

URANYUM DİOKSİDİN TERMODİNAMİK ÖZELİKLERİ

Mehmet KIRBIYIK*

ÖZET

Bu çalışmada uranyum dioksidin katı, sıvı ve sıvı-buhar fazlarına ait termodinamik özellikleri ve hal denklemleri ampirik ve analitik formüller halinde verilmiştir. Bunun için Menzies tarafından verilen $P_c = 2000$ bar, $T_c = 8000$ K ve $v_c = 0.33258$ cm³/g kritik nokta değerlerinden yararlanılmıştır. Ayrıca bir ve iki fazlı adyabatik ortamlarda ses hızını veren bağıntılar çıkarılmıştır.

ABSTRACT

In this study, thermodynamic properties and equations of state concerning solid, liquid and liquid-vapor phase of uranium dioxide were given in empirical and analytical formulas. Menzies' critical point estimates of 2000 bars, 800 K and 0.33258 cm³/g were used. Moreover, the relations of the speed of sound were derived in single and two-phase domains for adiabatic process.

1. GİRİŞ

Dünya enerji gereksinimini karşılamak için nükleer reaktör teknolojisinin geliştirilmesine paralel olarak reaktör emniyeti ve güvenliği çalışmaları da yoğunlaşmıştır. Amaç; çevre ve insan sağlığına zararsız, temiz ve emniyetli enerji kaynakları geliştirmektir.

Bugünkü nükleer güç reaktörlerinin esas yakıt maddesi uranyum dioksit (UO₂) dir. Bir kaza olması halinde reaktörün nötronik ve hidrodinamik davranışlarını belirlemek gerekmektedir. Bu davranışların belirlenmesi reaktör yakıtının yüksek sıcaklık ve basınçlarda hal denkleminin ve termodinamik özelliklerinin bilinmesi ile olanaklıdır. Fakat yüksek sıcaklık ve basınçlarda deneysel çalışma zorluğu vardır. Gerekliğinde kritik noktaya kadar olan verileri elde etmek için ekstrapolasyon tekniği kullanılmaktadır.

Son yıllarda uranyum dioksidin termodinamik özelliklerine ait deneysel ve teorik çalışma sonuçları ampirik bağıntılar, tablo ve grafikler halinde verilmiştir^{1,2}. Güç reaktörlerinin sağlıklı bir emniyet analizi; büyük bilgisayar programlarının kul-

* Doç. Dr.; Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Bursa.

lanılmasını gerektirmektedir. Bilgisayar hesaplamalarında tablo verileri ve grafiklerden ziyade daha çok ampirik ve analitik formüller tercih edilmektedir. Böylece hesaplama zamanı kısaltmakta ve programlama kolaylığı sağlanmaktadır.

Bu çalışmanın amacı; uranyum dioksidin katı, sıvı ve iki fazlı termodinamik özelliklerini ampirik ve analitik formüller halinde vermektir. Bunun için Menzies² tarafından verilen $P_c = 2000$ bar, $T_c = 8000$ K ve $v_c = 0.33258$ cm³/g kritik nokta değerlerinden yararlanılmıştır. Özelliklerin tutarlı olması için Clapeyron denklemi ve temel termodinamik bağıntılar³ sağlanmış, buhar-sıvı dengesinin bir tek bileşen ve kimyasal olarak asal termodinamik bir sistem olduğu farzedilmiştir. Ayrıca bir ve iki fazlı adyabatik ortamlarda ses hızını veren bağıntılar çıkarılmıştır. En küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilen formüllerin sade ve kullanışlı olmasına özen gösterilmiştir.

Bu uranyum dioksidin termodinamik özellikleri hızlı reaktörlerin yakıtı olan (UO₂ - PuO₂) içinde kullanılabilir.

2. SIVI-BUHAR FAZININ HAL DENKLEMİ

İki fazlı bir ortamda sıcaklık değişiminin; uranyum dioksidin doymuş özellikleri ve türevleri cinsinden ifade edilmesi emniyet çalışmaları için faydalıdır. Adyabatik bir işlem için enerjinin korunumu denklemi

$$dh = -q dv + v dp_{\text{doy}} \quad (1)$$

olarak yazılabilir. Burada h özgül entalpi, q sanki viskoz basınç⁴, v özgül hacim ve p_{doy} doymuş buhar basıncıdır.

