



İKİ BOYUTLU DIŞ YÜZEYLERDE ISIL AŞINMA SAYISAL ANALİZİ

Fatma Serap AYKAN* ve Zafer DURSUNKAYA**

* FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. P.K 37 Gölbaşı Ankara, fsakin@yahoo.com

** Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü B-308, Ankara,
refaz@metu.edu.tr

(Geliş Tarihi: 31. 01. 2008, Kabul Tarihi: 01. 04. 2008)

Özet: İki boyutlu dış yüzeylerde ısıl aşınabilen malzemelerin ısıl tepkilerini analiz eden bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem tüm fiziksel alanı sürekli bir çözüm alanı olarak almakta, ayrışmanın başladığı ve bittiği pozisyonu kontrol etmeye gerek duymamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda malzemenin ayrışması derecesi n olan Arrhenius denklemi kullanılarak modellenmiş, reaksiyon sonucu oluşan gazların ideal gaz gibi davrandıkları ve basıncın tüm çözüm alanında sabit olduğu varsayılmıştır. Mekanik erozyon veya faz değişimi ile yüzeyden kömür malzemenin ayrılması matematiksel modele dâhil edilmemiş, ayrışmanın bir çizgi boyunca değil bir bölge boyunca meydana gelmesi durumu incelenmiştir. Yöntem, ilk olarak bir boyutlu kartezyen geometriler için geliştirilmiş ve literatürdeki deneysel sonuçla karşılaştırılmıştır. Geliştirilen yöntem iki boyutlu kartezyen geometrilere uygulanmış ve değişen kalınlığa sahip geometrilerin analiz edilebilmesi için matematiksel dönüşümlerle fiziksel alan boyutsuz kare çözüm alanına çevrilmiştir. İki boyutlu kartezyen modelleme sonlu uzunluktaki silindirik geometrilere uyarlanmış, değişken çaplı silindirik geometrilerin çözülebilmesi için problem boyutsuz çözüm alanına dönüştürülmüştür. Tüm problemlerde malzeme ilk durumda sabit sıcaklıkta alınmış ve sınır koşulu olarak radyasyon, sabit ısı akısı ve yalıtımlı yüzey sınır koşulları uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isıl koruma, iki boyutlu ısıl aşınma, kompozit ayrışma, Arrhenius denklemi.

NUMERICAL ANALYSIS OF ABLATION PROCESS ON A TWO DIMENSIONAL EXTERNAL SURFACE

Abstract: The thermal response analysis of an ablative material on a two dimensional external surface is performed. The method considers the whole domain as one continuous computational domain, eliminating the necessity to check the starting and ending positions of the decomposition zone. The current study solves the decomposition of the material at high temperatures by using the n th order Arrhenius equation but excludes the removal of char from the surface due to mechanical erosion or phase change and considers that the ablation process takes place in a finite zone. Pyrolysis gases are assumed to behave as ideal gas and the pressure is taken as a constant on the whole physical domain. The formulation for one-dimensional case is validated by experimental results obtained from literature. The two-dimensional case in a Cartesian geometry is formulated and an algebraic transformation is used to normalize the region in both directions and transform at same time into a square computational domain in order to get a solution for variable thickness domains. The formulation for two-dimensional case is revised for the cylindrical coordinates with a finite length in the axial direction. To solve geometries where the outer surface deviates from cylindrical, the formulation is scaled and transformed into a non-dimensional square computational domain. In all problems, the radiation, constant heat flux and adiabatic wall boundary conditions exist and the entire domain is initially at a constant temperature.

Keywords: Thermal protection, 2-D ablation, composite decomposition, Arrhenius equation.

SEMBOLLER

M : Kütle [kg]
 $\bar{\rho}$: Görünen yoğunluk [kg/m³]
 $\tilde{\rho}$: Gerçek yoğunluk [kg/m³]
 A : Arrhenius sabiti
 n : Arrhenius derecesi
 E : Eşik enerjisi [J/kmol]
 R : Gaz sabiti [J/kgK], [J/kmolK]
 T : Sıcaklık [°C]

R : Hacim oranı
 V : Hacim [m³]
 P : Basınç [Pa]
 c : Özgül ısı [J/kgK]
 k : Isıl iletkenlik [W/mK]
 Q_d : Ayrışma ısısı [J/kg]
 t : zaman [sn]
 x : yatay koordinat [m]
 y : dikey koordinat [m]
 r : radyal koordinat [m]
 z : eksenel koordinat [m]

Ω : kütle akısı [$\text{kg/m}^2\text{s}$]

ξ : boyutsuz yatay koordinat

λ : boyutsuz dikey koordinat

İndeksler

k : Katı malzeme

g : Gaz malzeme

o : Orijinal malzeme

c : Kömürleşmiş malzeme

GİRİŞ

Yapıları maruz kaldıkları ısıya karşı korumak amacıyla uygulamada pek çok ısı koruma mekanizması mevcuttur. Her bir mekanizma farklı ihtiyaçlara yönelik geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

