluk);
total_thck_eff =irr_thck_eff+lioh_thick_eff+heat_thck_eff ;
xxx = pbr.*cld_thckm;%limiting point/if statement
hconst=(pickup_fraction_zr4*5.8*dco*total_thck_eff*16*10)/(6.5*(dco^2-
dci^2)*123);
% HİDROJENİN YAKIT ZARF MALZEMESİ DAVRANIŞI ÜZERİNDE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ
%HİDROJENE BAĞLI AKMA GERİNİM ANİZOTROPİSİ

if(hconst< 50)&&(hconst > 0)
b_NR =1.79 + (1.82 - 1.79)/(1 + (hconst/444.5019)^56.38393);

```

```

    b_TR =1.022 + (1.093333 - 1.022)/(1 + (hconst/666.603)^58.28871);
    trans= 520 + (560 - 520)/(1 + (hconst/52.39457)^23.4847);
    rolling= 562.754 - 0.4016484*hconst + 0.001043805*hconst^2 - 9.379713e-
7*hconst^3 + 2.952348e-10*hconst^4;
    normal=990 + 1.085693*hconst - 0.007470016*hconst^2 +
0.00001350288*hconst^3 - 7.158556e-9*hconst^4;
elseif((hconst >= 50) &&(hconst < 300))
    b_NR=1.79 + (1.82 - 1.79)/(1 + (hconst/444.5019)^56.38393);
    b_TR =1.022 + (1.093333 - 1.022)/(1 + (hconst/666.603)^58.28871);
    trans= 520 + (560 - 520)/(1 + (hconst/52.39457)^23.4847);
    rolling= 562.754 - 0.4016484*hconst + 0.001043805*hconst^2 - 9.379713e-
7*hconst^3 + 2.952348e-10*hconst^4;
    normal=990 + 1.085693*hconst - 0.007470016*hconst^2 +
0.00001350288*hconst^3 - 7.158556e-9*hconst^4;
elseif ((hconst >= 300) &&(hconst < 450))
    b_NR=1.79 + (1.82 - 1.79)/(1 + (hconst/444.5019)^56.38393);
    b_TR =1.022 + (1.093333 - 1.022)/(1 + (hconst/666.603)^58.28871);
    trans= 520 + (560 - 520)/(1 + (hconst/52.39457)^23.4847);
    rolling= 562.754 - 0.4016484*hconst + 0.001043805*hconst^2 - 9.379713e-
7*hconst^3 + 2.952348e-10*hconst^4;
    normal=990 + 1.085693*hconst - 0.007470016*hconst^2 +
0.00001350288*hconst^3 - 7.158556e-9*hconst^4;
else
    b_NR=1.79 + (1.82 - 1.79)/(1 + (hconst/444.5019)^56.38393);
    b_TR =1.022 + (1.093333 - 1.022)/(1 + (hconst/666.603)^58.28871);
    trans= 520 + (560 - 520)/(1 + (hconst/52.39457)^23.4847);
    rolling= 562.754 - 0.4016484*hconst + 0.001043805*hconst^2 - 9.379713e-
7*hconst^3 + 2.952348e-10*hconst^4;
    normal=990 + 1.085693*hconst - 0.007470016*hconst^2 +
0.00001350288*hconst^3 - 7.158556e-9*hconst^4;
end

```

% AKMA SINIR FARKI HESAPLAMA

%

%Coefficients:

```

p1 = 1.1962e-10;
p2 = -2.2294e-07;
p3 = 0.00010311;
p4 = -0.0018045;
p5 = 5.3947 ;

```

%Coefficients:

```

p11 = -1.1739e-09;
p22 = 1.6143e-06;
p33 = -0.00074807;
p44 = 0.13468;
p55 = 0.96844;

```

%Coefficients:

```

p111 = -1.6675e-07;
p222 = 0.00014933;
p333 = -0.025555;
p444 = 7.2048;

```

%Coefficients:

```

p1111 = 0.0063484;
p2222 = 4.8357;

```

%Coefficients:

```

p11111 = 0.0051261;
p22222 = 4.8775;

```

%Coefficients:


```

p111111 = 0.0052683;
p222222 = 5.4605;