Sıvı-buhar fazında p_{doy} basıncı salt sıcaklığın fonksiyonudur ve

$$p_{\text{doy}} = p(T)$$

veya

$$dp_{\text{doy}} = \left(\frac{dp}{dT} \right)_{\text{doy}} dT \quad (2)$$

dir. h entalpisi ise T sıcaklığının ve x kuruluk derecesinin fonksiyonu olarak

$$h = h(T, x)$$

veya

$$h = h_s + x h_{\text{sg}} \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir. Bu son denklemin diferensiyeli alınırsa

$$dh = \left[\frac{dh_s}{dT} + x \frac{dh_{\text{sg}}}{dT} + h_{\text{sg}} \frac{dx}{dT} \right] dT \quad (4)$$

olur. Benzer şekilde özgül hacim ve onun diferensiyeli, sırası ile

$$v = v_s + x v_{\text{sg}} \quad (5)$$

$$dv = \left[\frac{dv_s}{dT} + x \frac{dv_{\text{sg}}}{dT} + v_{\text{sg}} \frac{dx}{dT} \right] dT \quad (6)$$

dir. Yukarıdaki denklemlerde h_s doymuş sıvı uranyum dioksidin özgül entalpisi, h_{sg} özgül buharlaşma entalpisi, v_s doymuş sıvı uranyum dioksidin özgül hacmi ve v_{sg} özgül buharlaşma hacmi salt sıcaklığın fonksiyonudurlar. (4) ve (6) denklemleri arasında dx/dT yok edilirse,

$$dh = \frac{h_{sg}}{v_{sg}} dv + \left[\frac{dh_s}{dT} + x \frac{dh_{sg}}{dT} - \frac{h_{sg}'}{v_{sg}} \left(\frac{dv_s}{dT} + x \frac{dv_{sg}}{dT} \right) \right] dT \quad (7)$$

elde edilir. (2) ve (7) denklemleri (1) denklemi ile birleştirilirse,

$$dT = \frac{- \left(q + \frac{h_{sg}}{v_{sg}} \right) dv}{\frac{dh_s}{dT} + x \frac{dh_{sg}}{dT} - \frac{h_{sg}'}{v_{sg}} \left(\frac{dv_s}{dT} + x \frac{dv_{sg}}{dT} \right) - v \left(\frac{dp}{dT} \right)_{\text{doy}}} \quad (8)$$

bulunur.

3. DOYMUŞ ÖZELİKLER

Doymuş haldeki uranyum dioksidin termodinamik özellikleri; emniyet analizi hesaplamalarında kolaylıkla kullanılması için ampirik ve analitik formüller halinde verilmiştir. Bu formüller salt sıcaklığın fonksiyonudurlar. Menzies'nin verilerinden yararlanarak elde edilmişlerdir.

3.1. Buhar Basıncı

Sıcaklığa bağlı doymuş buhar basıncı

$$p_{\text{doy}}(T) = \exp \left(-4.34 \ln T - \frac{76800}{T} + 69.979 \right) \quad (9)$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada p_{doy} 'ın birimi din/cm^2 , T 'nin ise kelvin K 'dir. (9) denklemi, uranyum dioksidin buhar basıncı ölçmelerinin ampirik bir neticesidir¹.

Son zamanlarda uranyum dioksidin buhar basıncı Chasanow, Leibowitz ve Gabelnick tarafından da hesaplanmıştır⁵. Fakat diğer termodinamik özellikler Menzies'nin verilerine dayandığından bu çalışmada Menzies'nin buhar basıncı eğrisini veren (9) denklemi kullanılmaktadır.

