



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROJENİN REFRAKTER METALLERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
ETKİLERİ

Yahya AYTEMİŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri
Anabilim Dalı

Eylül-2025
MUŞ
Her Hakkı Saklıdır



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROJENİN REFRAKTER METALLERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
ETKİLERİ

Yahya AYTEMİŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri
Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Halil YILMAZ

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Mustafa KOCABAŞ

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Salih ÖZER

Eylül-2025
MUŞ
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL ve ONAYI

Yahya AYTEMİŞ tarafından hazırlanan “Hidrojenin Refrakter Metallerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri” adlı tez çalışması .../.../2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/ oy çokluğu ile Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Mustafa KOCABAŞ
Konya Teknik Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Halil YILMAZ
Muş Alparslan Üniversitesi,
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü

Üye

Doç. Dr. Salih ÖZER

Muş Alparslan Üniversitesi,
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü

Yukarıdaki sonuç;
Enstitü Yönetim Kurulu/...../..... Tarih ve/..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Selçuk SAĞIR
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Yahya AYTEMİŞ

..... /...../2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİDROJENİN REFRAKTER METALLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Yahya AYTEMİŞ

Muş Alparslan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Halil YILMAZ

Günümüzde modern mühendislik uygulamaları, uzun hizmet ömrü boyunca üstün mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini koruyabilen malzemelere olan ihtiyacı giderek artırmaktadır. Bu bağlamda, tantalum (Ta), vanadyum (V) ve niobyum (Nb) gibi refrakter metaller; yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci ve üstün mekanik özellikleri sayesinde nükleer enerji sistemleri, havacılık, petrokimya ve diğer ileri mühendislik alanlarında kritik öneme sahiptir. Ancak bu metallerin hidrojenle etkileşime girmesi sonucunda ortaya çıkan hidrojen kırılabilirliği (Hydrogen Embrittlement - HE) olgusu, uzun vadeli performanslarını olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Bu tez çalışmasında saf Ta, V ve Nb metallerinin hidrojenle etkileşimleri sonucu oluşan mekanik bozunmalar deneysel yöntemlerle sistematik olarak incelenmiştir. Numuneler hidrojen yüklenmiş ve yüklenmemiş durumda karşılaştırılmış, elde edilen gerilme-gerinim eğrileri ve mikroyapısal karakterizasyon sonuçları detaylı olarak değerlendirilmiştir. Bulgulara göre, Nb'de hidrojen yüklenmesi maksimum dayanımı yaklaşık 200 MPa'dan 230 MPa'a yükseltmiş, ancak süneklik %28'den %25'e düşmüştür. Ta'da hidrojen yüklenmemiş numuneler yaklaşık 470 MPa seviyesinde dayanım ve %7-8 uzama gösterirken, hidrojen yüklenmiş numunelerde dayanım 300 MPa'a gerilemiş, buna karşın uzama %15-16 seviyelerine yükselmiştir. V için ise hidrojen yüklenmesi dayanımı 210 MPa'dan 190 MPa'a düşürmüş, fakat sünekliği %15'ten %20 seviyelerine çıkarmıştır. Bu farklı davranışlar, hidrojenin söz konusu metallerle olan çözünürlük, difüzyon ve etkileşim mekanizmalarının değişkenliği ile açıklanabilir. Elde edilen tüm bu sonuçlar, hidrojenin refrakter metaller üzerindeki etkilerinin metal türüne ve kristal yapıya bağlı olarak değiştiğini açıkça göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma hidrojenin Nb, Ta ve V metallerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini hem sayısal hem mikroyapısal olarak detaylı biçimde ortaya koyarak, hidrojen direncinin artırılmasına yönelik malzeme geliştirme çalışmalarına bilimsel veri sağlamaktadır. Ayrıca, gelecekte yapılacak araştırmalarda yüksek sıcaklık koşullarında hidrojen etkilerinin, farklı gerinim oranlarının ve alaşımlama stratejilerinin incelenmesi önerilmektedir. Bu bağlamda çalışma, hidrojen ekonomisi ve nükleer enerji gibi stratejik alanlarda kullanılabilecek daha güvenilir ve dayanıklı malzemelerin tasarımına katkı sunmaktadır.

2025, 38 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Hidrojen kırılabilirliği, mekanik davranışlar, mikroyapı, refrakter metaller

ABSTRACT
MS THESIS
THE EFFECTS OF HYDROGEN ON THE
MECHANICAL PROPERTIES OF REFRACTORY METALS

Yahya AYTEMİŞ

Muş Alparslan University
Natural and Applied Science
Department of Nuclear Energy and Energy Systems

Advisor: Assistant Prof. Halil YILMAZ

In modern engineering applications, there is an increasing demand for materials that can retain their superior mechanical, thermal, and electrical properties over long service lifetimes. In this context, refractory metals such as tantalum (Ta), vanadium (V), and niobium (Nb) have attracted considerable attention due to their high-temperature strength, wear resistance, and excellent mechanical properties, making them essential for nuclear energy systems, aerospace, petrochemical industries, and other advanced technologies. However, the phenomenon of hydrogen embrittlement (HE), which occurs as a result of the interaction of these metals with hydrogen, can significantly degrade their long-term performance.

In this thesis, the mechanical degradation mechanisms of pure Ta, V, and Nb metals exposed to hydrogen have been systematically investigated by experimental methods. Tensile tests were performed on hydrogen-charged and uncharged samples, while microstructural characterization was carried out using optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and electron backscatter diffraction (EBSD). The results reveal that hydrogen affects each refractory metal differently. For Nb, hydrogen charging increased the maximum strength from approximately 200 MPa to 230 MPa, while reducing ductility slightly from ~28% to ~25%. In Ta, the uncharged specimens exhibited a maximum strength of ~470 MPa and an elongation of 7–8%, whereas hydrogen charging reduced the strength to ~300 MPa but increased elongation to 15–16%. For V, hydrogen charging decreased the strength from 210 MPa to 190 MPa, while enhancing ductility from 15% to 20%. These findings indicate that the influence of hydrogen strongly depends on the type of refractory metal, their crystal structure, hydrogen solubility, and diffusion characteristics.

In conclusion, this study provides comprehensive insight into the mechanical and microstructural responses of Nb, Ta, and V under hydrogen exposure. The results not only contribute to the understanding of hydrogen–metal interactions at the macroscopic and microscopic levels but also provide valuable knowledge for the development of hydrogen-resistant refractory metals. Future studies should focus on high-temperature testing, strain-rate-dependent behaviors, advanced fracture surface analysis, and computational modeling (e.g., DFT simulations). The outcomes of this work are expected to support the design of more reliable and durable materials for strategic applications such as nuclear energy and the emerging hydrogen economy.

2025, 38 Pages

Keywords: Hydrogen embrittlement, mechanical properties, microstructure, refractory metal

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince başta çağdaş ve kaliteli yaklaşımı ile hizmet sunan Muş Alparslan Üniversitesi'ne, yardım ve katkılarıyla bana yol gösteren kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Halil YILMAZ'a, bütün hayatım boyunca büyük bir sabır ve ilgi ile beni destekledikleri için aileme ve manevi desteklerinden dolayı biricik eşim Tuğba AVCI AYTEMİŞ'e en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Yahya AYTEMİŞ
MUŞ-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Hidrojenin Genel Özellikleri	3
2.2. Hidrojenin Nüfuziyeti.....	3
2.2.1. Absorpsiyon (yüzeyde hidrojenin tutulması)	3
2.2.2. Nüfuziyet (metal içine geçiş).....	3
2.2.3. Metal içinde difüzyon.....	3
2.2.4. Etkiler ve sonuçlar	3
2.3. Hidrojen Nüfuziyeti Üzerinde Etkili Faktörler.....	4
2.3.1. Metal türü	4
2.3.2. Sıcaklık ve basınç	4
2.3.3. Çevresel şartlar	4
2.3.4. Metal yapısı	4
2.4. Hidrojen Kırılgenliği (HE)	4
2.4.1. Hidrojen kırılgenliğinin sınıflandırılması.....	7
2.4.1.1. Hidrojenin çevresel kırılgenliği (HEE)	8
2.4.1.2. Hidrojenin dâhili kırılgenliği (IHE).....	8
2.4.1.3. Hidrojenin reaksiyon kırılgenliği (HRE).....	9
2.4.2. Hidrojen kırılgenliğinin etkileri.....	9
2.4.2.1. Hidrojenin metalik malzemeler üzerine etkileri	11
2.4.2.1.1. Alüminyum ve alüminyum bazlı alaşımlara etkileri.....	11
2.4.2.1.2. Bakır ve bakır bazlı alaşımlara etkileri	12
2.4.2.1.3. Nikel ve nikel bazlı alaşımlara etkileri.....	12
2.4.2.1.4. Titanyum ve titanyum bazlı alaşımlara etkileri.....	12
2.4.2.1.5. Demir esaslı alaşımlara ve çeliklere etkileri	13
2.4.2.1.6. Süper alaşımlara etkileri.....	14
2.4.3. Hidrojen kırılgenliğine etki eden faktörler	14
2.4.3.1. Basınç	14
2.4.3.2. Sıcaklık.....	15
2.4.3.3. Isıl işlem ve ürün şekilleri	15
2.4.3.4. Alaşım bileşimleri	15
2.4.3.5. Yüzey işlemi	16
2.5. Refrakter Metaller	16
2.5.1. Genel özellikler	16

2.5.2.	Kullanım alanları	17
2.5.3.	Hidrojenin refrakter metaller üzerine etkileri	17
2.5.3.1.	Molibden.....	17
2.5.3.2.	Tungsten	18
2.5.3.3.	Vanadyum.....	19
2.5.3.4.	Niobyum	19
2.5.3.5.	Tantalyum.....	20
2.6.	Refrakter Metallerin Hidrojen Etkilerinin Karşılaştırılması.....	21
3.	MATERYAL ve YÖNTEM.....	22
3.1.	Materyal ve Metalografik Yüzey İşlemleri	22
3.2.	Mikroyapı Karakterizasyonu	23
3.3.	Hidrojen Yükleme İşlemleri	24
3.4.	Çekme Testleri.....	24
4.	ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA.....	26
4.1.	Mikroyapı Analizi	26
4.2.	Gerilme-Gerinim Eğrileri	27
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	31
KAYNAKLAR		33
ÖZGEÇMİŞ		38

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

°C	: Derece santigrat
a	: Hidrojen aktivitesi
Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
C	: Karbon
Cb	: Kolombiyum
CH ₄	: Metan
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
CuO ₂	: Bakır oksit
F	: Fahrenheit
Fe	: Demir
H ₂	: Hidrojen gazı
H ₂ S	: Hidrojen sülfid
HBr	: Hidrojen bromür
HCl	: Hidrojen klorür
K	: Kelvin
k	: Boltzmann sabiti
Mg	: Magnezyum
Mn	: Manganez
Mo	: Molibden
NaCl	: Sodyum klorür
Nb	: Niobyum
Ni	: Nikel
Pd	: Paladyum
Pt	: Platin
Re	: Renyum
Ta	: Tantalyum
Th	: Toryum
Ti	: Titanyum
TiO ₂	: Titanyum oksit
V	: Vanadyum
W	: Tungsten
Zr	: Zirkonyum

Kısaltmalar

AISI	: Amerikan demir ve çelik enstitüsü
EBSD	: Elektron geri saçılım kırınımı

EDM	: Elektro-erozyon yöntemi
FCC	: Yüzey merkezli kübik
G	: Gibbs serbest enerjisi
HAGB	: Yüksek açılı tane sınırı
HE	: Hidrojen kırılgenlığı
HEE	: Hidrojenin çevresel kırılgenlığı
HRE	: Hidrojenin reaksiyon kırılgenlığı
IHE	: Hidrojenin dâhili kırılgenlığı
ksi	: İnç kare başına kilo pound
kv	: Kilovolt
LAGB	: Düşük açılı tane sınırı
ml	: mililitre
mm	: Milimetre
Mol	: Kimyasal madde miktarının birimi
Mpa	: Megapascal
ηH	: Denge halindeki hidrojen atomu sayısı
ppm	: Milyonda bir birime verilen ad
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SSC	: Sülfür gerilim çatlağı
T	: Mutlak sıcaklık
V	: Volt
µm	: Mikrometre

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	HEE, İHE ve HRE tipine dayalı hidrojen, stres ve malzeme faktörlerinin sınıflandırılması.....	8
Şekil 3.1	Çekme test numunelerinin teknik resim gösterimi ve EDM ile hazırlanmış numunelere ait gerçek numune görselleri sırasıyla V, Ta ve Nb	23
Şekil 3.2	Katodik hidrojen yükleme test düzeneği görüntüsü.	24
Şekil 3.3	DEBEN mikro-germe test cihazının görüntüsü.	25
Şekil 4.1	Nb, Ta ve V metallerine ait optik mikroskop görüntüleri (üst sıra: 20X, alt sıra: 50X).....	26
Şekil 4.2	Nb, Ta ve V metallerine ait sem görüntüleri ve bunlara karşılık gelen EBSD kristal yönelim haritaları.....	27
Şekil 4.3	Hidrojen yüklenmiş (H-yüklenmiş) ve hidrojen yüklenmemiş (H-yüklenmemiş) durumda (a) niobyum (Nb), (b) tantalyum (Ta) ve (c) vanadyum (V) metallerine ait gerilme-gerilim eğrileri.....	30

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Saf refrakter metallerin bazı mekanik ve kimyasal özellikleri	16
Çizelge 2.2	Refrakter metallerin hidrojen etkisinin kıyaslanması	21



1. GİRİŞ

Günümüzde malzemeler, hidrojenin elektrokimyasal süreçler sonucunda açığa çıktığı zorlu koşullarda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu durum, hidrojen kırılgenliği (HE) yoluyla malzeme bozulmasına neden olabilmektedir (Lynch, 2012). Metallerde çözünen hidrojen, iki temel türe ayrılır: metal kafesleri içinde hareket edebilen difüzyonel hidrojen ve dislokasyonlar gibi yapısal kusurlar tarafından hapsedilen difüze olamayan hidrojen (Yamane ve ark., 2021). Hidrojen ve diğer arayar elementlerinin metallerde çözünmesi, bu malzemelerin özelliklerini etkileyebilir. Bu etkiler özellikle düşük sıcaklıklarda daha belirgin hale gelir ve sünekten gevreğe geçiş sıcaklığının (DBTT) artmasına, hacim merkezli kübik (BCC) yapıli metallerin akma davranışının değişmesine yol açabilir. Çözelti içindeki hidrojenin neden olduğu gevrekleşmeye en bilinen örnek, çeliklerde gözlemlenmektedir (Chandler ve Walter, 1968). Hidrojen, metallerin mikro yapısını değiştirebilir; bu değişiklikler faz ayrışmaları ya da gerinim kaynaklı dönüşümlerle ortaya çıkabilir. Ayrıca boşluklar, dislokasyonlar, çatlaklar ve hidrürler oluşabilir; yüzeyde yapısal değişiklikler ve mikro yapı içindeki gerinim/gerilim durumu etkilenerek malzemenin gevrekleşmesine neden olmakla birlikte yerel korozyona karşı daha duyarlı hale gelebilir (Lynch, 2012; Ohaeri ve ark., 2018; Örnek ve ark., 2018).

