

HİDRİD OLUŞUMUNA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

İsak KOTÇİOĞLU*, Yüksel KAPLAN**, Mahmut D. MAT**, T. Nejat VEZİROĞLU***

*Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ERZURUM

**Niğde Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, NİĞDE

***Clean Energy Research Institute, University of Miami, Coral Gables, FL 33124, U.S.A.

ÖZET

Hidrojen genelde diğer yakıtlarda bulunmayan nadir özelliklere ve karakteristiklere sahip, hafif, temiz, çevre ile uyumlu ve uygun yanma karakteristiklerine sahip olan sentetik bir yakıttır. Hidrojen enerjisi, termal, mekanik ve elektrik gibi diğer enerji formlarına diğer yakıtlara göre daha verimli bir şekilde dönüştürülebilir. Hidrojen enerjisi sadece temiz ve kirletici olmayan bir yakıt olması nedeniyle değil, aynı zamanda sınırlı fosil yakıt rezervleri olması nedeni ile de son yıllarda çok önem kazanmıştır. Temel problem hidrojenin kullanımını sınırlayan depolama problemidir. Bu çalışmada, metal-hidrid yataklarda hidrojen depolanması, 3 boyutlu matematiksel model geliştirilerek nümerik olarak incelenmiştir. Matematiksel model depolama sırasında meydana gelen ısı ve kütle transferini, kimyasal reaksiyonları ve akışı içermektedir. Depolama sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyon ekzotermik bir reaksiyon olduğu için yatak ısınmaktadır. Yatak içindeki hidrojen akışı sıcaklık dağılımını etkilemesine rağmen, depolama hızını etkilememektedir.

Anahtar Kelimeler: Metal- hidrid yatak, Depolama, Hidrojen absorpsiyonu, Matematiksel model

NUMERICAL INVESTIGATION OF PARAMETERS AFFECTING HYDRIDE FORMATION

ABSTRACT

Hydrogen is a unique synthetic fuel with unusual properties and characteristics which are not shared by other fuels. It can be converted to other forms of energy, such as thermal, mechanical and electrical, with higher efficiencies than other fuels. It is the lightest and cleanest fuel, and environmentally most compatible. Hydrogen energy has recently gained great importance not only because of its being clean and non-pollutant fuel but also due to limited fossil fuel energy resources. The main problem lies in the storage limiting the hydrogen usage. In this study, hydrogen storage in metal-hydride beds has been investigated numerically developing a three-dimensional-mathematical model. The mathematical model includes the heat and mass transfer and chemical reaction that take place during the absorption. The hydride bed heats up due to the exothermic reaction that take place during the storage. Although hydrogen flow in bed affects the temperature distribution, it does not affect the storage velocity.

Key Words: Metal-Hydride Bed, Storage, Hydrogen absorption, Mathematical model

GİRİŞ

Fosil yatak rezervlerinin azalması, bu yakıtların çevresel zararları nedeniyle son yıllarda alternatif enerjiler üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Hidrojen enerjisi, hammaddesinin dünya yüzeyinde bol miktarda bulunan su olması ve çevreyi kirletmemesi nedeniyle en iyi alternatif enerji kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır. Hidrojen enerjisinin otomotiv, endüstri, fabrika ve evlerde kullanımını engelleyen en önemli problem depolama sorunudur.

Hidrojen depolanmasında üç temel yöntem vardır. Hidrojen gaz, sıvı ve metal-hidrid şeklinde depolanabilmektedir. Fakat gaz halde depolanması taşıtlar için geçerli değildir. Hidrojen gazını 17 MPa basınçta 16 galon hacimde depolamak için yaklaşık 1 ton ağırlığında ve 2 m³ hacminde bir ekipman gerekmektedir. Sıvılaştırma metodu da

pahalı olması nedeniyle pratik olarak uygun değildir. Hidrojeni sıvılaştırması 24K(-253°C) gibi düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir ve bu işlemler için elde edilen enerjinin 1/3'ü kadar enerji harcamak gereklidir. Dolayısıyla bu işlemde çok pahalıdır. Hidrojen depolanması için alternatif bir metot, metal-hidrid yataklardır. Metal hidrid depolama hidrojenin uygun bir alayla kimyasal reaksiyona girip yeni bir bileşik oluşturma esasına dayanır. Metal-hidrid kullanıldığı zaman 1-2 atmosfer basınçta birim kütle başına depolanan hidrojen miktarı sıvılaştırılmış hidrojen miktarından daha fazladır. Hidrojen kullanılmak istendiğinde metal hidrid deponun bir miktar ısıtılmasıyla istenilen miktarda hidrojeni geri almak mümkündür. Dolayısıyla metal-hidrid yataklarda hidrojenin şarjı veya deşarjı esnasında ısı transferinin ve kütle akışının bilinmesi metal-hidrid yatakların dizaynında çok önemlidir. Metal-hidrid depolama metodunun

getirdiği avantajlarla gelecekteki depolama metodu olacağı açıktır. Son yıllarda bu konuda birçok çalışma yapılmıştır(1-8).