3.2. Doymuş sıvı haldeki özgül hacim ve doymuş sıcaklık

Menzies'nin tablo değerlerine² en küçük kareler yönteminin uygulanmasıyla, sıcaklığa bağlı doymuş sıvı haldeki uranyum dioksidin özgül hacmi için

$$v_s(T) = \frac{0.33258}{\left[1 + 2.51373 \left(1 - \frac{T}{8000} \right)^{0.402581} \right]} \quad (10)$$

ifadesi bulunmuştur. Burada v_s cm^3/g ve T sıcaklığı K cinsindedir. Doymuş sıcaklık, T_{doy} , ise (10) denkleminde kolayca elde edilebilir:

$$T_{\text{doy}} (v_s) = 8000 \left\{ 1 - \left[\frac{1}{2.51373} \left(\frac{0.33258}{V_s} - 1 \right) \right]^{1/0.402581} \right\} \quad (11)$$

3.3. Doymuş buharın özgül hacmi

Doymuş buhar halindeki uranyum dioksidin özgül hacmi²;

$$v_g(T) = \exp(46.4565 - 1.85322 \times 10^{-2} T + 2.6899 \times 10^{-6} T^2 - 1.39106 \times 10^{-10} T^3) \\ [1 - 0.206359 \exp(T - 8000)] \quad (12)$$

denklemleri ile verilmektedir. v_g 'nin birimi cm^3/g , T 'ninki ise K'dir.

3.4. Doymuş haldeki sıvı ve buharın özgül iç enerjisi

Doymuş sıvı haldeki uranyum dioksidin özgül iç enerjisi için aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$e_s(T) = (-122.109 + 0.473014 T - 2.36112 \times 10^{-5} T^2 + 4.25418 \times 10^{-9} T^3) \\ \left[1 + 0.370629 \exp\left(\frac{T - 8010}{130}\right) \right] \quad (13)$$

Burada e_s 'nin birimi Joule (J)/g ve T 'nin K'dir. Yüksek sıcaklıklarda sıvı özellikler arasındaki tutarlılığı sağlamak için (13) denklemi üzerinde bir düzeltme yapılmıştır. Bundan böyle iç enerji değerleri Menzies'in verilerinden biraz farklıdır.

Doymuş buhar halindeki uranyum dioksidin özgül iç enerjisi diğer doymuş özelliklerin yardımı ile Clapeyron denkleminin kolayca hesaplanabilir.

3.5. Doymuş sıvı halin özgül entropisi

Doymuş sıvı haldeki uranyum dioksidin özgül entropisi;

$$ds = \frac{de}{T} + \frac{p}{T} dv \quad (14)$$

Gibbs-Duhem denkleminin doymuş sıvı çizgisi boyunca integralinin alınması ile elde edilir. Doymuş sıvı halin özgül iç enerjisi için (13) denkleminin diferensiyeli, özgül hacim için (10) denkleminin diferensiyeli ve basınç için (9) denklemi (14) denkleminde yerine konur ve 3761 K'den $T(K)$ 'e kadar integral alınırsa sıcaklığın fonksiyonu olarak doymuş sıvı halin özgül entropisi;

$$s_s(T) = -3.8067196 + 0.473014 \ln T - 4.72224 \times 10^{-5} T + 6.38125 \times 10^{-9} T^2 \\ + (0.17415 - 8.546 \times 10^{-6} T + 1.57672 \times 10^{-9} T^2) \exp\left(\frac{T - 8010}{130}\right) \\ + \exp(-67.9445 + 2.36358 \times 10^{-2} T - 3.38261 \times 10^{-6} T^2 + 1.74433 \times 10^{-10} T^3) \quad (15)$$

bulunur. s_s 'nin birimi J/g-K 'dir. Bir atmosferik doymuş basınca tekabül eden doymuş sıcaklık 3761 K'de sıvı hal özgül entropi değeri sıfır alınmıştır.

3.6. Özgül buharlaşma entropisi

Uranyum dioksit yakıtı doymuş sıvı halden doymuş buhar haline geçerken sıcaklık ve basınç sabit kalır ve doymuş bölgede hacmin fonksiyonu değıldirler. Bu şartlar altında Clapeyron denklemi³ ;

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{\text{doy}} = \frac{h_g - h_s}{T(v_g - v_s)} = \frac{h_{sg}}{Tv_{sg}} \quad (16)$$

dir. Sabit sıcaklık ve basınçtaki bir işlem için Gibbs-Duhem denkleminde elde edilen

$$s_g - s_s = \frac{h_{sg}}{T}$$

eşitliğı (16) denkleminde yerine konursa

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{\text{doy}} = \frac{s_g - s_s}{v_g - v_s} = \frac{s_{sg}}{v_{sg}} \quad (17)$$

olur. Burada s_{sg} özgül buharlaşma entropisidir.