HE, bugüne kadar hem demir esaslı hem de demirden farklı metal ve alaşımlarda yaygın şekilde araştırılmıştır. Bu konu, özellikle refrakter metaller açısından büyük önem taşımaktadır (Chandler ve Walter, 1968). Refrakter metaller, özellikle molibden (Mo) ve tungsten (W) nükleer füzyon reaktörlerinde plazmaya temas eden yüzey malzemesi, uzay-havacılık bileşenleri ve yarı iletken üretim ekipmanlarında en umut verici aday malzemeler arasında yer almaktadır (Roth ve Schmid, 2011; Massone ve Kiener, 2022). Bu metaller; yüksek ergime noktaları, mükemmel ısıl iletkenlikleri, düşük hidrojen çözünürlükleri, yüksek sputtering dirençleri ve üstün termo-mekanik özellikleri sayesinde bu uygulamalarda vazgeçilmezdir. Ancak hidrojenin bu metaller tarafından soğurulması, gevrekleşmeye ve öngörüleemeyen hatta felaketle sonuçlanabilecek malzeme hasarlarına neden olabilir (Fielding ve ark., 2014; Bhadeshia, 2016; Koyama ve ark., 2017). Bu nedenle, HE'nin bu malzemeler üzerindeki olumsuz etkileri, uzun süreli güvenilirlik ve emniyet açısından ciddi endişelere yol açmaktadır.

Bugüne kadar HE üzerine yapılan araştırmaların çoğu paslanmaz çelik ve yüksek dayanımlı çelikler üzerine yoğunlaşmıştır (Lynch, 2012). Ancak, Ta, V ve Nb gibi

refrakter metallerin mekanik özellikleri üzerinde hidrojen girişinin etkileri yeterince araştırılmamış ve bu alanda bilgi eksikliği sürmektedir. Bu çalışma da Ta, V ve Nb gibi metallerin HE'ye karşı duyarlılığını anlamayı hedeflemektedir. Bu amaçla, hidrojen atomlarının tantalum (Ta), vanadyum (V) ve niobyum (Nb) metallerindeki etkileşimlerini mikroskobik düzeyde açıklamak üzere deneysel hidrojen yükleme yöntemleri kullanılmaktadır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Hidrojenin Genel Özellikleri

Hidrojen kimyasal olarak yalnızca bir proton ile bir elektrondan oluşur ve periyodik tablonun en üstünde yer alan en hafif elementtir. Hidrojen kâinatta en çok bulunan elementler arasında yer almaktadır. Dünyadaki görünür maddenin %90'dan fazlası hidrojenden oluşmaktadır. Güneş tamamen hidrojenden oluşan bir yıldız olmakla birlikte hayatımızda çok önemli bir yere sahiptir. Saf haliyle hidrojen, oda sıcaklığında iki atom içeren bir gaz oluşturur. Hidrojen evrende en bol bulunan element olmasına karşın dünyada saf halde bulunmaz (Johnston ve ark., 2005).

2.2. Hidrojenin Nüfuziyeti

Hidrojenin metaller üzerine nüfuziyeti; hidrojen atomlarının bir metalin yüzeyinden malzeme içerisine doğru hareket etmesi ve metalin kristal yapısına nüfuz etmesi sürecidir. Bu olgu, özellikle yüksek sıcaklık ve basınç altında önemli hale gelir. Hidrojenin metaller üzerine nüfuziyeti şu şekilde özetlenebilir:

2.2.1. Absorpsiyon (yüzeyde hidrojenin tutulması)

Hidrojen gazı metal yüzeyine temas ettiğinde, hidrojen molekülleri (H_2) atomlarına ayrılır ve bu atomlar metal yüzeyine adsorbe olur.

2.2.2. Nüfuziyet (metal içine geçiş)

Adsorbe olmuş hidrojen atomları, metalin yüzeyinden malzeme içerisine doğru difüze olur. Bu işlemler sonrasında, hidrojen atomlarının metalin kristal kafesi içerisinde hareket etmesine sebep olur.

2.2.3. Metal içinde difüzyon

Hidrojen atomları metalin iç kısmına doğru difüze olur ve kristal yapının içinde hareket eder. Bu süreç, metalin türüne, sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişir.

2.2.4. Etkiler ve sonuçlar

Hidrojen nüfuziyeti, metalin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. HE adı verilen bir durum meydana gelebilir. Bu, metalin sünekliğinin değişmesi, kırılgan hale gelmesi ve malzemenin bünyesel kararlılığını değiştirebilir.

2.3. Hidrojen Nüfuziyeti Üzerinde Etkili Faktörler

2.3.1. Metal türü

Farklı metallerin hidrojen nüfuziyetine karşı farklı direnç seviyeleri vardır. Örneğin, çelikler genellikle hidrojen nüfuziyetine karşı daha hassastır.

2.3.2. Sıcaklık ve basınç

Yüksek sıcaklık ve basınç, hidrojen atomlarının metal içinde difüzyonunu hızlandırabilir.

2.3.3. Çevresel şartlar

Nem, oksijen gibi dış ortam etkileşimleri hidrojen nüfuziyetini tetikleyebilir.

2.3.4. Metal yapısı

Metalin kristal yapısı, tane sınırları ve dislokasyon yoğunluğu da hidrojenin metal içindeki hareketini etkileyen faktörlerdir. Hidrojen nüfuziyeti özellikle enerji sektörü (hidrojen depolama ve taşıma), petrokimya, nükleer endüstri ve metalürji alanlarında kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle, metal malzemelerin seçimi ve işlenmesi sırasında hidrojen nüfuziyetine karşı dirençli malzemelerin kullanılması büyük önem taşır.

2.4. Hidrojen Kırılğanlığı (HE)

Atomik hidrojenin varlığından dolayı bir metalin kırılma dayanıklılığının veya sünekliğinin azaldığı bir işlem olarak tanımlanır (Lee ve Woods, 2016). Atomik hidrojenin nüfuziyeti için direkt ihtiyaç olan saf haldeki H_2 ilave olarak, zarar verici etkisiyle birlikte, hidrojen sülfür (H_2S), hidrojen klorür (HCl) ve hidrojen bromür (HBr) gibi hidrojen bulunduran farklı gaz çeşitleriyle de HE görülebilir. H_2S ortamı, benzer çevre koşulları ve gaz basıncı durumlarında çeşitli alaşımlar için doğal haldeki H_2 çok daha risk teşkil edecek kırılğanlık hallerine sebep olabilmektedir. Kırılma yüklerindeki zayıflamayla birlikte, metalin akma mukavemetinin çok altındaki seviyelerde gevrekleşme olayı meydana gelebilir. HE münferit keskin çatlaklar halinde görünür. Başlangıçtaki çatlak açıklıkları ve çatlağın yayılmasıyla ilişkili lokal deformasyon o kadar küçük olabilir ki özel tahribatsız muayeneler dışında bunların tespit edilmesi zordur. HE'den kaynaklanan çatlaklar, normalde oldukça sünek olan malzemelerde çok az makroskobik mekanik deformasyon kanıtıyla birlikte hızla büyüyebilir. Yavaş gerin

oranlı test ortamında (SSR) malzeme bir baskı durumundayken ve gaz fazındaki hidrojene maruz bırakılırken işlem sonucundaki malzemenin bütünlüğünün hidrojen bozulmasıyla yorumlamak için ayrıntılı ve geniş çaplı araştırma süreçleri kullanılır. H₂'nin yaratmış olduğu etkiler (çekme dayanımı, süneklik, kırılma, yorulma ve çatlak oluşum hızı) gibi malzemenin bütünsel yapısı üzerindeki tesirleri, hidrojenin çevresel gevrekleşmesi (HEE) dizinlerindeki sonuçlarından doğabilecek sebeplere göre analiz edilmektedir. HE etkilerinin şiddetinin aynı zamanda basınç, sıcaklık, H₂ saflığı gibi çevresel faktörlerden de etkilendiği görülmektedir (Lee ve Woods, 2016). Yüksek mukavemetli malzemeler, hidrojen ortamında çalışırken HE'ye karşı çok hassastır (Zamanzade ve Barnoush, 2014). HE'ye duyarlı malzemeler olarak yüksek mukavemetli ve manganlı çelikler, alüminyum alaşımları, titanyum (Ti), magnezyum (Mg) ve Mg alaşımları yer almaktadır (Bochkaryova ve ark., 2015). Alüminyum alaşımları da eş zamanlı korozyon çatlaması ile birlikte HE'den etkilenir (Bochkaryova ve ark., 2015). HE temel özelliklerinden biri, gerinim hızına karşı duyarlı olması ve zamanla gecikmeli kırılma eğilimi taşımasıdır. HE etkisi, düşük deformasyon (gerinim) hızlarında daha belirgin hale gelir. Buna karşılık, daha yüksek gerinim hızlarında uygulanan yüklemelerde malzemenin HE'ye karşı duyarlılığı azalma eğilimi gösterir. HE etkisine maruz kalan parçalarda zamanla oluşan gecikmeli kırılmalara karşı hassasiyet artmaktadır. Ayrıca çelik ve alaşımlarda hidrojen taşınmasının, hidrojenin atomik düzeyde difüzyonu ve dislokasyonlar boyunca taşınması (hareket etmesi) sayesinde gerçekleştiği bilinmektedir (Wang ve ark., 2007).

HE kafes dekohezyonu veya lokalize plastisite olaylarıyla meydana gelmektedir. Örneğin, hidrojen dislokasyon olayını pasif hale getirir ve atomlar arasındaki bağlanma enerjisinde bir zayıflamaya neden olarak dekohezyona yol açar veya dislokasyon faaliyetlerini artırarak aşırı lokalize plastisiteye neden olur (Barrera ve ark., 2018).

(Örnek ve ark., 2023) tarafından yapılan çalışmalarda nikel (Ni) bakımından zengin östenit, östenit ve ferrit ile nikel hüdrür (Ni₂H) fazlar üzerinde çeşitli hidrostatik gerilmeler uygulanmıştır. Yapılan gerilmelerden sonra elastik karakterler ayrı ayrı fazlar baz alınarak hesaplanmıştır. Kübik bir birim hücrenin içine çekilen hidrojen homojen kafes gerilmesi oluşturmuştur. Bundan dolayı, hidrostatik gerilmelerin uygulanması ve etkilerini araştırmak kabul edilebilir bir yöntemdir. Östenit fazı hidrojenin birçoğunu

kendine çekebildiği gibi ve ferrit fazında hidrojen kaynaklı hasarlara neden olacak etkilere karşı direnç sağlamıştır.

Bir kusurun oluşum enerjisi (ΔH^{Hi}_f) bir metalik kafeste (Zhang ve Northrup, 1991)'a göre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\Delta H^{Hi}_f = E^{def} - E^{pure} - \mu_H \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de, elektrokimyasal hidrojen yüklenmesi esnasında aralıklı hidrojenin girdi enerjisi ile hidrojenin kimyasal potansiyel enerjisi arasındaki doğrudan ilişkiyi gösterir. Hidrojen kimyasal potansiyeli, μ_H elektrolit bileşenleri, pH, katot potansiyeli ve yüzeydeki atomik hidrojen konsantrasyonunu ve termodinamik aktiviteyi etkileyen birçok parametreden oluşur (Gavriljuk ve ark., 2022). μ_H tek bir hidrojen atomu için şu şekildedir:

$$\mu_H^{H_2} = \partial G / \partial n_H \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)'de G , Gibbs serbest enerjisi ve n_H , denge halindeki hidrojen atomlarının sayısıdır. Hidrojen atomunun kimyasal potansiyeli, hidrojen molekülünün kimyasal potansiyelinin yarısı olarak kabul edilir ($\mu_H = 1/2\mu_{H_2}$) ve bu gaz fazındaki H_2 ile dengede olan hidrojen evrim potansiyelinin koşulları altında gerçekleşir. Atomik hidrojen kimyasal potansiyeline atıfta bulunmanın sebebi (μ_H) moleküler hidrojenin kimyasal potansiyeline (μ_{H_2}) elektrokimyasal katodik polarizasyon sırasında hidrojen üretiminin neredeyse stabil bir halde olması ve atomik hidrojenin elektrolit içindeki hidrojen gazıyla dengede olmasıdır (Freysoldt ve ark., 2014).

μ_H belirli bir T sıcaklığında termodinamik aktiviteye doğrudan bağlanabilir:

$$\mu_H = E_{ref} + \mu^0(T) + kT \ln(a) \quad (2.3)$$

E_{ref} deneysel şartlara bağlı durumdaki referans hidrojen rezervuar enerjisi, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve a hidrojen aktivitesidir. Hidrojen aktivitesi 1 olarak kabul edilir. Bundan ötürü, hidrojen nüfuziyeti sırasında, μ_H hidrojen aktivitesindeki artış kaçınılmazdır (Boettcher ve ark., 2020).

Hidrojen, metallerin mikro yapısında çeşitli etkileşimlere girerek kırılma mekanizmalarını etkileyebilir. Özellikle dislokasyon hareketliliğini artırarak, tane içi kırılmaların oluşumuna zemin hazırlayabilir. Bu süreç, hidrojenin dislokasyonları

hızlandırarak, mikro çatlakların oluşmasına ve bunların birleşerek kırılmalara yol açmasına neden olabilir. Örneğin, krom kobalt nikel alaşımında (CrCoNi) yapılan bir çalışmada, hidrojenin dislokasyon hareketini artırarak, tane içi çatlakların oluşumunu tetiklediği gözlemlenmiştir (Yan ve ark., 2023).