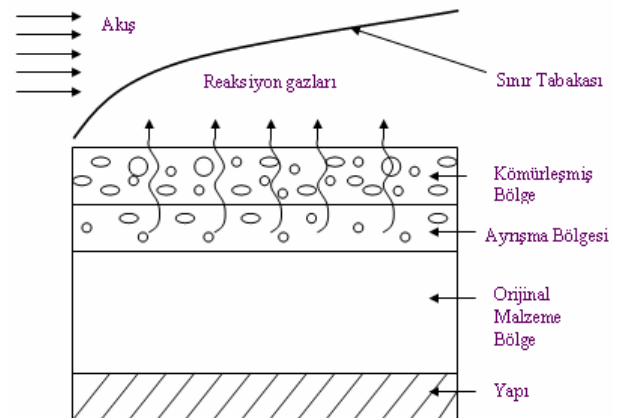
- Isı Soğurma: Isı soğurma yönteminde, yüksek termal iletkenlik özelliğine sahip malzemeler hızlı bir şekilde ısıyı korunan yapıdan uzaklaştırmak için kullanılmaktadır.
- Aktif Soğutma: Bu yöntemde sıvı ve gazlar boru sistemleri kullanılarak ve çoğunlukla dışarıdan enerji sağlayarak ısı soğurucu olarak kullanılmaktadır.
- Terleme ile Soğutma: Terleme ile soğutma, sıvı veya gazın gözenekli yüzeyden sınır tabakasına püskürtülmesi ile yapılmaktadır.
- Radyasyon ile Soğutma: Korunacak yapının yüzeyine uygulanan yüksek ışınım katsayısına sahip kaplamalarla yüzeye gelen yüksek ısı akıları yansıtılmakta ve böylelikle yalıtım sağlanmaktadır.
- Isıl Aşınma ile Soğutma: Isı ve kütle transferini kendi kendini düzenleyen ve maruz kaldığı ısıyı malzeme kaybıyla harcayan bir yalıtım mekanizmasıdır.

Aerodinamik ısınma yüksek hızlardaki hava araçlarında, uzun menzilli füzelerde ve uzay araçlarında tasarımı etkileyen önemli bir unsurdur. Isınma esnasında sınır tabakasındaki havanın sıcaklığı 1000°C 'lere ulaşmakta bu nedenle fonksiyonel yapının görevini yerine getirebilmesi için maruz kaldığı ısıdan korunması gerekmektedir. Bu maksatla kullanılan çeşitli ısı yalıtım yöntemleri vardır. Isıl aşınma da (ablasyon) bunlardan biridir. ASTM E 349 (1992) de tanımlandığı şekilde ısı aşınma, yapıyı maruz kaldığı ısıya karşı koruyan, termal enerjiyi malzemenin ısınarak aşınmasıyla sarf eden ve kendi kendini düzenleyen bir ısı ve kütle transferi mekanizmasıdır.

Isıl aşınan malzemeler çoğunlukla matris ve organik bağlayıcıdan oluşan kompozit malzemelerdir. Matris yapıyı oluşturan malzeme yüksek erime sıcaklığına ve yüksek mukavemet değerine sahipken organik bağlayıcı olarak kullanılan malzemeler düşük termal iletkenlik katsayısına ve matris malzemeye oranla düşük erime ya da ayrışma reaksiyonu sıcaklığına sahiptir.

Isıl aşınma işlemi birkaç aşamadan oluşur. İlk aşamada, maruz kaldığı ısı dolayısıyla yapı içerisinde sıcaklık artışı olur ve bu aşamada sadece iletim ile ısı aktarımı vardır. Yüzey sıcaklığı, ayrışma reaksiyonu ya da faz değişim sıcaklığına eriştiğinde yüzeyde ayrışma ya da faz değişimi başlamaktadır. Hangi mekanizmanın meydana geleceği yalıtım malzemesinin karakteristiğine bağlıdır. Bazı yalıtım malzemelerinde termo-kimyasal dönüşüm sabit bir sıcaklıkta değil bir sıcaklık aralığında olabilir. Bu durumda reaksiyon bir düzlemde değil bir bölgede meydana gelmektedir. Bu bölge, "ayrışma bölgesi" olarak adlandırılmaktadır. Orijinal malzemede ayrışma reaksiyonu meydana geldiğinde reaksiyon ürünü olarak gazlar oluşmakta ve yüzeye doğru akmaktadır. Geriye kalan gözenekli yapıya ise kömür ve bu bölgeye "kömürleşmiş bölge" denilmektedir. Sıcaklık arttıkça ayrışma bölgesi yüzeyden iç bölgelere doğru ilerlemekte ve kömürleşmiş bölge kalınlığı artmaktadır. Ayrışma reaksiyonu endotermik bir reaksiyon olduğu için ısının bir kısmı reaksiyon sırasında kullanılmaktadır. Bu sırada gözenekli kömürleşmiş bölge, içinden geçen reaksiyon sonucunda oluşan gazlar sayesinde soğutulmaktadır. Ayrıca bu gazlar yüzeyde oluşan sınır tabakasına ulaştığında, sınır tabakası kalınlığını artırmakta ve böylelikle taşınım ile malzemeye aktarılan ısı miktarını azaltmaktadır. Son olarak yüksek sıcaklık değerlerine ulaşan kömürleşmiş malzemede ve reaksiyon ürünü gazlarda farklı kimyasal reaksiyon meydana gelmektedir. Gözenekli yapıdaki yüksek sıcaklığa sahip kömürleşmiş tabakanın mukavemeti azalmakta maruz kaldığı kesme kuvveti nedeniyle sahip olduğu ısı ile birlikte malzeme yüzeyinden koparak ayrılmaktadır.