%Coefficients:
p1t = 7.0968e-13;
p2t = -6.935e-10;
p3t = 1.3083e-07;
p4t = 1.9042e-05;
p5t = 0.051301;
%Coefficients:
p1n = -1.6432e-10;
p2n = 1.6875e-07;
p3n = -2.6826e-05;
p4n = 0.057891;
%Coefficients:
p1r = 1.9545e-12;
p2r = -3.586e-09;
p3r = 1.8245e-06;
p4r = -0.00022984;
p5r = 0.068445;
%-----300-----
%Coefficients:
p1_300 = 2.2891e-10;
p2_300 = -1.3854e-07;
p3_300 = -3.9461e-06;
p4_300 = 0.042397;

%Coefficients:
p1_300n = 4.4811e-10;
p2_300n = -4.2769e-07;
p3_300n = 0.00011248;
p4_300n = 0.036545;
%Coefficients:
p1_300h = -1.3372e-09;
p2_300h = 1.2003e-06;
p3_300h = -0.00022616;
p4_300h = 0.051373;
%Coefficients:
p1_400t = -1.6132e-11;
p2_400t = 4.8351e-08;
p3_400t = -2.2299e-05;
p4_400t = 0.025707;
%Coefficients:
p1_400n = 1.9289e-10;
p2_400n = -1.3203e-07;
p3_400n = 3.642e-05;
p4_400n = 0.029011;
%Coefficients:
p1_400h = -6.8776e-10;
p2_400h = 4.9252e-07;
p3_400h = -5.1833e-05;
p4_400h = 0.044936;

if(hconst<650)
ASF_haddeleme= p1*hconst^4 + p2*hconst^3 + p3*hconst^2 + p4*hconst + p5;
ASF_enine = p11*hconst^4 + p22*hconst^3 + p33*hconst^2 + p44*hconst + p55
;
ASF_normal = p111*hconst^3 + p222*hconst^2 + p333*hconst + p444;
ASF_haddeleme400 = p1111*hconst + p2222;
ASF_enine400 =p11111*hconst + p22222;
ASF_normal400=p111111*hconst + p222222;
SH_enine_25= p1t*hconst^4 + p2t*hconst^3 +p3t*hconst^2 + p4t*hconst +p5t ;
SH_normal_25 = p1n*hconst^3 + p2n*hconst^2 +p3n*hconst + p4n;
SH_haddeleme_25 = p1r*hconst^4 + p2r*hconst^3 +p3r*hconst^2 +
p4r*hconst+p5r;
SH_enine_300=p1_300*hconst^3 + p2_300*hconst^2 +p3_300*hconst +p4_300;
SH_normal_300= p1_300n*hconst^3 + p2_300n*hconst^2 +p3_300n*hconst +
p4_300n ;
SH_haddeleme_300= p1_300h*hconst^3 + p2_300h*hconst^2+p3_300h*hconst
+ p4_300h ;
SH_enine_400=p1_400t*hconst^3 + p2_400t*hconst^2 +p3_400t*hconst +
p4_400t ;

```

```

SH_normal_400=p1_400n*hconst^3 + p2_400n*hconst^2 +p3_400n*hconst +
p4_400n;
SH_haddeleme_400= p1_400h*hconst^3 + p2_400h*hconst^2 +p3_400h*hconst
+ p4_400h;
elseif(hconst>650)
ASF_haddeleme=0;
ASF_enine =0;
ASF_normal =0;
ASF_haddeleme400=0;
ASF_enine400 =0;
SH_enine_25=0;
SH_normal_25=0;
SH_haddeleme_25 =0;
SH_enine_300=0;
SH_normal_300=0;
SH_haddeleme_300=0;
end
if(total_thck_eff > xxx)
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_299]);
tempBreak=1;
break;
end
if(stp1 == num_step)
[writeErrFlag]=writeFmt(10,[format_133], 'd_time', 'heat_mass_eff', 'lioh_mass_eff', 'i
rr_mass_eff', 'total_mass_eff', 'heat_thck_eff', 'lioh_thick_eff', 'irr_thck_eff', 'total_thck
_eff', 't', 'fuel_clad_temp', 'dif_coef', 'hconst', 'b_NR', 'b_TR', 'trans', 'rolling', 'normal', 'AS
F_haddeleme', 'ASF_enine', '
ASF_normal', 'ASF_haddeleme400', 'ASF_enine400', 'ASF_normal400', 'SH_enine_
25', 'SH_normal_25', 'SH_haddeleme_25', 'SH_enine_300', 'SH_normal_300', 'SH_h
addeleme_300', 'SH_enine_400', 'SH_normal_400', 'SH_haddeleme_400');
stp1 = 0;
end
end
try;
fclose(unit2fid(find([unit2fid{:,1}]==10,1,'last'),2));
unit2fid=unit2fid(find([unit2fid{:,1}]~=10),:);end