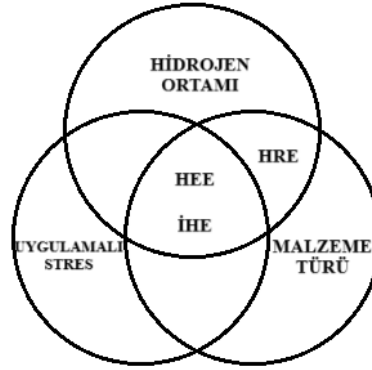
2.4.1. Hidrojen kırılabilirliğinin sınıflandırılması

Hidrojen ve metallerin birbirini etkileme olayı, metaller içindeki farklı elementlerin bileşikler teşekkül etmesiyle neticelenir. Bu karmaşık etkileşimler nedeniyle yayınlanmış literatürlerde HE'nin tanımı konusunda çok fazla kafa karışıklığı bulunmaktadır. HE'nin malzeme üzerine etkisi düşünüldüğünde tüm yapının kırılabilir duruma gelmesi beklenemez. Malzemenin yapısındaki değişimler çoklukla gözle görülemeyecek şekilde ve yerel çatlak oluşumları olarak kendini belli ettirir. Hidrojen ile metal ilişkileri üç farklı HE olayıyla açıklanır:

- a) Hidrojenin çevresel kırılabilirliği (HEE)
- b) Hidrojenin dâhili kırılabilirliği (IHE)
- c) Hidrojenin reaksiyon kırılabilirliği (HRE)

Çoğunlukla HEE, malzemelerin yüksek basınçlı hidrojen mahalinde tutulduğunu ifade eder. IHE'nin tanımı genellikle hidrojen kaynağının HEE'deki gibi yüksek basınçlı gazlı bir sistemden değil, IHE için hidrojenin elektrokaplama, korozyon, katodik yükleme ve hatta termal yükleme gibi elektrokimyasal bir süreçten geldiğini ima eder. İlâveten IHE için hidrojen kökeni de ıslaklıktan kaynaklanabilir. Metallerin üretim ve işleme aşamasında IHE metallere girebilir. HEE ve IHE malzeme üzerine etkileri çok benzerdir. Her iki HE olayı, dışarıdan geçerli stres gerektirir. HRE ise hidrojenle malzemenin kimyasal reaksiyona girmesiyle kalıcı hasar oluşturur. HRE hasarları dış etmenlerden bağımsız malzemeye stres oluşturmada da ortaya çıkabilir. Şekil 2.1.'de HE'nin nasıl etkilediğine dair bilgi vermektedir. Şekil 2.1.'de üç adet bölgenin kesişim noktasının boyutu, malzeme türü, HE ve uygulanan gerilim etkisinin ne kadar artırılabilir veya azaltılabilir üzerine araştırma yapmak önemli bir veridir. Uygulamalı gerilim ile malzeme türü aynı anda hidrojene maruz bırakıldığında HEE ile IHE etkilerini ortaya çıkardığı anlaşılmaktadır. HEE ile IHE'ye birbirinden ayıran kilit nokta, IHE'nin hidrojen kaynağının çoğunlukla şiddetli basınçlı dış etkiden olmaması, hidrojenin istemsiz oluşumu ve malzemenin içine çekilen hidrojenin, geçerli bir gerilim koşullarında zamanla gevrekleşmesine sebep olabilmesidir. HRE ise aşağıda belirtilen diyagram içerisinde uygulamalı gerilim ortamından etkilenmediği ve sadece malzeme türüyle

alakalı olduğu anlaşılmaktadır. HEE, IHE ve HRE'ye ait detaylı bilgiler aşağıdaki konu başlıklarında incelenmiştir.



Şekil 2.1 HEE, İHE ve HRE tipine dayalı hidrojen, stres ve malzeme faktörlerinin sınıflandırılması (Lee ve Woods, 2016).

2.4.1.1. Hidrojenin çevresel kırılabilirliği (HEE)

HEE, bir malzeme hem gerilme altındayken hem de kontrollü bir gaz halindeki hidrojen ortamına maruz bırakıldığında, mekanik özelliklerinde gözlemlenen bozulma durumudur. Çatlak başlangıcı genellikle bir çentik ya da yüzey kusurunun yakınındaki bölgede meydana gelir. Bu tür kırılmanın oluşabilmesi için gereken gerilme düzeyleri, genellikle çekme modunda olup bazı hassas malzemeler için akma dayanımının oldukça altında kalabilir. Çoğu durumda, sabit statik yükleme, özellikle uzun süreli uygulandığında, çevrimsel veya dinamik yüklemelere kıyasla HE'ye karşı daha duyarlı sonuçlar doğurur. Ayrıca artık (rezidüel) gerilmeler de bu etkiyi artırabilir ve dış yüklerle birlikte dikkate alınmalıdır. Bu kapsamda, SSR ya da özel olarak tasarlanmış çentikli numuneler üzerinde yapılan statik yükleme testleri, malzemenin hidrojen ortamındaki davranışını değerlendirmek ve bir eşik gerilme seviyesi belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılır. İyi karakterize edilmiş bir malzeme sisteminde bu eşik gerilme değerleri, belirli bir dış yükleme altında HEE'yi önlemek için uygulanabilecek maksimum müsaade edilebilir gerilme düzeyini tanımlamada kullanılabilir (Lee ve Woods, 2016).

2.4.1.2. Hidrojenin dâhili kırılabilirliği (IHE)

IHE, şekillendirme veya bitirme işlemleri sırasında hassas metallere yanlışlıkla hidrojen katılması nedeniyle bazı mekanik özelliklerin bozulması olayıdır. Bu gevrekleşme türü bu işlemler esnasında hidrojenin duyarlı metallere kasıtsız olarak dâhil edilmesinin bir sonucu olarak kabul edilir. Örneğin, IHE oluşum evreleri; malzemenin

asitle temizlenmesi, elektrokaplama, aşındırıcı vb. dâhili işlemlerle hidrojenin nüfuz etmesinin bir sonucudur. Belirtilen işlemler hidrojen iyonlarının salıvermesini sonucu olarak nitelendirilir. Ayrıca IHE, hidrojen iyonlarının boşaltılmasını içeren sulu ortamlarda da ortaya çıkabilir. IHE için çatlaklar çoğunlukla gerilim ölçüsünün çok olduğu kusur kökünün yakınlarında ortaya çıkar (Örnek ve ark., 2023).

2.4.1.3. Hidrojenin reaksiyon kırılganlığı (HRE)

Belirli sıcaklık ve basınçta atomik hidrojen, metal yüzeylere kolayca yayılabilir ve bazı elementler ile bileşiklerle doğrudan tepkimeye girebilir. Ayrıca hidrojen, nispeten düşük sıcaklıklarda metal matrisle tepkimeye girerek metal hidrit gibi metalik bileşikler de oluşturabilir. Bu tip hidrojen kaynaklı hasar Ti ve zirkonyum (Zr) gibi malzemelerde, hatta bazı demir (Fe) ya da çelik esaslı alaşımlarda görülebilen HRE olarak adlandırılır. Örneğin, denklem (2.4)'te kimyasal reaksiyona göre hidrojen ve demir-karbürler arasındaki ortak reaksiyon metan (CH₄) oluşturur:



Yüzeyin alt katmanlarında ve malzeme hacminin derin bölgelerinde, CH₄ gaz moleküllerinin oluşumu ve hareketi çoğunlukla tane sınırlarında yoğunlaşır; burada bulunan kalıntılar, safsızlıklar ve kusurlar gibi metalürjik özellikler, boşluk ve kabarcık oluşumuna neden olarak kırılğan kopmalara zemin hazırlayabilir. HRE duyarlılığı; alaşımda bulunan karbon (C) veya karbür miktarına, hidrojenin yoğunluğuna, gaz basıncına ve genellikle 473 K ila 873,15 K arasındaki sıcaklık değerlerine bağlıdır. Kararlı karbürler içeren alaşımlı çelikler (örneğin krom karbürler), karbon çeliklerinde bulunan sementite (Fe₃C) kıyasla Cr₃C'nin daha yüksek kararlılığı nedeniyle bu tür hidrojen saldırılarına karşı daha dirençlidir. (Lee ve Woods, 2016).

2.4.2. Hidrojen kırılğanlığının etkileri

Hidrojen genellikle metallerde üretim, imalat ve işleme operasyonlarında kullanılmaktadır. Bundan dolayı bir alaşım elementi olarak kabul edilebilir. Metallerdeki yüksek hidrojen oranları mekanik özellikler üzerinde yıpratıcı bir etkiye sahip olabildiği gibi yüksek çözünürlüğünden dolayı birçok olumlu etkiye de neden olabilir (Williamson ve Cox, 1977). Geçmişten günümüze kadar çeliklerin hidrojen tarafından gevrekleştirilmesi büyük bir öneme sahip olmuştur. Literatürde rapor edilen inanılmaz gözlemler silsilesi incelendiğinde hapsolma olaylarını incelemek için çeşitli yolların kullanılabileceğini belirtmektedir. Bunlar ferritik ve paslanmaz çelikler ile refrakter ve

asil metallere ile yapılabilir. Etkiler bir gözlem yoluyla incelenebilir. Bu gözlemler genellikle sürtünme, elektron mikroskobu ve çözünürlük ölçümleriyle tespit etmek mümkündür. Bunun dışında hidrojenin hapsolması, boşluklar, yüzeyler, sınırlar, safsızlık atomları ve çıkıklar ile gözlemlenebilir (Wert, 1978).

Hidrojenin belirli bir metal veya alaşımın mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, söz konusu hidrojen-metal sistemine, özellikle de hidrojenin çözünürlüğüne bağlıdır. Bazı metallere, hidrojenle birlikte katı çözeltiler meydana getirebilir. Bu aşağıda belirtildiği üzere açıklanabilir:

(a) Sievert Yasası, hidrojen gibi gazların metal içindeki çözünürlüğünün, gazın kısmi basıncının kareköküyle orantılı olduğunu belirtir (Rahm, 2021).

(b) Artan sıcaklıkla birlikte, metal fazında hidrojenin çözünürlüğü termodinamik olarak artış gösterir.

Bu metallere, örneğin demir (Fe), platin (Pt), nikel (Ni), kobalt (Co), bakır (Cu), alüminyum (Al) ve gümüş (Ag) endotermik kapaticılar olarak kabul edilir. Sıcaklık arttıkça çözünürlüğün düşmesi halinde, bu tür metallere ekzotermik tıkayıcı olarak adlandırılır. Bu tür metallere Ti, Zr, V, toryum (Th) ve paladyum (Pd) genellikle hidrojenle bileşikler (hidritler) oluşturma eğiliminde olup ve hidrit oluşturuıcı özellik gösterirler (Raymond, 1988).

Bu tez çalışmasında hidrojenin refrakter metallere Mo, W, Nb ve Ta üzerindeki etkileri ve hidrojenin refrakter metalleredeki çözünürlüğünü, geçirgenliğini ve difüzyonunu, refrakter metallere ve hidrojenin faz diyagramını, emilen hidrojeni ve hidrojen ortamının mekanik özellikler üzerindeki etkisini tartışılmakla birlikte daha çok Nb, Ta ve V üzerinde laboratuvar çalışmaları yapılmıştır.

Mo ve W, hidrojen çözünürlüğü bakımından son derece düşük değerlere sahiptir ve bu metallere, hidrojenin etkisinden neredeyse hiç etkilenmezler. Nb ve Ta, hidritler oluşturmak için büyük miktarlarda hidrojeni emebilir ve nispeten küçük miktarlarda ve hidrojenin düşük sıcaklıklarda çözünürlüğü üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Machlin, 2012).

Çözeltideki hidrojen ve diğer ara maddeler metallere özelliklerini etkiler. Etkiler en çok düşük sıcaklıklarda ve sünek, kırılğan ve geçiş sıcaklıklarının yükselmesi ile BBC metallere akma davranışı belirtilerini göstermektedir. Çözeltideki HE etkisine iyi bir örnek olarak çelikler gösterilebilir. En kapsamlı şekilde araştırılmış olan çeliklerin HE, statik yükleme testlerinde gecikmiş gevrek kırılma ve yavaş gerilme hızında daha şiddetli gevrekleşme ile karakterize edilmiştir. Hidrojenin çelikteki gevrekleştirici etkisi henüz

tam olarak aydınlatılmamış olmakla birlikte, hidrojenin belirli bölgelere, özellikle yüksek gerilimli bölgelere difüzyonunun bu etki için gerekli olduğu görüşü yaygın olarak kabul edilmektedir. Bu bölgelerde, kritik bir gerilme ile hidrojen konsantrasyonunun belirli bir kombinasyonuna ulaşıldığında, çatlama meydana gelmektedir. HE sıcaklık ve gerilme hızına benzer belirtileri çeliklerde olduğu gibi V için de gözlemlenmiştir (Magnusson ve Baldwin Jr, 1957). Yüksek mukavemetli çeliklerin atmosfer basınçlı hidrojen ortamında çatlak ilerlemesi üzerinde kararlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir (Johnson, 1969).

2.4.2.1. Hidrojenin metalik malzemeler üzerine etkileri

Hidrojenin metalik malzemeler üzerine olumlu ve olumsuz etkileri söz konusudur. Malzemenin yapısındaki değişiklikler metallerde korozyon, gevrekleşme, metal yorulması gibi etkilerinin olduğu bilinmektedir. Hidrojenin metaller üzerine farklı etkileri olduğu görüşleri mevcut olup genel anlamda en çok kabul gören kısmı 5 ppm değerinden fazla hidrojen içeren metallerde soğuk çatlak riskinin bulunduğu (Durkaya ve ark., 2016). 5 ppm değerinin üzerindeki çözülmüş hidrojen, metallerde çatlamlara, hidrojen kırılmasına ve kabarcıklanmasına neden olarak metalin mekanik özelliklerini tahrip edecek düzeyde etkileyebilmektedir (Durkaya ve ark., 2016).

2.4.2.1.1. Alüminyum ve alüminyum bazlı alaşımlara etkileri

Kuru H_2 ortamının Al ve alaşımları üzerinde ihmal edilebilir etkileri vardır. Hidrojenle ilgili en önemli sorun, genellikle nem etkisi ve dökümhanedeki eritme, döküm ve katılaştırma işlemleri sırasında gazla dolu boşlukların oluşumu ile ilişkilidir. Bu gaz içeren boşluklar, malzemenin mikro yapısında oluşan kusurlardır ve genellikle döküm veya işleme süreçleri sırasında meydana gelir. Bu tür boşluklar, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Özellikle, malzemenin süneklik (plastik şekil değiştirme kapasitesi) ve kırılma tokluğu (düşük sıcaklıkta kırılmaya karşı direnç) gibi temel özellikleri zayıflatır. Sonuç olarak, bu durum malzemenin genel dayanıklılığını ve güvenliğini azaltarak, yüksek gerilmelere maruz kaldığında çatlama veya kırılma olasılığını artırır. Eriyikten soğuma sırasında hidrojen döküm kusurlarına difüze olur ve burada birikir. Düşük sıcaklıklarda hidrojenin katı metal içindeki çözünürlüğünün azalması nedeniyle, çatlaklar meydana gelir. Oda sıcaklığına yakın koşullarda ve 10 ksi (69 MPa) kadar olan basınçlarda, kuru hidrojen gazı, Al alaşımlarında belirgin bir HE etkisi oluşturmaz. Bununla birlikte, yüksek dayanımlı Al alaşımları, sulu bir çözelti içinde hidrojenle elektrokimyasal olarak doygun hale getirildiğinde, sünekliklerinde azalma

gözlemlenir. Sulu ortamda Al alaşımlarının gevrekleşmesinin temel mekanizması, saf HE etkisinden daha çok gerilim korozyon çatlaması (SCC) olabilir. SSC, aşındırıcı bir ortamda çatlak oluşumunun büyümesi durumudur. Özellikle yüksek sıcaklıkta çekme dayanımına maruz kalan sünek metal bileşimleri beklenmedik ve ani bozulmalarına neden olabilir. Yoğun olarak SCC'ye maruz kalan metal parçalar, mikroskopik çatlaklar yoğun iken görünüm olarak parlak ve ışıldayan yapıdadır. SCC genellikle hızla ilerler ve saf metallerden daha çok alaşımlar arasında daha sıklıkla rastlanır (Sieradzki ve Newman, 1987).