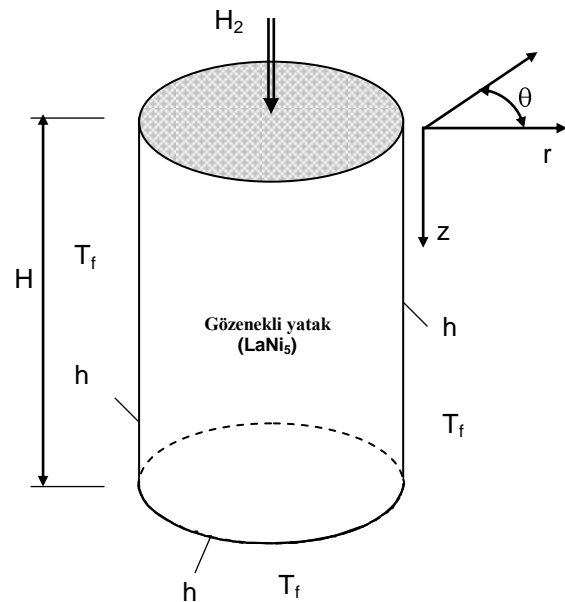
Lucas ve Richard (3) ısı taşınım denklemini ve hidrojen depolama sisteminin performansını, tek boyutlu olarak incelemişlerdir. Geliştirdikleri matematiksel modeli nümerik olarak çözmüşlerdir. Fakat geliştirilen modelde reaksiyonla açığa çıkan ısı hesaba katılmamıştır. Bernauer(4) çalışmasında, metal hidrid teknolojisi alanında son on yıldır yapılan çalışmalar neticesinde meydana gelen gelişmeleri özetlemiş, hidrojenin depolanmasıyla hidridin hareketli ve hareketsiz uygulamalarda, emniyetli bir şekilde kolaylıkla kullanılabileceğini göstermiştir. Mayer ve arkadaşları(5) çalışmalarında metal-hidrid kafesler için zamana bağlı ısı ve kütle transferini içeren bir matematik model geliştirmişler ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Bu model konvektif etkileri içermemektedir. Oysa konvektif terim metal hidrid kafeslerine yüksek basınçta hidrojen emdirilmesinde önem kazanmaktadır. Gopal ve Murthy(7) $MmNi_{4.5}Al_{0.5}$ alaşımından yapılmış metal-hidrid kafesinin hidrojen emilmesi ve bırakılmasında değişik soğutucu akışkan sıcaklığı etkisini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlar ve hidrojen emilmesinin düşük soğutucu akışkan sıcaklığında arttığını bulmuşlardır. Gopal ve Murthy(8) diğer çalışmalarında ise metal-hidrid yatakların performansına yatak kalınlığı, efektif ısı iletkenlik ve soğutucu sıcaklığının etkilerini inceleyerek optimum efektif ısı iletkenliğinin kafes kalınlığının artmasıyla arttığını belirtmişlerdir. Jemni ve Ben Nasrallah(9) metal-hidrojen reaktörlerinde absorpsiyon işlemlerini iki boyutlu bir matematiksel model geliştirerek incelemişlerdir. Sıcaklık basınç ve hidrid oluşumunun yoğunluğunun zamana ve boyuta göre değişimi ve bu değişkenlerin reaktör geometrisi, sıcaklık ve basınç gibi parametrelerle olan ilişkilerini incelemişler, fakat ısı ve kütle transferinin reaksiyon hızına etkilerini incelememişlerdir. Jemni ve arkadaşları(10) diğer bir çalışmada ise hidrojenin absorpsiyon ve disorpsiyon işlemlerini deneysel olarak incelemiş ve elde edilen sonuçlarla geliştirdikleri (9) teorik modelin geçerliliğini test etmişlerdir. Mat ve Kaplan(11) $LmNi_5-H_2$ hidrid reaktöründe hidrojen absorpsiyonunu nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında hidrid yataklardaki kompleks ısı ve kütle transferini ve kimyasal reaksiyonları göz önüne almışlardır. Hidrid oluşumunun denge sıcaklığından önemli ölçüde etkilendi-

ğini göstermişlerdir. Hidrid oluşumunun özellikle soğutulan cidar yakınlarda hızlı bir şekilde, merkez bölgelerinde ise yavaş olduğunu göstermişlerdir. Bir sonraki çalışmalarında ise (12) hidrit oluşumunu üç boyutlu (3D) olarak modellemişlerdir. Bu çalışmada basınç, sıcaklık ve reaksiyon hızı gibi parametrelerin hidrid oluşumuna etkilerini incelemişler ve elde ettikleri sonuçlarla deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğunu göstermişlerdir.

Mevcut çalışmanın amacı ise, metal-hidrid oluşumunu etki eden proses parametrelerinin araştırılması ve 3 boyutlu olarak oluşturulan matematiksel modeli geliştirerek akışlı ve akışsız durumlar için incelemek ve literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırmaktır.

MATEMATİKSEL MODEL

Hidrojen depolama işlemi hem ısı ve kütle transferi hem de reaksiyon hızının ve akışın beraber düşünülmesi gereken son derece kompleks bir olaydır. Teorik olarak incelenen metal-hidrid yatak Şekil 1'de verilmiştir. Bu yatak 25 mm çapında ve 60 mm yüksekliğinde ve içerisi gözenekli $LaNi_5$ alaşımı ile doldurulmuştur. Bu yatakta hidrid oluşumunu karakterize eden denklemler aşağıda verilmiştir.