Bir ısıl aşınma problemi yukarıda belirtilmiş olan birçok karmaşık mekanizmadan oluşmaktadır. Bazıları ısıl yalıtım anlamında diğerlerine göre daha etkindir. Bu çalışmada yalıtım anlamında nispeten daha baskın olduğu değerlendirilen mekanizmalar çözüme dâhil edilmiştir. Isıl aşınma işleminin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Isıl aşınma işlemi şematik gösterimi.

Literatürde Isıl Aşınma konusunda pek çok çalışma mevcuttur. Ancak çalışmaların birçoğunda uygulama alanının gizlilik içermesi sebebiyle detaylı bilgiye

erişmek mümkün değildir. Bu çalışmaların başında Florio ve vd. (1991) cam takviyeli kompozit malzeme üzerine yaptıkları analitik ve sayısal çalışma gelmektedir. Çalışmalarında gaz fazı ile katı faz arasında lokal termal denge olduğu ve olmadığı durumları sonlu farklar yöntemi kullanarak incelenmiştir. Shih ve arkadaşlarının (2003) geliştirdiği modelde ise zamanla değişen ısıl aşınma probleminde yüzeyde eriyik katman oluştuğu ve oluşmadığı durumlar hareketli sınır yöntemiyle incelenmiştir. Sayısal formülasyonda sonlu hacim yöntemi kullanılmıştır. Shih ve Cheung başka bir çalışmada ise (1997) termo-kimyasal genleşmenin ısıl aşınmaya etkisini incelemiştir. Hogan ve arkadaşlarının çalışmasında (1996) yalıtım malzemesinin aşınmasını lineer elastik katı malzemenin davranışına benzeterek kontrol hacim sonlu elemanlar yöntemiyle iki boyutlu eksenel simetrik geometriler için sayısal analizler yapmıştır. Çalışmada termo-kimyasal ayrışmanın sabit bir sıcaklıkta gerçekleştiği varsayılmıştır.

Bu çalışmada ise kartezyen ve silindirik iki boyutlu geometriler için sonlu farklar yöntemi kullanılarak, kömürleşmiş bölgenin ve ayrışma bölgesinin başlangıcını ve bitişini takip etmeden (hareketli sınır yöntemini kullanmaya gerek olmadan) malzeme ve sıcaklık dağılımını hesaplayan bir yöntem geliştirilmiştir. Termo-kimyasal reaksiyon belli bir sıcaklık aralığında gerçekleşebilmekte ve lineer olmayan sınır koşulu (radyasyon) çözülmektedir.

ISI VE KÜTLE TRANSFERİ MODELLEMESİ

Bir Boyutlu Kartezyen Geometrilere Isıl Aşınma Analizi

Problemin matematiksel modelini oluşturmak için, kütle ve enerji korunumu denklemleri kullanılmıştır. Orijinal malzeme reaksiyona girince gaz fazında ve katı fazda reaksiyon ürünleri açığa çıkarmaktadır. Orijinal malzemenin ve reaksiyon sonucu oluşan kömürleşmiş malzemenin tamamı katı malzeme olarak tanımlanmıştır. (Eşitlik.1,2)

$$M_k = M_o + M_c \quad (1)$$

$$M_o \xrightarrow{\text{reaksiyon}} M_g + M_c \quad (2)$$

Ayrışma reaksiyonu nedeniyle katı kütle kaybı n derecesinden Arrhenius denklemiyle çözülmüştür (Shih vd., 2003). Buna göre katı fazdaki malzemelerin özgül ağırlığının zamana göre değişimi Eşitlik.3'te verilmiştir.

$$\dot{\rho}_k = -\frac{\partial \bar{\rho}_k}{\partial t} = -\bar{\rho}_o A \left(\frac{\bar{\rho}_k - \bar{\rho}_c}{\bar{\rho}_o} \right)^n e^{(-E/RT)} \quad (3)$$

Ayrışma reaksiyonu hacimsel olarak ifade edilirse birim hacimdeki orijinal malzeme reaksiyon sonucunda “a” birim hacimde kömürleşmiş malzemeye ve “1-a” birim

hacimde gaz dönüşmektedir. Burada “a” meydana gelen termo-kimyasal reaksiyonun bir parametresidir. İncelenen hacimde orijinal, kömürleşmiş ve gaz malzemenin hacminin toplam hacme oranı zamana göre değişen bir parametre olarak tanımlanmıştır.