2.4.2.1.2. Bakır ve bakır bazlı alaşımlara etkileri

Bakır (Cu) ve Cu alaşımları, oksijen (O) veya bakır oksit (Cu₂O) bulundurmaları takdirde normalde HE'ye karşı hassasiyet göstermezler. O içeren Cu ve Cu alaşımları, hidrojen ortamında tavlanylup ısıtıldığında, atomik hidrojen metallere difüze olur ve Cu₂O veya O ile reaksiyona girerek su (H₂O) oluşturur. Eğer sıcaklık 648,15 K veya daha yüksekse, H₂O yüksek basınçlı buhara dönüşür. Bu, HRE'nin klasik bir örneğidir, çünkü buhar, çatlaklar ve kabarcıklar şeklinde hidrojen hasarına neden olacak ve harici basınç uygulanmasa bile metallerin kırılma dayanıklılığını ve sünekliğini azaltacaktır. Sert ziftli Cu genellikle küçük miktarlarda Cu₂O içerir; bu nedenle daha sonra 643,15 K üzerindeki bir sıcaklığa maruz kalacaklarsa, hiçbir sıcaklıkta H₂'ye maruz bırakılmamalıdır. Cu₂O parçacıklarıyla reaksiyonun denklemi (2.5) şöyledir :



2.4.2.1.3. Nikel ve nikel bazlı alaşımlara etkileri

Yüksek sıcaklık dayanımı, oksidasyon ve sıcak korozyon direnci açısından üstün özellikler sergiler. Ayrıca kuru oksidasyon ve kimyasal aşındırıcı ortamlar karşısında yüksek performans gösteren Ni bazlı bir alaşım, HE'ye karşı da duyarlı olduğu anlamına gelmez. Saf Ni, bir element olarak hidrojen etkisiyle önemli derecede kırılmanlaşır; bundan dolayı, Ni-Cu, Ni-Fe, Ni-Co ve Ni-W gibi Ni açısından zengin bileşimlere sahip çoğu ikili alaşımda, Ni içeren bölgelerin hidrojen tarafından önemli ölçüde kırılmanlaştığı gözlemlenmiştir (Lee, 2008).

2.4.2.1.4. Titanyum ve titanyum bazlı alaşımlara etkileri

Genelde, Ti ve alaşımları sulu ortamlarda inanılmaz korozyon direnci özellikleri sergiler. Bu yüksek korozyon direnci, oksitleyici ortamlar altında hava ile suda doğal

olarak oluşan ince, kararlı ve sağlam bir titanyum oksit (TiO_2) tabakasından oluşmaktadır. Ayrıca, aşırı katodik yükleme koşullarında uygulanan akım altında sulu ortamlarda bazı Ti alaşımlarında HE tespit edilmiştir. Ti üzerinde doğal olarak oluşan TiO_2 tabakası, düşük ile orta seviyedeki katodik yükleme koşullarında hidrojen alımını etkili bir biçimde engellediği görülmüştür. Yüksek katodik yükleme akımı koşullarında koruyucu film dağılabilir ve Ti alaşımlarında koruyucu özelliklerini kaybederek, atomik hidrojenin malzemenin çoğunluğuna girmesine imkân tanıyabilir. Deniz suyu gibi nötre yakın elektrolitlerde çinko (Zn), Al ve Mg gibi metallere galvanik bağlanma 353 K üzerindeki sıcaklıklarda Ti birleştiğinde hidrojen alımının artmasına ve hidrit oluşumuna neden olabilir.

2.4.2.1.5. Demir esaslı alaşımlara ve çeliklere etkileri

Çeliklerin HEE duyarlılığı genel olarak ayrı ayrı dört çelik fazında incelenebilir:

- Östenitik,
- Ferritik,
- Martensitik
- Çökelme sertleşmesi

Genel olarak düşük dayanımlı östenitik çeliklerin çoğu, ferritik çeliklere göre HE'ye karşı çok duyarlı değildir. Ancak, martensitik ve çökelmeyle sertleşen çeliklerin HEE ve IHE üzerine etkilerine karşı oldukça hassas olduğu bilinmektedir. Östenitik paslanmaz çelikler ile Fe-Ni-Cr esaslı süper alaşımlar da dâhil olmak üzere, birçok yüksek dayanımlı mühendislik alaşımı ve süper alaşımın bileşimlerine dayalı HE etkilerinin kapsamlı bir şekilde incelendiğinin farkında olunması önemlidir; zira bu malzemeler endüstriyel uygulamalar açısından yüksek derecede fayda sağlamaktadır (Lee, 1994). Östenitik paslanmaz çelikler için (Michler ve Naumann, 2008) tarafından yapılan ve 223 K'de çok sayıda test numunesi için gerçekleştirilen deneysel testler, Ni içeriğinin kontrol eden ana faktör olduğunu göstermektedir. Soğuk çatlama ve kırılma testlerinin önemli sebebi durumundaki HE'yi açıklayan birçok mikroyapısal mekanizma literatürde araştırılmıştır. Fakat hangi işlemlerle ilgili açıklanırsa açıklansın, hidrojenin metale nüfuziyet miktarı, hidrojenin kaynağı ve metale uygulanan gerilimlere göre doğacak malzeme davranışı aynı olmadığı anlaşılmıştır (Schapery, 1986). Hidrojenin nüfuziyeti kadar hangi evrede malzeme içeriğine girdiği (metal üretiminde sıvı fazdayken, kaynak işlemleri sırasında vb.), metalin ana özelliklerine göre (C oranı az metal, martensitik

metal, paslanmaz metaller vb.), metallerin maruz bırakıldığı dış etkenlerde metallerin üretim ömrü boyunca ortaya çıkan mekanik dayanımı için önemlidir (Durkaya ve ark., 2016). Farklı metaller için deneylerle kanıtlanmış kritik hidrojen içerikleri literatürde bulunmaktadır. Mesela vakum ortamında işlenen bir çelik metali için kırılabilirliği yok eden hidrojenin içerdiği değerin 2 ppm olduğu kanıtlanmıştır (Shirband ve ark., 2011). Ayrıca başka bir çalışmadaki deneysel araştırmalar neticesinde AISI 430 paslanmaz çelik metali sünek çok küçük çatlak davranışlarından, gevrek formuna geçişine olanak veren hidrojen ölçüsünün $1,45 \times 10^{-5}$ mol/cm³ olduğu görülmüştür (Yen ve Tsai, 1996).

2.4.2.1.6. Süper alaşımlara etkileri

Ni bazlı süper alaşımlar, katı çözelti sertleşmesi veya çökeltme sertleşmesi mekanizmalarıyla güçlendirilebilen en karmaşık mikro yapısal özelliklere sahip malzemeler arasında yer almaktadır. Fe bazlı süper alaşımların gelişimi östenitik paslanmaz çeliklerden gelir ve yüzey merkezli kübik (FCC) matrisin hem katı çözeltide sertleştirme hem de çökelti oluşturuç elementlerle birleştirilmesi ilkesine göre geliştirilmiştir. Fe bazlı süper alaşımların temel özelliğı süper alaşımlar, östenitik matrisin FCC fazını stabilize etmek için en az %25 Ni ve Fe'den yapılmış olmasıdır. Bu sebeple, Fe esaslı süper alaşımlar aynı zamanda Ni-Fe esaslı süper alaşımlar olarak da adlandırılmaktadır. Co bazlı süper alaşımlar ise, mikro yapısal açıdan Ni bazlılara kıyasla daha az karmaşıklık gösterir. Co alaşımlarının büyük bir kısmı, gama-prime (γ') pekleştirme fazı oluşturmaz ve mekanik dayanımlarını östenitik FCC yapıya sahip katı çözelti matrisinden alırlar.

2.4.3. Hidrojen kırılabilirliğine etki eden faktörler

Metaller üzerine etki eden hidrojen dış şartlar doğrultusunda istemli veya istemsiz olarak malzemenin yapısında belirli değişimlere neden olabilir.

2.4.3.1. Basınç

H₂ basıncı arttıkça HE duyarlılığı da artar, bu da HEE indeks değeri lerinin birden azalmasına neden olur. Ancak doyma basıncına ulaşıldığında HEE endeksinin katlanarak azaldığı görülmektedir. Bu ilişkideki bozunma üssü, basıncın bir fonksiyonu olarak HE prosesindeki kinetik etkileri veya hız sınırlamalarını yansıtabilir. Sabit bir sıcaklıkta, H₂ basıncının etkisi, yüksek basınçlı hidrojenin birim hacim başına mevcut atomik hidrojen miktarını artıracak ve dolayısıyla yayılan bir çatlak ın ucundaki lokalize HEE etkilerini

artıracağı gerçeğine dayanarak niteliksel olarak anlaşılır. Tarihsel olarak, Sievert'in hidrojen konsantrasyonu basınçlı gaz yasasına dayanmaktadır. Basıncın bir fonksiyonu olarak HE derecesinin genellikle hidrojen basıncının kareköküyle orantılı olduğu varsayılmıştır (Bernstein ve Thompson, 1974).

2.4.3.2. Sıcaklık

HEE'nin geniş bir sıcaklık aralığında oluşabileceği gözlemlenmiştir; ancak birçok malzeme için oda sıcaklığı civarında oluşumu en şiddetlidir. Niteliksel olarak, tuzaklanma modellerinde hidrojenin difüzyonu ve bağlanma enerjisi temel parametreler olarak öne sürülmüştür. HE'nin oda sıcaklığına yakın en şiddetli olduğunu ve daha yüksek veya daha düşük sıcaklık aralığında daha pasif halde olduğu bilinir (Vehoff, 2007). Düşük sıcaklıklarda, hidrojenin difüzyon hızı, mevcut tuzak bölgelerini doldurmak için yetersiz kalmaktadır; ancak sıcaklık yükseldiğinde hidrojenin hareketliliği artar ve tuzaklanma etkinliği azalır.

2.4.3.3. Isıl işlem ve ürün şekilleri

Isıl işlem ve ürün formları, karmaşık mikro yapılara sahip belirli malzeme türleri için HE derecesi üzerinde derin bir etkiye sahip olabilir. Genel olarak, dövme ve toz metalürjisi (Powder Metallurgy) işlemlerinin, benzer bileşimlere ve ısıtılma işlemine sahip döküm süper alaşımlarına kıyasla yüksek basınçlı hidrojen ortamından biraz daha az etkiye sahip olduğu bulunmuştur (Fritzemeier ve Chandler, 1989).

2.4.3.4. Alaşım bileşimleri

Alaşımlardaki hidrojen etkisinin yalnızca kimyasal bileşime bağlı olarak, mikro yapı, faz dağılımı ve termo-mekanik işlemler gibi diğer etkenlerden bağımsız şekilde değerlendirilmesi oldukça zordur. Pek çok yüksek mukavemetli mühendislik ve süper alaşımların bileşimlerine dayanan HE etkilerinin kapsamlı biçimde incelenmiş olduğunun farkında olunması önemlidir; zira bu malzemeler endüstriyel uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak, bu alaşımlar bileşimsel ve mikroyapısal olarak kalıtsal bir karmaşıklık içerdiğinden, bazen temel bilimsel ilkelerinin ortaya konmasına en az elverişli sistemler olarak ortaya çıkmaktadır (Lee, 1994).

2.4.3.5. Yüzey işlemi

Hassas mühendislik malzemeleri için HEE indeksinin duyarlılığı, HE test numunelerinin yüzey kalitesinden bir miktar etkilenebilir. Bunun nedeni, gaz halindeki hidrojenin, özellikle yüksek basınçlı hidrojen ortamına maruz kalan duyarlı bir malzeme üzerinde nispeten büyük yüzey kusurları mevcut olduğunda, yüzeyin mikro çatlak başlangıcı ve büyüme davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmasıdır. Bu nedenle, numune hazırlığı ve bileşen üretiminde yüzey işleme ve finisaj süreçlerine özen gösterilmesi gerekmektedir. HE'nin neden olduğu iç çatlaklar, çok az makroskobik korozyon veya hasar verici bulgu ile başlayabilir (Lee ve Woods, 2016).

2.5. Refrakter Metaller

2.5.1. Genel özellikler

Tüm metaller arasında sıcaklık sabit kalmak koşuluyla, katı haldeki bir maddenin birim kütlesinin sıvı hale gelmesi için verilmesi gereken en yüksek ısının 2273,15 K'den büyük olması ve katı ya da sıvı haldeki maddelerin termodinamik denge halindeki buharının belirli bir sıcaklıkta oluşturduğu basıncın en az olduğu: Nb, Ta, Mo, W ve V elementlerinin bulunduğunu metal grubu refrakter metaller olarak bilinmektedir. Refrakter metallerin malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin ölçüsü, dayanıklılığı ve aşınma, çizilme, delinme ve kesilme gibi plastik deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak bilinen sertlikleri de yüksektir (Denizalp, 2012). Refrakter metallere ait genel fiziksel özellikler çizelge 2.1'de sunulmaktadır.

Çizelge-2.1. Saf refrakter metallerin bazı mekanik ve kimyasal özellikleri (Rooy, 1990).

Özellik	Niobyum (Nb)	Tantalyum (Ta)	Molibden (Mo)	Tungsten (W)	Vanadyum (V)
Ergime Sıcaklığı (°C)	2468	2996	2610	3410	1910
Yoğunluk(20 °C de, g/cm ³)	8,57	16,6	10,22	19,25	6,099
Kristal Yapısı	HMK	HMK	HMK	HMK	HMK
Poisson Oranı	0,38	0,35	0,32	0,28	0,35
Elastisite Modülü (GPa)	103	185	324	400	128

Refrakter metallerin yoğunluk ve katı bir maddenin katılıktan sıvı bir duruma geçmeye başladığı sıcaklık değerlerinin çok yüksek metaller olduğu görülmektedir (Denizalp, 2012).