Şekil 1. Fiziki model ve koordinat sistemi

Hidrojen Kütle Dengesi

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_g u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho_g u_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_g u_z) = -\dot{m} \quad (1)$$

Katı Fazın Kütle Dengesi

$$-\varepsilon \frac{\partial \rho_s}{\partial t} = \dot{m} \quad (2)$$

Momentum Denklemi

r-yönünde

$$\rho \frac{\partial u_r}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right) - \rho \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \quad (3)$$

θ- yönünde

$$\rho \frac{\partial u_\theta}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right) - \rho \left(u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) \quad (4)$$

z -yönünde

$$\rho \frac{\partial u_z}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) - \rho \left(u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (5)$$

Enerji Denklemi

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_c \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_c}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \lambda_c \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \rho C_p u_r \frac{\partial T}{\partial r} - \rho C_p u_\theta \frac{\partial T}{\partial \theta} - \rho C_p u_z \frac{\partial T}{\partial z} + \dot{m} (H^0 - T) (C_{ps} - C_{pg}) \quad (6)$$

Burada u_r , u_θ ve u_z sırayla r, θ ve z yönündeki hız

bileşenleri, ρ_e , C_{pe} , λ_e ve \dot{m} ise sırayla efektif

yoğunluk, özgül ısı, ısı iletkenlik ve depolanan hidrojen miktarıdır. $(\rho C_p)_e$ ifadesi;

$$(\rho C_p)_e = (\varepsilon \rho_g C_{pg} + (1-\varepsilon) \rho_s C_{ps}) \quad (7)$$

eşitliğinden hesaplanır. Burada ε gözeneklilik oranıdır. Efektif ısı iletkenlik,

$$\lambda_e = \varepsilon \lambda_g + (1-\varepsilon) \lambda_s \quad (8)$$

şeklinde yazılabilir. Burada λ_g gaz fazın, λ_s ise katı fazın ısı iletkenlik katsayısıdır. Jemni ve Ben Nasrallah(10) depolanan hidrojen miktarının reaksiyon oranıyla doğrudan ilgili olduğunu açıklamışlar ve bunu aşağıdaki denklemle ifade etmişlerdir.

$$\dot{m} = -C_a \exp \left(-\frac{E_a}{RT_s} \right) \ln \left(\frac{P_g}{P_{eq}} \right) (\rho_{ss} - \rho_s) \quad (9)$$

Burada C_a malzemeye bağlı sabit, ρ_{ss} katı fazın doymuş durumdaki yoğunluğu ve P_{eq} denge basıncını ifade etmektedir. Denge basıncı van't Hoff denklemi

$$\ln P_{eq} = A - \frac{B}{T} \quad (10)$$

yardımlarıyla hesaplandı. Burada A ve B malzeme sabitleri olup, sırasıyla 100.75 ve 31896.25 değerlerini almaktadır(10).

Başlangıç ve Sınır Şartları

Başlangıçta hidrid yatağının her tarafı aynı sıcaklıkta ve basınçta kabul edilmiştir.

t=0 da

$$P=P_0, T=T_0, u=v=w=0 \quad (11)$$

Hidrid yatağının yüzeyleri, sıcaklığı T_f olan soğutucu akışkan ile soğutulmakta ve hidrojen z=0 da sabit basınçta şarj edilmektedir. Buna göre sınır şartları;

r = 0 da

$$\frac{\partial P}{\partial r} \left(0, 0, t \right) = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} \left(0, 0, t \right) = 0 \quad (12)$$

z=H ve r=r₀ da

$$\frac{\partial P}{\partial r} \left(r_0, \theta, t \right) = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial z} \left(r, \theta, t \right) = 0 \quad (13)$$

$$r = r_0 \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \left(r_0, \theta, t \right) = h_1 \left(T - T_f \right) \quad (14)$$

$$z = H \text{ da } -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \left(r, \theta, t \right) = h_2 \left(T - T_f \right) \quad (15)$$

θ = 0 ve 2π de

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} \left(r, 0, t \right) = \frac{\partial T}{\partial \theta} \left(r, 2\pi, t \right), \quad (16)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} \left(r, 0, t \right) = \frac{\partial P}{\partial \theta} \left(r, 2\pi, t \right) \quad (17)$$

burada h_1 ve h_2 hidrid yatak ile hidrojen gaz ve yüzey duvarları ile soğutucu akışkan arasındaki ısı transfer katsayısıdır.

Tablo 1. Metal ve hidrojenin termofiziksel özellikleri ve kullanılan dataların değerleri.