$$R_o = \frac{V_o}{V_t} \quad R_c = \frac{V_c}{V_t} \quad R_g = \frac{V_g}{V_t} \quad (4a,b,c)$$

Gaz fazındaki malzemenin ideal gaz gibi davrandığı varsayılarak gaz yoğunluğu sıcaklığın bir fonksiyonu olarak alınmıştır.

$$\frac{\partial \bar{\rho}_g}{\partial t} = -\frac{P}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Kontrol hacimdeki toplam gaz kütlesi reaksiyondan oluşan gazlar ve iç yüzeyden dış doğru olan gaz akışı nedeniyle değişmektedir. Birim alandaki gaz kütle akışı Ω olarak gösterilirse gaz kütle akısının konuma göre değişimi Eşitlik.6 kullanılarak verilebilir.

$$\frac{\partial \Omega}{\partial y} = -\frac{\partial \bar{\rho}_k}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho}_g R_g) \quad (6)$$

Orijinal, kömürleşmiş ve gaz fazındaki malzemelerde ısı iletimi ile ve iç yüzeyden dış yüzeye doğru olan gaz akışı sebebiyle konveksiyon ısı transferi vardır. Ayrışma reaksiyonu sebebiyle reaksiyona bağlı olarak bir ısı tüketimi/üretimi olmaktadır. Bununla birlikte problem zamana bağlı bir problem olarak çözüldüğünden ısı depolaması da olmaktadır. Tüm bu mekanizmalar dahil edilerek enerji denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

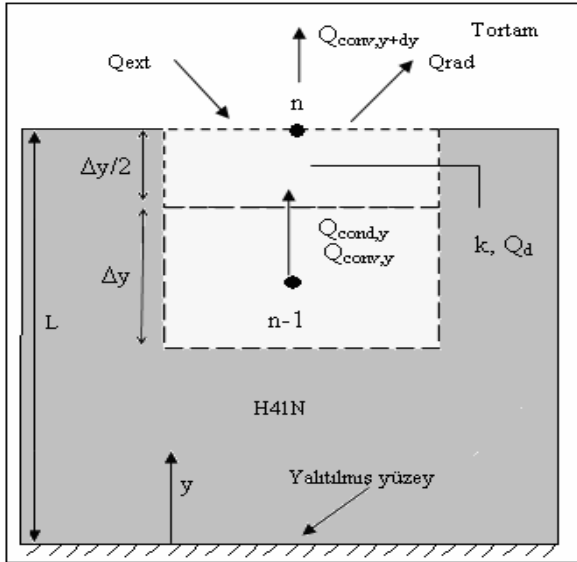
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[(\bar{\rho}_g c_g R_g + \bar{\rho}_c c_c R_c + \bar{\rho}_o c_o R_o) T \right] = \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(k_o R_o \frac{\partial T}{\partial y} + k_c R_c \frac{\partial T}{\partial y} + k_g R_g \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ - \left[c_g \frac{\partial}{\partial y} (\Omega T) + Q_d \frac{\partial \bar{\rho}_k}{\partial t} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Çözüm algoritması Şekil 2’de gösterildiği gibi belli bir yakınsama kriterini sağlayacak biçimde iteratif olarak kurulmuştur. Arrhenius denklemi açık (explicit), bunun dışındaki tüm denklemler kapalı (implicit) olarak çözülmüştür.



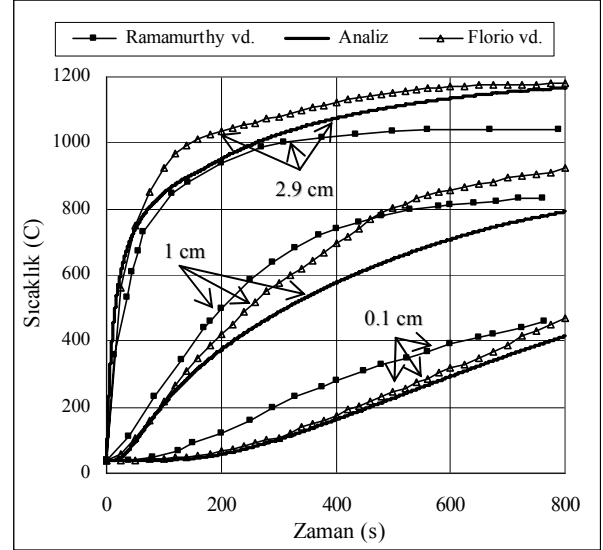
Şekil 2. Çözüm algoritması.

Geliştirilen formülasyonun doğruluğunu görmek amacıyla literatürde bulunan malzeme bilgilerinden ve test sonuçlarından faydalanılmıştır. Literatürdeki çalışmada 0.03 m kalınlığında, yapının tek boyutlu ısı transferi yapacağı kabullenmesini mümkün olduğunca sağlayacak genişlikte H41N malzemesinden üretilmiş, 40°C sabit sıcaklıkta, bir yüzeyi yalıtılmış bir yüzeyinde ortama radyasyon transferi yapan aynı zamanda 279.7 kW/m² sabit ısı akısına maruz kalan bir bloğun test verileri kullanılmıştır. Aynı model, geliştirilen yöntem kullanılarak 151 çözüm noktasıyla 0.2 sn zaman aralığıyla toplam 800 sn için analiz edilmiştir. (Şekil 3)



Şekil 3. Problemin şematik gösterimi.