2.5.2. Kullanım alanları

(Denizalp, 2012) tarafından yapılan incelemelerde refrakter metallerin uygulama alanları, ilk etapta akkor lambaların içinde mevcut elektrik akımı üzerinden ışık saçan teller, elektron tüpündeki kontrol gridleri, ısıtma ekipmanları gibi uygulama alanlarının az olmasına karşın içeriğindeki W, Ta ve Mo yüksek sıcaklık ile radyasyon altında şekil ve özelliklerini korudukları için nükleer reaktörlerin kontrol çubuklarında, ısı değiştiricilerinde, füzyon reaktörleri içeriğinde (W plazmaya doğrudan maruz bırakılan yüzey alanları için makuldür) ve ısı transfer uygulamalarında (yüksek ısı iletkenlikleri sayesinde ısı emici özelliğe sahiptir) kullanılır.

2.5.3. Hidrojenin refrakter metaller üzerine etkileri

Mo ve W, düşük hidrojen çözünürlüğüne sahip, yüksek erime noktalı metallerdir ve endotermik depolama maddeleri olarak görev yapabilirler. Metal tarafından emilen hidrojen, mekanik özellikleri etkileyebilir; bu etki katı çözeltide hidrojenin varlığı, bir hidrür (veya başka bir ikinci faz) oluşumu ve metaldeki alaşım elementleriyle gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla ortaya çıkabilir. Çözeltideki hidrojen ve diğer ara maddeler metallerin özelliklerini etkileyecektir. Hidrojenin etkileri, özellikle düşük sıcaklıklarda belirginleşir ve bu etkiler, sünek-kırılgan geçişin yükselmesi ile birlikte, FCC yapıya sahip metallerin akma davranışını da etkiler. Çözelti içindeki hidrojenin kırılganlık üzerindeki iyi bilinen bir örneği çeliklerdir. Öte yandan, hidrojenin Mo ve Mo bazlı alaşımlar üzerindeki mekanik özellikler üzerindeki etkisi ise son derece sınırlıdır (Chandler ve Walter, 1968).

Özellikle Mo, W ve Cr, arayer yabancı maddeleri için çok düşük kafes çözünürlükleri nedeniyle, Nb ve Ta'dan daha düşük sıcaklıklarda küçük miktarlarda ara yer yabancı maddelerinden daha fazla etkilenir (Hahn ve ark., 1962).

2.5.3.1. Molibden

Mo-hidrojen sisteminde hiçbir hidrit veya ikinci faz oluşumu gerçekleşmemiştir. Veri seti sınırlı olsa da, hidrojenin Mo bazlı alaşımlardaki çözünürlüğünün düşük olması beklenmektedir (Chandler ve Walter, 1968). Hidrojen Mo'yu kırılganlaştırabilir. Bu

nedenle, çoğu durumda hidrojen, düşük sıcaklıklarda önemli bir etken olarak kabul edilmemektedir.

Mo, özellikle dökme demirler, çelikler ve süper alaşımlar gibi malzemelerde belirli mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla alaşım elementi olarak kullanılan bir refrakter metaldir.

Çeliklerde, alaşım elementi olarak molibden katkısı;

- Çekme dayanımı ve akma noktasını artırır,
- % uzama ve kesit daralmasını azaltıcı yönde rol oynar,
- Sertleşebilme özelliğini, tokluğu, korozyon mukavemetini yükseltir.

Mo'nun alaşımlara etki ettiği bu özellikler; yüksek gerilim, geniş sıcaklık aralıkları ve malzemelerin aşınmasına, bozulmasına veya zarar görmesine neden olan kimyasal veya fiziksel etmenlerin bulunduğu ortama karşı çok önemlidir (Denizalp, 2012).

2.5.3.2. Tungsten

W, BCC ile kristal yapısı ve yüksek yoğunluğu ($19,25 \text{ g/cm}^3$) ile tanınır. Yüksek ergime noktası ve düşük termal genleşme katsayısı sayesinde, yüksek sıcaklık uygulamalarında mükemmel performans sergiler. W $3695,15 \text{ K}$ gibi yüksek bir ergime noktasına sahip olup, son derece güçlü mekanik özelliklere sahip bir refrakter metaldir. Belirtilen yüksek ergime noktası sıcaklığı onu nükleer füzyon reaktörleri gibi yüksek sıcaklık ve yoğun enerji uygulamaları için ideal malzeme olarak kullanılmaktadır. Buna karşın, doğal halde bulunan tungstenin kırılgenlik ve şekillendirme zorlukları gibi sınırlamaları da dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır (Antusch ve ark., 2017).

Çeliklerde sertliği ve mukavemeti artırır, lamba filamanlarının iç yapısında kullanılan tungsten, periyodik tabloda geçiş metalleri olarak bilinir ve güçlü bir refrakter metal olan bir elementtir (Haner, 2023).

W ve alaşımları, nükleer füzyon reaktörlerinde plazma ile temas eden bileşenler (plasma-facing components) olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalar için, W tabanlı yüksek entropili alaşımlar geliştirilmiştir (Yoo ve ark., 2024).

W'nun hidrojenle etkileşimi üzerine yapılan çalışmalarda, W içeren mikroalaşımli çeliklerin HE'ye karşı gösterdiği direnç (Zhao ve ark., 2014) tarafından incelenmiş W eklemeinin hidrojen desorpsiyonunun aktivasyon enerjisini artırdığı ve mikro yapısal özelliklerin HE davranışını etkilediği tespit edilmiş ve hidrojenin neden olduğu

gevrekleşmenin, dekohesyon ve iç basınç etkilerinin birleşimiyle oluştuğu öne sürülmüştür.

W, gümüşü beyaz rengi sayesinde metalik bir görünüme sahiptir. Refrakter bir metal olan W, düşük nem içeriğiyle dikkat çeker. W, yüksek sertliğinin yanı sıra kimyasal açıdan da son derece karardır. Hidrojen, su veya konsantre asitler W ile hiçbir şekilde reaksiyona girmez yani refrakter metal olan W'a hidrojen etki etmez (Stanford advanced materials, 2025).

2.5.3.3. Vanadyum

Çelikte çözünürlüğü en yüksek olan mikroalaşım elementidir. V nitrürün çözünürlüğü V karbürden daha düşüktür. Malzemedeki artan nitrojen(N) içeriği nedeniyle V'nin çözünmesi ve çökmesi önemli ölçüde kontrol edilebilir. V çöktirleri Ti kadar etkili değildir. Yeniden kristalleşme gecikmesi yeterince kısadır. V'nin yüksek çözünürlüğü, ferritin normalleştirilmesinden sonra iyi çökeltme sertleşmesi sağlar (Hannane, 1988). V içeriği arttıkça akma dayanımı artar. Tane inceltme etkisi zayıftır, bu da tokluğu olumsuz etkiler (Çeviker, 1991). V'nin azot ile birleşip oluşturduğu nitrürler tane küçülmesini ferritik yapıda sağlar. Bu sebeple, çentik dayanımını artırır. Mukavemeti yüksek karbür oluşturduğundan, aşınma ve sıcak dayanımı artırmak amacıyla takım çeliklerinde Volfram ile sığağa dayanıklı çeliklerde ise Cr ile birlikte dâhil edilir (Topbaş, 1998).

2.5.3.4. Niobyum

Nb ile alaşımları çok yüksek sıcaklıklardaki kullanımı önemli yere sahip refrakter malzemelerdir. Ancak, Nb'nin yükseltgenmesine karşı çok az dayanımından ötürü, Nb içerikli refrakter malzemeleri kullanmak için yükseltgenme direncinde önemli bir değişikliğe ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer elementlerle karışımı Nb'nin içerik özelliklerini ve yükseltgenme direncini belirli oranda iyileştirmektedir (Elkoca, 2018).

Nb'nin iç alanı sınırlıdır. Bunun nedeni, bu süreçte Nb karbonitürün östenitleştirme sırasında kısmen çözünmeden kalmasıdır. Nb aynı zamanda tokluğun ve gücün artırılmasında da rol oynar. Bu, yeniden kristalleşmeyi yavaşlatarak ve tane boyutunu küçültmek elde edilir. Nb elementi en yüksek tane küçültme etkisine ve özelliklerine sahiptir. Efektif tutar limit oranı %0,04Nb'dir. Bu nedenle Nb alaışımının tokluğu maksimum değerine ulaşır. Ancak zaten az miktarda dışkıyı katılaştırma etkisine

sahiptir (Çeviker, 1991). Sertlik ve akma noktası artar, tane boyutu küçülür ve süneklik azalır (Topbaş, 1998).

Katı halden sıvı hale geçiş sıcaklığı çok yüksek olduğundan Nb ve alaşımları geleneksel Ni bazlı içeriğinde süperalaşımlarla şu anda mümkün olanlardan daha yüksek sıcaklıklardaki kullanım için aday refrakter malzemelerdir. Ancak, Nb'nin yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı çok düşük direncinden dolayı oksidasyon direncinde yapılacak önemli bir modifikasyon Nb bazlı refrakter malzemelerin geliştirilmesinde esas teşkil etmektedir. Diğer elementlerle alaşımlama, Nb'nin yüksek sıcaklık dayanımını, kırılma tokluğunu ve oksidasyona karşı direncini bir ölçüde artırmaktadır. Farklı yöntemlerden yararlanarak, yoğun Al_2O_3 'den oluşan Al-bazlı kaplama oluşturarak oksidasyon direncinde yapılacak bir iyileştirme Nb bazlı refrakter malzemelerin geliştirilmesinde tercih edilebilir bir yol olmaktadır.

2.5.3.5. Tantalum

Ta, hidrojenle etkileşime girdiğinde, özellikle yüksek sıcaklıklarda ve gerilim altında HE riski taşır. Bu fenomen, hidrojenin metal içinde difüzyon yaparak, özellikle yüksek gerilim bölgelerinde toplanması ve bu bölgelerde hidrojen hidrürlerinin oluşumuna neden olmasıyla gerçekleşir. Bu hidrürler, metalin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyerek çatlama ve kırılma riskini artırır (Hossick-Schott ve ark., 2013). Ta refrakter metalinin çeşitli çalışmalarda hidrojenle ilgili gözlemlenen sonuçları şunlardır:

- Deteryum ile yapılan doygunlaştırma işlemi sonrasında, filmlerin yapışma enerjisinin ve çatlama dayanımının azaldığı, yani hidrojenin bu filmlerde gevrekleşmeye neden olduğu bulunmuştur (Moody ve ark., 1994).
- Ta bazlı alaşımlarda, Mo ve rhenyum (Re) gibi elementlere ilave edilmesinin, HE'yi azalttığını ve hatta tamamen ortadan kaldırdığını göstermiştir (Gypen ve ark., 1984).

2.6. Refrakter Metallerin Hidrojen Etkilerinin Karşılaştırılması

Çizelge-2.2. Refrakter metallerin hidrojen etkisinin kıyaslanması (Hardie ve McIntyre, 1973; Zhao ve ark., 2014; Yoo ve ark., 2021).

Metal	Hidrojen Etkisi	Hidrojen Etkisinin Sonuçları
Tantalyum (Ta)	Yüksek	Tantalyum, hidrojenle reaksiyona girerek hidritler oluşturur ve bu hidritler, metalin sünekliliğini düşürür, deformasyon kabiliyetini azaltır, çatlakların başlangıcına neden olur, gevrek kırılma moduna geçer, akma ve kopma mukavemetini azaltır.
Vanadyum (V)	Orta	Vanadyum, hidrojenle birleşerek vanadyum hidritleri oluşturur buda malzemenin sünekliliğini olumsuz etkiler, plastik deformasyon yeteneğini sınırlandırarak sünekliliğini kaybetmesine neden olur, metali kırılgan hale getirir, özellikle düşük sıcaklıklarda gevrek kırılmalara yol açar.
Niobyum (Nb)	Yüksek	Niobyum, hidrojenle birleşerek niobyum hidritleri oluşturur buda malzemenin sünekliliği azaltır, metalin kırılganlığını artırır, akma ve kopma mukavemetini azaltır, düşük sıcaklıklarda gevrek kırılmaya yol açar, tane sınırları ve yüzey kusurlarına sebep olur ve malzemenin mikroyapısında faz değişimlerine neden olur.
Molibden (Mo)	Düşük	Molibden, hidrojenle reaksiyona girme eğiliminde değildir ve bu nedenle hidrojen etkisi düşüktür. Metalin plastik deformasyon kabiliyetini sınırlandırır, süneklilik kaybına yol açar, özellikle yüksek hidrojen konsantrasyonlarında kırılgan bir davranış sergilemesine neden olur, metalin akma mukavemeti ve kopma dayanımı azalır, mikro çatlakların başlangıcını tetikler ve bu çatlaklar hızla yayılabilir, yüzey kusurları, tane sınırları ve dislokasyonlar, hidrojenin birikmesine neden olur ve bu durum metalin zayıflamasına yol açar.
Tungsten (W)	Düşük	Tungsten, hidrojenle reaksiyona girme eğiliminde değildir ve bu nedenle hidrojen etkisi düşüktür. Tungstenin hidrojenle birleşmesi, metalin deformasyon kapasitesini sınırlayarak sünekliliğini kaybetmesine yol açar, düşük sıcaklıklarda özellikle kırılgan kırılma eğilimini artırır, akma ve kopma mukavemetini düşürerek, metalin dayanımını zayıflatır, tungsten kristal yapısında mikroskobik çatlakların gelişmesine ve hızla yayılmasına neden olur,

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal ve Metalografik Yüzey İşlemleri

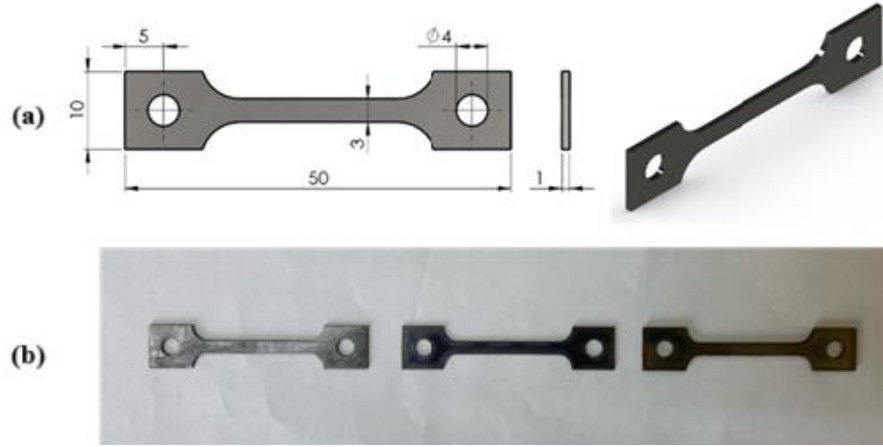
Bu çalışmada HE testlerinde kullanılmak üzere, polikristalin yapıdaki saf haldeki Ta, Nb, V metallerine ait levhalar tercih edilmiştir. Söz konusu metaller Çin Halk Cumhuriyeti'nden temin edilmiş olup; %99,9 safiyetinde tavllanmış Ta ve haddelenmiş Nb levhalar 1 mm kalınlığında, %99,9 saflıktaki V levha ise 0,5 mm kalınlığındadır. Bu levhalardan, çekme testlerinde kullanılmak üzere minyatür tipte düz çekme numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler, 25 mm ölçüm (gauge) boyuna, 3 mm genişliğe ve 0,5 ile 1 mm arasında değişen kalınlıklara sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Numunelerin hassas şekilde üretilmesi amacıyla tel kesim elektro-erozyon (EDM) yöntemi kullanılmıştır (Bkz. Şekil 3.1(a)). Ayrıca, EDM ile hazırlanmış numunelere ait gerçek numune görselleri de çalışmaya eklenmiştir (Bkz. Şekil 3.1(b)).