	Metal (LaNi ₅)	Hidrojen
Yoğunluk, ρ (kg m ⁻³)	:4200	:0.0838
Özgül ısı, C _p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	:419	:14.89
Isıl iletkenlik katsayısı, λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	:1.087	:0.761147 10 ⁻⁴
Gaz Giriş sıcaklığı,(T ₀)	:293 K	

Yatak giriş ve soğutucu sıcaklığı, (T _f)	:293 K
Isı transfer katsayısı, h (Wm ⁻² K ⁻¹)	:325

NÜMERİK METOD

Genel denklemler PHOENICS(13) programı yardımıyla nümerik olarak çözülmüştür. PHOENICS programında olayları karakterize eden denklemler tamamen implicit olarak kontrol hacim yöntemi ile çözülmüştür. Bu yöntemde diferansiyel denklemler sonlu bir kontrol hacimde integre edilir. PHOENICS programı temel olarak aşağıdaki denklemi çözmektedir.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \phi \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\nabla \phi) + S \quad (18)$$

Burada ϕ çözüm için kullanılan (T, v, w, ρ_s , ρ_g gibi) genel değişkendir. S'de kaynak terimini ifade etmektedir. Bu denklemde olmayan özel kaynak terimleri PHOENICS' in temel yapısına uygun bir şekilde yazılan bir alt program eklenmiştir. Çözüm alanı r, θ ve z yönlerinde sırasıyla 25, 20 ve 60 gride bölünmüştür.

SONUÇLAR

Hidrojen metal-hidrid yatağa sarj edilmeden önce basınç ve sıcaklığı sabittir. Hidrojenin sıcaklığı 293 K olup soğutucu akışkan sıcaklığına eşittir.

Şekil 2'de elde edilen nümerik sonuçlarla Jemni ve arkadaşlarının(10) deneysel sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların uyum içinde olduğu görülmüştür.

Şekil 3'de r-z düzleminde ($\theta=\pi/2$) t=100, 500,1500 ve 2000 saniyelerdeki sıcaklık dağılımları görülmektedir. Şekil 3a'da görüldüğü gibi 100 saniye sonunda yataktaki sıcaklık önemli ölçüde yükselmektedir. Bunun sebebi meydana gelen reaksiyonun ekzotermik bir reaksiyon olmasıdır. Yatak girişte ve çevreden soğutulduğu için bu bölgelerde sıcaklık düşük olmaktadır. Şekil 3b ve Şekil 3c'de görüldüğü gibi kimyasal reaksiyon merkezde devam etmekte ve böylece merkezdeki sıcaklığın yüksek olmasına neden olmaktadır. t=2000 saniye sonra Şekil 3d' de ise görüldüğü gibi yatakta sıcaklık oldukça düşmüştür ve yatak içindeki sıcaklık gradyanı azalmıştır. Bunun sebebi metal doyma durumuna yaklaşması ve kimyasal reaksiyonun çok yavaşlamasıdır. Fakat yatak merkezinde azda olsa ısı üretimi mevcuttur.

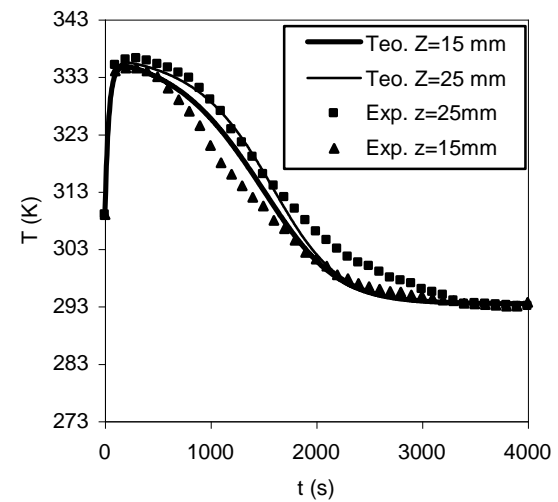
Farklı zaman aralıklarında hidrid/metal değişimi Şekil 4'de verilmiştir. Metal-hidrid

oluşumuna etki eden en önemli proses parametrelerden biride sıcaklıktır. Şekil 4a ve Şekil 4b'de görüldüğü gibi soğuk yüzeylerde hidrid oluşumu yüksek olmaktadır. Yatak merkezinde ise sıcaklık yüksek olduğundan hidrid oluşumu yavaş olmaktadır. Bunun sebebi sıcaklığın artmasıyla reaksiyon hızının azalmasıdır. t=1500 ve 2000 saniyeye ulaştığında yatağın girişinde ve soğutma yüzeylerinde hidrid oluşumu büyük ölçüde tamamlanmakta ve yatak merkezinde ise az da olsa reaksiyon devam ettiği için burada H/M oranı düşük olmaktadır (Şekil 4c,d). Bu durum denklem 9 ile açıklanabilir. Denklemde hidrid oluşumunda etkili parametreler denge basıncı ve sıcaklık olduğu görülmektedir.

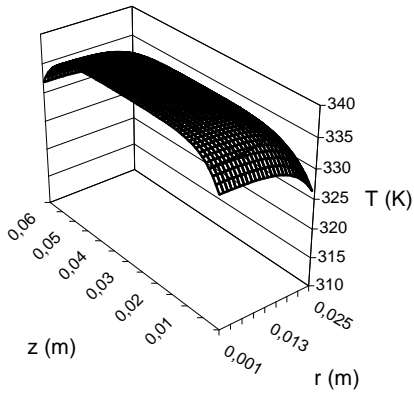
Bu denklemdeki $\exp\left(-\frac{E_a}{RT_s}\right)$ teriminden dolayı

sıcaklık artması ile hidrojen miktarının artması beklenir. Fakat aynı denklemde $\ln\left(\frac{P_g}{P_{eq}}\right)$

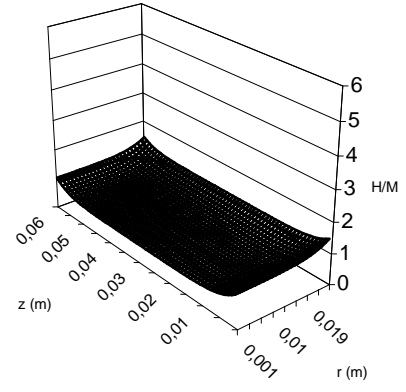
teriminde bulunan P_{eq} ise sıcaklıkla artmakta, dolayısıyla hidrid oluşumunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sonuç emilen hidrojen miktarında etkili parametre denge basıncı olduğunu ortaya koymaktadır.