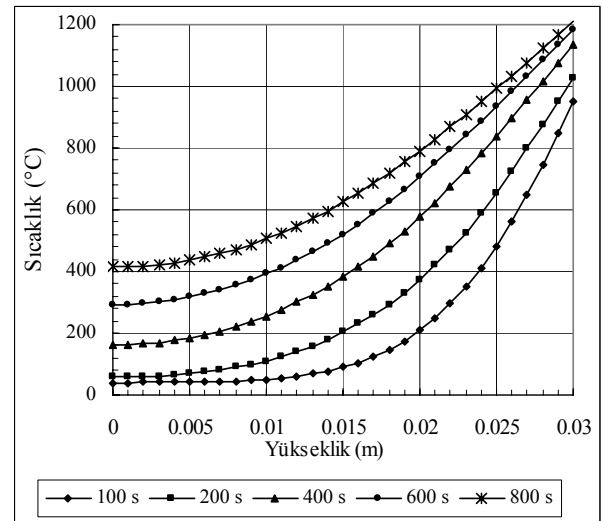
Problemden H41N malzemesine ait bilgiler Shih vd. (2003)'nin yaptığı çalışmadan alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Ramamurthy vd. (1990)'nin yaptığı testin sonuçları ve Florio vd. (1991) tarafından yapılan sayısal çalışmayla karşılaştırılmıştır. Çözüm alanında yalıtılmış yüzeyden 0.1 cm, 1 cm, ve 2.9 cm mesafelerindeki sıcaklığın zamana göre değişimi Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Yalıtılmış yüzeyden 0.1 cm, 1 cm, ve 2.9 cm mesafesinde sıcaklığın zamana göre değişimi.

Dış yüzeye yakın bölgelerde testten elde edilen ve analizden elde edilen sıcaklık profilleri birbirleriyle oldukça uyumlu çıkmıştır ancak yüzeyden içe doğru ilerledikçe analiz değerleri, test değerlerinden daha düşük çıkmaktadır. Test ve analiz verileri arasındaki maksimum göreceli sıcaklık farkının çözüm süresinin ilk yarısında artmakta, ilerleyen zamanlarda ise bu fark giderek azalmaktadır. Ramamurthy vd. (1990) tarafından yapılan test çalışmasında deneydeki belirsizliklerin ±%5 olduğu belirtilmiştir. Ayrıca malzeme bilgilerinin alındığı makalede katı kütle yoğunluğunun tanımı net olarak ifade edilmemiştir. Bunlara ek olarak bu çalışmada yapılan kabullenmeler de elde edilen sayısal sonuçları etkilemiştir.

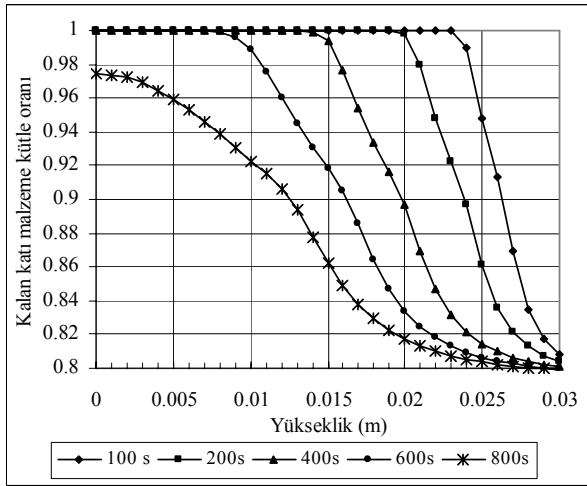
Aynı problemin çözümü ile bulunan, çeşitli zamanlarda konuma (korunan yapıdan mesafesine) göre sıcaklık profilleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. 100'er saniye aralıklarla yalıtılmış yüzeyden uzaklığa bağlı sıcaklık profilleri.

Şekilde görülen ilk aşamalarda yüzeye yakın kısımlardaki sıcaklık değişiminin fazla olması ve zaman ilerledikçe bu değişimin azalmasının sebebi, kömürleşmiş malzemeye kıyasla daha düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olan orijinal malzeme oranının ilk aşamalarda yüksek olması ve ısıya maruz kaldıkça termo-kimyasal reaksiyona girerek azalması, buna bağlı olarak da kömürleşmiş malzeme oranının artmasıdır.