Çekme test numunelerinin yüzey hazırlığı için zımparalama, parlatma ve kimyasal dağlama işlemleri uygulanmıştır. Ancak numunelerin oldukça ince olması nedeniyle, klasik yöntemlerle yüzey hazırlığı yapılması pratik olarak mümkün olmamıştır. Bu sebeple, 3 boyutlu yazıcı yardımıyla özel kalıplar tasarlanarak üretilmiş; numuneler bu kalıplar içerisine yerleştirilmiştir. Kalıplar içerisindeki numuneler, sırasıyla 1200, 2000 ve 2400 grit zımpara kâğıtları kullanılarak zımparalanmıştır. Zımparalama işleminin ardından, numuneler 3 μm , 1 μm ve $\frac{1}{4}$ μm elmas süspansiyonlar ile uygun parlatma keçeleri kullanılarak mekanik olarak parlatılmıştır. Bu işlemi takiben, yüzeyde oluşabilecek mekanik gerilmeleri gidermek ve düzgün bir mikroyapı yüzeyi elde edebilmek amacıyla, numuneler yarım saat süreyle koloidal silika (OP-S) son parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Ancak bu işlem, ışık mikroskobu altında tane sınırlarının yeterince net gözlemlenmesi için yeterli olmamıştır. Bu nedenle, mikroyapının ortaya çıkarılması amacıyla kimyasal dağlama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

(Petzow, 1999) tarafından hazırlanan çözelti örnekleri baz alınarak Ta ve V numuneleri için 75 ml metanol (%99,8), 10 ml sülfürik asit (%95–97) ve 25 ml hidroklorik asit (%32) içeren bir çözelti hazırlanmış; dağlama işlemi, paslanmaz çelik katot kullanılarak 30 saniye boyunca 30 V DC akım altında uygulanmıştır.

Nb numuneleri ise 50 ml etanol (%96), 10 ml saf su ve 1 ml fosforik asit (%85) içeren çözelti içerisinde, 1 dakika süreyle 80 V DC akım altında elektrodağlamaya maruz bırakılmıştır.

Bu işlemler sonucunda elde edilen numuneler, hem mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları hem de hidrojen yükleme için uygun hale getirilmiştir.



Şekil 3. 1 Çekme test numunelerinin teknik resim gösterimi ve EDM ile hazırlanmış numunelere ait gerçek numune görselleri sırasıyla V, Ta ve Nb

3.2. Mikroyapı Karakterizasyonu

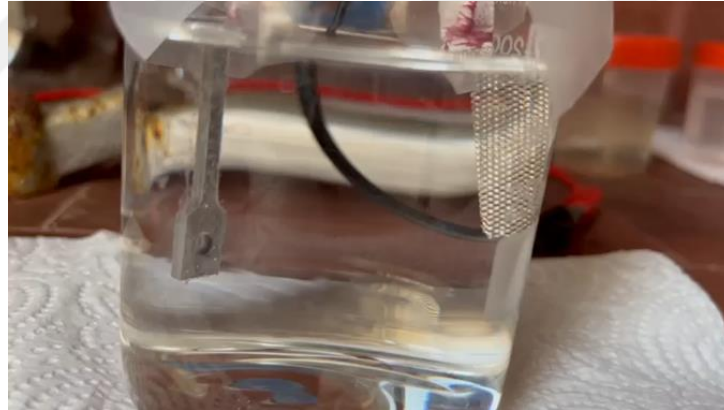
Ta, Nb ve V metallerine ait numunelerin mikroyapısal analizleri, yüzey morfolojisi ve tane yapılarının detaylı bir şekilde incelenebilmesi amacıyla hem optik mikroskop hem de taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, numunelerin dağlama işlemleri sonrasında ortaya çıkan yüzey mikroyapıları, ZEISS Axio Lab.A1 model ters metalürjik ışık mikroskobu ile farklı büyütme oranlarında incelenmiştir. Bu incelemeler sırasında, özellikle tane sınırlarının belirginliği, yüzey homojenliği ve olası mikroyapısal düzensizliklerin tespiti amaçlanmıştır. Işık mikroskobu görüntülemeleri, numune yüzeyindeki temel mikroyapı özelliklerinin ön değerlendirmesini sağlayarak daha ileri analizler için temel teşkil etmiştir. Daha yüksek çözünürlüklü detaylı yüzey morfolojisi analizleri ise, Zeiss Sigma VP model taramalı elektron mikroskobu (Carl Zeiss, Jena, Almanya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri sırasında, 20 kV hızlandırma gerilimi ve yüksek prob akımı modu tercih edilmiştir. Bu sayede, mikroyapısal detayların (tane yapısı, yüzey kusurları vb.) yüksek çözünürlükle görüntülenmesi mümkün olmuştur.

Kristalografik faz, kristal yönelimi, ortalama tane boyutu ve tane boyutu dağılımını belirlemek amacıyla Elektron Geri Saçılma Kırınımı (EBSD) ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler için yine bir Zeiss Sigma VP SEM cihazı kullanılmış; sistem, NordlysNano EBSD dedektörü (Oxford Instruments) ile donatılmış ve veri toplama işlemleri AZtec V3.1 yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. EBSD analizlerinde adım

büyüklüğü 500 μm ile 900 μm arasında olacak şekilde ayarlanmış ve 20 kV hızlandırma gerilimi kullanılmıştır. Verilerin işlenmesi ise AZtec yazılımı (Oxford Instruments) ile yapılmıştır. Yüksek Açılı Tane Sınırları (HAGB), $\geq 15^\circ$ yönelim farkı olan sınırlar olarak; Düşük Açılı Tane Sınırları (LAGB) ise $\geq 1^\circ$ ve $< 15^\circ$ yönelim farkına sahip sınırlar olarak tanımlanmıştır. Tane boyutları, yatay ve dikey doğrultulardaki ortalama kesişim sayılarına dayanan lineer kesişim yöntemi ile hesaplanmıştır.

3.3. Hidrojen Yükleme İşlemleri

Çekme test numuneleri, oda sıcaklığında 200 ml hacminde %0,1 molar (0.1 M) sülfirik asit (H_2SO_4) çözeltisi içeren bir beher içine daldırılmış ve ardından 10 saat boyunca 10 mA/cm^2 akım yoğunluğu ile galvanostatik olarak hidrojen emilimine maruz bırakılmıştır. Numunelerin gerekli yüzey ölçümleri alınıp hidrojenin yükleneceği alan hesaplanmıştır. 10 mA/cm^2 akım yoğunluğu için gerekli akım saptanarak güç kaynağı ile ayarlanmıştır. Kablo bağlantıları ve IR-drop gibi sapmaları ortamdaki kaldırmak için multimetre ile geçen akım ayarlanmıştır.

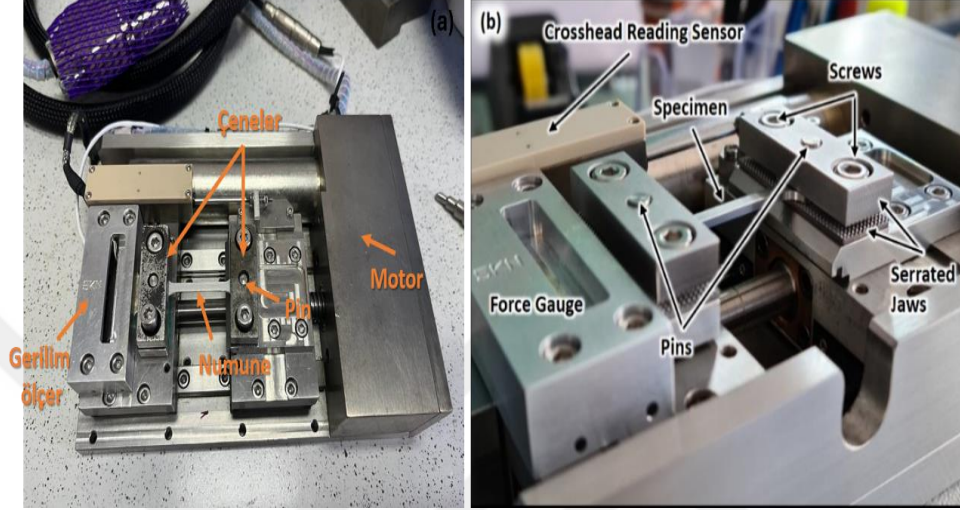


Şekil 3.2 Katodik hidrojen yükleme test düzeneği görüntüsü

3.4. Çekme Testleri

Mekanik çekme testleri, DEBEN (Bury Edmunds, UK) mikro-germe test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hidrojenle yüklenmiş çekme test numuneleri, oda sıcaklığında ve havayla temas eden bir ortamda test edilmiştir. Test boyunca, numunelere 0,005 mm/dak 'lık sabit bir uzama (gerinim) oranı uygulanmıştır. Numunelerin kopmasına kadar geçen ortalama test süresi yaklaşık 5 ila 6 saat arasında değişiklik göstermiştir. Bu yavaş gerinim oranı, hidrojenin malzeme yapısı üzerindeki etkilerini detaylı şekilde gözlemleyebilmek adına tercih edilmiştir. Uygulanan bu yöntem sayesinde

HE davranışları zamana bağlı olarak dikkatle incelenebilmiştir. Test sırasında oluşan uzama ve yük değerleri sürekli olarak kaydedilmiştir. Çekme testi için kullanılan deney düzeneğine ait görüntü Şekil 3.3'te verilmiştir. Bu düzeneğin doğru bir şekilde kurulması, hem deneyin hassasiyetini artırmış hem de numunenin kopma anına kadar olan davranışlarının yüksek doğrulukta değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

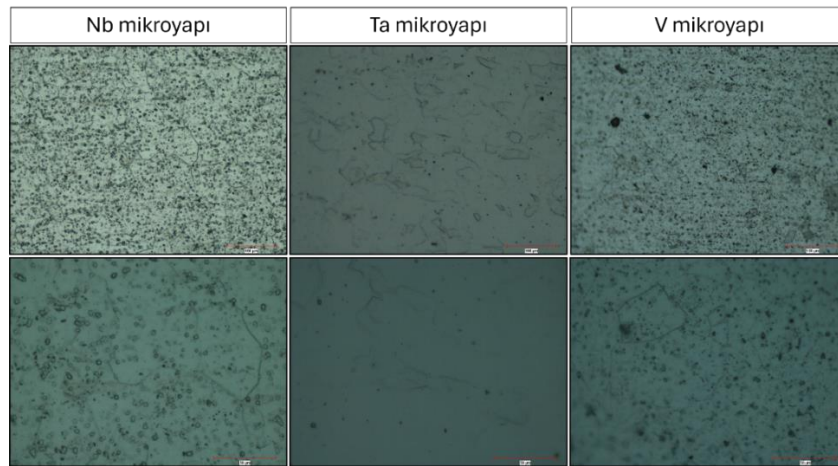


Şekil 3.3 DEBEN mikro-germe test cihazının görüntüsü

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

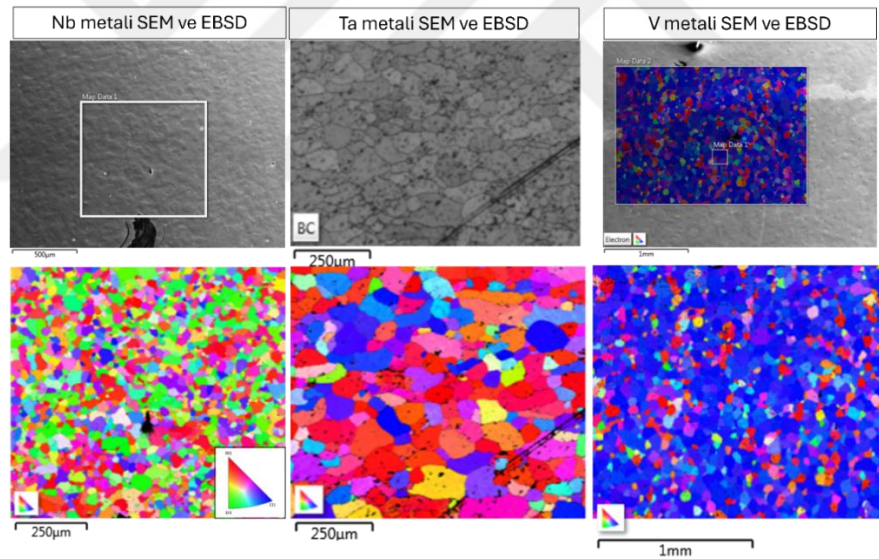
4.1. Mikroyapı Analizi

Şekil 4.1'de, Nb, Ta ve V metallerine ait yüzey mikroyapı görüntüleri, 20X ve 50X büyütme altında optik mikroskop ile elde edilmiştir. 20X büyütme ile elde edilen üst sıra görüntüleri, malzemelerin genel mikroyapı düzeni hakkında bilgi verirken; 50X büyütme ile alınan alt sıra görüntüleri, tane yapısı ve segregasyonlar gibi daha detaylı morfolojik özelliklerin incelenmesine olanak sağlamıştır. Nb metalinde yüzeyin homojen bir tane dağılımına sahip olduğu, ancak bazı bölgelerde mikrogözenek veya segregasyon izlerinin bulunduğu gözlemlenmiştir. Özellikle 50X büyütmede, tane sınırlarının daha belirgin olduğu ve tane içi çökeltilerin varlığı dikkat çekmektedir. Ta metalinde ise daha iri taneler ve bazı bölgelerde düzensiz yapı gözlenmiştir. Mikroyapı, nispeten daha düşük miktarda çökelti içermekle birlikte, tane sınırlarının yer yer çözünürlük kaybına uğradığı görülmektedir. Bu durum, Ta'nın yüksek süneklik ve düşük difüzyon özellikleriyle ilişkilendirilebilir. V metalinin görüntülerinde, daha ince taneli ve dağılmış bir yapı ortaya çıkmaktadır. 50X büyütmede özellikle çok sayıda ince ve homojen dağılımlı çökelti gözlemlenmiş, bu da V'nin yüksek çözünürlük kapasitesi ve ince mikroyapı geliştirme eğilimi ile uyumludur. Bu optik mikrografik incelemeler, her üç refrakter metalin üretim sonrası mikroyapı özellikleri hakkında temel bilgiler sunmakta ve mekanik test sonuçlarıyla ilişkilendirilebilecek yapısal farklılıkları ortaya koymaktadır. Ayrıca, hidrojenle temas sonrası yapılacak mikroyapı değişim analizlerine referans teşkil etmesi açısından da bu görüntüler önem arz etmektedir.