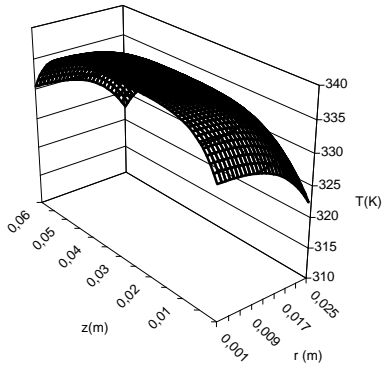
Şekil 2. Nümerik olarak elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması(10)



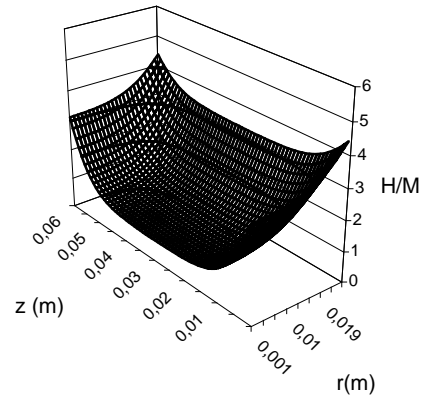
(a)



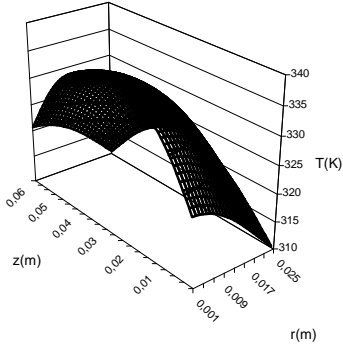
(a)



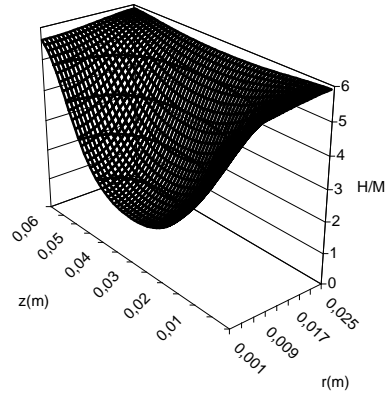
(b)



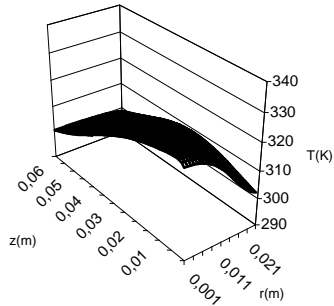
(b)



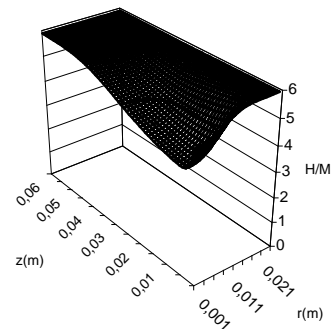
(c)



(c)



(d)



Şekil 3. Metal-hidrid yataкта sıcaklık dağılımının zamana göre değişimi
a)t=100 s b)t=500 s c)t=1500 s d)t=2000 s

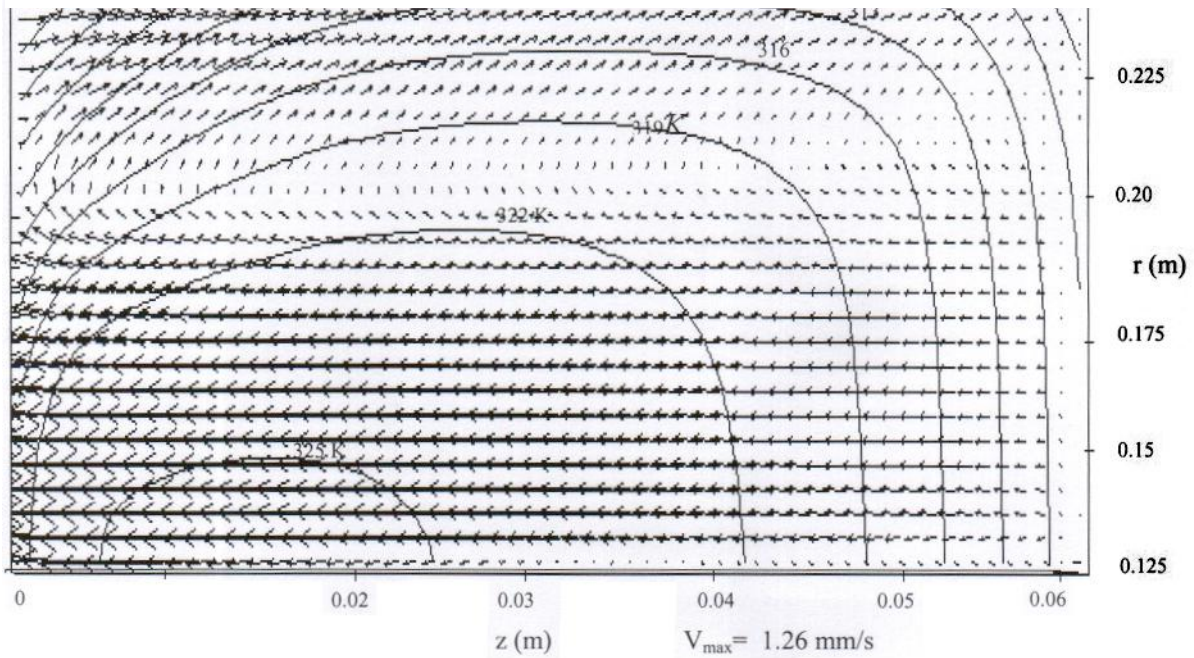
(d)