Şekil 6’da belli zaman dilimlerinde, o anda var olan katı kütle miktarının ilk durumdaki katı kütle miktarına oranının ($M_k / M_{k,i}$) konuma göre değişimi verilmiştir. Katı malzeme, çözünme reaksiyonu tamamlandığında kütlelerinin %20’sini kaybetmektedir. Yani orijinal malzeme reaksiyona girdiğinde kütlelerinin yaklaşık %20’si gaza dönüşmektedir. Dış yüzeydeki ve yüzeye yakın bölgelerdeki çözüm noktalarında “kalan katı kütle oranı” 0.8’lere düşmüş ve bu noktalardaki sıcaklık değerleri 1200°C ’ye yaklaşmıştır. Zaman ilerledikçe iç bölgelerdeki çözüm noktalarında da sıcaklık artmakta ve çözünme reaksiyonu başlamaktadır. Bu yüzden de “kalan katı kütle oranı” zaman içinde azalmaktadır.



Şekil 6. 100'er saniye aralıklarla kalan katı kütle oranının konuma göre değişimi.

İki Boyutlu Kartezyen Geometrilere Isıl Aşınma Analizi

İki boyutlu ısıl aşınma probleminde eklenen ikinci boyuttan dolayı bilinmeyen sayısının artması sebebiyle enerji ve kütle korunumu denklemlerine ek olarak momentum korunumu denklemi de çözülmüştür. Momentum denklemi yazılırken tüm çözüm alanında basıncın sabit kaldığı dolayısıyla basınç gradyantının sıfır olduğu kabul edilmiştir.

$$\frac{\partial \Omega_x}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Omega_x}{\tilde{\rho}_g R_g} \Omega_x \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\Omega_x}{\tilde{\rho}_g R_g} \Omega_y \right) \quad (8)$$

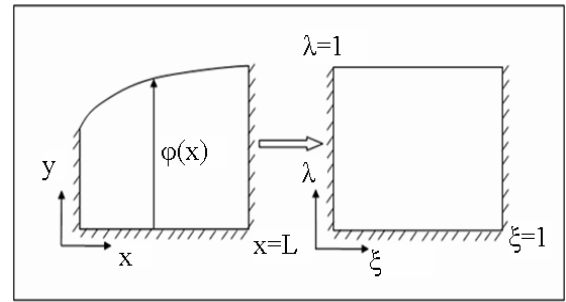
Çözüm algoritması, bir boyutlu problemin çözümüne ek olarak momentum denklemi çözülürken program kütle

akısı için bir yakınsama kontrolü yapmaktadır. Bu da çözüm süresini artırmaktadır.

İki boyutlu çözümün doğruluğunu kontrol etmek için çözüm alanı iki boyutlu tutulmuş ama problem tek boyuta indirgenerek bir boyutlu çözüm ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların birebir örtüştüğü görülmüştür.

Değişken kalınlıktaki geometrilerin analiz edilebilmesi amacıyla formülasyon Eşitlik.9a,b’de tanımlanan parametreler kullanılarak Şekil 7’de gösterildiği gibi boyutsuz kare çözüm alanına dönüştürülmüştür.

$$\xi = \frac{x}{L} \quad \lambda = \frac{y}{\varphi(x)} \quad (9a,b)$$



Şekil 7. Koordinat transformasyonunun şematik gösterimi

Tüm eşitlikler, sınır ve başlangıç koşulları, ξ ve λ kullanılarak boyutsuz hale getirilmiştir.

H41N malzemesinin özellikleri kullanılarak dış profili Eşitlik.10’da verilen parabolik bir yüzeye sahip iki boyutlu bir yapının ısıl aşınma analizi yapılmıştır.

$$y(x) = 0.17\sqrt{x+0.03} \quad (10)$$

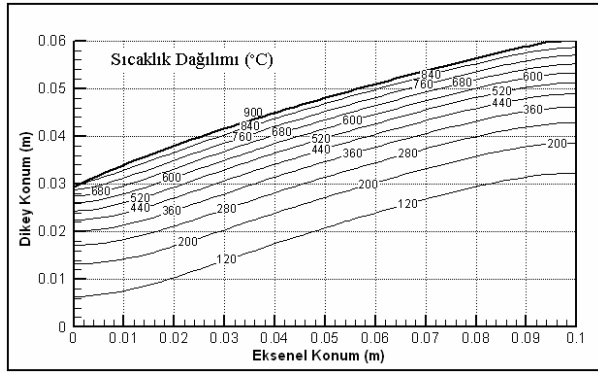
Elde edilen sıcaklık dağılımı, orijinal malzeme dağılımı ve “kalan katı kütle oranı” dağılımı sırasıyla Şekil 8 a,b,c’de verilmiştir.

Silindirik Geometride Isıl Aşınma Analizi

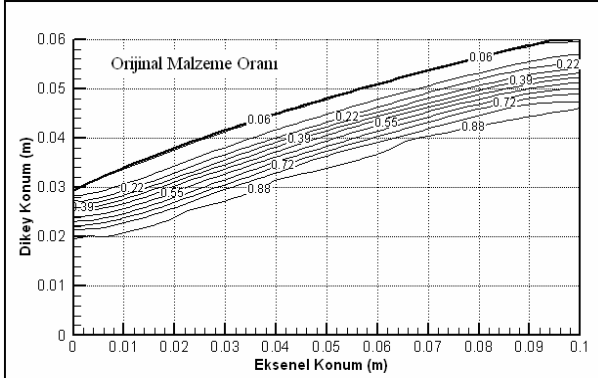
Silindirik geometride eksen boyunca çapın değiştiği eksenel simetrik bir yapının ısıl aşınma analizi yapılmıştır. Kütle, momentum ve enerji denklemleri eksenel simetrik yapılar için tekrar çıkartılmış ve kartezyen geometrilere uygulanan dönüşüm kullanılarak çözüm alanı boyutsuz kare çözüm alanına dönüştürülmüştür.