clear all

end

```

7.2. EK 2 – FRAPCON-3.4 Yakıt performans kodu Girdi Verileri

* GOESINS:

FILE05='nullfile', STATUS='scratch', FORM='FORMATTED',

CARRIAGE CONTROL='LIST'

* GOESOUTS:

FILE06='out513r6BOLlower.n', STATUS='UNKNOWN', CARRIAGE CONTROL='LIST'

FILE66='stripf.br3', STATUS='UNKNOWN', FORM='FORMATTED'

/*****

ifa 513 rod 6

\$frpcn

im=55, na=11, nr=17,

ngasr = 45,

\$end

\$frpcon

nplot = 1,

cpl = 0.239, thkclid = 0.705e-3,

dco = 9.13e-3, pitch = 11.87e-3,

den = 95, thkgap = 0.075e-3,

dspgw = 0.0012, enrch = 4.4, fgpav = 2.4e6,

hplt = 0.0115, rc = 1.2e-3, icm = 4,

fortmtl = 2.00, dishsd = 0.0, hdish = 0.0,

icor = 0, idxgas = 1, iplant = -2, iq = 0, jdlpr = 0, fa = 1.0,

deng= 0.0, dspg = 0.0073, roughf = 0.2e-6, roughc = 5e-7,

jn(1) = 19,

totl = 3.53, vs = 8.0,