Şekil 4. Metal-hidrid yatakta değişik zamanlara göre H/M dağılımı

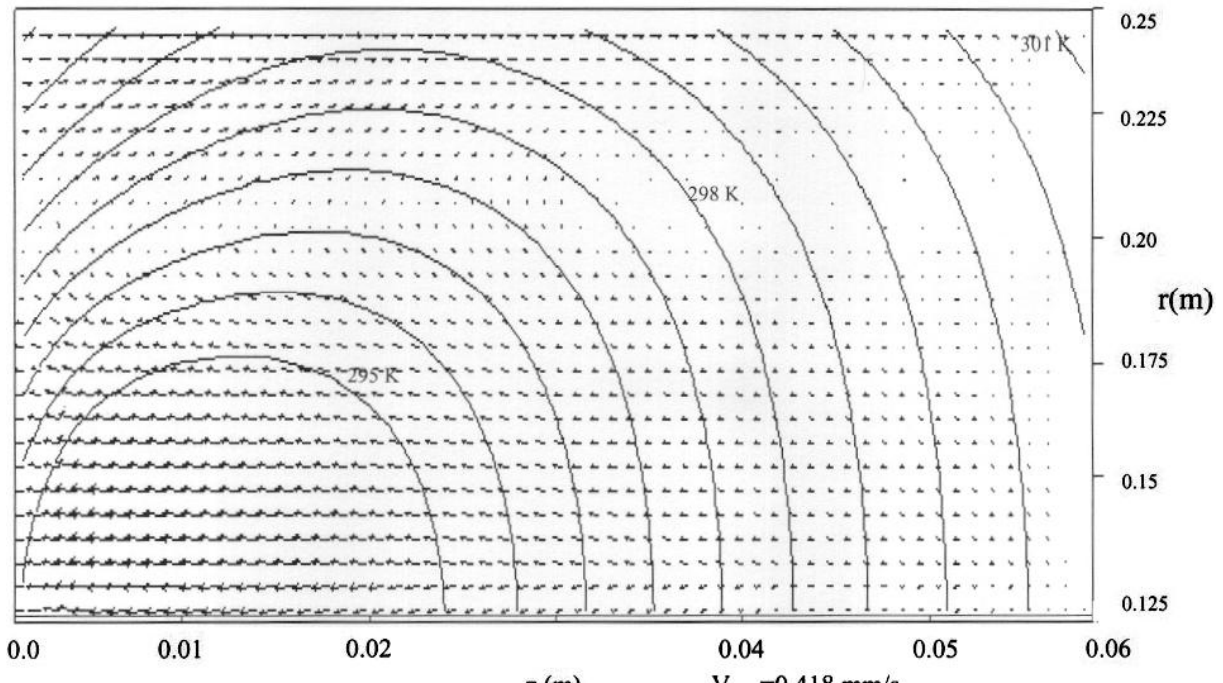
a)t=100 s b)t=500 s c)t=1500 s d)t=2000 s