$\left(\frac{dp}{dT}\right)_{\text{doy}}$ değeri buhar-basınç eğrisini veren (9) denkleminde özgül hacimlerde (10) ve (12) denklemlerinden bilindiğıne göre ssg sıcaklığın fonksiyonu olarak (17) denkleminde hesaplanabilir.

4. SIVI HAL ÖZELİKLERİ

Uranyum dioksidin doymuş özellikleri kullanılarak yüksek sıcaklıklarda geçerli olan sıvı hal termodinamik özelliklerine ait analitik ve ampirik bağıntılar aşağıda çıkarılmıştır.

4.1. Sıvı hal basıncı

Sıvı uranyum dioksit için hal denklemi

$$p = p(e, \rho) \quad (18)$$

olarak yazılabilir. Reaktör emniyeti çalışmaları açısından basıncın iç enerji yerine sıcaklık cinsinden $p(T, \rho)$ olarak ifade edilmesi daha uygundur. (18) denkleminin diferensiyeli alınır;

$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial e}\right)_{\rho} de + \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_{e} d\rho$$

veya

$$dp = \frac{\gamma_v(\rho)}{c_v} de + \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_{e} d\rho \quad (19)$$

bulunur. Bu denklemde ısı basıncı katsayısı

$$\gamma_v(\rho) = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{\rho}$$

özdeşliği ile tarif edilir ve p basıncı, c_v sabit hacimde özgül ısıyı, e özgül iç enerjisi, ρ yoğunluğu ve T sıcaklığı göstermektedir. Sıvı uranyum dioksit için γ_v salt yoğunluğun fonksiyonu olarak kabul edilmiştir⁶. Gerçekte sıcaklığa da bağlı olmakla beraber doymuş sıcaklık civarındaki değişmeler için sıcaklığın kuvvetli bir fonksiyonu değildir. Yoğunluk sabit tutularak doymuş sıcaklık $T_{\text{doy}}(\rho)$ ve sıvı bölge sıcaklığı T arasında (19) denkleminin integrali alınırsa

$$p(T, \rho) = p_{\text{doy}} [T_{\text{doy}}(\rho)] + \gamma_v(\rho) [T - T_{\text{doy}}(\rho)] \quad (20)$$

bulunur.

Görüldüğü gibi sıvı hal denklemi iç enerji yerine sıcaklık cinsinden ifade edilmiştir. $\gamma_v(\rho)$ ve sıcaklık değişimi; (21) ve (24) denklemlerinden hesaplanabilir. $p(T, \rho)$ 'yi hesaplamak için p_{doy} ve $T_{\text{doy}}(\rho)$ 'nin bilinmesi gerekmektedir. Onlarda (9) ve (11) denklemlerinden hesaplanabilir.

4.2. Isıl basınç katsayısı

Sıvı uranyum dioksit için ısıl basınç katsayısı, $\gamma_v(\rho)$, (9) ve (10) denklemlerinden yararlanarak hesaplanmıştır. Yoğunluğa bağlı polinom şeklindeki ifadesi

$$\gamma_v(\rho) = (6.62545 - 3.11963 \rho + 0.361439 \rho^2 + 0.048254 \rho^3) \times 10^6 \quad (21)$$

dir. Birimi $\text{din/cm}^2 \cdot \text{K}$, ρ 'nun birimi g/cm^3 'dir. γ_v ; uranyum dioksidin sıvı hal basıncını ve diğer sıvı hal özelliklerini hesaplamak için kullanılmaktadır.