H41N malzemesinin özellikleri kullanılarak dış profili Eşitlik.11’da verilen parabolik bir yüzeye sahip iki boyutlu bir yapının ısıl aşınma analizi yapılmıştır.

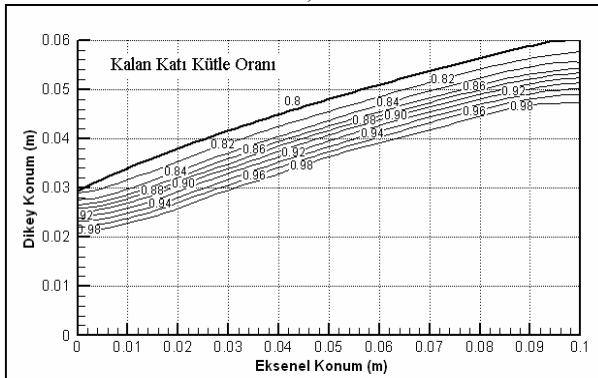
$$r(z) = 0.18\sqrt{z+0.0125} \quad (11)$$



a)



b)



c)

Şekil 8. Parabolik dış profile sahip kartezyen geometrinin 65x21'lik çözüm ağı kullanılarak, 0.1 sn zaman aralığıyla yapılan analizin 400. sn sonuçları, a) Sıcaklık dağılımı, b) Orijinal malzeme dağılımı, c) Kalan katı kütle oranı dağılımı.

Elde edilen sıcaklık dağılımı, orijinal malzeme dağılımı ve kütle oranı dağılımı Şekil 9.a,b,c'de verilmiştir

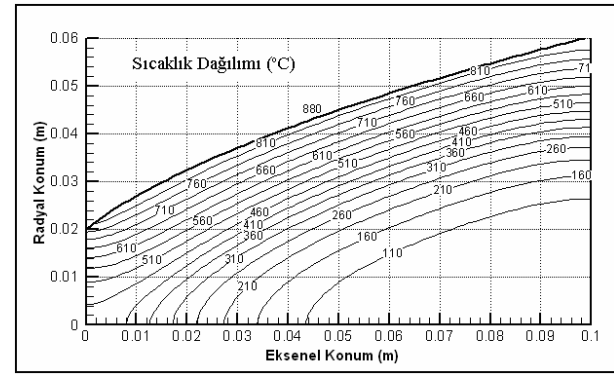
SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada bir boyutlu geometrilerden başlanarak eksenel simetrik silindirik geometrilere kadar ilerleyen adımlarla ısıl aşınma analizi yapılmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada tüm çözüm alanı ayrışma yüzeyini takip etmeden bir bütün olarak çözülmüştür. Geliştirilen yöntem iki boyutlu değişken dış profile sahip kartezyen ve silindirik geometrileri de analiz edebilmektedir.

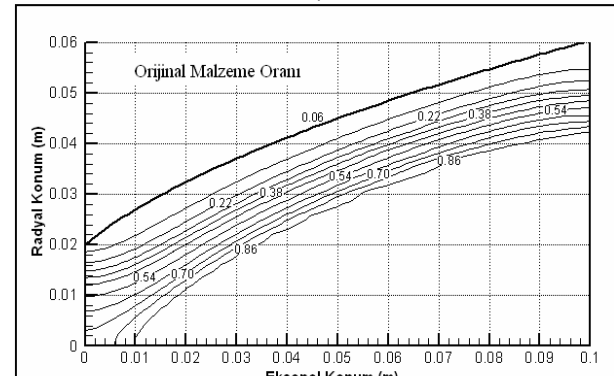
Çalışmadaki temel varsayımlar çözüm alanı içerisinde basınç dağılımının sabit olduğunun, gaz ve katı fazın ısıl dengede olduğunun kabul edilmesi, kömürleşmiş ve

gaz malzemenin yüksek sıcaklıkta ayrışmasının yok sayılması, orijinal malzemenin ayrışmasının derecesi n olan Arrhenius denklemiyle modellenmesidir.