Şekil 4.1 Nb, Ta ve V metallerine ait optik mikroskop görüntüleri (üst sıra: 20X, alt sıra: 50X)

Şekil 4.2’de verilen SEM ve EBSD analizleri, Nb, Ta ve V metallerinin mikroyapılarını karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Elde edilen EBSD verilerine göre, Nb metalinin ortalama tane boyutu $23 \pm 13 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiş olup, bu yapı daha küçük ve eş eksenli tanelerle barındırmaktadır. Bu durum, Nb’nin nispeten daha homojen ve ince taneli bir mikroyapıya sahip olduğunu göstermektedir. Öte yandan, Ta ve V metallerinin sırasıyla $43 \pm 26 \mu\text{m}$ ve $46 \pm 31 \mu\text{m}$ ortalama tane boyutlarına sahip olduğu görülmüş, bu da bu iki metalin daha iri ve geniş tane yapıları sergilediğini ortaya koymuştur. Ta mikroyapısı, yüksek oranda yönelmiş ve belirgin tane sınırları ile dikkat çekerken; V mikroyapısında hem küçük hem de büyük tanelerin bir arada bulunduğu daha heterojen bir yapı gözlemlenmiştir. Bu mikroyapısal farklılıklar, malzemelerin deformasyon davranışları ve özellikle HE mekanizmaları üzerinde doğrudan etkili olabilir. Özellikle tane boyutunun artması, hidrojenin tane sınırlarında birikerek çatlak oluşumunu tetikleme ihtimalini artırabilir. Dolayısıyla, bu mikroyapısal veriler sonraki mekanik testlerin yorumlanmasında önemli bir temel oluşturmaktadır.



Şekil 4.2 Nb, Ta ve V metallerine ait sem görüntüleri ve bunlara karşılık gelen EBSD kristal yönelim haritaları

4.2. Gerilme-Gerinim Eğrileri

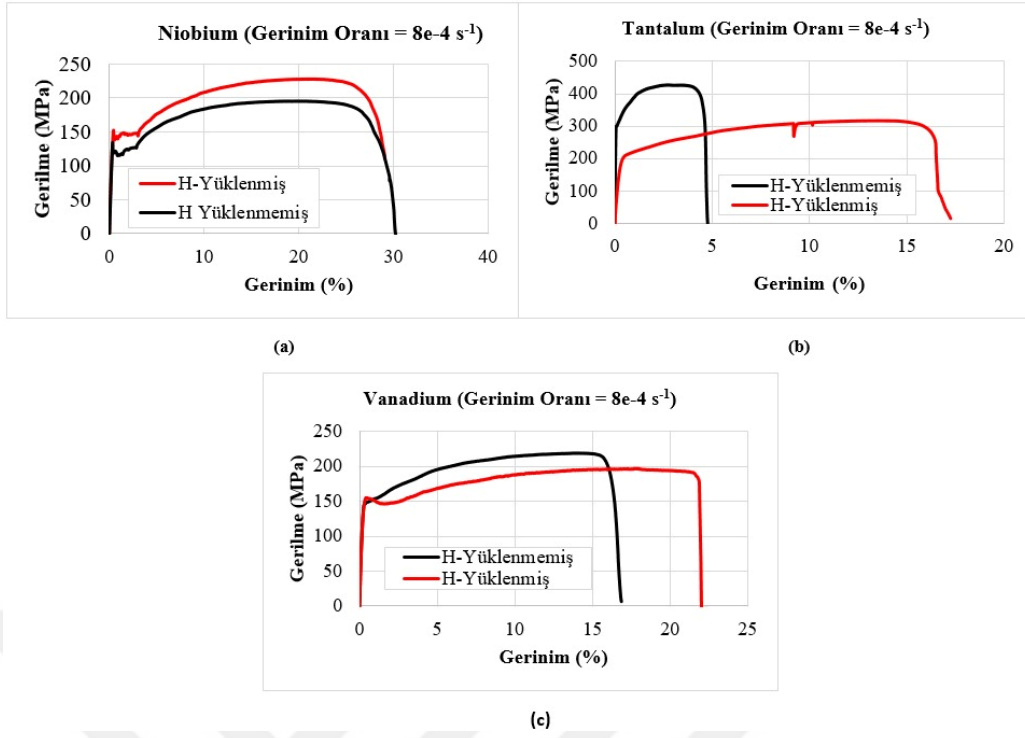
Şekil 4.3’te hidrojen yüklenmemiş ve hidrojen yüklenmiş Nb, Ta ve V metallerine ait gerilme-gerinim eğrileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, hidrojenin söz konusu refrakter metallerin mekanik davranışları üzerinde belirgin ve farklı etkiler yarattığını göstermektedir.

Nb için hidrojen yüklenmiş numunede en yüksek dayanım yaklaşık 230 MPa seviyesine ulaşırken, hidrojen yüklenmemiş numune ise en fazla 200 MPa civarında dayanım sergilemiştir (Şekil 4.3a). Bu durum (Oriani, 1978) ve (Lynch, 2012) göre hidrojenin Nb matrisi içerisinde çözünerek katı çözelti sertleşmesine yol açtığını düşündürmektedir. Ayrıca Nb'nin BCC yapısının hidrojen çözünürlüğünü nispeten daha yüksek oranda tolere etmesi, sünekliğin ciddi şekilde azalmasını engellemiştir. Uzama (gerinim) açısından bakıldığında, hidrojen yüklenmemiş Nb numunesi yaklaşık %27–28 oranında kopma gerinimine ulaşırken, hidrojen yüklenmiş numunede bu değer yaklaşık %25 seviyelerine düşmüştür. Yani, Nb'de hidrojen yüklenmesi mukavemeti artırırken süneklikte sınırlı bir azalmaya yol açmıştır. (Owen ve ark., 1984) tarafından yapılan araştırmalarda da hidrojen yüklemesinden sonra Nb numunesinin akma gerilimi ve sünekliği büyük oranda sabit kaldığı, HE'nin daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca Nb metalinin hidrojene maruz bırakılmasından sonra malzemenin çentiklere karşı daha duyarlı olduğu yorulma ömrünün azaldığı tespit edilmiştir (Stoloff ve ark., 1981).

Ta için hidrojenin etkisi oldukça farklıdır. Hidrojen yüklenmemiş Ta numunesi yaklaşık 450 MPa seviyesinde maksimum gerilme değerine ulaşırken, kopma uzaması yaklaşık %4.5-5 olarak ölçülmüştür (Şekil 4.3b). Buna karşın hidrojen yüklenmiş numune maksimumda yalnızca 310 MPa civarında bir dayanım göstermiş ve kopma uzaması %16–17 seviyelerine kaymıştır. Dayanımda belirgin bir azalma olmasına rağmen sünekliğin artış göstermesi, hidrojenin Ta içerisinde dayanım kaybına yol açtığını fakat deformasyon kapasitesini artırdığını ortaya koymaktadır. Bu durum Ta'da hidrojenin dislokasyon hareketini kolaylaştırıcı ancak taşıma kapasitesini düşürücü bir rol oynadığını düşündürmektedir. Bu sonuç, hidrojenin Ta içinde daha baskın bir şekilde HE'ye neden olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer şekilde (Birnbbaum ve Sofronis, 1994) ile (Nagumo, 2004) tarafından yapılan araştırmalarda Ta'nın yüksek hidrojen afinitesi nedeniyle süneklik kaybına uğradığı ve özellikle tane sınırlarında hidrojen birikimi sonucu kırılma davranış gösterdiği rapor edilmiştir. Yapılan çalışmalarda Ta refrakter metalinin gerilim miktarının çok azaldığı ve gerinim oranının çok arttığı gözlemlenmiştir. (Imagawa ve ark., 1995) tarafından hidrojen yükleme işleminde Ta çekme testlerinde hidrojen 190–250 ppm seviyesinde malzemenin kırılma davranışını göstermiş, hidrojen içeriği 250 ppm'e ulaştığında HE gözlenmiştir. Ayrıca (Lawson, 1961) Ta refrakter metale hidrojen yüklenmesiyle akma gerilimin yükseldiği görülmüştür.

V için hidrojen yüklenmemiş numune yaklaşık 210 MPa seviyesinde maksimum gerilme göstermiş ve yaklaşık %16 uzama ile kırılmıştır (Şekil 4.3c). Hidrojen yüklenmiş numunede ise maksimum gerilme 190 MPa seviyelerine düşmüş, ancak kopma uzaması yaklaşık %22 seviyelerine yükselmiştir. Bu sonuç, hidrojenin V metalinde dayanımı sınırlı şekilde azaltmasına rağmen sünekliği artırdığını göstermektedir. Bu etki, V matrisinde hidrojenin dislokasyon hareketlerini kolaylaştırarak yumuşatma etkisi oluşturmasıyla açıklanabilir. Nitekim daha önce yapılan (Kirchheim, 1988) ve (Fukai, 2005) yapmış oldukları çalışmalarda da V'nin hidrojenle etkileşiminde mekanik özelliklerde HE'nin sınırlı, ancak mukavemet kaybının belirgin olduğu bildirilmiştir. (Wang ve ark., 2004) ile (Ohnuki ve ark., 2006) tarafından yapılan çalışmalarda, saf haldeki V metalinin hidrojen yüklenmesinden önce statik şarj etme yöntemiyle sertleştiği gözlenmiştir. Buna karşılık, hidrojen yüklenmesi sırasında dinamik şarj etme yöntemi uygulandığında numune üzerinde gerilmelerde azalma meydana gelmiş, bu durum hidrojenin mobil dislokasyonlarla hızlı etkileşimine bağlanmıştır. Ayrıca, V metalinde hidrit oluşumu da rapor edilmiştir. Çekme testleri sırasında yapılan gözlemlerde ise, başlangıçta çekme gerilmesinde belirgin bir azalma olduğu, test durdurulduğunda ise gerilme seviyesinin eski haline geri döndüğü belirtilmiştir (Ohnuki ve ark., 2006).

Sonuç olarak, hidrojenin Nb, Ta ve V üzerindeki etkileri birbirinden farklıdır. Nb'de hidrojen dayanımı artırıcı bir etki yaratırken süneklik büyük oranda korunmuştur. Ta'da hidrojen, ciddi bir gevreklemeye sebep olmuş, bu da HE etkisinin en baskın olduğu metalin Ta olduğunu göstermiştir. V'de ise hidrojen dayanım kaybına yol açsa da sünekliğin korunması dikkat çekicidir. Bu farklılıkların temelinde, her bir metalin hidrojen çözünürlüğü, difüzyon katsayısı, kristal yapısal özellikleri ve hidrojenle olan termodinamik etkileşimleri yatmaktadır.



Şekil 4.3 Hidrojen yüklenmiş (H-yüklenmiş) ve hidrojen yüklenmemiş (H-yüklenmemiş) durumda (a) Niobyum (Nb), (b) Tantalum (Ta) ve (c) Vanadyum (V) metallerine ait gerilme-gerinim eğrileri (gerinim oranı = $8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$). Eğriler, hidrojenin farklı refrakter metallerin mekanik davranışları üzerindeki etkisini göstermektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, saf haldeki Nb, Ta ve V metallerinin hidrojen ortamına maruz bırakıldıklarında gösterdikleri mekanik ve mikroyapısal davranışlar kapsamlı olarak incelenmiştir. Gerilme-gerinim eğrilerinden elde edilen sayısal sonuçlar, hidrojenin her bir refrakter metal üzerinde farklı etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Nb numunelerinde hidrojen yüklenmesi, maksimum dayanımı 200 MPa'dan 230 MPa'a yükseltirken süneklikte sınırlı bir azalmaya (%28'den %25'e) yol açmıştır. Bu durum, Nb'nin hidrojenle etkileşiminde katı çözelti sertleşmesi mekanizmasının baskın olduğunu göstermektedir. Ta için hidrojenin etkisi belirgin biçimde olumsuzdur; hidrojen yüklenmemiş numunelerde yaklaşık 470 MPa seviyesinde dayanım ve %7–8 uzama elde edilirken, hidrojen yüklenmiş numunelerde dayanım 300 MPa'a kadar düşmüş, buna karşın uzama %15–16 seviyelerine yükselmiştir. Bu sonuç, hidrojenin Ta'da mukavemet kaybına neden olurken sünekliği artırdığını ve bu etkinin dislokasyon hareketlerini kolaylaştırmasıyla ilişkili olduğunu göstermektedir. V metalinde ise hidrojen yüklenmesiyle dayanım yaklaşık 210 MPa'dan 190 MPa'a düşmüş, ancak süneklik %15'ten %20 seviyelerine yükselmiştir. Bu da hidrojenin V matrisi içerisinde dislokasyon hareketlerini kolaylaştırarak yumuşatma etkisi yarattığını işaret etmektedir. Mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları (optik mikroskopi, SEM ve EBSD) ile elde edilen bulgular, hidrojenin metal yapılarında yerel deformasyon alanlarını etkilediğini ve özellikle Ta'da tane sınırlarında gevrekleşmeye yol açtığını göstermiştir.

Elde edilen tüm bu veriler, hidrojenin refrakter metaller üzerindeki etkilerinin metal türüne, kristal yapıya, hidrojen çözünürlüğüne ve difüzyon özelliklerine bağlı olarak değiştiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, Nb hidrojen varlığında dayanım açısından daha dirençli bir davranış sergilerken, Ta HE'ye karşı en hassas metal olarak öne çıkmıştır. V ise süneklik açısından nispeten avantajlı olmakla birlikte, dayanım kaybı nedeniyle performans sınırlamalarına sahiptir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, bu metallerin farklı sıcaklık ve gerinim oranlarında hidrojenle etkileşimlerinin incelenmesi, kırılma yüzeylerinin ileri elektron mikroskopisi yöntemleri ile detaylı olarak karakterize edilmesi ve hidrojenin atomik düzeydeki davranışlarının hesaplamalı yöntemlerle (örn. DFT, atomistik simülasyonlar) desteklenmesi önerilmektedir. Ayrıca, alaşımlama ve yüzey modifikasyonu gibi yöntemlerle hidrojen direncinin artırılması, stratejik uygulamalar (özellikle nükleer enerji

ve hidrojen ekonomisi) için kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, hidrojenle etkileşim halinde olan refrakter metallerin davranışlarını anlamaya yönelik temel bir bilimsel katkı sağlamış olup, daha güvenilir ve dayanıklı malzeme tasarımlarına giden yolda yol gösterici bir nitelik taşımaktadır.