4.3. Özgül ısı

Uranyum dioksidin sıvı hali için özgül iç enerji değişimi

$$de = c_v dT + (T\gamma_v - p)dv \quad (22)$$

termodinamik bağıntısıyla verilmektedir. Madde 1.3.1.'de γ_v 'nin salt yoğunluğun fonksiyonu olduğu farzedilmiştir. Bunun neticesi olarak c_v 'de salt sıcaklığın fonksiyonu olur. Öyle ki;

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = T \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v = T \left(\frac{\partial \gamma_v}{\partial T}\right)_v = 0 \text{ dir.}$$

Bu şartlarda c_v ; uranyum dioksidin doymuş özellikleri kullanılarak doymuş sıvı çizgisi boyunca (22) denkleminde kolayca hesaplanabilir. Belirli sıcaklık noktalarında bulunan sayısal değerler sıcaklığın fonksiyonu olarak bir eğriye fit edilirse aşağıdaki özgül ısı ifadesi bulunur:

$$c_v(T) = (0.517 - 1.07749 \times 10^{-4} T + 2.20425 \times 10^{-8} T^2 - 1.0655 \times 10^{-12} T^3) \left[1 + 16.6343 \exp\left(\frac{T - 7980}{115}\right) \right] \quad (23)$$

Burada c_v 'nin birimi $\text{j/g} \cdot \text{K}$ 'dir. Bu ifade sıvı bölgesi için de geçerlidir.

4.4. Sıvı hal sıcaklığı

Adyabatik bir işlem için enerji denklemi

$$de = - (p + q) dv$$

ile (22) denklemi eşitlenirse sıvı uranyum dioksidin sıcaklık değişimi

$$dT = - \frac{1}{c_v} (q + T\gamma_v) dv \quad (24)$$

bulunur.

4.5. İç enerji

Sabit hacimde özgül ısı sıcaklığın fonksiyonu olarak bilindiğine göre sıvı uranyum dioksidin özgül iç enerjisi kolayca hesaplanabilir. Sabit bir hacim işlemi için (22) denkleminin $T_{\text{doy}}(\rho)$ ve T arasında integrali alınırsa sıvı hal özgül iç enerji ifadesi

$$\begin{aligned} e_{\text{as}}(T) = & e_s [T_{\text{doy}}(\rho)] + 0.517 [T - T_{\text{doy}}(\rho)] \\ & - 5.38745 \times 10^{-5} [T^2 - T_{\text{doy}}^2(\rho)] + 7.3475 \times 10^{-9} [T^3 - T_{\text{doy}}^3(\rho)] \\ & - 2.66367 \times 10^{-13} [T^4 - T_{\text{doy}}^4(\rho)] + (1013.83 - 0.215978 T \\ & + 4.28693 \times 10^{-5} T^2 - 2.03826 \times 10^{-9} T^3) \exp\left(\frac{T - 7980}{115}\right) \\ & + [-1013.83 + 0.215978 T_{\text{doy}}(\rho) - 4.28693 \times 10^{-5} T_{\text{doy}}^2(\rho) \\ & + 2.03826 \times 10^{-9} T_{\text{doy}}^3(\rho)] \exp\left(\frac{T_{\text{doy}}(\rho) - 7980}{115}\right) \end{aligned} \quad (25)$$

olarak bulunur. e_{as} 'nin birimi J/g ve sıcaklıklarınki ise K'dir.

4.6. Entropi

Sıvı uranyum dioksit için entropi; bağımsız değişken v ve T cinsinden

$$s_{\text{as}} = s(v, T)$$

veya

$$ds_{\text{as}} = \frac{c_v}{T} dT + \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dv \quad (26)$$

olarak ifade edilebilir. c_v 'nin analitik formülü (26) denkleminde yerine konur ve hacim sabit tutularak $T_{\text{doy}}(\rho)$ ile T arasında integrali alınırsa aşağıdaki analitik entropi denklemi bulunur:

$$s_{\text{as}}(T) = s_s [T_{\text{doy}}(\rho)] + 0.517 \ln\left(\frac{T}{T_{\text{doy}}(\rho)}\right)$$