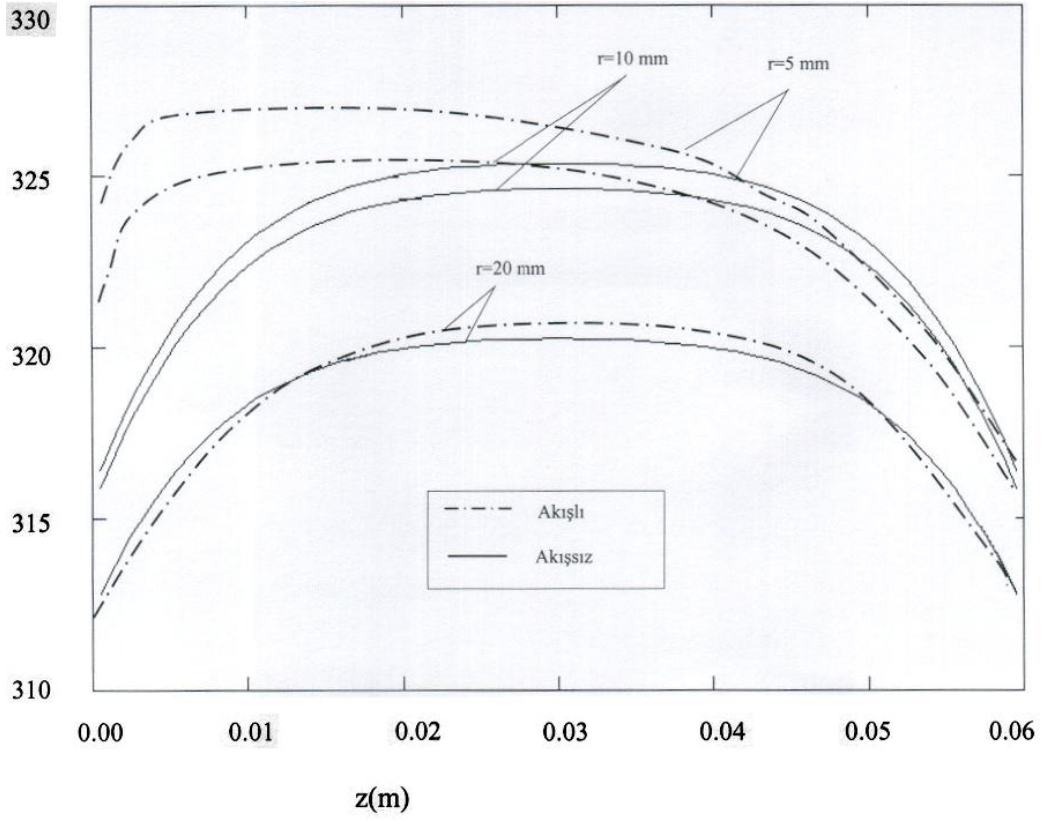
$t=200$ ve 2500 saniyede hız ve sıcaklık profilleri Şekil 5 'de verilmiştir. Şekil 5a ve Şekil 5b'de hız vektörlerine aynı ölçek kullanılmıştır. Şekil 5b'de hız vektörünün Şekil 5a'ya göre önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi metalin doyma durumuna yaklaşması ve kimyasal reaksiyonun çok yavaşlamasıdır. Dolayısıyla sıcaklık dağılımının hız vektöründen önemli ölçüde etkilenmediği sonucuna varılabilir.

Şekil 5. Yatak içerisindeki sıcaklık ve hız profillerinin dağılımı a) $t=200$ s b) $t=2500$ s

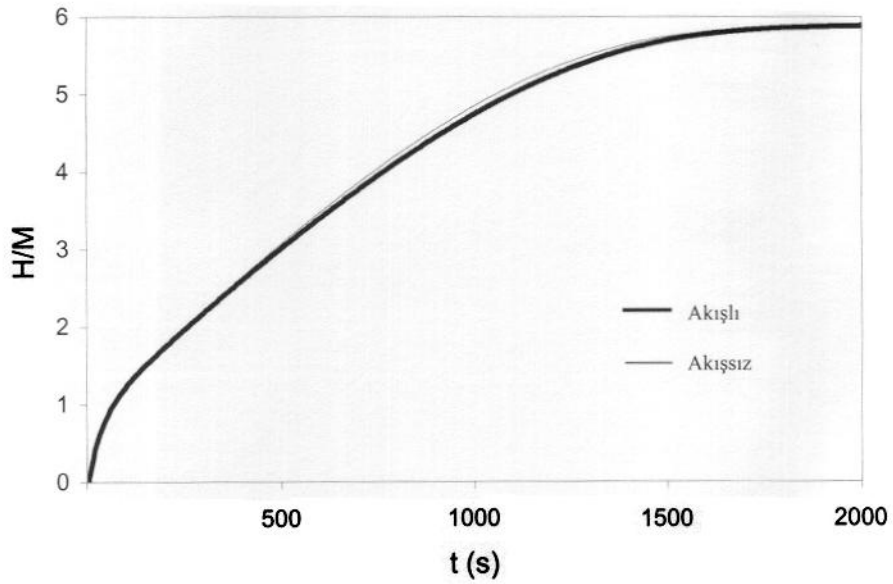


(a)





Şekil 6. Yatak geometrisinde akışlı ve akışsız durumlarda sıcaklık profilleri



Şekil 7 Akışlı ve akışsız durumlar için H/M oranının karşılaştırılması

Şekil 6' da akışın sıcaklık üzerindeki etkisini göstermek için akışlı ve akışsız ortamlardaki sıcaklık profilleri mukayese edilmiştir. Konvektif etkiler düşünülmediğinde simetrik bir sıcaklık dağılımı elde edilmektedir. Buna karşın konvektif etkiler dahil edildiğinde yani akışlı durumda, sıcaklık eğrilerinin özellikle giriş kısmında bozulduğu görülmektedir. Giriş kısmında akışlı durumda $r=5\text{mm}$ ve $r=10\text{mm}$ 'de merkezde sıcaklığın önemli ölçüde yüksek olduğu, fakat cidara yakın kısımlarda sıcaklığın daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Şekil 7' de yatak içerisinde hidrid oluşumu akışlı ve akışsız durumlar için mukayese edilmiştir. Hız profilleri sıcaklık profillerini bozduğu halde, H/M oranını etkilemediği görülmüştür. Bu durumun gözenekli ortamdan dolayı hızın nispeten küçük oluşundan kaynaklandığı söylenebilir. Benzer sonuçları Jemni ve Ben Nasrallah (9) nümerik çalışmalarında bulmuşlardır.