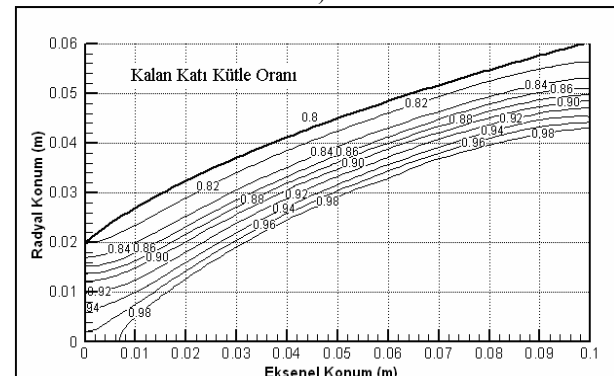
Yapılan çalışmayı doğrulamak için bir boyutlu geometride literatürden alınan test değerleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlardan görüldüğü gibi bazı aşamalarda fark artsa da hesaplanan sıcaklık seviyeleri ile test verilerinin birbirine yakın olduğu değerlendirilmiştir. Erişilebilir kaynaklarda konunun uygulama alanlarındaki gizlilik nedeniyle tam olarak tanımlanmış malzeme bilgisi ve test sonuçları oldukça azdır. Bu nedenle malzeme bilgisindeki ve tanımlanmasındaki bilinmezlik analiz sonuçlarını etkilemekte ve doğrulamadaki farkı artırmaktadır.



a)



b)



c)

Şekil 9. Parabolik dış profile sahip kartezyen geometrinin 81x21'lik çözüm ağı kullanılarak, 0.1 sn zaman aralığıyla yapılan analizin 400. sn sonuçları, a) Sıcaklık dağılımı, b) Orijinal malzeme dağılımı, c) Kalan katı kütle oranı dağılımı.

Yapılan örnek çözümlerinde iç yüzeyin sıcaklığının dış yüzey profilinden çok etkilendiği ve küçük değişikliklerin bile iç yüzey sıcaklığında büyük farklılıklar oluşturduğu görülmüştür. Bu nedenle ısı aşınan malzemeyle yalıtım sağlanan yapılarda, yalıtım profili ve kalınlığı büyük önem taşımaktadır.

Geliştirilen yöntem dış balistik uygulamalarında kullanılacak ısı aşınabilen yalıtım malzemelerin analizinde kullanılabilecektir. Eksenel simetrik termal sınır koşulları bu sistemler için kabul edilebilir bir varsayımdır. Bununla birlikte geliştirilen bilgisayar programının modüler yapıda olması nedeniyle yapılan varsayımların çözüme kolaylıkla dahil edilebilecektir.

İleri çalışmalarda gaz fazı ile katı fazı arasında termal dengenin olmadığı durum ve gaz basıncının çözüm alanında değişken olduğu durum çözüm yöntemine dahil edilerek daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilecektir. Yapı içerisinde basınç dağılımının olması yüksek hızlarda daha önemlidir, çünkü burun kısmında yüksek basınç gradyanı oluşmaktadır. Bununla birlikte yüzeyden mekanik ve ısı gerilmeler dolayısıyla katı malzemenin yapıdan ayrılması, kopması çözüme dahil edilebilir. Yüzeydeki akış, aşınma nedeniyle şekilsel değişiklikler ve ısınma problemi birlikte çözülebilir.

KAYNAKÇA

ASTM E 349, Standard Terminology Relating to Space Simulation, 1992.

Aykan, F. S., Numerical Analysis of Ablation Process on a Two Dimensional External Surface, *METU Master Thesis*, September 2005.

Florio, J. Jr., Henderson, J. B., Test, F. L., Hariharan, R., A Study of the Effects of the Assumption of Local-Thermal Equilibrium on the Overall Thermally-Induced Response of a Decomposing, Glass-Filled Polymer Composite, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, Vol.34, pp.135-147.

Hogan, R.B., Blackwell, B.F., Cochran, R.J. "Application of Moving Grid Control Volume Finite Element Method to Ablation Problems", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, April-June-1996, Vol. 10, No.2, pp.312-319.

Ramamurthy, H., Test, F.L., Florio, J. Jr., Henderson, J. B., Internal Pressure and Temperature Distribution in Decomposing Polymer Composites, *Proc. Ninth Heat Transfer Conf.*, Jerusalem, Israel, August 1990.

Shih, Y.C., Cheung, F.B., Koo, J. H., Yang, B.C., Numerical Study of Transient Thermal ablation of High-Temperature Insulation Materials, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2003, Vol.17, No.1, pp.53-61.

Shih, Y.C., Cheung, F.B., "Numerical Study of the Thermal Response of High- Temperature Ablative Materials", *Numerical Heat Transfer, Part A*, 1997, Vol.32, No.6, pp.555-574.



Fatma Serap AYKAN, 1980 Mersin-Erdemli'de doğdu. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 2002 yılında Lisans, 2005 yılında Yüksek Lisans derecelerini aldı. 2002-2007 yılları arasından ROKETSAN A.Ş'de Yapısal Termal Tasarım Mühendisi olarak çalıştı. Halen FNSS Savunma Sistemleri A.Ş'de Analiz ve Test Mühendisi olarak çalışmakta ve ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümünde Doktora programına devam etmektedir.



Zafer DURSUNKAYA, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1981 yılında Lisans; Illinois Institute of Technology Makina Mühendisliğinde 1984 yılında Yüksek Lisans ve 1988 yılında Doktora derecelerini aldı. 1989-1994 yılları arasında Ricardo'da kıdemli mühendis olarak çalıştı. 1994'den beri ODTÜ Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.