$$\begin{aligned}
& - 1.07749 \times 10^{-4} [T - T_{\text{doy}}(\rho)] + 1.102125 \times 10^{-8} [T^2 - T_{\text{doy}}^2(\rho)] \\
& - 0.35517 \times 10^{-12} [T^3 - T_{\text{doy}}^3(\rho)] + (-0.211023 + 4.26349 \times 10^{-5} T \\
& - 2.03826 \times 10^{-9} T^2) \exp\left(\frac{T-7980}{115}\right) + [0.211023 - 4.26349 \times 10^{-5} T_{\text{doy}}(\rho) \\
& + 2.03826 \times 10^{-9} T_{\text{doy}}^2(\rho)] \exp\left(\frac{T_{\text{doy}}(\rho) - 7980}{115}\right) \quad (27)
\end{aligned}$$

Burada s_{as} 'nin birimi J/g-K, sıcaklıkların birimi K'dır.

Dikkat edilirse (25) ve (27) denklemlerindeki T sıcaklığındaki ρ yoğunluğu ile T_{doy} sıcaklığındaki ρ yoğunluğunun birbirine eşit olduğu görülmektedir.

5. KATI HAL ÖZELİKLERİ

Herhangi bir termodinamik işlem için katı uranyum dioksidin yoğunluğu sabit farzedilerek enerji ve katı hal denklemi sırası ile

$$de_k = \delta Q \quad (28)$$

ve

$$de_k = \left(\frac{\partial e_k}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial e_k}{\partial v}\right)_T dv = C_{vk} dT \quad (29)$$

olur. Sabit hacimde özgül ısı

$$C_{vk}(T) = 0.22731 + 2.95464 \times 10^{-5} T + 3.22113 \times 10^{-8} T^2 \quad (30)$$

formülü ile verilmektedir⁷. Birimi J/g-K'dır.

Katı hal basıncı için ise doymuş buhar basıncını veren (9) denklemi kullanılabilir.

6. SIVI VE SIVI-BUHAR FAZLI ADYABATİK ORTAMLARDA SES HIZI

Sıvı fazında uranyum dioksidin hal denklemi

$$p = p(\rho, T)$$

veya diferensiyel şeklinde

$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T d\rho + \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\rho dT \quad (31)$$

olarak yazılabilir. Adyabatik değişmeler için enerji denklemi ise

$$de - \frac{p}{\rho^2} d\rho = 0 \quad (32)$$

olur. Burada de; (22) denklemi ile verilmektedir.

(22), (31) ve (32) denklemleri kendi aralarında birleştirilir ve gerekli işlemler yapılırsa sıvı fazındaki ses hızının karesini veren aşağıdaki ifade elde edilir:

$$C_1^2 = \frac{dp}{d\rho} = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T + \frac{T\gamma_v^2}{C_v\rho^2} \quad (33)$$

Bu ifadedeki $\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T$; (20) denkleminde kolayca bulunur:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T = \left[\frac{dp_{doy}}{dT} - \gamma_v \right] \frac{dT_{doy}}{d\rho} + [T - T_{doy}] \frac{d\gamma_v}{d\rho}$$

Sıvı-buhar fazında uranyum dioksidin hali aşağıdaki denklem takımı ile belirlenebilir:

$$\left. \begin{aligned} p_{doy} &= p(T) \\ e &= e_s(T) + x e_{sg}(T) \\ x &= x(\rho, T) \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

ve

Burada kuruluk derecesi

$$x = \frac{1/\rho - V_s(T)}{v_g(T) - v_s(T)} \quad (35)$$

bağıntısı ile tarif edilmektedir.

Yukarıdaki denklem takımının diferensiyeli alınır

$$\left. \begin{aligned} dp_{doy} &= \left(\frac{dp}{dT} \right)_{doy} dT \\ de &= \frac{de_s}{dT} dT + x \frac{de_{sg}}{dT} dT + e_{sg} dx \\ dx &= \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right)_T d\rho + \left(\frac{\partial x}{\partial T} \right) dT \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

ve

olur. dT ve dx bu diferensiyel denklemler arasında yok edilirse

$$\begin{aligned} de &= \frac{\frac{de_s}{dT}}{\left(\frac{dp}{dT} \right)_{doy}} dp_{doy} + \frac{x \frac{de_{sg}}{dT}}{\left(\frac{dp}{dT} \right)_{doy}} dp_{doy} \\ &+ e_{sg} \left(\frac{\partial x}{\partial T} \right) d\rho + \frac{e_{sg} \left(\frac{\partial x}{\partial T} \right) \rho}{\left(\frac{dp}{dT} \right)_{doy}} dp_{doy} \end{aligned} \quad (37)$$

bulunur. Bu (37) ve (32) denklemleri birleştirildiğinde iki fazlı adyabatik ortamda