SONUÇ

Bu çalışmada 3 boyutlu metal-hidrid yatak içerisinde hidrojenin depolanması nümerik olarak incelenmiştir. Geliştirilen matematiksel model hidrid oluşumu esnasında, meydana gelen ısı ve kütle transferini, kimyasal reaksiyonu ve gaz akışını içermektedir. Elde edilen sonuçlar hidrid oluşumunda sıcaklığın önemli bir parametre olduğunu göstermiştir. Başlangıçta hidrid oluşumu yatak içerisinde düzgün bir şekilde artmaktadır. Reaksiyon ısısından dolayı yatak içerisinde sıcaklık arttığından cidar civarında ve yatak girişinde hidrid oluşumu daha hızlı gerçekleşmekte, merkezde ise daha yavaş olduğu görülmüştür.

Elde edilen nümerik sonuçlar akışın yatak içerisinde sıcaklık profillerini önemli ölçüde etkilediğini, ancak toplam hidrit oluşumunun akıştan etkilenmediğini göstermektedir. Ayrıca yatak içerisindeki sıcaklık akışsız durumla mukayese edilmiştir. Bazı bölgelerde akıştan dolayı sıcaklık düşmesine rağmen bu düşüş yatağın diğer bölgelerindeki sıcaklık artışlarıyla dengelenmektedir.

SİMGELER

C_p	Özgül ısı ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
E_a	Aktivasyon enerjisi (J mol^{-1})
h	Isı transfer katsayısı ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
H	Yatak yüksekliği (m)
H/M	Hidrojen-metal atomik oranı

m	Hidrojen absorpsiyon miktarı ($\text{kg m}^{-3}\text{s}^{-1}$)
P	Basınc (Pa)
r	Radyal koordinat (m)
r_0	Yatak yarı çapı (m)
R	Evrensel gaz sabiti ($\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$)
t	Zaman (s)
T	Sıcaklık (K)
z	Eksenel koordinat (m)
ε	Gözeneklilik
λ	Isı iletkenlik katsayısı ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
μ	Dinamik viskozite ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	Yoğunluk (kgm^{-3})
θ	Açısal koordinat (rad)

Alt indisler

e	Efektif
eq	Denge
f	Soğutucu akışkan
g	Gaz
0	Başlangıç
s	Katı

KAYNAKLAR

- 1) Supper, W., Groll, M., Mayer, U., Reaction Kinetics in Metal Hydride Reaction Beds with Improved Heat and Mass Transfer, J Less-Common Metals, 104, 279-286,1984.
- 2) Suissa, E., Jacob, I., Hadari, Z., Experimental Measurements and General Conclusions on the Effective Thermal Conductivity of Powdered Metal Hydrides, J Less-Common Metals, 104,287-205,1984.
- 3) Lucas, G.G., Richards, W.L., Mathematical Modeling of Hydrogen Storage Systems,Int. J. Hydrogen Energy, 9(3) 225-231,1984.
- 4) Bernauer, O., Metal Hydride Technology, Int. J. Hydrogen Energy , 13(3), 181-190,1988.
- 5) Mayer, U., Groll, M., Supper, W., Heat and Mass Transfer in Metal Hydride Reaction Beds Experimental and Theoretical Results, J. Less-Common Metals, 131, 235-44,1987.
- 6) Sun, DW., Deng, S.J., A Theoretical Model Predicting the Effective Thermal Conductivity in Powdered Metal Hydride Beds, Int.J.Hydrogen Energy,15(5),331-336,1990.
- 7) Gopal, M.R., Murty, S.S., Prediction of Heat and Mass Transfer in Annular Cylindrical

- Metal Hydride Beds, Int. J. Hydrogen Energy, 17(10), 795-805,1992.
- 8) Gopal, M.R., Murty, S.S., Studies on Heat and Mass Transfer in Metal-Hydride Beds, Int J. Hydrogen Energy, 20(11), 911-917,1995.
- 9) Jemni, A., Ben Nasrallah, S., Study of Two-Dimensional Heat and Mass Transfer During Absorption in a Metal- Hydrogen Reactor, Int. J. Hydrogen Energy, 20(1), 43-52,1995.
- 10) Jemni, A., Ben Nasrallah, S., Jilani, L., Experimental and Theoretical Study of a Metal-Hydrogen Reactor, Int. J. Hydrogen Energy, 24(1), 631-644,1999.
- 11) Mat, M., Kaplan, Y., Numerical Study of Hydrogen Absorption in an La Ni₅ Hydride Reactor, Int. J. Hydrogen Energy, 26(9), 957-963,2001.
- 12) Mat M. D., Kaplan Y., Aldaş K. Investigation of Three-Dimensional Heat and Mass Transfer in a Metal Hydride Reactor. Int. J. Eney Research (2001-Değerlendirmede)
- 13) Rosten, H., Spalding, D.B., Phoenics Manual, CHAM, TR/1000. London,UK:1986.