```

nunits = 0,
flux(1) = 2.5e16, nsp = 0, p2(1) = 16e6, tw(1) = 620,
jst(1)=55*1, go=5000,
qf(1) = 0.0000,0.1736,0.3420,0.5000,0.6428,
0.7660,0.8660,0.9397,0.9848,1.0000,0.9848,
0.9397,0.8660,0.7660,0.6428,0.5000,0.3420,
0.1736,0.0000,
x(1) = 0,0.1961,0.3922,0.5883,0.7844,0.9806,
1.1767,1.3728,1.5689,1.7650,1.9611,2.1572,
2.3533,2.5494,2.7456,2.9417,3.1378,3.3339,
3.5300,
ProblemTime=
0.1, 0.5, 1.0 , 1.5, 6.25,
13.33, 21.25, 30,51.65, 55, 69.50,
81.25, 83.96, 87.71, 90.21, 96.21,
97.00, 123.13, 124.00, 129.13, 135.63,
137.0, 147.63, 149.00, 166.67, 182.04,
183.0, 224.54, 226.00, 254.17, 255.00,
257.71,276.13, 286.13, 310.92,
338.63,380.29, 442.79, 484.46, 540, 570,
600,630,660,690,730, 760, 790,820,850,880,
910,940,970,1000,
qmpy=55*20.25,
slim = 0.05,
$end

```

8. KAYNAKLAR

- [1] Cox, R. P. & Beyer, G. H., "Separation Of Hafnium From Zirconium Using Tributyl Phosphate", Ames Laboratory ISC Technical Reports, Washington, 1955.
- [2] Schemel, J. H., "ASTM Manual on Zirconium and Hafnium", ASTM, Florida, 1977.
- [3] Garzarolli F. and Sabol G.P., EPRI Report 10135522, Assessment of the effect of elevated reactor coolant hydrogen on the performance of PWR Zr-based alloys, 2006.
- [4] Adamson R. B., Cox B., Garzarolli F., Riess R., Sabol G., Strasser A. and Rudling P., ZIRAT11/IZNA6 Annual Report, ANT International, Mölnlycke, Sweden, 2006/2007.
- [5] Cox B., Some Thoughts on the Mechanisms of In-Reactor Corrosion of Zirconium Alloys, Journal of Nuclear Materials, 336, pp. 331-368, 2005
- [6] Hillner E., Corrosion of zirconium base alloys, an overview, ASTM STP 633, pp. 211-235, 1977.
- [7] Iglesias, F.C., Duncan, D.B., Sagat, S. and Sills, H.E. Journal of Nuclear Materials 130, pp. 36-40 (1985).
- [8] Parfenov, B.G., Gerasimov, V.V. and Vendiktova, G.I. Corrosion of Zirconium and Zirconium Alloys, translated from Russian, Jerusalem by IPST Press, 1969.
- [9] Elmoselhi M. et al., A study of the hydrogen uptake mechanism in zirconium alloys, Proc. 10th Int. Symp. On Zr in the Nucl. Ind., Baltimore, MD., ASTM-STP-1245, pp. 62-79, 1994.
- [10] Cox, B., "Hydrogen uptake during oxidation of zirconium alloys". Journal of Alloys and Compounds, 256(1-2), pp. 244-246, 1997.
- [11] Northwood, D.O. and U. Kosasih, "Hydrides and delayed hydrogen cracking in zirconium and its alloys". International Metal Reviews, 28(2), p. 92-121, 1983.

- [12] Kammenzind, B.F., D.G. Franklin, H.R. Peters, and W.J. Duffin. Hydrogen Pickup and Redistribution in Alpha-Annealed Zr-4. in Zirconium in the Nuclear Industry: 11th International Symposium. ASTM STP 1295, p. 338-370, 1996.
- [13] Libowitz, G.G., "A pressure-composition-temperature study of the zirconium-hydrogen system at high hydrogen contents". Journal of Nuclear Materials, 5(2), pp. 228-233, 1962.
- [14] R.B. Borg and G.J. Dien. An Introduction to Solid State Diffusion, San Diego, CA, USA, 1988.
- [15] B. Cox. J. Electrochem. Soc. 24, p. 108, 1961.
- [16] A.R. Massih and P. Rudling, Proc. Ini. Topical Meet. on LWR Fuel Performance, Avignon, France, pp. 716-729, 1991.
- [17] Garzarolli F. et al., Review of corrosion and dimensional behaviour of Zircaloy under water reactor conditions, ASTM STP 681, pp. 91-106, 1979.
- [18] Garzarolli F. and Stehle H., Behaviour of structural materials for fuel and control elements in light water cooled power reactors, Proc IAEA International Symposium on Improvement in water reactor fuel technology and Utilization, Stockholm, pp. 387-407, 1987.
- [19] Rudling P. et al., Zr Alloy Corrosion and Hydrogen Pickup, ANT International, Mölnlycke, Sweden, 2013.
- [20] A.R. Massih and P. Rudling, Proc. Ini. Topical Meet. on LWR Fuel Performance, Avignon, France, pp. 716-729, 1991.
- [21] S. Banerjee and P. Mukhopadyay, "Phase Transformation: Examples from Titanium and Zirconium Alloys," Pergamon Press, pp. 6-11, 42, Oxford, UK, 2007.
- [22] J.J. Duderstadt, W.R. Martin, Transport Theory, Wiley, New York, 1979.
- [23] Laidler, Keith. "The Development of the Arrhenius Equation." J. Chem. Educ., 61 (6), p 494, 1984

- [24] Hillner, E., "Corrosion of Zirconium - Base Alloys - An Overview," Zirconium in the Nuclear Industry; Third Conference, ASTM STP 633, A.L. Lowe, Jr. and G.W. Parry, Eds, ASTM, , pp. 211-235. 1977.