C₂ ses hızını veren analitik bağıntı

$$C_2^2 = \frac{dp_{\text{doy}}}{d\rho} = \frac{\left[\frac{p_{\text{doy}}}{\rho^2} - e_{\text{sg}} \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right)_T \right] \left(\frac{dp}{dT} \right)_{\text{doy}}}{\frac{de_s}{dT} + x \frac{de_{\text{sg}}}{dT} + e_{\text{sg}} \left(\frac{\partial x}{\partial T} \right)_\rho} \quad (38)$$

elde edilir.

Uranyum dioksit için ses hızı, bir veya iki fazlı olmasına göre (33) veya (38) denklemden kolayca hesaplanabilir. Bu analitik denklemlerin güvenilirliği için deneysel çalışmaların da yapılması gerekir.

7. SONUÇ

Bu çalışmada uranyum dioksidin birbiri ile tutarlı termodinamik özellikleri ve hal denklemi çıkarılmıştır. Bir güç reaktörünün emniyet analizinde kullanılması için bulunan analitik ve ampirik ifadeler bilgisayar kodlarına kolayca programlanabilir. Özgül buharlaşma hacmi, iç enerji, entalpi ve entropi değerleri sıcaklığın fonksiyonu olarak Tablo: 1'de gösterilmiştir. En düşük sıcaklık 3761 K bir atmosferlik doymuş basınca karşılık gelmektedir. Tablo: 1'deki özgül buharlaşma değerleri beklenildiği şekilde kritik nokta civarında sıfıra yaklaşmaktadır.

Tablo: 1
Uranyum dioksidin özgül buharlaşma hacmi, iç enerji entalpi ve entropi değerleri

T (K)	v _{sg} (cm ³ /g)	e _{sg} (J/g)	h _{sg} (J/g)	s _{sg} (J/g-K)
3761	1645	2517	2684	0.7136
4000	641	2338	2506	0.6266
5000	39	1794	1973	0.3947
6000	8	1556	1764	0.2940
7000	2	1036	1220	0.1743
7400	1	688	824	0.1114
7800	0.4230	319	390	0.0500
7999	0.9765	63	77	0.0096

Sıvı özellikler; doymuş sıvı özelliklerden yararlanarak bulunduğundan sıvı ve sıvı-buhar fazı arasındaki geçişlerde termodinamik özelliklerin sürekliliği korunmaktadır.

KAYNAKLAR

1. D.C. MENZIES: The equation of state of uranium dioxide at high temperatures and pressures, TRG Report, 1119 (D), UKAEA (1966).
2. D.L. BOOTH: The thermodynamic Properties of Na, Al₂O₃, Mo and UO₂ above 2000 K, TRG Report 1759, UKAEA (1968).

3. A.R. BÜYÜKTÜR: Termodinamik, Cilt 2, Uludağ Üniversitesi Basımevi, 1985.
4. J. VON NEUMANN, R.D. RICHTMYER: A Method for the numerical calculation of hydrodynamic shocks, J. App. Phys. 21, 232-237, (1950).
5. M.G. CHASANOV, L. LEIBOWITZ ve S.D. GEBELNICK: High temperature physical properties of fast reactor Materials, J. Nucl. Materials, 49, 129-135, (1973).
6. J.S. ROWLINSON: Liquid and liquid mixtures, Butterworth Scientific Publications, London (1959).
7. L. LEIBOWITZ, D.F. FISCHER ve M.C. CHASANOV: Enthalpy of uranium-plutonium oxides; (U_{0.8} P_{0.2}) O_{1.97} from 2350 to 3000 K, J. Nucl. Materials, 42, 113 (1972).