KAYNAKLAR

- Antusch, S., Reiser, J., Hoffmann, J., Onea, A. 2017. Refractory materials for energy applications, *Energy Technology*, 5 (7), 1064-1070.
- Barrera, O., Bombac, D., Chen, Y., Daff, T., Galindo-Nava, E., Gong, P., Haley, D., Horton, R., Katzarov, I., Kermode, J.R. 2018. Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum, *Journal of materials science*, 53 (9), 6251-6290.
- Bernstein, I.M., Thompson, A.W., 1974, Hydrogen in metals. Proceedings of an international conference on the effects of hydrogen on materials properties and selection and structural design, Champion, Pennsylvania, September 23--27, 1973. *American Society for Metals, Metals Park, Ohio*.
- Bhadeshia, H.K.D.H. 2016. Prevention of hydrogen embrittlement in steels, *ISIJ international*, 56 (1), 24-36.
- Birnbaum, H.K., Sofronis, P. 1994. Hydrogen-enhanced localized plasticity—a mechanism for hydrogen-related fracture, *Materials Science and Engineering: A*, 176 (1-2), 191-202.
- Bochkaryova, A., Li, Y.V., Barannikova, S., Zuev, L., 2015, The effect of hydrogen embrittlement on the mechanical properties of aluminum alloy, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 012057.
- Boettcher, S.W., Oener, S.Z., Lonergan, M.C., Surendranath, Y., Ardo, S., Brozek, C., Kempler, P.A. 2020. Potentially confusing: potentials in electrochemistry, *ACS Energy Letters*, 6 (1), 261-266.
- Chandler, W., Walter, R., 1968, Hydrogen effects in refractory metals, *Refractory Metal Alloys Metallurgy and Technology: Proceedings of a Symposium on Metallurgy and Technology of Refractory Metals held in Washington, DC, April 25–26, 1968*. Sponsored by the Refractory Metals Committee, Institute of Metals Division, The Metallurgical Society of AIME and the National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, Springer, 197-249.
- Çeviker, I. 1991. Mikroalaşımli dövme çeliklerde mikroyapısal karakterizasyon ve mikroyapı-mekanik özellikler ilişkisi.
- Denizalp, F. 2012. Yüksek Safiyette Molibden Tozunun Spark Plazma Sinterleme Yöntemi ile Şekillendirme Şartlarının Belirlenmesi ve Karakterizasyonu.
- Durkaya, G., Kaplan, H., Çetin, B., Gürleyik, M., Pişkin, A.R., Ersoy, K., Meço, H. 2016. Zırh Çeliklerinin Kaynağında Hidrojen İçeriğinin Raman Spektroskopi Yöntemi İle Analiz Edilmesi, *Mühendis ve Makina*, 57 (674), 50-56.
- Elkoca. 2018. *Development of an Oxidation Resistance Surface Coating on Niobium Base Metal*.
- Fielding, L., Song, E.J., Han, D.-K., Bhadeshia, H., Suh, D.-W. 2014. Hydrogen diffusion and the percolation of austenite in nanostructured bainitic steel, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 470 (2168), 20140108.

- Freysoldt, C., Grabowski, B., Hickel, T., Neugebauer, J., Kresse, G., Janotti, A., Van de Walle, C.G. 2014. First-principles calculations for point defects in solids, *Reviews of modern physics*, 86 (1), 253-305.
- Fritzemeier, L., Chandler, W. 1989. *Hydrogen embrittlement- Rocket engine applications, Superalloys, supercomposites and superceramics*(A 90-34151 14-26). San Diego, CA, Academic Press, Inc., 1989, 491-524.
- Fukai, Y., 2005, The metal-hydrogen system: basic bulk properties, *Springer*,
- Gavriljuk, V., Shyvaniuk, V., Teus, S. 2022. *Hydrogen in engineering metallic materials*, Springer Nature, Chem, Switzerland, 10, 978-3.
- Gypen, L., Brabers, M., Deruyttere, A. 1984. Corrosion resistance of tantalum base alloys. Elimination of hydrogen embrittlement in tantalum by substitutional alloying, *Materials and Corrosion*, 35 (2), 37-46.
- Hahn, G.T., Gilbert, A., Jaffee, R.I., 1962, The Effects of Solutes on the Ductile-to-brittle Transition of Refractory Metals, *Defense Metals Information Center, Battelle Memorial Institute*,
- Haner, S. 2023. Tungsten (Volfram).
- Hannane, N., 1988, Einfluß der Prozeßparameter bei der thermomechanischen Behandlung mikrolegierter Stähle für Flachprodukte, Spezialprofile und Stabstahl, *na*,
- Hardie, D., McIntyre, P. 1973. The low-temperature embrittlement of niobium and vanadium by both dissolved and precipitated hydrogen, *Metallurgical Transactions*, 4, 1247-1254.
- Hossick-Schott, J., Reiterer, M., Heffelfinger, J., Hintz, M., Ringle, M., Levina, I., Gaffney, K. 2013. *Latent cracking of tantalum-titanium welds due to hydrogen embrittlement*, *Jom*, 65, 625-629.
- Imagawa, H., Matsuno, K., Yamaoka, I. 1995. Evaluation of hydrogen embrittlement of tantalum; Tantalum no suiso zeika no hyokaho, *Zairyo (Journal of the Society of Materials Science, Japan)*, 44.
- Johnson, H. 1969. *Hydrogen Brittleness In High Strength Steels*.
- Johnston, B., Mayo, M.C., Khare, A. 2005. Hydrogen: the energy source for the 21st century, *Technovation*, 25 (6), 569-585.
- Kirchheim, R. 1988. Hydrogen solubility and diffusivity in defective and amorphous metals, *Progress in Materials Science*, 32 (4), 261-325.
- Koyama, M., Rohwerder, M., Tasan, C.C., Bashir, A., Akiyama, E., Takai, K., Raabe, D., Tsuzaki, K. 2017. Recent progress in microstructural hydrogen mapping in steels: quantification, kinetic analysis, and multi-scale characterisation, *Materials Science and Technology*, 33 (13), 1481-1496.
- Lawson, V.B. (1961), "The effect of interstitial elements on the mechanical properties of tantalum at low temperature", *University of British Columbia*,
- Lee, J.A., 2008, Effects of the density of states on the stacking fault energy and hydrogen embrittlement of transition metals and alloys, *Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference*, Grand Teton Natl. Park, WY, 7-10.

- Lee, J.A. 1994. A Theory for Hydrogen Embrittlement of Transition Metals and their Alloys, *Hydrogen Effects in Materials*, 569-580.
- Lee, J.A., Woods, S. 2016. Hydrogen embrittlement.
- Lynch, S. 2012. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms, *Corrosion reviews*, 30 (3-4), 105-123.
- Machlin, I., 2012, Refractory Metal Alloys Metallurgy and Technology: Proceedings of a Symposium on Metallurgy and Technology of Refractory Metals Held in Washington, DC, April 25–26, 1968. Sponsored by the Refractory Metals Committee, Institute of Metals Division, The Metallurgical Society of AIME and the National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, *Springer Science & Business Media*,
- Magnusson, A., Baldwin Jr, W. 1957. Low temperature brittleness, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 5 (3), 172-181.
- Massone, A., Kiener, D. 2022. Prospects of enhancing the understanding of material-hydrogen interaction by novel in-situ and in-operando methods, *international journal of hydrogen energy*, 47 (17), 10097-10111.
- Michler, T., Naumann, J. 2008. Hydrogen environment embrittlement of austenitic stainless steels at low temperatures, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33 (8), 2111-2122.
- Moody, N., Venkataraman, S., Bastasz, B., Angelo, J., Gerberich, W. 1994. Hydrogen Effects on the Fracture of Thin Tantalum Nitride Films, *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 356, 827.
- Nagumo, M. 2004. Hydrogen related failure of steels—a new aspect, *Materials Science and Technology*, 20 (8), 940-950.
- Ohaeri, E., Eduok, U., Szpunar, J. 2018. Hydrogen related degradation in pipeline steel: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (31), 14584-14617.
- Ohnuki, S., Yasuda, T., Yashiki, K., Suda, T., Watanabe, S., 2006, Dynamic and static hydrogen effects on mechanical properties in Vanadium alloys, AIP Conference Proceedings, *American Institute of Physics*, 132-138.
- Oriani, R. 1978. Hydrogen embrittlement of steels, *Annual review of materials science*, 8 (1), 327-357.
- Owen, C., Cheong, D., Buck, O., Scott, T. 1984. Effects of hydrogen on mechanical properties of vanadium-niobium alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 15 (1), 147-153.
- Örnek, C., Mansoor, M., Larsson, A., Zhang, F., Harlow, G.S., Kroll, R., Carlà, F., Hussain, H., Derin, B., Kivisäkk, U. 2023. The causation of hydrogen embrittlement of duplex stainless steel: Phase instability of the austenite phase and ductile-to-brittle transition of the ferrite phase—Synergy between experiments and modelling, *Corrosion Science*, 217, 111140.
- Örnek, C., Reccagni, P., Kivisäkk, U., Bettini, E., Engelberg, D.L., Pan, J. 2018. Hydrogen embrittlement of super duplex stainless steel—Towards understanding the effects of microstructure and strain, *International journal of hydrogen energy*, 43 (27), 12543-12555.

- Petzow, G., 1999, Metallographic etching: techniques for metallography, ceramography, plastography, *ASM international*,
- Rahm, J.M., 2021, There Is an Alloy at the End of the Rainbow: Structure and Optical Properties from Bulk to Nano, *Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden)*,
- Raymond, L., 1988, Hydrogen Embrittlement Test Methods: Current Status and Projections, *ASTM International*,
- Rooy, E.L. 1990. Introduction to aluminum and aluminum alloys. in: Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials, *ASM International*, pp. 3-14.
- Roth, J., Schmid, K. 2011. Hydrogen in tungsten as plasma-facing material, *Physica Scripta*, 2011 (T145), 014031.
- Schapery, R. 1986. *Encyclopedia of Material Science and Engineering*, Pergamon, Oxford.
- Shirband, Z., Shishesaz, M.R., Ashrafi, A. 2011. Hydrogen degradation of steels and its related parameters, a review, *Phase Transitions*, 84 (11-12), 924-943.
- Sieradzki, K., Newman, R. 1987. Stress-corrosion cracking, *Journal of physics and chemistry of solids*, 48 (11), 1101-1113.
- Stoloff, N., Ashok, S., Xiao, P., 1981, Influence of hydrogen and test temperature on mechanical properties of vanadium and niobium. *Rensselaer Polytechnic Inst., Troy, NY (United States)*.
- Topbaş, M.A. 1998. *Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı*, Prestij Yayıncılık, İstanbul, 28-80.
- Vehoff, H. 2007. Hydrogen related material problems, *Hydrogen in metals III: properties and applications*, 215-278.
- Wang, M., Akiyama, E., Tsuzaki, K. 2007. Effect of hydrogen on the fracture behavior of high strength steel during slow strain rate test, *Corrosion science*, 49 (11), 4081-4097.
- Wang, Y., Kanedome, M., Yasuda, T., Suda, T., Watanabe, S., Ohnuki, S., Nagasaka, T., Muroga, T. 2004. Dynamic and static hydrogen effects on mechanical properties in pure vanadium, *Journal of nuclear materials*, 329, 477-480.
- Wert, C.A. 1978. Trapping of hydrogen in metals, *Hydrogen in Metals II: Application-Oriented Properties*, 305-330.
- Williamson, K.D., Cox, K.E., 1977, Hydrogen, Its Technology Implications, *Crc Press*,
- Yamane, R., Tokiwa, R., Kaneko, A., Takimoto, T., Adachi, T., Tsuchiya, H., Tonegawa, A., Uchida, H.T., 2021, Effect of hydrogen solution on the Young's modulus of rolled tungsten, *Actuator; International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications 2021*, VDE, 1-4.
- Yan, S., He, X., Zhu, Z. 2023. Hydrogen Embrittlement of CrCoNi Medium-Entropy Alloy with Millimeter-Scale Grain Size: *An In Situ Hydrogen Charging Study*, *Entropy*, 25 (4), 673.
- Yen, S., Tsai, Y. 1996. Critical hydrogen concentration for the brittle fracture of AISI 430 stainless steel, *Journal of the Electrochemical Society*, 143 (9), 2736.

- Yoo, J., Jo, M.C., Jo, M.C., Kim, S., Kim, S.-H., Oh, J., Sohn, S.S., Lee, S. 2021. Effects of solid solution and grain-boundary segregation of Mo on hydrogen embrittlement in 32MnB5 hot-stamping steels, *Acta Materialia*, 207, 116661.
- Yoo, Y., Zhang, X., Wang, F., Chen, X., Li, X.-Z., Nastasi, M., Cui, B. 2024. Spark plasma sintering of tungsten-based WTaVCr refractory high entropy alloys for nuclear fusion applications, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 31 (1), 146-154.
- Zamanzade, M., Barnoush, A. 2014. An overview of the hydrogen embrittlement of iron aluminides, *Procedia materials science*, 3, 2016-2023.
- Zhang, S., Northrup, J.E. 1991. Chemical potential dependence of defect formation energies in GaAs: Application to Ga self-diffusion, *Physical review letters*, 67 (17), 2339.
- Zhao, J., Jiang, Z., Lee, C.S. 2014. Effects of tungsten on the hydrogen embrittlement behaviour of microalloyed steels, *Corrosion Science*, 82, 380-391.



ÖZGEÇMİŞ**KİŞİSEL BİLGİLER**

Adı Soyadı : Yahya AYTEMİŞ

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: İMKB Anadolu Lisesi, Merkez, Muş	2009
Üniversite	: Cumhuriyet Üniversitesi, Merkez, Sivas	2014
Yüksek Lisans	: Alparslan Üniversitesi Merkez, Muş	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014-2015	Ortadoğu Mimarlık Mühendislik	Kontrol Mühendisi
2015-2019	Doğugaz Doğal Gaz Dağıtım A.Ş.	İç Tesisat Müdürü
2019-2022	Aymer Group Mak. Müh. Ltd. Şti	Şirket Yetkilisi
2022-2023	Muş Valiliği	Kontrol Mühendisi
2023- Halen	BOTAŞ	Mekanik Birim Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Doğal Gaz- Enerji-NDT Uzmanı-Level II (Tahribatsız Muayene Personeli)

YABANCI DİLLER

İngilizce