- [25] Ursu, I., Physics and Technology of Nuclear Materials, Pergamon Press Ltd., 1985.
- [26] Pychea, T.D., Bain, G.M., McInteer, W.A., and Pham, C.H., "Waterside Corrosion of PWR Fuel Rods Through Burnups of 50,000 MWD/MTU," In Light Water Reactor Performance, DOE/NE/34130-1, 1985.
- [27] Hillner, E. and Chirigos, J.N., "The Effect of Lithium Hydroxide and Related Solutions on the Corrosion Rate of Zircaloy in 680° F Water," WAPD-TM-30, Westinghouse Electric Corporation, Bettis Atomic Laboratory, 1962.
- [28] Berna, G.A., Beyer, G.A., Davis, K.L. and Lanning, D.D., FRAPCON-3: A computer code for the calculation of steady-state, thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup (No. NUREG/CR--6534-Vol. 2; PNNL--11513-Vol. 2). Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Systems Technology; Pacific Northwest Lab., Richland, WA, USA, 1997.
- [29] Geelhood, K.J., and C.E. Beyer. 2008. "Corrosion and Hydrogen Pickup Modeling in Zirconium Based Alloys," Proceedings of the 2008 Water Reactor Fuel Performance Meeting, Seoul, Korea, October 19–23, 2008.
- [30] M.E. Flanagan, "The Effect Of Hydrogen On The Deformation Behavior Of Zircaloy-4," M. S. Thesis in the Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Penn State University, 2008.
- [31] SCDAP/RELAP5/MOD3.3, Code Manual volume 4, Rev. 2: MATPRO: "A Library of Materials Properties for Light Water Reactors Accident Analysis", NUREG/CR-1650, chapter 4.9., 2001.
- [32] T. M. Link, D. A. Koss, and A. T. Motta, "Failure of Zircaloy Cladding under transverse plane-strain deformation," Nuclear Engineering and Design, vol. 186, pp. 379-394, 1998.
- [33] R. Hill, The Mathematical Theory of Plasticity: Oxford Univ. Press, 1950..

- [34] W. A. Backofen, Deformation Processing. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Co., 1972.
- [35] P. Delobelle, P. Robinet, P. Bouffioux, P. Greyer, and I. LePichon, "A Unified Model to Describe the Anisotropic Viscoplastic Zircaloy-4 Cladding Tubes," in 11th International Symposium on Zr in the Nuclear Industry, ASTM STP 1295 Garmisch-Partenkirchen, pp. 373-393, 1996.
- [36] J. S. Bradbrook, G. W. Lorimer, and N. Ridley, "The Precipitation of Zirconium Hydride in Zirconium and Zircaloy-2," Journal of Nuclear Materials, vol. 42, pp. 142-160, 1972.
- [37] J. E. Bailey, "Electron microscope observations on the precipitation of Zirconium Hydride in Zirconium," Acta Metallurgica, vol. 11, pp. 267-280, 1963.
- [38] J. B. Bai, N. Ji, D. Gilbon, and J. L. Lebrun, "Microstructural study by XRD profile analysis and TEM observations on hydrided recrystallized zircaloy-4," Scripta Metallurgica et Materialia, vol. 26, pp. 369-374, 1992.
- [39] J. Fiala, J. Čadek, Mater. Sci. Eng. 75, 117–126, 1985.
- [40] C. Nam, B.-K. Choi, M.-H. Lee, Y.-H. Jeong, J. Nucl. Mater. 305, 70–76, 2002.
- [41] V. Fidleris, J. Nucl. Mater. 159, 22–42, 1988.
- [42] K.L. Murty, I. Charit, Prog. Nucl. Energy 48 (2006) 325–359.
- [43] N. Rupa, M. Clavel, P. Bouffioux, C. Domain, A. Legris, ASTM STP 1423, pp.811–834., 2002,
- [44] Jung, Yang-II, Seol, Yong-Nam, Choi, Byoung-Kwon, & Park, Jeong-Yong, "Thermal creep of Zircaloy-4 tubes containing corrosion-induced hydrogen", Journal of Nuclear Materials, 419, 213-216, 2017.
- [45] Weihermiller, W B, and Allison, G S. "LWR nuclear fuel bundle data for use in fuel bundle handling", p. 26, United States, 1979.

EK 2 - Tez Çalışması Orjinallik Raporu

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : MEHMET CEM TOKER
Doğum yeri : Edirne, TÜRKİYE
Elektronik posta adresi : mehmet-cem.toker@u-psud.fr
Yabancı dili : İngilizce, Rusça, Fransızca

EĞİTİM DURUMU

Lisans :Hacettepe Üniversitesi Nükleer Mühendislik
Yüksek Lisans :Hacettepe Üniversitesi Nükleer Mühendislik
Yüksek Lisans :Ecole Polytechnique, Radyoaktif Atık Yönetimi

İŞ TECRÜBESİ

2009-2011 :Stajyer Mühendis – Bilişim Sektörü (Yazılım Geliştirme)
2016 :Stajyer Mühendis – Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
2016 :Stajyer Mühendis – Elektrik Üretim Anonim Şirketi
2015-2020 :Firma Yöneticisi – Toptan, Perakende Sektörü
2017-2020 :Yarı Zamanlı Çevirmen- Özel Sektör
2020-2022 :YLSY Bursiyeri - Türkiye Atom Enerjisi Kurumu

